

## INDICE AVERMA 2019

### 1. ARQUITECTURA Y HÁBITAT CONSTRUIDO

SIMULACIÓN SOLAR, LUMÍNICA Y TÉRMICA DEL PROYECTO DE UN PABELLÓN UNIVERSITARIO EN VILLA MARIA, CÓRDOBA. Avalos, S., Sanchez, G., Calvo, L., Gatani, M.	13
ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA DOBLE FACHADA VERDE PARA EL CLIMA DE LA CIUDAD DE SALTA C. B. López Ruiz, S. Flores Larsen, D. Hoyos	25
EVALUACION TÉRMICA Y ECONOMICA DE SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS PARA LA ENVOLVENTE DE EDIFICIOS ESCOLARES EN SAN MIGUEL DE TUCUMAN S. L. Ledesma, V. Nota, M. Mostajo, C. Llabra, C. Villa	33
DETERMINACIÓN IN SITU DE LA RESISTENCIA TÉRMICA DE MUROS EN EDIFICIOS HISTÓRICOS: MÉTODOS ESTACIONARIO Y DINÁMICOS M. Hongn, M. Valdéz, S. Flores Larsen, C. Gea Salim, S. González	45
CONFORT TÉRMICO EN AULAS ESCOLARES DEL TRÓPICO, A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE DISEÑO BIOCLIMÁTICAS PASIVAS Montoya O, Viegas G.	55
EVALUACION DE PROPUESTAS DE DISEÑO PARA LA OPTIMIZACION DEL DESEMPEÑO LUMINICO EN AULAS DEL TROPICO, BASADAS EN METRICAS DINAMICAS Montoya O., San Juan G., Saavedra L.	67
CALIDAD DEL AGUA UTILIZADA PARA CONSUMO HUMANO EN EL SALAR DE PIPANACO. CATAMARCA M. Saracho L Segura, P. Lobo, N. Aguero	79
REVISION DE LOS RANGOS DE CONFORT INVERNAL DE VIVIENDAS EN CORDOBA COMO CONDICION PARA EL ACONDICIONAMIENTO NATURAL G. Arrieta, A. Maristany	103
EVALUACIÓN TÉRMICA Y DE CONFORT EN SALAS DEL CABILDO DE SALTA EN INVIERNO C. Gea Salim, M. Hongn, S. González, S. Flores Larsen	115
SIMULACION POR EQUEST DE UNA CELDA DE ENSAYO AL EXTERIOR PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE COMPONENTES DE EDIFICIOS M. E. Soldatti, N. S. Odobez, C. Godoy	125

## **2. ENERGÍA SOLAR: APLICACIONES TÉRMICAS, AGRÍCOLAS, QUÍMICAS E INDUSTRIALES**

ENTALPÍA ISOSTÉRICA DE ADSORCIÓN DE METANOL EN CARBONES ACTIVADOS CON ALTO GRADO DE MICROPOROSIDAD  
A. Sartarelli, E. Cyrules 01

UTILIZACIÓN DE BOTELLAS DE PET Y CAPTADORES FLOTANTES PARA EL CALENTAMIENTO DE ESTANQUES  
M. Y. Gutierrez S., G. R. Figueredo, R. A. Spotorno, J. J. Pochettino, H. D. Zurlo 13

ENSAYO TÉRMICO NORMALIZADO DE UN COLECTOR SOLAR CON ACUMULACIÓN INTEGRADA PARCIALMENTE AISLADO, HECHO CON MATERIALES ACCESIBLES Y DE FABRICACIÓN SIMPLE  
J. H. Garnica, J. M. Lucchini, J. R. Barral, M. E. Buosi, P. D. Galimberti 25

SECADO DE ZANAHORIA EN UN SECADERO SOLAR COMPACTO  
García V., Bistoni S., Iriarte A., Rugani A. 37

CONSTRUCCIÓN Y ENSAYOS DE UN HELIÓSTATO DE FOCO LINEAL PARA UN HORNO SOLAR  
C. Placco, M. Gea, R. Casimiro, M. Hongn, C. Fernández, H. Suligoy, D. Lacuadra 45

## **3. ENERGÍA SOLAR: CONVERSIÓN FOTOVOLTAICA**

CARACTERIZACIÓN DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS BASADO EN UN CONVERTIDOR SEPIC  
M. Alvarez, M. Maldonado, S. Lovera, F. Magnago 01

CARACTERIZACION DE UNA PERGOLA SOLAR FOTOVOLTAICA INSTALADA EN LA CIUDAD DE CORRIENTES  
A.R. González Mayans, M. Cáceres, A. Firman, L. H. Vera, C. Cadena 13

PREVISÃO DA TEMPERATURA E DO DESEMPENHO DO GERADOR FOTOVOLTAICO FLUTUANTE A PARTIR DE SUAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS MEDIDAS EM REAIS CONDIÇÕES AMBIENTAIS  
O. de C. Vilela, T. S. Bacelar, N. Fraidenraich, E. Moura de S. Barbosa 21

CÁLCULO DE LA RELACIÓN DE RENDIMIENTO DE UNA PLANTA FOTOVOLTAICA MEDIANTE DISTINTAS METODOLOGÍAS. CASO DE ESTUDIO EN LA CIUDAD DE MAR DEL PLATA  
S.A. González, G.J. Murcia, E. Garin, J.C. Branda, A. Lanson, R. Aristegui 29

MODELADO DE LA EFICIENCIA DE INVERSORES PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A LA RED  
R. F. Farfán, C. W. M. Prieb, A. Krenzinger, C. A. Cadena 43

DISEÑO Y DESARROLLO DE UN EMULADOR SOLAR BASADO EN CELDAS SOLARES DE LABORATORIO M. Troviano	51
<b>4. EÓLICA, GEOTÉRMICA, MAREOMOTRIZ, HIDRÁULICA, BIOMASA Y BIOGÁS</b>	
METODOLOGÍA PARA OBTENCIÓN DE MÓDULOS DE POTENCIA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA GESTIONABLE EN REDES DE MEDIA TENSIÓN U. Manassero, F. Missio, G. Lorenzón, S. Tkaczyk	01
ESTUDIO DE INSERCIÓN DE PARQUES FOTOVOLTAICOS Y CENTRALES DE BIOMASA EN LA RED DE 132 KV DE ENTRE RÍOS U. Manassero, J. P. Fernández, I. Steinmann, M. Nicolau, R. Regalini	11
PÉRDIDAS E INCERTIDUMBRES EN LAS PROBABILIDADES DE EXCEDENCIA DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE PARQUES EÓLICOS. EJEMPLO DE UN CASO EN LA PATAGONIA F. Tilca; J.F. Mathisson Malvasio	21
<b>5. POLÍTICAS Y ECONOMÍA EN EL USO EFICIENTE Y RACIONAL DE LA ENERGÍA</b>	
CERTIFICACIÓN DE SUSTENTABILIDAD AMBIENTAL PARA EDIFICIOS ESCOLARES EN ETAPA DE USO. ANÁLISIS COMPARATIVO DE CUATRO MODELOS INTERNACIONALES M. G. Ré , M. C. Michaux	01
VALOR DEL SERVICIO: UNA ALTERNATIVA PARA LOS SISTEMAS DE COMERCIALIZACION DE ENERGIA EN GENERACIÓN DISTRIBUIDA C. Reineri, F. Romero, E. Florena, H. Rovere	13
TRANSICIÓN ENERGÉTICA Y CALIDAD TÉRMICA EN VIVIENDAS RURALES DEL NOROESTE DE PATAGONIA M. B. Cardoso, L. Zanovello	25
ANALISIS DE LA HUELLA DE CARBONO EN PLACA DE REVESTIMIENTO RESUELTAS CON SCRAP V. Saez, B. Garzon	37
GENERACIÓN Y ALMACENAMIENTO DISTRIBUIDOS DE ENERGÍA ELÉCTRICA COMO HERRAMIENTAS DE FLEXIBILIDAD PARA EL SISTEMA ENERGÉTICO DE LA PROVINCIA DE MENDOZA: ANÁLISIS BASADO EN EL MODELO LEAP A. O. Benito, A. P. Arena	47

POTENCIAL FOTOVOLTAICO GLOBAL DE LA PROVINCIA DE SALTA. UN INDICADOR MULTICRITERIO PARA LA DEFINICIÓN DE ÁREAS DE ACCION PRIORITARIA DEL SECTOR RESIDENCIAL I. Cruz, J. Sauad, R. Durán, M. Condorí	59
POBREZA ENERGÉTICA EN LA ARGENTINA URBANA. VALIDACIÓN DE UN INDICADOR BASADO EN LA LÍNEA DEL 10% DE LOS INGRESOS TOTALES FAMILIARES R. Durán, M. Condorí	69
<b>6. TECNOLOGÍAS ASOCIADAS A LAS ENERGÍAS RENOVABLES</b>	
REDUCCION DE EMISIONES EN LA INDUSTRIA DE LITIO EN LA PUNA ARGENTINA MEDIANTE TECNOLOGIAS SOLARES DE CONCENTRACION P. Dellicompagni, J. Franco, V. Flexer	01
ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE OMNIBUS ELECTRICO PARA LA UNIVERSIDAD DE VILLA MARIA Pierantonelli M., Quintilla T.	13
MODELADO NUMÉRICO DEL TIEMPO APLICADO A GENERACIÓN RENOVABLE: EVALUACIÓN DE CONFIGURACIONES EN EL MODELO WRF J. G. Cañellas, M. L. Mayol, E. Wolfram, F. Orte, A. C. Saulo, A. D. Otero	25
<b>7. RADIACIÓN SOLAR Y CLIMA</b>	
COMPARACIÓN DE VALORES DE IRRADIANCIA GLOBAL MEDIDA EN SITIOS DE ALTURA EN ARGENTINA CONTRA BASES DE DATOS SATELITALES. G. Salazar, C. Gueymard	01
ESTUDO COMPARATIVO DE MODELOS DE ESTIMATIVA DA RADIACÃO DIFUSA NO SERTÃO DA PARAÍBA, REGIÃO NORDESTE DO BRASIL D. Rodrigues, L. Petribú, J. Galdino, O. de C. Vilela	07
VARIABILIDAD DE CORTO PLAZO Y VALORES EXTREMOS DE LA IRRADIANCIA SOLAR EN LA PAMPA HÚMEDA ARGENTINA R. Aristegui, P. Iturbide, V. Stern, J. Lell, R. Righini	19
SOBRE LA COMPLETITUD DE LAS SERIES TEMPORALES DE RADIACIÓN SOLAR EN LA PAMPA HÚMEDA ARGENTINA R. Righini, S. Luza, D. Licata Caruso, R. Aristegui, V. Stern	31
<b>8. HÁBITAT, ENERGÍA</b>	



METODOLOGÍA PARA DETERMINAR EL POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES DE BASE SOLAR A ESCALA URBANA. CASO DE ESTUDIO: BARRIO DE FLORES – CABA A. Figueira, A. Maggi, S. Miguel, E. Fernandez, D. Grosso, L. Santamaria	01
RED INTERNACIONAL EN BIOMASA Y BIOENERGIA: RESULTADOS, APRENDIZAJES Y PROPUESTA DE EVALUACION S. M. Manrique, V. Javi, F. Villafañe, C. Binda, A. Salvo, S. Ontiveros, B. Balderrama, R. Caso, M. Honorato	11
EVALUACION DE LA DEMANDA DE ENERGÍA TÉRMICA DE USUARIOS RESIDENCIALES EN EL PEÑÓN – CATAMARCA, PARA TRANSFERENCIA DE CALENTADORES SOLARES DE AGUA C. Ramos Caro, Y. Perdiguero Samaja, A. Iriarte, A. Arrieta	25
EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE GESTIÓN DE ACTIVOS APLICADOS A LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS FLOTANTES C. U. M. Carmona, T. S. Bacelar, E. M. Barbosa, O. C. Vilela	35

## **SIMULACIÓN SOLAR, LUMÍNICA Y TÉRMICA DEL PROYECTO DE UN PABELLÓN UNIVERSITARIO EN VILLA MARIA, CÓRDOBA.**

**Avalos, S.1, Sanchez, G1., Calvo, L2., Gatani, M.3**

FAUD, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Universidad Nacional de Córdoba,

Av. Vélez Sarsfield 264, Córdoba, Tel.: 54-351-4332096.

CIT VM CONICET. Arturo Jauretche 1555, Villa María, Córdoba +54 353 453-9103

www.unvm.edu.ar

e-mail: at.arqavalos@gmail.com - gabysan7@hotmail.com

*Recibido 15/08/19, aceptado 22/10/19*

### **RESUMEN**

Se presenta la evaluación de soleamiento, y análisis lumínico y térmico del proyecto de un edificio académico-institucional de la Universidad Nacional de Villa María (UNVM) proyectado a partir de una estructura existente de H°A premoldeado. En el pliego de especificaciones técnicas se indican requerimientos de confort lumínico (iguales o superiores a 500 lux) y confort térmico (25°C durante todo el año). El objetivo es evaluar si los requerimientos establecidos en el pliego pueden ser alcanzados por el edificio. Se simuló el soleamiento, radiación solar incidente sobre las superficies de las envolventes, penetración solar por aberturas y análisis de iluminación natural de espacios interiores. Luego se realizó un análisis de cargas térmicas de calefacción y refrigeración para determinar la cantidad de energía que se debe suministrar al edificio para mantener las condiciones interiores de temperatura. Los resultados demostraron que se necesita mejorar el proyecto para cumplir con los requerimientos establecidos. Las aberturas requieren un diseño de protecciones adecuadas para evitar la penetración solar en épocas indeseadas, los niveles de iluminación natural alcanzan valores por debajo de los requeridos (200 lux < 500 lux), mientras que la temperatura interior de 25° deseada de verano exige suministro de energía.

**Palabras clave:** Simulación, incidencia solar, análisis lumínico, análisis térmico.

### **INTRODUCCION**

A nivel mundial, el alarmante deterioro ambiental, el crecimiento de la población, el cambio climático y sus graves consecuencias para el planeta, la crisis energética y los aumentos de emisiones de gases efecto invernadero requieren de forma inminente la adopción de medidas que mitiguen la situación. Desde cada área de trabajo e investigación es necesario el compromiso con la problemática ambiental y el planteo de líneas consecuentes con los tratados y acuerdos mundiales. En un escenario marcado por la dependencia energética, la seguridad y sostenibilidad del suministro, el ahorro y la eficiencia energética se convierten en una premisa para el diseño al igual que el uso de otros recursos y tecnologías que hagan que las construcciones sean más amigables con el medio ambiente (Ferrari, C., & Frezzi, P., 2013).

En este contexto, existe cierto consenso acerca de que las medidas tendientes a disminuir emisiones por el consumo de energías con combustibles fósiles y a incorporar pautas de eficiencia energética en las edificaciones deben ser tomadas en cuenta a nivel político e institucional. En este sentido, es prioridad tomar la iniciativa en el cumplimiento de las normas y en la toma de conciencia sobre formas de generar, distribuir y consumir energía.

<sup>1</sup> Profesora asistente Instalaciones IB-FAUD UNC.

<sup>2</sup> Becaria doctoral CONICET.

<sup>3</sup> Investigadora independiente CONICET, Docente FAUD, UNC

En esta dirección, una contribución ambiental podría ser alcanzada con la inclusión de requerimientos de eficiencia energética en los llamados a licitación de edificios institucionales, y el cumplimiento de esos requerimientos en los proyectos elaborados. El pliego de especificaciones técnicas del caso de estudio elegido solicita condiciones interiores referidas a temperatura y humedad: 25°C para áreas comunes, 20°C para áreas especiales y 50% de humedad en todo el edificio. Aunque la variable de HR no se tendrá en cuenta para este análisis. A su vez, especifica condiciones requeridas de niveles de iluminación iguales o superiores a los 500 lux de iluminación general, y 200 lux en pasillos y baños.

El objetivo del presente artículo es evaluar si los requerimientos establecidos en el pliego pueden ser alcanzados por el edificio proyectado, o si es necesario el planteo de ajustes de proyecto. Los edificios institucionales tienen un uso intensivo, con un amplio rango horario de ocupación diaria, por lo que el cumplimiento de pautas de ahorro de energía se presenta como una alternativa necesaria para la gestión de los recursos de manera eficiente.

## **METODOLOGÍA**

La metodología de trabajo consiste en el análisis tecnológico del edificio de la UNVM y la caracterización correspondiente según Norma IRAM 11.603 y norma IRAM 11.601 (2002), evaluación de soleamiento y simulación térmica.

Se caracterizó el sistema constructivo propuesto para el proyecto del edificio CIT campus VM, de 110.00 m<sup>2</sup> de superficie aproximada, teniendo en cuenta información suministrada por el Pliego de Especificaciones Técnicas Particulares “Talleres de Investigación – 1° Etapa”. Se describió la composición de las envolventes verticales y horizontales, y se calculó el índice de transmitancia térmica, y el riesgo de condensación superficial e intersticial, comparándolos con valores admisibles según norma IRAM 11.603 para Córdoba, para verano e invierno. Los datos de Densidad (Kg/m<sup>3</sup>) y Conductividad (W/m.C°) fueron extraídos de la norma IRAM 11.601.- La planilla de cálculo ha sido desarrollada por Maristany (2006).

La evaluación de soleamiento fue realizada a través de simulación de la trayectoria solar anual y diaria sobre el edificio utilizando el software Ecotect Analysis 2011.

El archivo climático utilizado para la simulación es extensión epw obtenido del software Meteonorm, exportado a extensión. wea.

Ecotect permitió simular la trayectoria solar para todos los días del año, visualizar las sombras arrojadas y extraer gráficos de máscaras de sombra para cada una de las aberturas del edificio. donde se visualizan porcentajes de sombra y radiación solar de cada una, ángulos de altura solar y azimut. Se estudió la radiación solar incidente en Wh/m<sup>2</sup> sobre cada envolvente para el solsticio de invierno y verano.

Se realizó además un análisis de Radiación total (Wh) incidente en el interior (radiación directa y difusa), sobre una malla a 0,10 m sobre nivel de piso. Para el solsticio de invierno, se consideró el día 21/6, de 8:00 a 18:00 hs, mientras que para el solsticio de verano se consideró el día 22/12, de 8:00 a 18:00 hs.

Para el análisis lumínico, se determinó el Factor de luz día (Daylight Factor) DLD (%) tomando un rango de 0 a 5%-sobre una grilla de análisis-posicionada a la altura del plano de trabajo 0.80 m sobre nivel de piso interior. Los cálculos son basados en el método BRE Split Flux que utiliza factores de luz natural basados en el valor de iluminancia del cielo para determinar probables niveles de luz natural en el modelo simulado

Con el software RADIANCE (herramienta de simulación de iluminación precisa basada en la radiosidad) se simularon niveles de iluminación natural (Lux) de los espacios interiores. El análisis fue realizado para el día 21 de junio a las 10:00 hs. y a las 15:00 hs. El enfoque visual seleccionado es la esquina del recinto de los talleres de trabajo más alejada de las ventanas.

La simulación térmica fue calculada por Thermal Analysis del software Ecotect para determinar la demanda energética (kWh) de refrigeración y calefacción de los espacios interiores del edificio destinados a talleres de trabajo y administración. Según el pliego, se prevee alcanzar una temperatura interior uniforme de 25°C para invierno y verano. Para la evaluación se consideró un rango de temperaturas de confort interior de diseño entre 18°C y 26 °C, de acuerdo a norma IRAM 11.604 (2001). Los locales de baños y depósito se consideraron como zonas no acondicionadas.

Se estimó una ocupación total de 6 personas trabajando en una jornada diaria de 08:00 a 18:00 hs durante los 5 días hábiles de la semana, con una actividad de trabajo sedentario (70 W de actividad metabólica). Por ser un edificio universitario, se adoptó el supuesto que durante el mes de enero no habrá ocupación, que se corresponde con el receso de verano. También se determinó el número de renovaciones de aire horarias (0,30 m<sup>3</sup>/h) y las condiciones de climatización HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) de mixed-mode system.

## CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LA CIUDAD DE VILLA MARÍA

Villa María es una ciudad del centro de la provincia de Córdoba, zona bioambiental IIIa: templada cálida. La temperatura media de invierno es de 10,8 °C y la de verano 24,8 °C. Los veranos son calurosos y húmedos, con temperaturas máximas medias que superan los 30°C y mínimas medias de 17°C (IRAM 11.603:1.996). Presenta inviernos secos y veranos lluviosos. Los promedios mensuales de lluvia de los meses calurosos son: Diciembre: 189,6 mm; Enero: 127,1 mm; Febrero: 131 mm y Marzo: 110,2 mm. El mes con menor precipitación es Julio con un promedio de 4,7 mm.

## DESCRIPCION CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio es el proyecto de un edificio institucional del campus de la Universidad Nacional de Villa María (UNVM), “Talleres de Investigación – 1° Etapa”.

El edificio es un prisma de base rectangular orientado 15° al Noreste, con el mayor eje en dirección NO-SE según se puede observar en la Fig. 1.



*Figura 1a y b: Estructura existente para la construcción del edificio de talleres de investigación UNVM.*

El proyecto fue elaborado a partir de una estructura de H° A° premoldeado existente. El conjunto está compuesto por una platea de hormigón armado in situ, columnas y vigas prefabricadas y paneles pretensados para techo (Fig. 1a y b).

De acuerdo al pliego de especificaciones técnicas que forma parte del llamado a licitación de la construcción, el total de la estructura alcanza una superficie de 240,60 m<sup>2</sup>, a completarse en dos etapas de obra. La primera etapa comprende el cerramiento de 111,00 m<sup>2</sup> de superficie, el completamiento de la cubierta de techo y la ejecución de todos los sistemas de instalaciones del edificio. El programa incluye área de administración-dirección, salón con planta libre para múltiples puestos de trabajo y áreas técnicas y de servicios (Fig. 2).

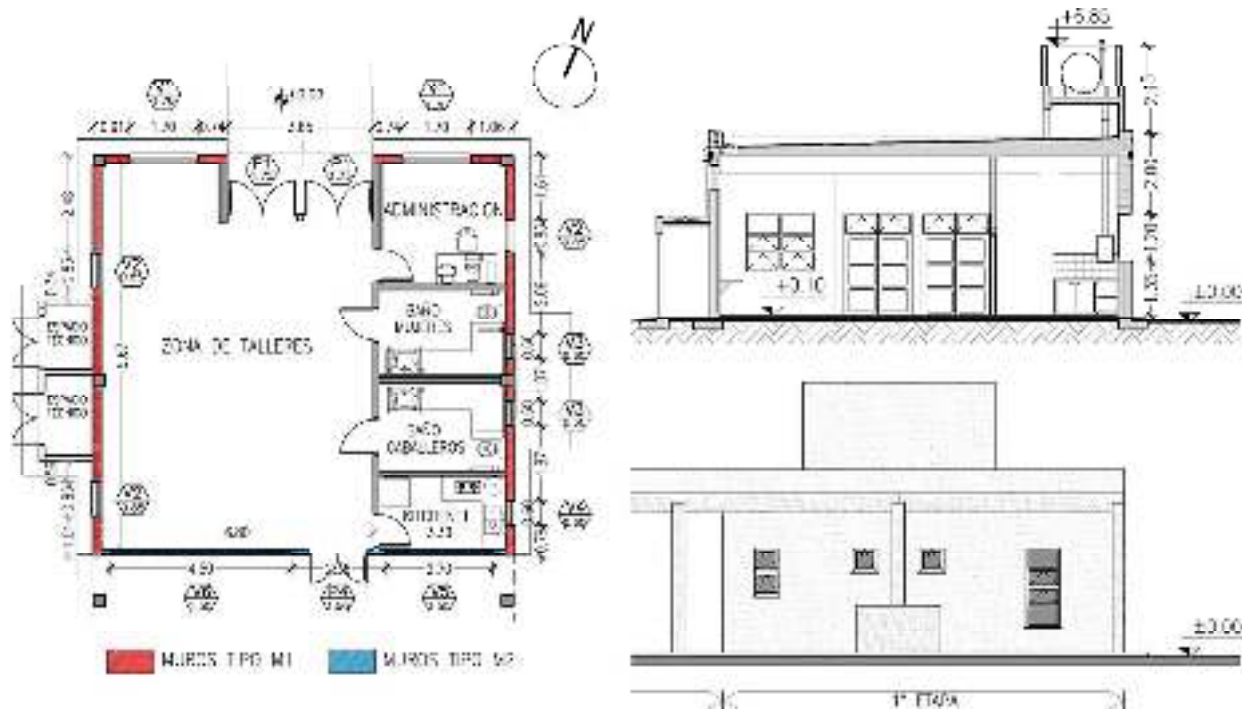


Fig. 2: Planta, corte y fachada del proyecto del edificio.

## CARACTERIZACIÓN DE ENVOLVENTES DE ACUERDO A NORMAS IRAM.

La composición de las envolventes y el valor de transmitancia térmica estimado se describen a continuación. El edificio tiene dos tipos de muros exteriores, M1 y M2. El muro tipo M1 se utiliza en las fachadas orientadas al noroeste, noreste y sudoeste, y está compuesto por bloques cerámicos de 18cm de espesor con revoque grueso y fino en ambas caras. El muro tipo M2 se utiliza en la fachada orientada al sudeste, y está compuesto por bloques cerámicos de 12cm de espesor con revoque grueso y fino en ambas caras. Su composición se describe en las tablas 1 y 2.

### MUROS

Tabla 1: Caracterización de Muro 1

Muro M1 Material	Espesor (m)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Conduct. (W/m.C°)
1- Revestimiento grueso fratazado y revoque fino	0,04	1.800	1,16
2- Aislación Hidrófuga + Pintura asfáltica	0,005	1.100	0,70
3- Ladrillo Cerám. Hueco Port. 18x18x33	0,18	1.800	0,62
4- Revoque grueso y fino al fieltro	0,04	1.900	0,93

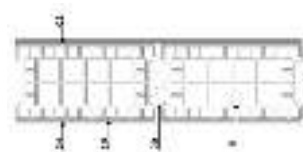


Fig. 3: Planta detalle M1.

El coeficiente de transmitancia térmica estimado para M1 es de 2,10 W/m<sup>2</sup>°C el cual no verifica nivel mínimo ni para invierno (1.85 W/m<sup>2</sup>°C) ni para verano (2,10 W/m<sup>2</sup>°C).

Tabla 2: Caracterización de Muro 2

Muro M2 Material	Espesor (m)	Densidad (Kg/m3)	Conduct. (W/m.C°)
1- Revoque grueso y fino al fieltro	0,04	1.900	0,93
2- Ladrillo Hueco 12x18x33	0,12	1.800	0,62
4- Revoque grueso y fino al fieltro	0,04	1.900	0,93

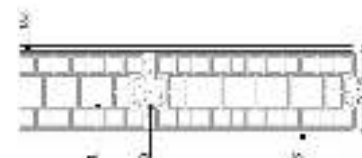


Fig. 4: Planta detalle M2.

El coeficiente de transmitancia térmica estimado es de 2,59 W/m<sup>2</sup>°C, el cual no verifica nivel mínimo ni para invierno (1,85 W/m<sup>2</sup>°C) ni para verano (2,10 W/m<sup>2</sup>°C).

## CUBIERTA

La composición de la cubierta T1 se describe en la tabla 3 y Fig. 3 según pliego de especificaciones técnicas, sobre los paneles premoldeados de H°A° se ejecuta una capa de compresión de H°A° de 5 cm. La barrera de vapor se compone de una película de 2 mm de pintura asfáltica base acuosa. El relleno para pendiente es un mortero alivianado con perlitas de poliestireno expandido de espesor mínimo 10cm, con una pendiente del 2 %. Sobre el mortero de pendiente se ejecuta una carpeta de nivelación de mortero con vermiculita, de 6 cm de espesor final, según pliego. La capa de terminación se constituye por una capa de tejuelas sobre mortero de asiento, terminada con pintura impermeable fibrada.

Tabla 3: Caracterización de cubierta T1

Cubierta T1 Material	Espesor (m)	Densidad (Kg/m3)	Conduct. (W/m.C°)
1- Panel de techo premoldeado	0,05	1.800	0,97
2- Capa de compresión de H° A°	0,05	2.400	1,63
3- Mortero pend. c/ poliest. expandido .	0,10	1.300	0,35
3- Mortero de vermiculita	0,06	600	0,16
4- Barrido cementicio	0,005	1.900	0,6
5- Tejuela sobre mortero de asiento	0,045	90	0,76
6- Pintura fibrada	0,007	90	0,039

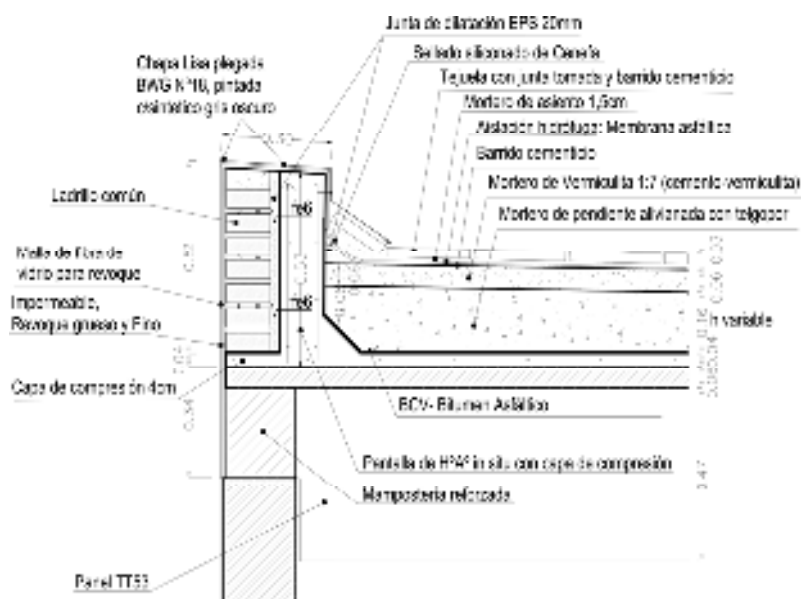


Fig. 5: Detalle de techo y cubierta.

El coeficiente de transmitancia térmica estimado es de  $0,93 \text{ W/m}^2\text{C}^\circ$ , el cual verifica nivel C para invierno ( $1,00 \text{ W/m}^2\text{C}$ ) pero no verifica para verano ( $0,76 \text{ W/m}^2\text{C}^\circ$ ).

## CARPINTERÍAS

La carpintería de los talleres es de aluminio prepintado color blanco con vidrio laminado transparente 4+4 mm. Las aberturas se componen de puertas con doble hoja de abrir, ventanas con abertura tipo batiente y paños fijos. Los valores de transmitancia térmica de aberturas fueron extraídos de la norma IRAM 11.601 (2002), que para vidrio laminado adopta un valor de  $5,30 \text{ W/m}^2\text{C}^\circ$ .

## ANÁLISIS DE SOLEAMIENTO Y RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE SOBRE EL EDIFICIO

La incidencia del soleamiento depende de la ubicación del edificio con respecto a la trayectoria solar. En la Fig. 6 (izquierda) se puede ver la implantación del edificio en relación al recorrido aparente del sol, comparada con la orientación recomendada por el software (derecha).

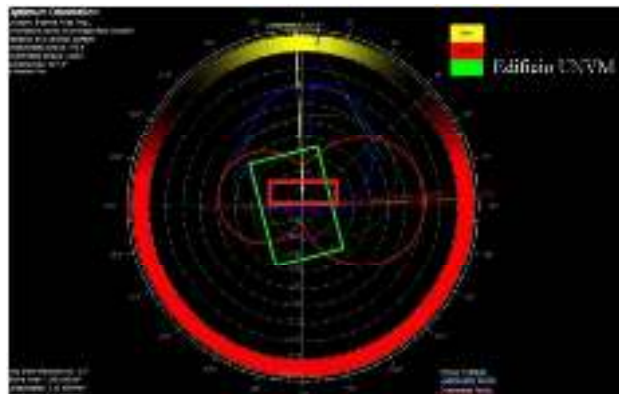
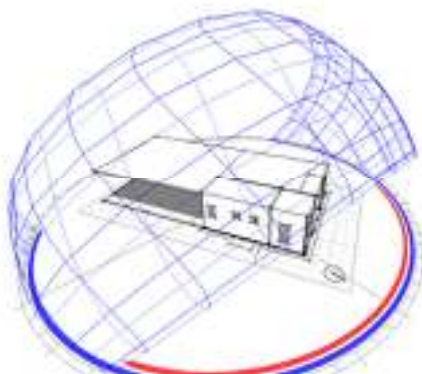


Fig. 6: Análisis de implantación con Ecotect A.

Se observa que el mayor desarrollo de fachada está dispuesto hacia las orientaciones suroeste y noreste. Las aberturas en estas fachadas son pequeñas (V3 de  $0,60 \times 0,60 \text{ m}$ ) y de proporciones rectangulares dispuestas de manera vertical (V2 de  $0,85 \times 1,95 \text{ m}$ ). Las aberturas propuestas para la fachada principal noroeste son más grandes (V1 de  $1,70 \times 1,45 \text{ m}$ ), y están centradas en la fachada. Además, las aberturas V5 ( $2,70 \times 1,50 \text{ m}$ ) y V6 ( $4,50 \times 1,50 \text{ m}$ ) resultan interesantes para favorecer la ventilación natural cruzada en estaciones intermedias y permitirán generar ventilación cruzada en el local principal y kitchenet, según se observa en gráfico de la Fig. 2.

El análisis de Radiación Solar Total Incidente por fachadas se presenta en la Fig. 7. Los mayores valores de radiación total en invierno se producen en la cubierta, que recibe un total de  $3,030 \text{ Wh/m}^2$ , y en la fachada NO (frente) cuyo valor es de  $3,624 \text{ Wh/m}^2$ .



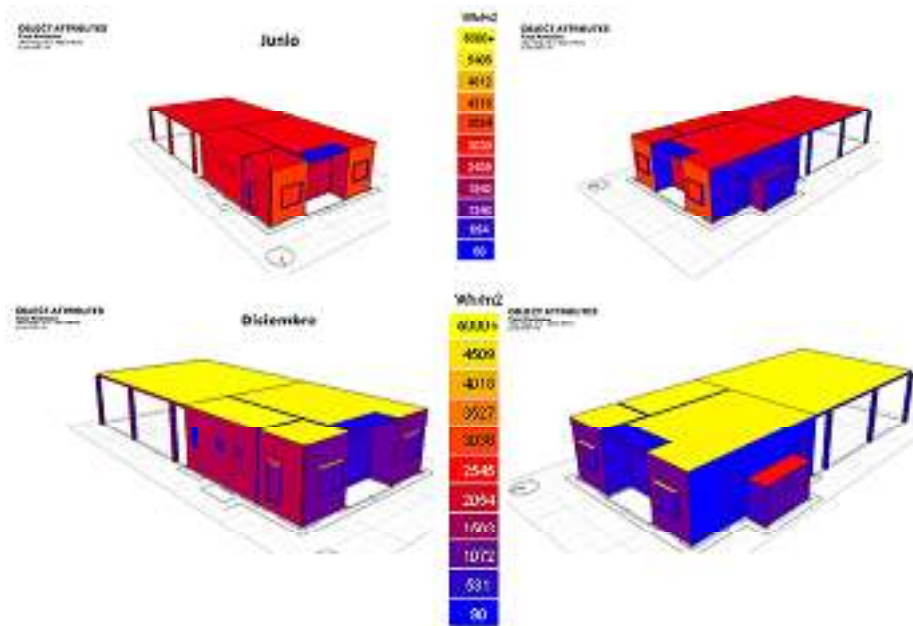


Fig. 7: Análisis de radiación total incidente y datos de radiación diaria obtenidos del archivo climático utilizado.

En verano estos valores ascienden en cubierta a más  $6.000 \text{ Wh/m}^2$  y descienden en fachada NO a  $1.072 \text{ Wh/m}^2$ . La situación más desfavorable ocurre en verano, debido a la ganancia excesiva a través de la cubierta por el gran aporte de calor. En invierno, la fachada NO vertical es la que mayor radiación recibe

### MÁSCARAS DE SOMBRA DE LAS ABERTURAS

Los gráficos de las Fig. 8 y 9 muestran la penetración solar de cada abertura del edificio. Las aberturas tipo V2 ( $0,85 \times 1,95\text{m}$ ) de los talleres se muestran en la fig. 8. Las aberturas V2 con orientación suroeste correspondiente a los talleres tienen penetración solar a partir de las 16:15 hs. hasta la puesta de sol durante todos los meses del año. La abertura V2 con orientación noreste de la administración presenta una obstrucción provocada por un volumen saliente correspondiente al espacio técnico que impide el ingreso de sol a la tarde durante los meses de invierno.

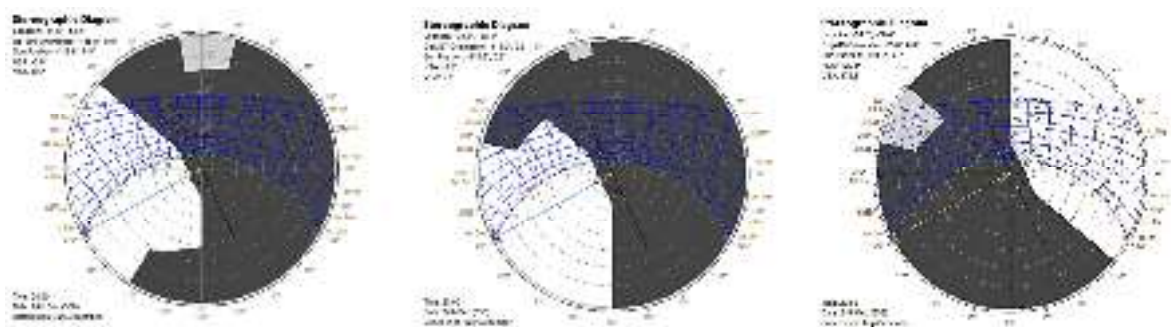


Fig. 8: Máscaras de sombras para ventanas tipo V2. Izq y centro: orientación suroeste; Der: Noreste. Análisis con Ecotect.



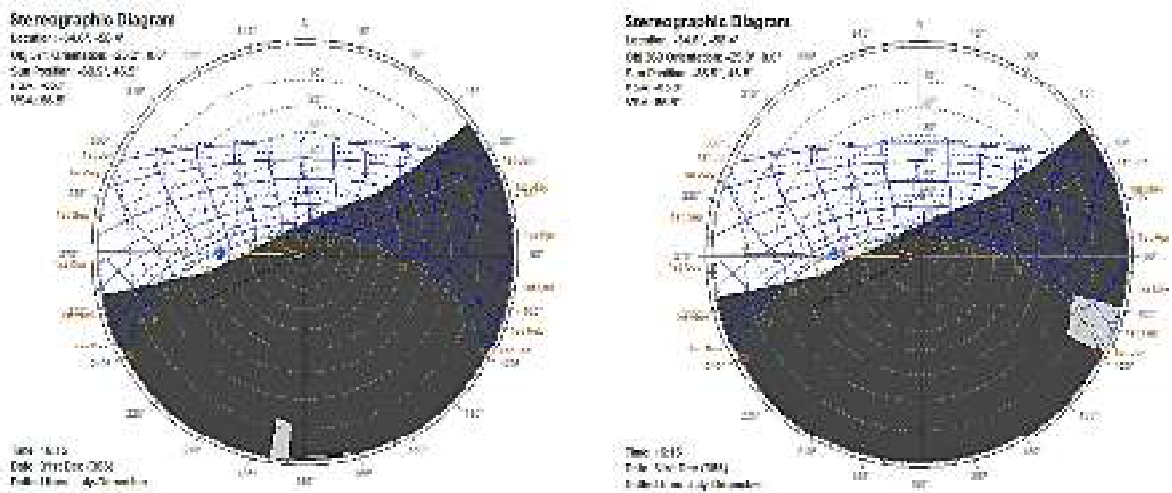


Fig. 9: Máscaras de sombras para abertura tipo V1 orientación noroeste y noreste. Análisis con Ecotect A.

La Fig. 9 muestra máscaras de sombra de ambas aberturas tipo V1 orientadas hacia el noreste. Se observa que tienen penetración solar durante la mayor parte del año. Durante los meses de invierno el sol ingresa a partir de las 7:00 hs en junio y julio, y 8:00hs en agosto. En los meses de verano el sol ingresa a partir de las 12:00 hs en noviembre, 13:00 hs en diciembre y 14:00 hs en enero. El grafico de la izquierda muestra la máscara de sombra de la ventana V2 del local de administración, ubicada al noreste. Se observa penetración solar en la mañana durante todos los meses del año.

Con respecto al análisis de radiación total incidente en el interior (radiación directa y difusa), los resultados de invierno muestran valores acumulativos predominantemente entre 180 Wh y 210 Wh en el interior de los locales analizados (Fig. 10). Para el solsticio de verano (Fig. 10b) los resultados muestran valores acumulativos predominantes más elevados, entre 540 Wh y 670 Wh.

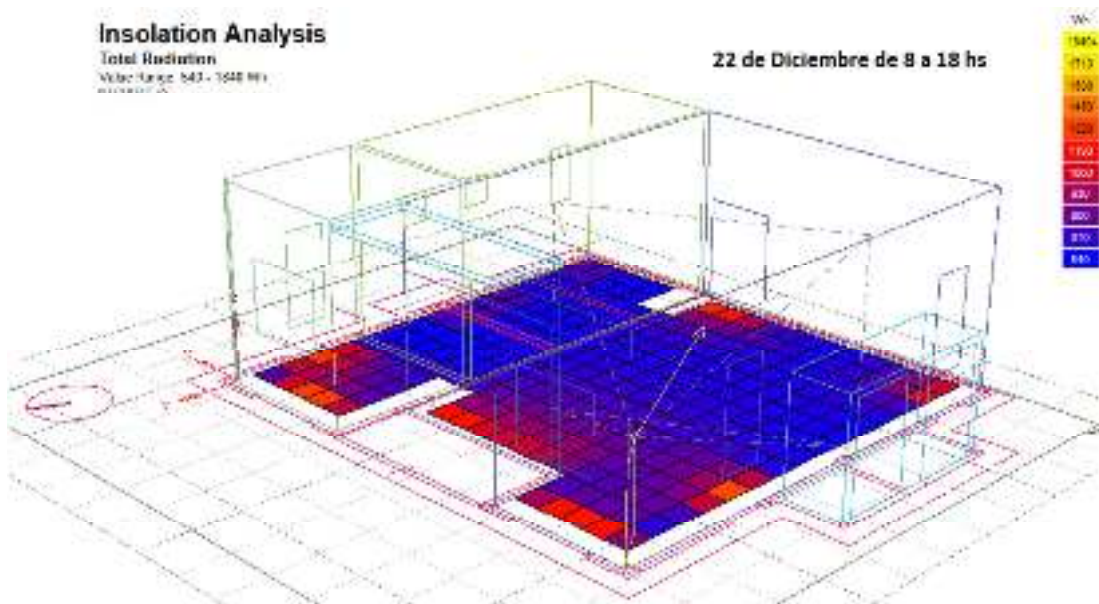


Fig. 10 a: Análisis de radiación total solar en espacios interiores para solsticio de invierno.

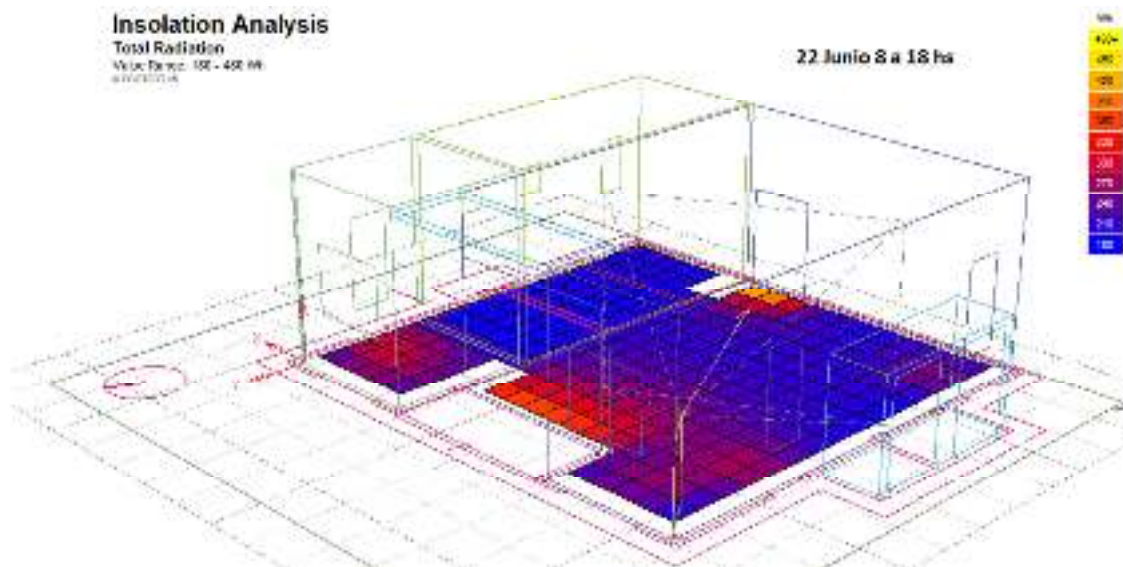


Fig. 10 b: Análisis radiación total solar en espacios interiores para solsticio de verano.

El gráfico de la Fig. 11 corresponde a los resultados del análisis de iluminación diurna, que muestra valores de Factor de luz día (Daylight Factor).

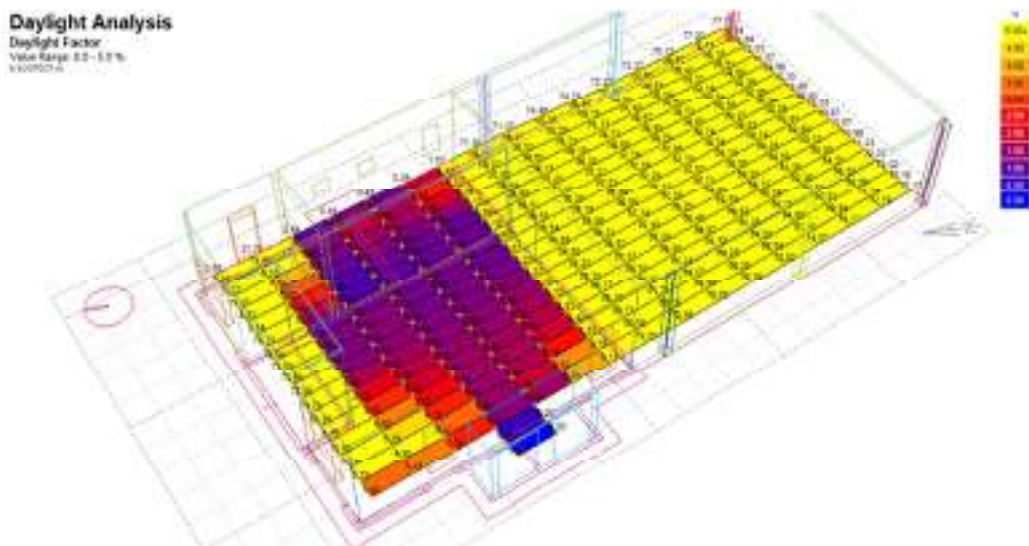


Fig. 11: Análisis de iluminación diurna. Factor de luz día (Daylight Factor) con software Ecotect.

Se puede observar que la distribución de la luz natural en el interior de los talleres de trabajo no es uniforme.

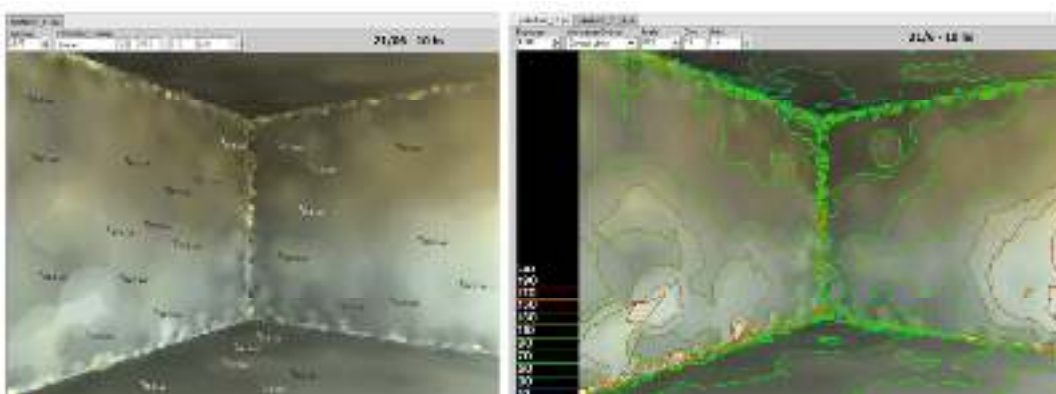
Los valores más elevados se presentan próximos a las ventanas ubicadas al norte (5%), valores que caen de manera abrupta hacia el centro de los talleres, disminuyendo entre el 0,5 y 1,5%.

### ANÁLISIS LUMÍNICO CON RADIANCE

El análisis lumínico con el software Radiance (Fig. 12a y 12b) arroja resultados de niveles de iluminación (Lux), mostrando en una imagen la cantidad de luz sobre cada superficie interior. Además, permite visualizar los cálculos con curvas Isolux, uniendo puntos que reciben la misma cantidad de iluminación.

Se obtuvieron valores de niveles de iluminación natural por debajo de lo requerido en el pliego (500 lux), en el horario matutino se observan valores entre 110 y 150 lux y en horario vespertino esos

valores ascienden a 250 y 300 lux. Para alcanzar el requerimiento deseado se considera necesario rediseñar las aberturas de la fachada sudoeste, modificando sus proporciones para lograr una mejor distribución, y diseñando elementos que incrementen la captación de iluminación natural difusa.



*Fig. 12 a: Análisis lumínico con Radiance.*



*Fig. 12 b: Análisis lumínico con Radiance.*

## **SIMULACIÓN TÉRMICA**

La demanda de refrigeración alcanza 24,16 kWh/m<sup>2</sup>/año superando ampliamente a la demanda de calefacción, que llega a 6,08 kWh/m<sup>2</sup>/año. La máxima demanda de calefacción se produce en el mes de julio (201,79 kWh) y la máxima demanda de refrigeración se produce en el mes de enero (651,36 kWh) pese a que no se considera la variable de cargas internas, ya que el edificio está en receso. Los resultados se resumen en la Fig. 13 y tabla 5.

Los resultados de la simulación térmica indican que es posible conseguir las condiciones de temperatura interior requerida en el pliego con una demanda elevada de refrigeración en verano. La demanda de refrigeración en el periodo cálido es un 31% mayor a la demanda en calefacción en el periodo frío. Con respecto a los valores totales en kWh, la carga de refrigeración indica una relación de 3,97 veces respecto a la carga de calefacción.

En concordancia con el estudio de asoleamiento y análisis de radiación solar incidente, se observa un aporte importante de calor en el periodo cálido a través de las aberturas V1 (equinoccios y solsticio de verano) que incrementa la carga de refrigeración de manera significativa. Sin embargo, la mayor cantidad de pérdidas y ganancias se generan a través de las envolventes verticales, ya que los muros y aberturas presentan valores de transmitancias térmicas (K) que no verifican nivel mínimo para invierno ni para verano.

Mes	Refrigeración Total	Calefacción Total
	kWh	kWh
Ene	651,36	1,30
Feb	567,97	0,77
Mar	294,62	0,30
Abr	60,94	4,78
Mayo	1,24	59,51
Jun	2,77	168,99
Jul	3,46	201,79
Ago	2,45	93,06
Sep	1,31	32,26
Oct	32,78	2,14
Nov	184,25	0,68
Dic	447,15	0,43
<b>TOTAL</b>	<b>2250,30</b>	<b>566,01</b>
<b>Total /m<sup>2</sup></b>	<b>24,16</b>	<b>6,08</b>

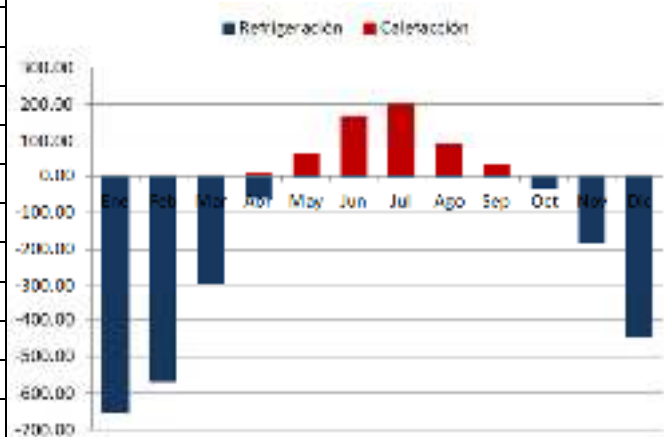


Fig. 12: Resumen de demanda mensual de refrigeración y calefacción.

## CONCLUSIONES

Como se desprende de los resultados presentados, se concluye que las estrategias de diseño utilizadas en el proyecto del edificio CIT CONICET “Talleres de Investigación – 1° Etapa” del campus de la Universidad Nacional de Villa María (UNVM) son adecuadas. Sin embargo, algunos recursos pueden ser optimizados para cumplir con los requerimientos solicitados en el pliego de licitación y alcanzar desempeño con mayor eficiencia.

Se recomienda modificar las proporciones y dimensiones de las aberturas, horizontales por verticales, para lograr penetración solar más uniforme dentro de los espacios de trabajo y favorecer la ventilación natural cruzada en estaciones intermedias (aprovechando las aberturas tipo V6 y V1). Además, se recomendarán protecciones adecuadas y elementos que tamicen el sol directo en el interior para evitar deslumbramientos.

Con respecto a la temperatura interior, se recomienda ajustar la temperatura propuesta en el pliego de 25°C, adoptando un rango de temperaturas adaptadas para invierno y verano.

Además, se sugerirá incorporar aislaciones en muros verticales, aberturas con DVH y protecciones solares en aberturas orientadas al noroeste, para reducir la carga de refrigeración. En relación a la cubierta, que tenderá a acumular mucho calor en verano por exceso de masa, se recomendará realizar una cubierta invertida.

## REFERENCIAS:

- Ferrari, C., & Frezzi, P. (2013). Modelo de crecimiento del sistema eléctrico de la Provincia de Córdoba. Período 2010-2040. En S. Devalis, *Matriz de recursos energéticos de la Provincia de Córdoba* (págs. 15-53). Córdoba, Argentina: Copiar editora.
- Gonzalo, G. (2003). *Manual de Arquitectura Bioclimática* (2da ed.). Tucumán.
- IRAM 11601. (2002). *Aislamiento térmico de edificios. Método de cálculo*. Buenos Aires: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- IRAM 11603. (1996). *Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación Bioambiental de la República Argentina*. Buenos Aires: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

IRAM 11604. (2001). *Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de Energía en Calefacción. Coeficiente volumétrico G de pérdidas de calor. Cálculo y valores límites, Segunda Edición.* Buenos Aires: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

IRAM 11605. (1996). *Aislamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios.* Buenos Aires: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

**Key words:** Simulation, solar incidence, lighting analysis, thermal analysis

## **ABSTRACT**

The case of study presented in this paper is the project of an institutional building sited in the National University of Villa María campus (UNVM). The project is part of an institutional program for UNVM infrastructure development. It involves the construction of a new building using an existing H°A° structure. Technical specifications included in the project brief indicates requirements for lighting comfort (equal to or greater than 500 lux) and thermal comfort (25 ° C in work areas). The main goal of this paper is to evaluate if the requirements can be achieved by the projected building, or if it will be necessary to adjust the proposal. In a first stage of analysis, solar radiation incident on the surfaces, solar penetration through openings and natural lighting analysis of interior spaces were performed using the Ecotect Analysis and Radiance software. In a second stage, thermal heating and cooling loads analysis was carried out by simulation with Ecotect Analysis software, in order to determine how much energy should be supplied to maintain the design internal temperature conditions. The results shows that the project needs to be optimized, in order to achieve the requirements established in the project brief. Natural lighting levels are below than what is required (200 lux <500 lux), while 25° internal temperature is achieved with high cooling demand.



## **ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA DOBLE FACHADA VERDE PARA EL CLIMA DE LA CIUDAD DE SALTA**

**Constanza Belén López Ruiz<sup>1</sup>, Silvana Flores Larsen<sup>2</sup>, Daniel Hoyos**

INENCO - Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Universidad Nacional de Salta (UNSa)

Tel. +54 387 4255424- Fax +54 387 4255489 e-mail: [conyblopezruiz@gmail.com](mailto:conyblopezruiz@gmail.com)

*Recibido 15/08/19, aceptado 21/10/19*

**RESUMEN:** La integración de vegetación en la envolvente edilicia permite reducir el consumo energético de refrigeración en verano y mejorar las condiciones de confort interior en edificios. Esto se debe a que, en verano, las plantas son energéticamente más eficientes que los elementos de sombreado tradicionales debido a que las hojas regulan su temperatura superficial a través de la evapotranspiración. En este marco, el objetivo del presente trabajo consiste en estudiar la eficiencia de una doble fachada vegetal aplicada a una vivienda social del IPV ubicada en la ciudad de Salta, la cual se simula para cuatro posibles orientaciones. Para ello, se utilizó el software SIMEDIF en su reciente versión 2.0, que incluye el modelo térmico de dobles fachadas vegetales. Se analizó la disminución de la temperatura interior y de la temperatura superficial de los muros, de acuerdo a sus orientaciones. Los resultados muestran que, en días calurosos en la ciudad de Salta, sería posible obtener disminuciones de entre 13°C y 20°C en la temperatura superficial de muros Este y Oeste y de entre 0.3°C y 1.5°C en los ambientes interiores. Se concluye que, para el clima de Salta, las dobles fachadas vegetales son una estrategia útil para disminuir las temperaturas interiores en verano y reducir el consumo energético destinado a refrigeración.

**Palabras clave:** doble fachada verde, simulación transitoria, enverdecimiento urbano

### **INTRODUCCIÓN**

En Argentina, entre el 35% y el 40% de la energía primaria está destinada al acondicionamiento de espacios interiores. El notorio incremento en las ventas de equipos de refrigeración sumado a condiciones climáticas adversas (excesivo calor en verano) viene provocando un paulatino incremento en el consumo eléctrico. Uno de los caminos efectivos para reducir el consumo energético de verano en las construcciones es la aplicación de estrategias bioclimáticas de diseño (orientación del edificio, aislación térmica, materiales utilizados, ganancia directa, etc.) y, en particular, la utilización de fachadas protegidas por material vegetal (Oropeza-Pérez y Østergaard, 2018). Estudios prometedores muestran que existen medidas para contrarrestar los efectos de las altas temperaturas urbanas tales como techos y materiales frescos o enverdecimiento urbano (Santamouris et al., 2018; Alchapar et al., 2016; Sosa et al., 2017). Esta estrategia tiene la ventaja de poder ser incluida no sólo durante la etapa de diseño del edificio, sino como mejora de un edificio preexistente (rehabilitación). En verano, las plantas se comportan mejor térmicamente que los elementos de sombreado tradicionales debido a que la temperatura superficial de las hojas es menor que la de un dispositivo de sombreado convencional. Esto se debe a que un buen porcentaje de la radiación solar absorbida por la planta (alrededor de un 60%, dependiendo del tipo de planta, nivel de humedad, época del año, etc.) es transformado en calor latente debido al proceso fisiológico de evapotranspiración, lo que ocasiona que la temperatura de las hojas no se eleve tanto como en el caso de los materiales convencionales de los dispositivos de sombreado, en los que toda la energía absorbida se transforma en calor sensible. Además, las plantas presentan otros efectos interesantes cuando se utilizan en edificios, que van desde lo ambiental

<sup>1</sup> Tesista de grado de Licenciatura en Energías Renovables, Fac. Cs Exactas, Universidad Nacional de Salta

<sup>2</sup> Directora de tesis

(disminución de CO<sub>2</sub>, influencia en el microclima, etc.) hasta lo estético y psicológico (disminución del estrés, atenuación del nivel sonoro exterior, acercamiento visual a elementos naturales).

El uso de plantas en la envolvente de edificios se extendió notablemente con el sistema de techos verdes, para el cual existe buena cantidad de estudios experimentales y de modelos físicos. En el caso de las fachadas verdes, la información es mucho más escasa y su aplicación en casos concretos mucho más reducida, por lo que se considera que está aún en una etapa de desarrollo e investigación. Podemos encontrar trabajos que contribuyen de forma significativa a la modelización térmica de las fachadas verdes, como el de Stec et al. (2005), quienes consideraron que el calor latente expulsado por la planta debe ser proporcional a la radiación absorbida y proponen un modelo basado en la analogía eléctrica-térmica. El modelo de red térmica también fue usado por Kontoleon y Eumorfopoulou (2010), quienes investigaron el comportamiento térmico de las zonas de construcción con fachadas verdes. El modelo matemático desarrollado por Scarpa et al. (2014) para dos tipos de paredes vivas mostró buenos resultados en cuanto a la temperatura en la superficie de la pared y los flujos de calor en verano e invierno. Por su parte, Susorova et al. (2013) desarrollaron un modelo matemático de una pared exterior con plantas trepadoras y lo verificaron experimentalmente en verano. Los autores consideraron el comportamiento variable de la resistencia estomática (resistencia al intercambio gaseoso y la transpiración) de la planta con la radiación solar, el cual es un parámetro crucial para determinar el nivel de transpiración de la planta. Recientemente, el software SIMEDIF V2.0 (SIMEDIF, 2019) ha incluido un módulo de cálculo de dobles fachadas verdes que utiliza un modelo físico que incorpora el impacto de la humedad relativa, radiación solar y temperatura del aire en el balance energético de la planta y de la envolvente edilicia.

En este marco, el objetivo del presente trabajo consiste en estudiar la eficiencia de una fachada vegetal aplicada a una vivienda social del IPV ubicada en la ciudad de Salta, para disminuir el consumo energético destinado a refrigeración y mejorar las condiciones térmicas de los ambientes interiores.

## **METODOLOGÍA**

Para la simulación se seleccionó una vivienda del IPV localizada en la ciudad de Salta (24° 03' latitud Sur, 65°44' longitud Oeste, 1187 msnm). Según la norma IRAM 11603 de acondicionamiento térmico de edificios, la ciudad de Salta pertenece a la región IIIa, zona templada cálida con amplitudes térmicas mayores de 14°C. Los datos climáticos horarios se obtuvieron del año típico meteorológico TMY para la ciudad de Salta, disponible en [climate.onebuilding.org](http://climate.onebuilding.org), el cual fue generado mediante la metodología de Bre y Facchinotti (2014) y se encuentra en formato EPW (EnergyPlus Weather) compatible con SIMEDIF. Según las estadísticas, el mes de noviembre es el más caluroso del año, por lo que las simulaciones se realizaron para este mes.

### *Descripción de la vivienda*

La vivienda, construida por el Instituto Provincial de Vivienda, tiene una superficie construida de 63.7 m<sup>2</sup>. Consta de tres habitaciones, una cocina-comedor y un baño, como muestra la Figura 1. La envolvente vertical es de ladrillo cerámico hueco de 0.18m con revoque grueso y fino a la cal en ambos lados, con un espesor de 0.01 m, sin aislación térmica. La envolvente horizontal es un techo en pendiente compuesto por un cielorraso suspendido de placas de yeso (9.5 mm de espesor) el cual se encuentra ubicado a 2.6 m del suelo. Por encima del cielorraso se encuentra una cámara de aire luego de la cual está la chapa de calibre 25 ( $5 \times 10^{-4}$  m). El cielorraso está sujeto a la chapa mediante correas perfil "C" de fijación. Para tener en cuenta el espesor de la cámara de aire que corresponde a cada local, se consideraron dos espesores promedio, uno de 0.95 m de alto asignado a los dormitorios 3 y 2, y 0.78 m para el comedor, el baño y el dormitorio restante. Los muros interiores son de mampostería de ladrillos cerámicos huecos de 0.08m y 0.12 m, también revocados en ambos lados. En cuanto a la carpintería, las puertas son de madera de cedro y las ventanas son de vidrio simple incoloro de 4 mm de espesor.

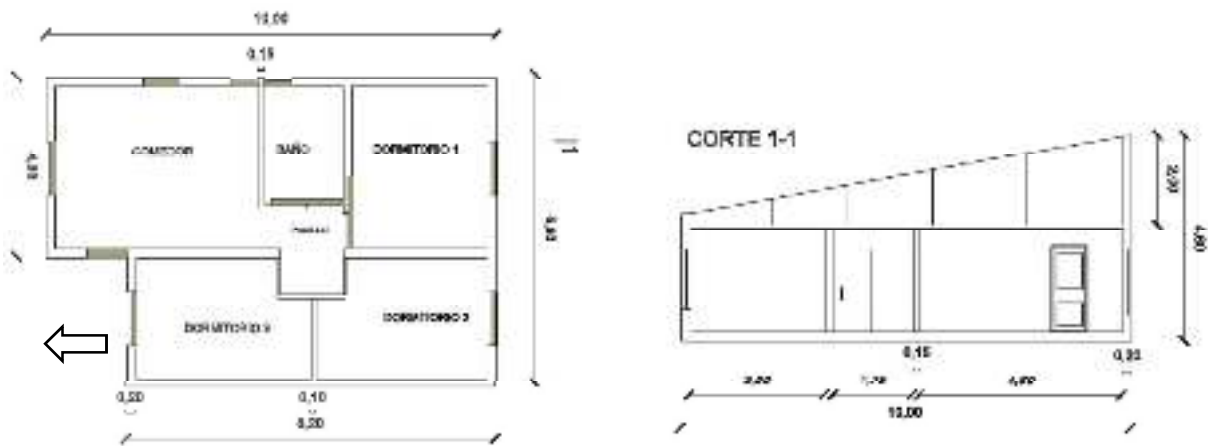


Figura 1: (Izq.) Vista en planta de la vivienda analizada. (Der.) Vista en corte de la vivienda.

### Simulación térmica con SIMEDIF

Se utilizó el software SIMEDIF V2.0 para realizar la simulación térmica del prototipo base y del prototipo con fachada vegetal incorporada. Para ello, se definieron 6 zonas térmicas cuyas superficies, volúmenes y áreas vidriadas se muestran en la Tabla 1. En la simulación se utilizaron 2 renovaciones de aire. Los muros y piso se definieron como masivos, mientras que el techo se consideró como un tabique compuesto por tres capas (cielorraso de yeso + cámara de aire + chapa, con conductancia térmica equivalente de  $0.025 \text{ W/m}^2\text{-K}$ ). Las propiedades térmicas de los materiales de muros, pisos y techos se obtuvieron de las normas IRAM 11601 y se muestran en la Tabla 2. Para los muros exteriores se fijó una absorptancia solar de 0.6, correspondiente a una pintura de color medio. El coeficiente global de pérdida de muros interiores se fijó en 6 y  $8 \text{ W/m}^2\text{-K}$  (superficies interiores no asoleadas y asoleadas, respectivamente), mientras que el coeficiente global de pérdida  $h$  de las superficies exteriores se estimó en  $15 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$  a través de la correlación de Duffie y Beckman (2005) con la velocidad media de viento  $v$  (m/s):

$$h = 5.7 + 3.8 v$$

Local	Área de suelo ( $\text{m}^2$ )	Volumen ( $\text{m}^3$ )	Área vidriada ( $\text{m}^2$ )
Comedor	16.2	42.12	2.16
Dormitorio 3	9.99	25.97	1.32
Dormitorio 2	11.61	30.19	1.32
Dormitorio 1	10.8	28.08	1.62
Baño	4.55	11.83	0.24
Pasillo	3.3	8.58	0

Tabla 1: Locales y características de las zonas térmicas.

		$k \text{ (W/m K)}$	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$C_p \text{ (J/kg K)}$	Espesor (m)
Muro exterior	Revoque exterior	1.16	1900	800	0.02
	Ladrillo cerámico hueco	0.38	636	850	0.18
	Revoque interior	0.93	1900	800	0.02
Muro interior	Revoque exterior	0.93	1900	800	0.02
	Ladrillo cerámico hueco	0.33	631.3	1009	0.12
	Revoque interior	0.93	1900	800	0.02
Techo	Cielo raso	0.58	1200	1080	0.095
	Cámara de aire	0.024	1.02	1012	0.78
	Chapa galvánica	58	7900	450	0.0005

Tabla 2: Propiedades térmicas de los materiales de muros y techos requeridos para la simulación.



Se simuló el mes de noviembre (30 días), que corresponde al mes más caluroso del año. Para el análisis, se eligió el día más caluroso del periodo (29 de noviembre), en que la temperatura mínima fue de 17.8°C, la media de 26.8°C y la máxima de 35°C. Se consideraron cuatro orientaciones para el “Caso Base” (sin fachada vegetal) y cuatro orientaciones para el “Caso mejorado” (con fachada vegetal). Las fachadas verdes se ubicaron en las orientaciones con mayores niveles de radiación solar (Este y Oeste) y con áreas de posible sombreado suficientemente grandes como para que el efecto de la cobertura verde sea significativo (Figura 2).

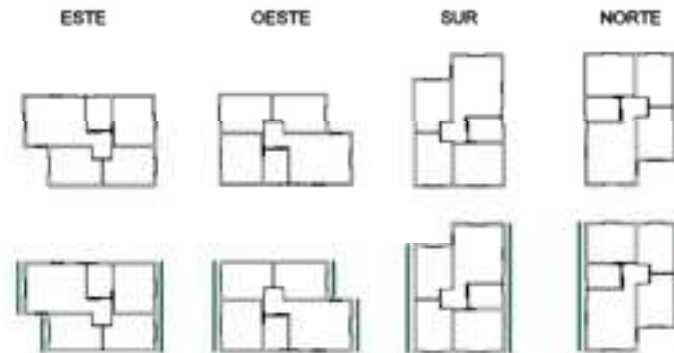


Figura 2: Caso Base y Caso Mejorado, con la ubicación de las fachadas verdes, para las cuatro orientaciones.

Para la fachada vegetal, se propuso el uso de la trepadora *Parthenocissus tricuspidata*, conocida también como *parra Virgen*, una enredadera de hoja caduca cuyo follaje permitiría cubrir la totalidad del área en la cual se instale durante la estación estival. Se trata de una planta resistente a la radiación solar y a temperaturas elevadas que es de uso habitual en la zona. Para simular la fachada vegetal, SIMEDIF utiliza el modelo térmico descrito en Flores Larsen et al. (2015). Para ello, el software crea automáticamente dos elementos: una nueva zona térmica (que representa la cavidad entre la planta y la pared) y un tabique (que representa a la planta). La nueva zona térmica tiene las dimensiones de la cavidad formada entre la planta y la pared el área interna de la planta y la pared (con un número de renovaciones de aire que deben ser ingresadas por el usuario de acuerdo al follaje y velocidad de viento; normalmente 20 o más si hay buena ventilación de la cavidad). Esta zona térmica es una zona de transición intermedia entre el espacio interior y el espacio exterior. En cuanto al tabique, es un elemento de conexión entre la cavidad y el exterior con el espesor y la conductividad térmica de la hoja. Los coeficientes globales de convección-radiación se reasignan automáticamente: a la superficie de la planta expuesta al viento se le asigna, como primera aproximación, el mismo coeficiente original del muro del Caso Base, mientras que las superficies del lado de la cavidad se recalculan a partir de correlaciones para cavidades ventiladas (Manual de EnergyPlus, 2019). El efecto de sombreado de la planta se tiene en cuenta a través de la disminución de la radiación solar que incide sobre la pared. Para ello, SIMEDIF primero calcula la transmitancia de una hoja (modelo PROSPECT D, Féret et al., 2017) y luego la transmitancia de la planta completa, de acuerdo al número de capas de hojas (descrito con el Índice de Área Foliar) y a la distribución promedio de las hojas (horizontal, vertical, a 45° o esférica). El modelo completo de cálculo de transmitancia se encuentra descrito en Flores Larsen et al. (2018). Una vez calculada la transmitancia de la planta  $\tau$ , SIMEDIF automáticamente modifica la absorptancia de la pared, multiplicándola por  $\tau$ . De esta manera, la cantidad de radiación que es absorbida por el muro contempla el efecto de sombreado de la doble fachada vegetal.

El módulo de SIMEDIF requiere de los siguientes datos para las fachadas vegetales:

1. Pared en la que se monta la fachada (pueden ser varias paredes)
2. Alto y ancho de la fachada verde (el área cubierta no puede exceder el área de la pared)
3. Distancia entre el material vegetal y la pared y renovaciones horarias de aire de la cavidad.
4. LAI (Índice de Área Foliar, área de hoja respecto del área vertical).
5. Características biológicas de la planta (largo de la hoja, espesor, resistencia estomática, contenido de agua, pigmentos, etc.). Dado que muchas de estas características no son sencillas

de determinar, el software incluye dos bases de datos (Angers y Lopex'93) de diferentes tipos de plantas. Como ambas bases tienen distintos tipos de datos, luego de seleccionar la planta se deben chequear los valores que se cargan automáticamente, ya que puede ser necesario el ingreso de algunos datos adicionales en forma manual.

6. Temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica y velocidad de viento promediadas durante las horas de mayor nivel de radiación solar (con estos valores el software calcula el porcentaje de evapotranspiración de la planta, que se considera constante durante las horas de sol).

En el caso de estudio, se utilizó un largo de hoja de 15cm, espesor 0.2 mm, resistencia estomática de 160 s/m., temperatura media del aire en las horas de sol de 30.3°C, humedad relativa media de 30% y velocidad de viento promedio de 5.4 m/s.

## RESULTADOS

### Caso Base

La Tabla 3 presenta los resultados simulados de temperatura media de cada zona térmica y sus correspondientes amplitudes térmicas, para cada una de las cuatro orientaciones de la Figura 2, para cada ciudad el día representativo.

<b>Temperatura media diaria <math>\pm</math> Amplitud Térmica (<math>^{\circ}</math>C) para la ciudad de Cafayate</b>				
Zona térmica	Orientación Norte	Orientación Sur	Orientación Este	Orientación Oeste
Comedor	28.4 $\pm$ 4.8	28.4 $\pm$ 4.8	28.5 $\pm$ 4.5	28.5 $\pm$ 4.8
Dormitorio 3	29.8 $\pm$ 2.6	29.8 $\pm$ 2.6	30.2 $\pm$ 2.7	29.9 $\pm$ 2.5
Dormitorio 2	29.7 $\pm$ 2.5	29.9 $\pm$ 2.5	30.0 $\pm$ 2.4	30.1 $\pm$ 2.6
Dormitorio 1	29.8 $\pm$ 2.4	29.9 $\pm$ 2.4	30.2 $\pm$ 2.4	30.5 $\pm$ 2.7
Baño	29.3 $\pm$ 1.7	29.2 $\pm$ 3.3	28.9 $\pm$ 1.5	29.0 $\pm$ 1.5
Pasillo	28.7 $\pm$ 2.3	28.6 $\pm$ 2.3	28.8 $\pm$ 1.5	28.8 $\pm$ 2.4

*Tabla 1: Temperaturas medias y amplitudes térmicas obtenidas de la simulación para el 29 de noviembre, para el Caso Base en sus cuatro orientaciones.*

Se observan temperaturas medias altas en todos los casos, de entre 28.4°C y 30.5°C, con amplitudes térmicas diarias de entre 3°C y 10°C, consistentes con una vivienda sin aislación térmica. La orientación más desfavorable es la Oeste, que presenta las mayores temperaturas interiores, seguida por la orientación Este. Esto se debe a la mayor área de envolvente expuesta a la radiación solar proveniente de estas orientaciones (Figura 2). En todos los casos, los interiores sobrecalentarán significativamente con el consecuente discomfort térmico.

### Caso Modificado

La Figura 3 muestra la disminución en la temperatura superficial de las paredes sombreadas por las plantas en los muros orientados hacia el Este y el Oeste, para las distintas orientaciones. Las viviendas con orientación norte y sur tienen un área de cubierta vegetal mayor a la de los dos casos restantes. Debido a esto se esperaría que dicha disminución sea más notoria en los locales vinculados a estas paredes. En el Caso Base-Orientación Norte, la temperatura superficial de los muros Este y Oeste alcanza los 48°C (alrededor de las 10AM) y 55°C (alrededor de las 16PM), respectivamente, mientras que cuando se somborean estos muros la temperatura disminuye entre 2°C y 6°C en la orientación Este, y entre 13°C y 16°C, dependiendo de la zona térmica. Estos valores son similares a los encontrados por otros autores, como Papadakis et al. (2001) que midieron diferencias de entre 9°C y 12°C para un muro de concreto de 20cm de espesor en Atenas, orientado al Sureste y pintado de amarillo claro, en días calurosos de verano (agosto). Por su parte, Wong et al. (2010) encontraron disminuciones de temperatura de la superficie externa de muros entre 1.1°C y 11.6°C, dependiendo del tipo de

vegetación. Otros estudios informaron reducciones de 5.5 °C (Pérez et al., 2011) y entre 1.9–8.3°C (Eumorfopoulou y Kontoleon, 2009).

Respecto a las mismas paredes, pero del caso base, las orientaciones norte y sur presentaron una disminución de 6.9°C en promedio durante el día para la pared Este (que conecta el dormitorio 3 con el exterior), siendo su mayor disminución entre las 8AM y las 11AM y, con un promedio de alrededor de 7.5°C para la pared oeste que conecta el comedor con el exterior. La disminución más notoria ocurrió durante las horas de la tarde, entre las 13PM y las 18PM para la vivienda orientada hacia el Norte. Para la vivienda orientada hacia el Sur, la disminución promedio fue de 8.1°C para la pared Este (que conecta el Comedor con el exterior), y de 6.8°C para la pared Oeste (que conecta el Dormitorio 3 con el exterior). La mayor disminución también ocurre durante el mismo intervalo horario que en el caso anterior. Los dos casos restantes no mostraron grandes variaciones, salvo para la pared que conecta el Dormitorio 2 con el exterior donde la disminución promedio es de 6.5°C para la vivienda orientada hacia el este y de 6.8°C para la orientación restante, siendo esta más notoria entre las 8AM y las 11AM para el primer caso y entre las 14PM y las 17PM para el segundo.

La Figura 4 muestra la disminución de la temperatura interior horaria de las zonas térmicas respecto del Caso Base, para las orientaciones Norte y Sur. Para la orientación Sur, se observa que la mayor disminución de temperatura se obtuvo en el Dormitorio 3, con 1.4°C en el periodo comprendido entre las 19PM y las 21PM. Para la orientación Norte, también el Dormitorio 3 presenta las mayores disminuciones, ligeramente más bajas que en el caso anterior, con valores de 1.1°C en el periodo entre las 15PM y las 16PM, en horas en las que la temperatura exterior llega a su máximo. El local con menor impacto de la fachada verde es, para ambas orientaciones, el Dormitorio 2, en donde las disminuciones son menores a 0.5°C. Los espacios restantes (Comedor y Dormitorio 1) presentan disminuciones máximas que oscilan entre 0.8°C y 1.0°C, principalmente en horas de la tarde.

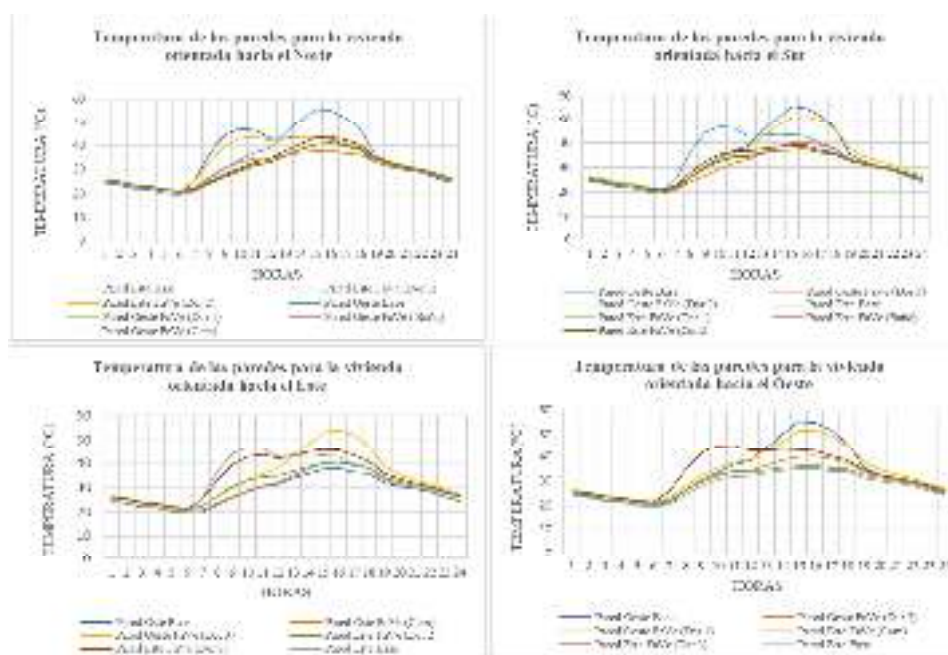


Figura 3: Temperatura superficial de las paredes exterior Este y Oeste, en el Caso Base y con la doble fachada verde, para las distintas zonas térmicas y orientaciones de las viviendas (Dor=Dormitorio, Com=Comedor, Base=Caso Base, FaVe=Caso con Fachada Vegetal).

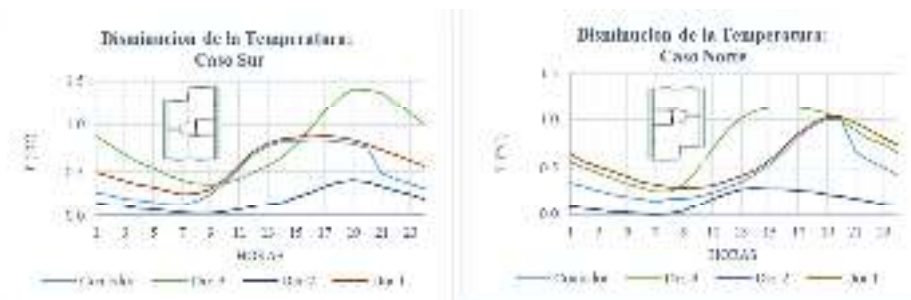


Figura 4: Disminución de las temperaturas en el interior de los espacios cuyas superficies externas están cubiertas por la doble fachada verde.

## CONCLUSIONES

La utilización de dobles fachadas verdes para el sombreado de fachadas asoleadas permite disminuir la temperatura superficial de los muros y, en consecuencia, el ingreso de energía térmica hacia el interior. Este efecto será más evidente en aquellos muros que no contengan aislación térmica, como el caso de la vivienda social analizada en el presente trabajo. En un día extremo de verano, los muros orientados al Oeste disminuyeron su temperatura máxima de 55°C a 35-42°C, dependiendo del espacio. Esto significa una disminución de la temperatura superficial de entre 13°C y 20°C alrededor de las 16PM. Una disminución similar se observa en muros con orientación Este, en los que las mayores disminuciones ocurren alrededor de las 10AM. Por otra parte, en los ambientes interiores se obtuvo una disminución de temperatura del aire de entre 0.3°C y 1.5°C, dependiendo del espacio y de la orientación de la vivienda.

Finalmente, debe destacarse que, si bien en este trabajo se analizó la influencia de la vegetación sobre la temperatura de la vivienda, existen beneficios adicionales y muy importantes derivados del enverdecimiento de la fachada, como la mejora del confort térmico exterior debido a la disminución de la temperatura media radiante (por disminución de la temperatura superficial del muro), o los beneficios estéticos, psicológicos y biológicos a nivel urbano.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por PICT ANPCYT 2014-2605 y por la Universidad Nacional de Salta (CIUNSa-A N°2489).

## REFERENCIAS

- Alchapar N.L., Erica N. Correa, M. Alicia Cantón, 2014. Classification of building materials used in the urban envelopes according to their capacity for mitigation of the urban heat island in semiarid zones. *Energy and Buildings* 69, pp. 22-32, 2014.
- Bre F., Fachinotti V. "Generación del año meteorológico típico para la ciudad de Santa Fe en la región litoral argentina". *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 18, pp.11.01-11.08, 2014.
- Eumorfopoulou, E.A., Kontoleon, K.J., 2009. "Experimental approach to the contribution of plant covered walls to the thermal behaviour of building envelopes". *Building and Environment* 44, 1024-1038.
- Feret J. B., Gitelson A. A., Noble S. D., Jacquemoud S., 2017. PROSPECT-D: Towards modeling leaf optical properties through a complete lifecycle, *Remote Sensing of Environment*, pp. 204-215. Ed. Elsevier.
- Flores Larsen S., Filippín C., Lesino G. "Modeling double skin green façades with traditional thermal simulation software". *Solar Energy* 121, pp. 56-67, Ed. Elsevier, Noviembre 2015.
- Flores Larsen S., Castro N., Filippín C., López C. "Modeling the spectral solar transmittance of double green facades for energy simulation". *International Conference on Energy Engineering and Smart*

- Grids (ESG 2018). Fitzwilliam College, University of Cambridge, Inglaterra, 25 al 26 de Junio de 2018. ISBN: 978-1-912532-04-9.
- Kontoleon K.J, Eumorfopoulou E.A., 2010. The effect of the orientation and proportion of a plant-covered wall layer on the thermal performance of a building zone. *Building and Environment* (45), 1287–1303.
- Manual de Energy Plus, 2019 Disponible en [www.energyplus.net](http://www.energyplus.net)
- Oropeza-Pérez I., Østergaard P.A., 2018. Active and passive cooling methods for dwellings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 82, Part 1, February 2018, Pages 531-544.
- Papadakis G., Tsamis P., Kyritsis S. (2001). “An experimental investigation of the effect of shading with plants for solar control of buildings”. *Energy and Buildings* 33, pp. 831-836.
- Pérez, G., Rincón, L., Vila, A., González, J., Cabeza, L., 2011. Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings. *Appl. Energy* 88, 4854–4859.
- Santamouris M, Cooling the cities –A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments, *Sol. Energy*. 103 (2014) 682–703.
- Scarpa M., Mazzali U., Peron F., 2014. Modeling the energy performance of living walls: Validation against field measurements in temperate climate. *Energy and Buildings* (79), 155–163.
- SIMEDIF, 2019. V2.0. Laboratorio de Edificios Bioclimáticos. INENCO. Universidad Nacional de Salta-CONICET. <http://170.210.201.130/index.php/es/software/simedif-2-0-calculo-termico-de-edificios/>
- Stec W.J., van Paassen A.H.C., Maziarz A., 2005. Modeling the double skin façade with plants. *Energy and Buildings* (37), 419–427.
- Susorova I., Angulo M., Bahrami P., Stephens B., 2013. A model of vegetated exterior façades for evaluation of wall thermal performance. *Buildings and Environment* (67), 1-13.
- Wong, N.H., Kwang Tan, A.Y., Chen, Y., Sekar, K., Tan, P.Y., Chan, D., et al., 2010. Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Build. Environ.* 45, 663–672.

## **ANALYSIS OF THE ENERGY EFFICIENCY OF A DOUBLE GREEN FAÇADE FOR THE CLIMATE OF SALTA CITY**

**ABSTRACT:** One of the effective ways to reduce summer energy consumption in buildings is the integration of vegetation in the building envelope, in particular, the double green facades. The reason is that, in summer, plants are more energy efficient than traditional shading elements because of their lower surface temperature, that is, the leaves regulate their temperatures through evapotranspiration. The thermal modelling of a double green facade must include these biological aspects that affect the energy balance of the leaves, and it is not usually included in the available thermal simulation software. SIMEDIF software in its recent version 2.0 includes this model. Within this framework, the objective of this work is to study the efficiency of a double green facade applied to a social housing of the IPV located in the city of Salta, which is simulated for four possible orientations. The decrease of the interior temperature and that of the surface wall’ temperatures are analyzed through transient thermal simulation. The results show that, on hot summer days in Salta city, it would be possible to obtain decreases ranging between 13 and 20°C in the surface temperature of East and West walls and between 0.3°C and 1.5°C in the indoor environments.

**Keywords:** double green façade, thermal simulation, urban greening

## **EVALUACION TERMICA Y ECONOMICA DE SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS PARA LA ENVOLVENTE DE EDIFICIOS ESCOLARES EN SAN MIGUEL DE TUCUMAN**

**Sara Lía Ledesma, Viviana Nota, María Mostajo, Cristina Llabra, Cintya Villa**

Centro de Estudios Energía Habitabilidad y Arquitectura Sustentable (CEEHAS)

Instituto de Acondicionamiento Ambiental – Facultad de Arquitectura y Urbanismo – Universidad

Nacional de Tucumán – Tel. 03814364093 – int. 7914 – Av. Roca 1800

sledesma@ herrera.unt.edu.ar – vnota01@yahoo.com.ar

*Recibido 16/08/19, aceptado 17/10/19*

**RESUMEN:** El presente trabajo tiene como objetivo analizar y evaluar la incidencia de las decisiones de diseño sobre el comportamiento térmico de la envolvente vertical opaca de edificios escolares construidos por el estado en San Miguel de Tucumán. Para ello, con la utilización de programas desarrollados por el Centro de Estudios Energía, Habitabilidad y Arquitectura Sustentable (CEEHAS) de la FAU-UNT, se realizó la evaluación del comportamiento frente a la transferencia de calor, de diferentes sistemas constructivos de muros. Se tomaron como punto de partida los sistemas tradicionales, a los que se evaluaron bajo diferentes condiciones de diseño. Se analizaron también soluciones constructivas que incluyen materiales de uso reciente. Los resultados alcanzados permitieron cuantificar la incidencia de la orientación, color superficial, protecciones solares y materialización constructiva de la envolvente; sobre la transmisión térmica del elemento.

**Palabras clave:** transmisión térmica, energía, escuelas

### **INTRODUCCION**

Al área edilicia le corresponde más del 40 % de la energía que se consume en nuestro país, donde la mayor parte es empleada en la climatización de los ambientes interiores. Los requerimientos de energía para la calefacción y refrigeración, van a depender de la situación climática en el que se encuentra inserto el edificio y, en gran medida, del comportamiento térmico de la envolvente edilicia, donde una inapropiada resolución de la misma, va a determinar espacios interiores con inadecuadas condiciones de habitabilidad y por lo tanto elevados requerimientos energéticos para su acondicionamiento.

Dentro del área edilicia, se encuentra el sector educativo, el cual representa uno de los sectores esenciales en el desarrollo humano, desafortunadamente, los espacios educativos de nuestro país no siempre se adecuan a las premisas de habitabilidad, y se encuentran ajenos a principios de sustentabilidad, por lo que resulta de fundamental importancia incorporar estrategias de diseño pasivo en los edificios escolares, considerando que los mismos no cuentan con equipamiento para la climatización artificial (Venhaus H.M.; s/f).

Las estrategias de diseño pasivo que, de acuerdo a la definición del Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM) (Norma IRAM 11900, 2019), son las modificaciones que permiten mejorar la sensación de confort y reducir la demanda de energía convencional a través de las características del diseño arquitectónico y de los elementos constructivos, resultan de fundamental aplicación para alcanzar niveles de alta calificación en el etiquetado energético de los edificios.

Una herramienta que posibilita la evaluación de las mencionadas estrategias, es la determinación de las cargas térmicas de enfriamiento y calefacción necesarias para el acondicionamiento de los ambientes. Dicho análisis facilitará la toma de decisiones proyectuales apropiadas para lograr el confort térmico interior. Estudios realizados, sobre las cargas energéticas requeridas para la climatización artificial de edificios, permitieron demostrar que la modificación de la envolvente, mediante estrategias de



conservación de energía, produce disminuciones del 77% y 75% en verano y del 44% y 93% en invierno para el caso másico y liviano respectivamente (Balter, Ganem, Discoli; 2015).

La ciudad de San Miguel de Tucumán, localidad donde se centra este estudio, pertenece a la zona bioambiental “IIB” de acuerdo a IRAM 11603 (IRAM, 2011), tiene un clima cálido húmedo, con registros en verano de temperatura media máxima de 30,7 °C y humedad relativa media máxima del 85%, y en invierno, de temperatura media mínima de 7,7 °C y humedad relativa mínima media de 64%, por lo que, en este clima mixto, resulta de fundamental importancia incorporar estrategias de diseño pasivo, que optimicen el comportamiento energético de los edificios escolares, para ambas condiciones estacionales.

Estudios realizados por el CEEHAS, demostraron que las soluciones constructivas empleadas con mayor frecuencia en los muros exteriores de las escuelas de Tucumán no cumplen con las condiciones de aislamiento térmico adecuadas, por lo que resulta necesario contar con alternativas de mejoramiento térmico y/o incorporar nuevos materiales, de manera tal de alcanzar las condiciones térmicas necesarias para lograr condiciones de confort interior. (Ledesma *et al*, 2014)

El objetivo del presente estudio, ha sido evaluar el comportamiento térmico de los paramentos verticales externos prototípicos de edificios escolares, cuantificar el aporte de diferentes estrategias de diseño pasivo, tales como, incorporación de materiales aislantes, protecciones solares, variación en los colores superficiales y orientaciones; y analizar comparativamente los costos requeridos para su construcción de cada una de las alternativas planteadas.

Los resultados alcanzados permitieron valorar cada decisión de diseño, de acuerdo a su contribución a la eficiencia energética y al acondicionamiento higrotérmico, de las aulas, atendiendo las características climáticas de la localidad, a la vez de ponderarlos en relación a su conveniencia económica. El trabajo se enmarca en el Proyecto de Investigación PIUNT B620/2: “Etiquetado energético en edificios escolares de Tucumán”.

## DESARROLLO:

### *Casos de análisis*

A efectos de valorar la contribución a la eficiencia energética y al acondicionamiento térmico de diferentes soluciones de diseño, se llevó a cabo la evaluación del comportamiento térmico de muros exteriores utilizados con más frecuencia en las escuelas construidas por el estado: mampostería de ladrillo común de 0,30 m y de 0,20 m de espesor y de ladrillo hueco de 0,18 m. Cabe destacar que el muro de ladrillo común de 0,15 m, que también tuvo un uso frecuente, no fue estudiado, dado a que el muro de 0,20 fue el más empleado en la construcción escolar en décadas anteriores e incluso presenta un mejor comportamiento térmico. (Ledesma S.L. et al, 2016).



*Fig.1: Vista de los muros exteriores de escuelas de Tucumán*

Sobre estos sistemas constructivos de base, denominados CASO A, se plantearon de mejoramiento: incorporación de cámara de aire y placa de yeso (CASO B) e incorporación de cámara de aire, aislante térmico y placa de yeso (CASO C) (Fig. 2).

Las diferentes soluciones constructivas, fueron evaluadas térmicamente, empleando los programas desarrollado por el CEEHAS, el coeficiente de transmisión térmica K, su verificación de Normas, el

amortiguamiento y retardo, se empleó el programa CEEMAKMP (Gonzalo, 2003) y para verificar el riesgo de condensación superficial e intersticial, se utilizó el programa CEEMACON (Gonzalo, 2003), todos ellos bajo los procedimientos establecidos por la normas IRAM 11601 (IRAM, 2002) y 11625. (Tabla 1).

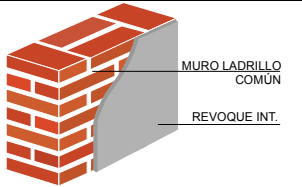
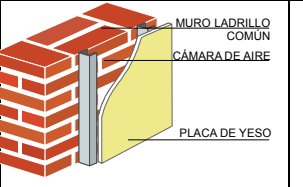
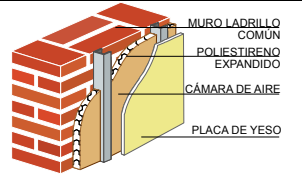
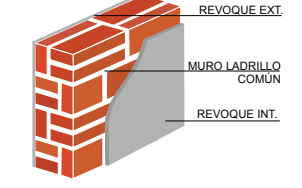
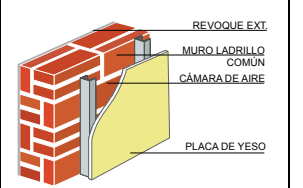
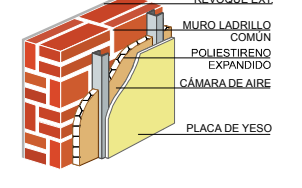
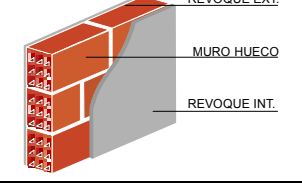
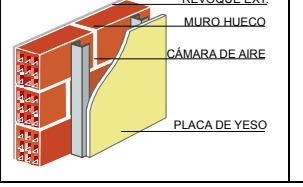
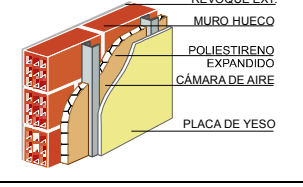
Elemento	Croquis		
	CASO A - Muro base	CASO B - Muro con cámara de aire 0,07m y placa de yeso	CASO C - Muro con poliest. expand. 0,05m, cámara de aire y placa de yeso
Ladrillo común de 0,27 m			
Ladrillo común de 0,17 m			
Ladrillo hueco de 0,18 m			

Fig.2: Soluciones constructivas analizadas

Elemento	K W/m <sup>2</sup> °C	$\mu$	$\phi$ hs	Verifica K Normas Verano			Verifica K Normas Invierno			Verifica condensac.		
				A	B	C	A	B	C	Sup.	Interst.	
				0,45	1,10	1,80	0,37	1,01	1,82			
Ladrillo común de 0,27m	con una cara revocada (LC30)	<b>1,85</b>	0,17	7	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	con cámara de aire de 0,07m y placa de yeso (LC30cam)	<b>1,18</b>	V:0,17 I:0,14	V:7 I:9	NO	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI
	con 0,05m de poliest. exp., cámara de aire 0,02m y placa de yeso (LC30aisl)	<b>0,47</b>	V:0,16 I:0,02	V:8 I:12	NO	SI	SI	NO	SI	SI	NO	NO
ladrillo común de 0,17m	con dos caras revocadas (LC20)	<b>2,47</b>	0,35	5	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI
	con cámara de aire de 0,07m y placa de yeso (LC20cam)	<b>1,33</b>	V:0,3 I:0,15	V:4 I:8	NO	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI
	con 0,05m poliest. exp, cámara de aire 0,02m placa de yeso (LC20aisl)	<b>0,49</b>	V:0,28 I:0,05	V:5 I:10	NO	SI	SI	NO	SI	SI	NO	NO
ladrillo hueco de 0,18m	con dos caras revocadas (LH18)	<b>1,91</b>	0,2	5	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI
	con cámara de aire de 0,07m y placa de yeso (LH18cam)	<b>1,14</b>	V:0,32 I:0,17	V:4 I:7	NO	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI
	con 0,05m poliest. exp, cámara de aire 0,02m y placa yeso (LH18ais)	<b>0,47</b>	V:0,29 I:0,08	V:5 I:10	NO	SI	SI	NO	SI	SI	NO	NO

Tabla N°1: Valores de K, amortiguamiento y retardo, cumplimiento de valores máximos admisibles de K y verificación de riesgo de condensación.

A partir de los resultados obtenidos podemos concluir que, dentro de las soluciones constructivas que se emplean, (soluciones de base), el muro de ladrillo común de 0,27 con una cara revocada presenta un valor de coeficiente K muy próximo al nivel C, y no presenta riesgo de condensación. Con un valor de K levemente mayor, se encuentra el ladrillo hueco de 0,18 con dos caras revocadas, pero presenta



riesgo de condensación. El muro de ladrillo macizo de 20 cm, no cumple con los valores normados y presenta riesgo de condensación.

Dentro de las soluciones mejoradas, con cámara de aire, a las cuales se les incorporo una barrera de vapor de pintura asfáltica sobre la superficie interior del ladrillo, cumplen con los valores mínimos de de K, algunos presentan valores de K próximos a los establecidos por IRAM 11605 para nivel B, pero presentan riesgo de condensación en todos los casos. Las soluciones con aislante térmico, cumplen nivel B y algunos se encuentran próximos al nivel A de las Normas y no presentan riesgos de condensación.

#### *Métodos y resultados*

Con el fin de evaluar el comportamiento térmico de cada una de las soluciones constructivas bajo diferentes condiciones de diseño, se utilizó el programa CEEHASQPER (Ledezma, Nota, Gonzalo, 2018), que permitió determinar el flujo de calor bajo régimen periódico y establecer la carga térmica promedio diaria, para verano e invierno, de cada elemento.

Para la implementación del programa CEEHASQPER, se emplearon los valores de temperatura exterior promedio horaria, para verano e invierno, brindados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2000-2010); los valores de temperatura interior, establecidos por IRAM 11659 (IRAM, 2007) y los valores de K, amortiguamiento y retardo de cada elemento calculados con el programa CEEMAKMP.xls (Gonzalo, 2002), estos últimos se encuentran en la tabla N° 1.

Se realizaron los cálculos para la unidad de superficie de cada elemento, bajo las condiciones de: (i) las cuatro orientaciones, (ii) dos situaciones color superficial (claro y oscuro), correspondientes a los coeficientes de absorción de 0,2 y 0,7 y (iii) las condiciones de muro totalmente asoleado, totalmente obstruido el sol o protegido por un alero.

En este último ítem, cabe destacar que se adoptó como modelo de análisis, un alero de 0,85 m de profundidad, dado que es el que se presenta en las escuelas construidas del plan 700 escuelas. Se consideraron los factores de protección establecidos en la Normas IRAM 11900. Por lo que corresponde de acuerdo a la orientación y estación:

Factor de protección orientación Norte = 0,5 verano; 0,8 invierno (fig. 5)

Factor de protección orientaciones Este y Oeste: 0,68 verano (redondeo: 0,7); 0,8 invierno

Factor de protección orientación Sur: 0,73 verano; 0,67 invierno (a efectos del cálculo se redondea a 0,7 para ambos casos)

#### *Análisis de resultados.*

A partir del análisis del comportamiento térmico en verano, de las situaciones constructivas empleadas con mayor frecuencia en las escuelas de Tucumán, muros simples totalmente asoleados y considerando la variación de acuerdo a distintas orientaciones y coeficientes de absorción (0.2 y 0.70), se puede observar la notable la diferencia que existe entre ellos. En un primer análisis, se evaluaron comparativamente, las soluciones constructivas de base de los muros simples (Caso A), con las de mejor comportamiento térmico, muros compuestos con cámara de aire y aislación térmica, (Caso C).

Para el verano, las mayores cargas térmicas se producen en el muro de ladrillo común de 0,20 m (LC20), de color oscuro y para las orientaciones Este y Oeste (187 Wdía), correspondiendo a un 70% superior a los que presentan menor carga térmica, los muros de ladrillo común de 0,30 (LC30) y ladrillo hueco (LH18), color claro, orientadas al norte y sur, (56Wdia).

Para la situación de invierno, nuevamente se observa que el mejor desempeño térmico se produce en los muros LC30 y LH18, con orientación Norte, color oscuro, los cuales presentan un ingreso diario de calor de 19 Wdía, en contraposición con el muro LC20, color claro, que presenta hacia el norte, una pérdida promedio diaria de 184Wdía, constituyendo los valores máximos de pérdidas de calor. (Fig.3).

Cabe destacar que la solución constructiva que registra el comportamiento térmico más desfavorable para las situaciones de invierno y verano (LC20), resulta en un promedio un 15 % más costosa que las soluciones constructivas más favorables.

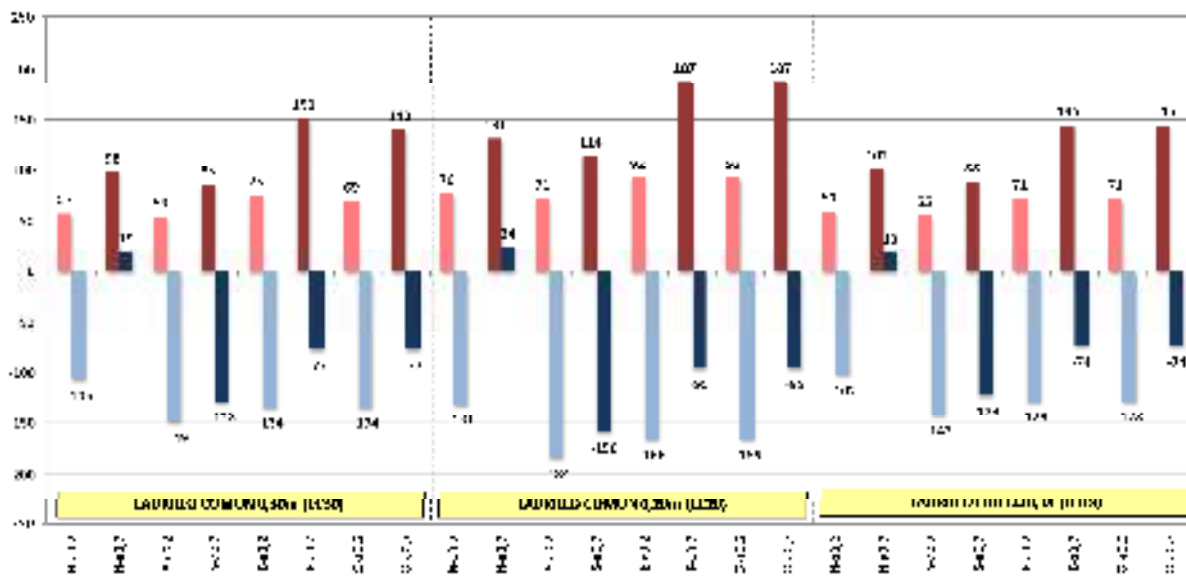


Fig 3: Carga térmica diaria, verano e invierno, de muros simples y asoleados, variación de acuerdo a orientación y color

Al analizar el comportamiento térmico de los muros con cámara de aire y aislación térmica, asoleados, observamos igual comportamiento que en el caso anterior. (Fig.4)

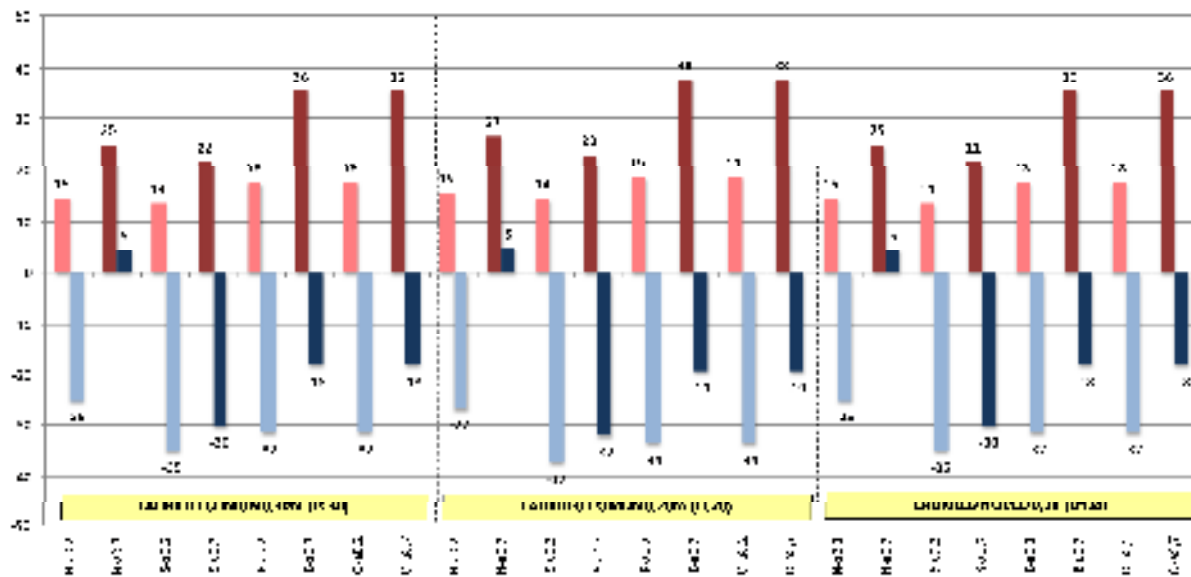


Fig 4: Carga térmica diaria, verano e invierno, de muros aislados y asoleados, variación de acuerdo a orientación y color

En el análisis de la situación de verano se puede observar que los mejores comportamientos se producen en los muros de LC30 y LH18 aislados, claros, con orientación Norte, los que presentan una carga de calor inferior en un 62% con respecto al muro LC20 oscuro al este y oeste, el cual presenta mayor carga. Igual comportamiento se observa para la situación de invierno, en donde los muros LC30 y LH18 aislados, Norte y oscuros, presentan un balance positivo, en contraposición con el muro LC20 aislado claro, orientado al Sur, que presenta pérdidas de calor en el orden de 37 W/día (Fig 4) Nuevamente en este caso se observa que el sistema constructivo que registra el comportamiento térmico más desfavorable para las situaciones de invierno y verano (LC20), supera en un promedio de 40% a las mas favorables.

El color superficial es un factor que tiene gran incidencia en el comportamiento térmico del paramento y que no incide en el costo del sistema constructivo.

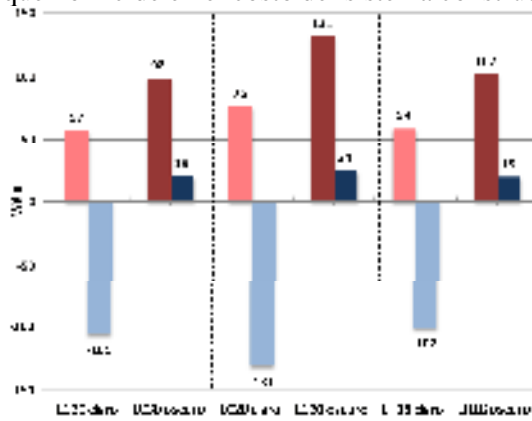


Fig. 5: Carga térmica diaria estacional de muros simples, asoleados, orientación norte, variación de acuerdo a color

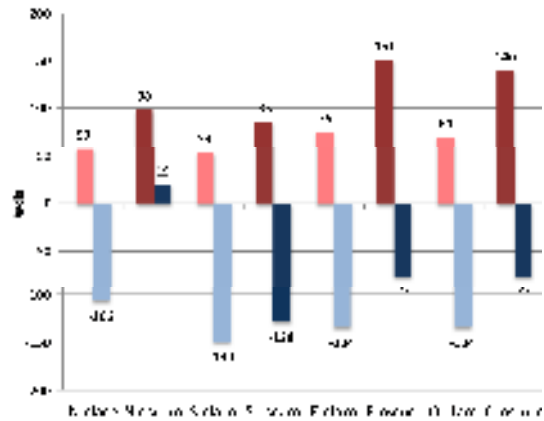


Fig 6: Carga térmica diaria estacional, de muro simple LC30, asoleado, variación de acuerdo a orientación y color

En el análisis del comportamiento bajo diferentes condiciones de color, de los muros simples, podemos observar que, para la situación de verano, el uso de colores claros determina una reducción de las cargas térmicas en un 58% en relación a los oscuros en todos los casos analizados, en contraposición, para la situación de invierno, el color claro determina las situaciones de mayor pérdidas de calor, superando en un 125% superiores al color oscuro, para todas las situaciones analizadas. (Fig.5).

Para realizar un análisis más específico, se toma como referencia, el comportamiento térmico del muro LC30, ya que presenta un comportamiento similar al muro LH18, y por otro lado no se considera el comportamiento térmico del muro de LC20, dado que no cumple con los valores normados. En el análisis de la influencia del color, para las diferentes orientaciones, (Fig. 6), se observa que para la situación de verano, el uso del color claro en relación al oscuro determina, en la orientación Norte una reducción de las cargas térmicas en un 42%, en la orientación Sur en un 37% y en la Este y Oeste en un 51%. En invierno, el color oscuro en relación al claro permite ganancias de calor en la orientación Norte de un 125%, reduce las pérdidas de calor en un 24% en la orientación Sur y en un 42% en la orientación Este y Oeste.

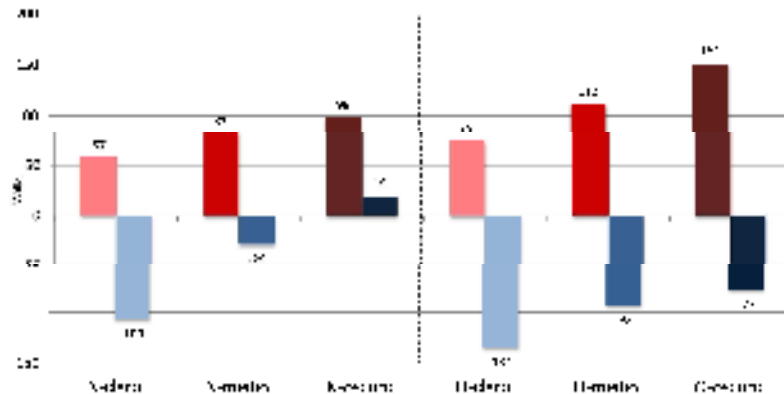


Fig 7: Carga térmica diaria estacional, de muro simple LC30, asoleado, orientación Norte y Oeste, variación de acuerdo a color

Es decir que, para Tucumán, el color oscuro al Norte, determinara un comportamiento global más eficiente y hacia las otras orientaciones será el color claro, el más conveniente. El uso de colores medios reduce las diferencias de comportamiento estacional, fundamentalmente para la orientación norte. En el análisis del comportamiento térmico de un muro LC30, orientado al Norte y Oeste, bajo diferentes condiciones de color, se observa que el muro de color medio orientado al norte disminuye notablemente las pérdidas en invierno con respecto al muro color claro, lo que mejora el balance

global anual, con una disminución del 32 % de la carga térmica global. Para la orientación Oeste un color medio permitirá un comportamiento térmico mejor que el color que el oscuro, con una disminución del 11% de la carga térmica global (fig. 7). En el del muro LC30 aislado, se observa un comportamiento similar al muro LC30, la influencia del color se mantiene (Fig 8)

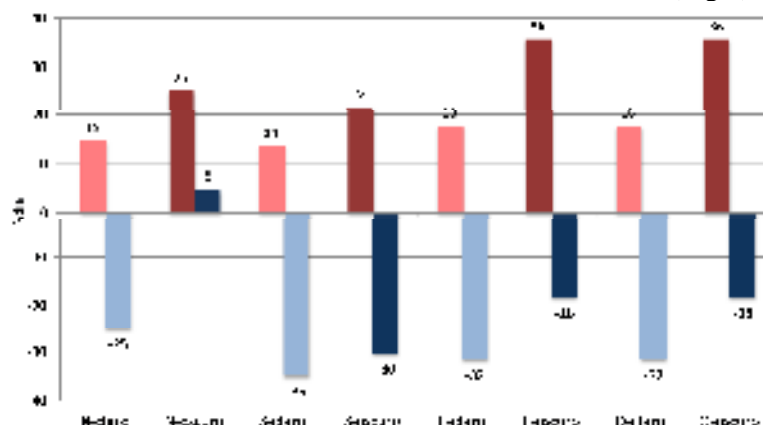


Fig. 8: Carga térmica diaria estacional, de muro LC30 aislado y asoleado, variación de acuerdo a la orientación y color

Analizando las orientaciones Este y Oeste, se puede concluir que, manteniendo el elemento constructivo, o sea manteniendo su costo, con solo cambiar el color, es posible disminuir la carga en un 50 %, de 151 a 75 W, para LC30 simple y 36 a 18 W, para LC30 aislado. Si por cuestiones de diseño es necesario mantener un color oscuro, es posible reducir la carga térmica, mediante la mejora del elemento en un 76% (de 151 a 36Wdía) mediante la incorporación de aislación térmica, con un incremento del costo del paramento de un 39%. La presencia de algún elemento que obstruya la radiación solar, también será determinante del comportamiento térmico de un muro, con el fin de evaluar la ocurrencia conjunta del color y la protección solar, se analizó la incidencia de un alero corrido de 0.85m, solución frecuente en escuelas de reciente construcción, tal como fue explicado en párrafos anteriores. (Ver Fig.4)

Al analizar el comportamiento térmico en verano, de un muro LC30, con el alero y bajo distintas condiciones de color y orientación, se puede observar que, si bien la presencia de la protección solar ha determinado una disminución de la carga en un promedio de 18.5 % en relación a la situación de muro totalmente asoleado, la notable mejora del comportamiento del muro se observa en la comparación entre el muro oscuro versus el muro claro, con una reducción promedio de carga térmica en muros parcialmente protegidos del 35%, (siendo la reducción promedio en muros sin protección solar, del 58%) (Fig.9)

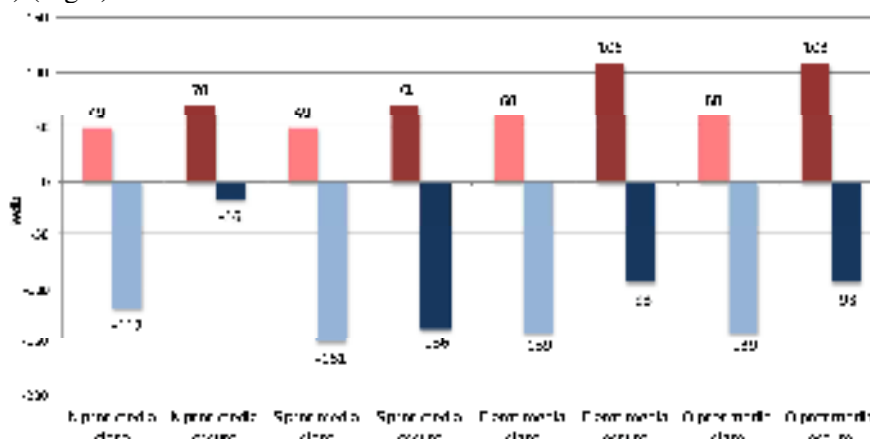


Fig. 9: Carga térmica diaria estacional, de muro LC30 simple, con alero de 0.85 m (protección media, variación de acuerdo a orientación y color

Un análisis más detallado, de la influencia de la protección solar, en relación al color del elemento, puede observarse en Fig. 10. Podemos apreciar que hacia el Norte en verano, un muro oscuro con

alero (protección media) (70Wdía), tendrá una carga térmica inferior en un 28%, al muro oscuro totalmente asoleado (98Wdía), pero superará en un 23% al muro claro asoleado (57Wdía). Situación similar se observa en la orientación sur, pero la diferencia es aún mayor en las orientaciones este y oeste, donde el muro oscuro, con protección media (108 Wdía), tiene una carga superior en un 56%, con respecto al muro claro totalmente asoleado (69 Wdía). Podemos entonces concluir que la elección de colores claros, que no significa incremento en el costo del paramento, tiene un impacto más significativo en la mejora del comportamiento térmico que la incorporación de una protección parcial. Se observa además, que una protección total de la radiación solar, deja sin efecto las incidencias del color y la orientación dentro del comportamiento del elemento, siendo la alternativa más recomendable para la orientación este y oeste en nuestra latitud. Para el caso del muro con aislación térmica, las relaciones porcentuales se mantienen, siendo los valores nominales significativamente menores, por lo que se relativiza la influencia del color y la protección.

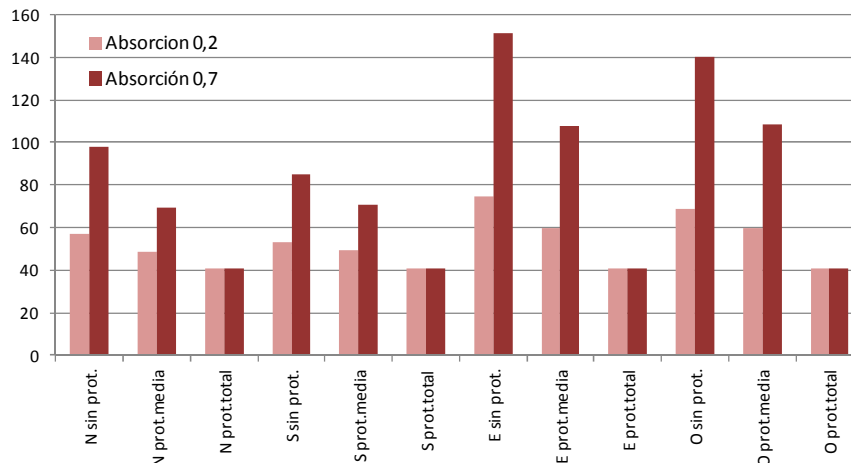


Fig. 10: Carga térmica diaria de verano, de muro LC30 simple. Variación de acuerdo a orientación, color y presencia de protección.

Merecen un análisis especial los muros con orientación Norte, dado que se contraponen la conveniencia de color claro u oscuro de acuerdo a la estación del año. En el análisis del comportamiento global de un muro de LH18 aislado, podemos observar, que la situación más conveniente será la del muro oscuro con protección media (alero), dado que disminuye en un 28% los requerimientos energéticos globales, en relación a un muro oscuro sin protección, en un 53%, en relación a un muro oscuro con protección total y en un 45%, en relación a un muro claro sin protección. (Fig 11).

Para la orientación Oeste, se verifica una mayor ganancia térmica, superior en un 30% aproximadamente, que el muro norte. El muro claro con protección media presenta el mejor comportamiento térmico global, en el balance anual presenta valores similares al muro oscuro con protección media y a los muros con protección total. No obstante si consideramos el período estival, por ser el más desfavorable, la protección total será altamente recomendable, donde el muro presenta una carga térmica inferior en un 62% y 81% con respecto al muro oscuro con protección media y totalmente asoleado, respectivamente (Fig.12)

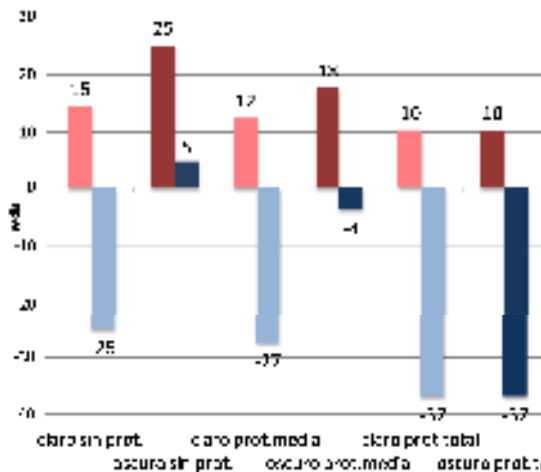


Fig.11: Carga térmica diaria estacional, de muro LH18, Norte, aislado. Variación de acuerdo a color y presencia de protección.

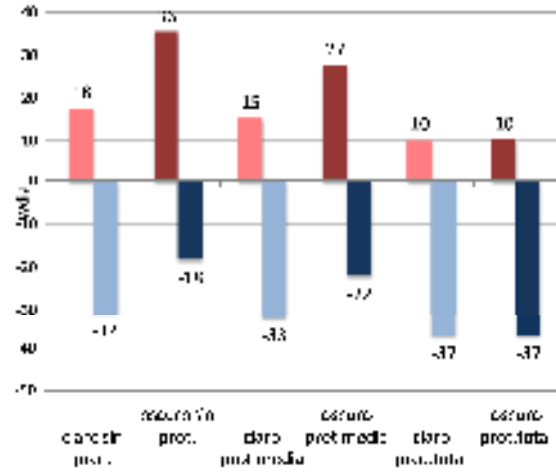


Fig.12: Carga térmica diaria estacional, de muro LH18, Oeste, aislado. Variación de acuerdo a color y presencia de protección.

La variación constructiva del elemento, es el principal condicionante de su comportamiento energético, a modo de ejemplo en la fig.13, puede apreciarse la variación para un muro LH18, de acuerdo a sus materiales y resolución constructiva. Para la situación de color claro, se aprecia una notable reducción de la carga de intercambio, en el verano será de 40% y 75% la disminución registrada en la comparativa entre el muro simple (71 W día) y el muro con cámara de aire (43%) y muro con cámara y aislante (18W día), respectivamente. Para el invierno la relación será similar.

Si comparamos para verano, el muro simple oscuro (145 W día) con el muro con aislación térmica claro (18W día), éste último presentará una ganancia de calor un 87% inferior.

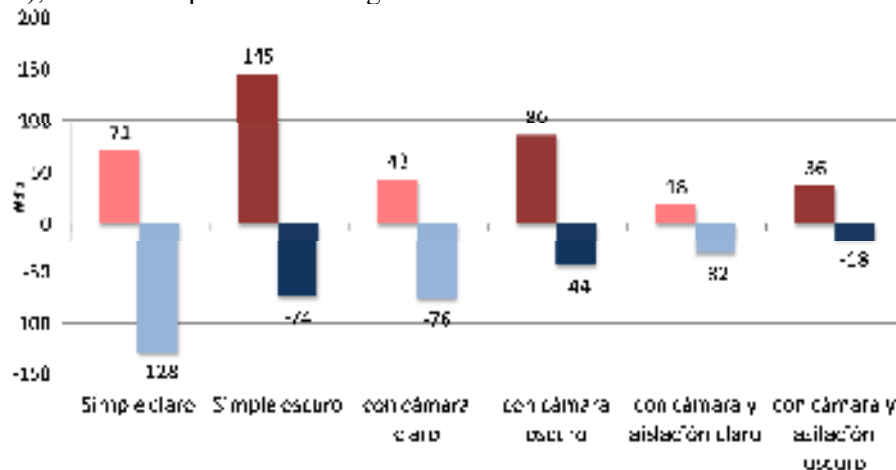


Fig.13: Carga térmica diaria estacional, muro LH18, Oeste. Variación de acuerdo a solución constructiva y color

La figura 14, muestra el comportamiento térmico de un paramento asoleado orientado hacia el norte, color claro y oscuro, considerando distintas soluciones constructivas que cumplen con la normativa IRAM 11605, nivel B, y se encuentran cercanos al nivel A. Se incorporaron en el análisis, los siguientes sistemas constructivos:

Elemento	Lad. macizo 0.13, lana de vidrio 2", foil alum., cámara aire, placa yeso (LC15aisl)	Ladrillo hueco 0.12, lana de vidrio 2", foil alum. cámara aire y placa de yeso (LH12aisl)	Mampostería Hormigón celular 0.15 m (H Cel15)	Mampostería Hormigón celular 0.175m (Hcel17.5)	Mampostería Hormigón celular 0.20m (H Cel20)	Ladrillo macizo 0.27, revoque exterior termoaislante (LC30RevAis)
K (W/m <sup>2</sup> °C)	0.51	0.47	0.7	0.62	0.54	0.91

Tabla 2: Sistemas constructivos incorporados al análisis y valores de transmitancia térmica

Podemos observar que, para verano los valores oscilan entre 15 y 28 W día, para color claro y entre 25 a 48Wdía para color oscuro, y para invierno una pérdida de calor entre 25 y 35W día, en colores claros y 27 y 48Wdía en oscuros, se destaca nuevamente la incidencia del color con una reducción del 40%. En el balance térmico global, los muros tradicionales compuestos, LC30aisl, LC20aisl y LH18aisl, LH12aisl, presentan similar comportamiento, muy próximo a ellos el muro compuesto de ladrillo común de 0,15 (LC15aisl), presentando los muros con materiales no tradicionales (hormigón celular y revoque termoaislante), una carga térmica superior en promedio, entre un 30 y 40%, para colores claros y oscuros respectivamente.

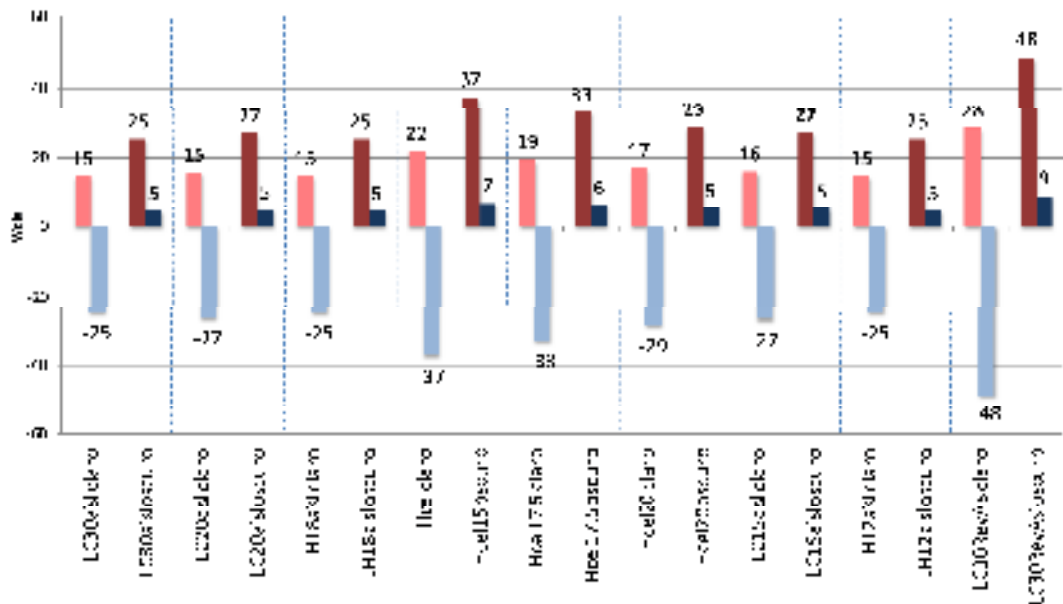


Fig. 14: Carga térmica diaria estacional, muro Norte, aislados y asoleados. Variación de acuerdo a solución constructiva y color

Se observa similar comportamiento para la orientación oeste, con valores superiores, dada la orientación. Se destaca, la notable la diferencia en el comportamiento entre los muros con materiales tradicionales con los que incorporan materiales “no tradicionales”. Tomando como referencia el muro LH18aisl, se observa que los muros construidos con hormigón celular HCel15, HCel17,5 y HCel20, presentan una carga mayor que el caso de referencia del 49%, 33% y 14% respectivamente. El muro de ladrillo con revoque termoaislante (LC30RevAisl), presenta una carga superior en un 94% (fig.15)

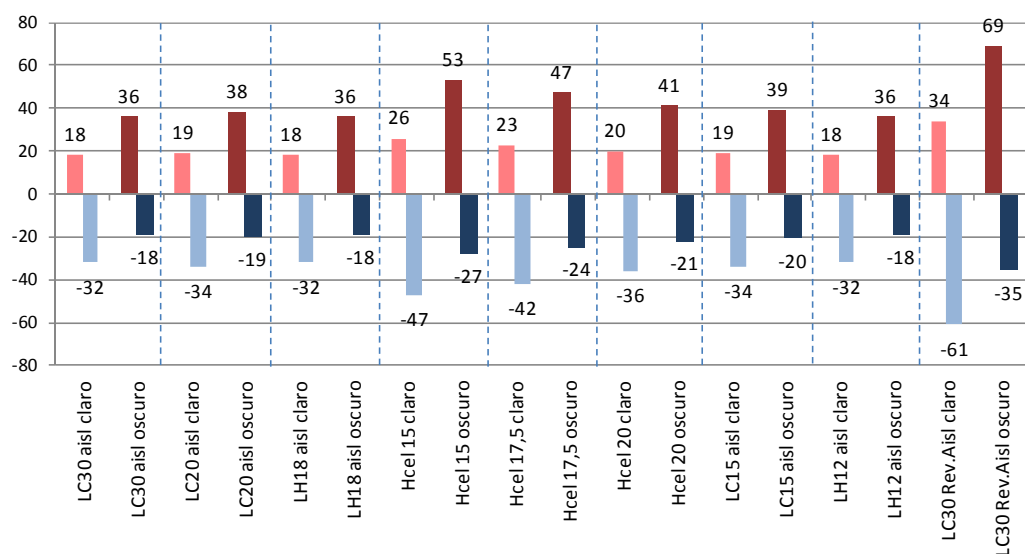


Fig.15: Carga térmica diaria estacional, muro Oeste, aislados y asoleados. Variación de acuerdo a solución constructiva y color

Es notable la diferencia del comportamiento térmico entre los muros simples no aislados y los muros compuestos aislados, pero cabe analizar las diferencias en sus costos. Dicha relación se muestran en la figura 16. A modo de ejemplo podemos observar que la reducción de la carga térmica entre un muro LH18 y LH18aisl, es del 75%, mientras que el incremento del costo es 39%. Situación que se repite en las otras tipologías.

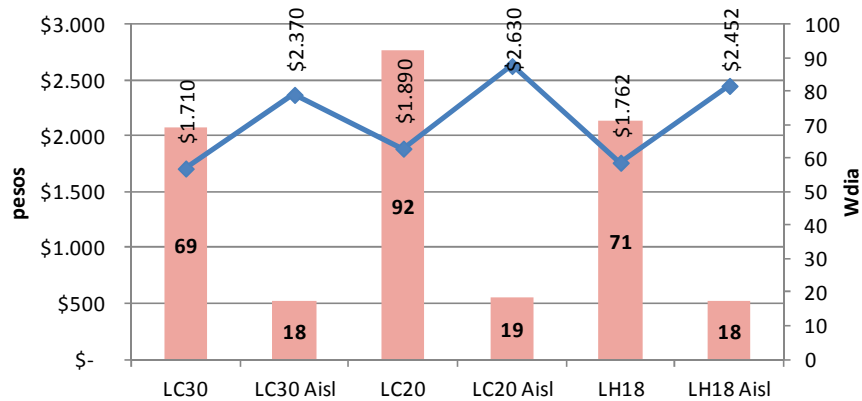


Fig.16: Carga térmica diaria estacional, muro Oeste, aislados y aseleados. Variación de acuerdo a solución constructiva (Q/m2)

La figura 17 muestra la variación de costos y comportamiento térmico global de las soluciones constructivas aisladas, analizadas en párrafos anteriores. Se observa que el muro LC15aisl, tiene el menor costo, con un comportamiento térmico similar al resto de los muros compuestos LC30aisl, LH18aisl y LH12aisl. El resto de las soluciones constructivas lo superan en el costo en el orden del 15 al 30%, excepto el muro con revoque aislante, cuyo costo es 50% superior y su eficiencia mucho menor. Se observa que los nuevos materiales no presentan un mejor comportamiento que los muros compuestos, siendo el más eficiente de ellos, el muro HCel20, que con un costo superior al 20% que el muro LC15Aisl, presenta un ingreso aun mayor al mismo.

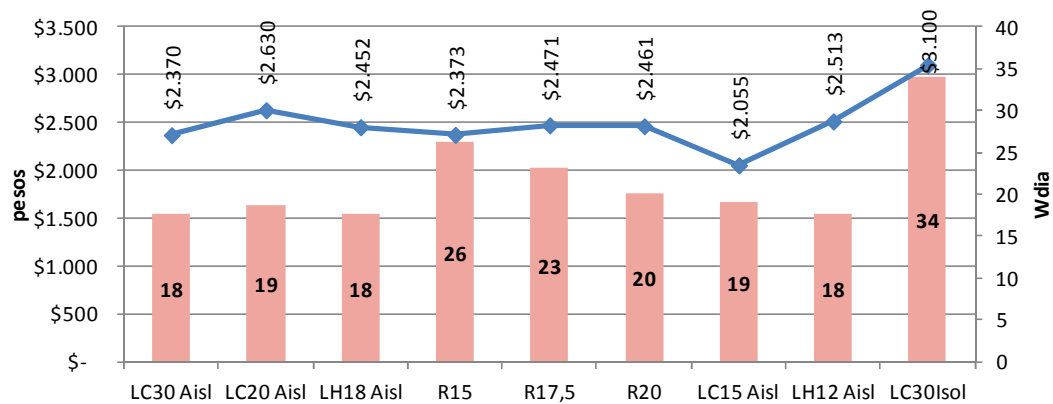


Fig.17: Variación de costos y comportamiento térmico global de las soluciones constructivas aisladas

## CONCLUSIONES:

El estudio permitió cuantificar la contribución de las estrategias de diseño pasivo al mejoramiento del comportamiento térmico de la envolvente vertical opaca, así como la incidencia en los costos de las mismas.

Se verificó la importancia de la incidencia del color sobre el comportamiento final del elemento, decisión que no incide en el costo del mismo. En verano, un muro oscuro orientado hacia el Oeste, permite ingreso de prácticamente el doble de la carga térmica que transmite el mismo elemento pintado de color claro. Decisión de diseño, que supera a la eficiencia que tendría la presencia de una protección solar parcial del paramento, la cual para la misma orientación puede llegar a producir una reducción en el orden del 25%. La orientación, factor también determinante, puede generar una diferencia del ingreso de calor en el orden del 35 al 145%, en la comparativa de muros de igual color y de muro claro versus oscuro respectivamente. La protección total de la radiación solar en el verano, pauta fundamental para nuestra latitud y posible alcanzar con soluciones de bajo costo (árboles,



pérgolas, toldos), posibilita una reducción de hasta el 75% de la ganancia térmica. Para la orientación Norte, frente a la necesidad de aprovechar el sol de invierno y proteger del verano, la solución más conveniente, será usar colores medios y proteger parcialmente el muro.

A modo de ejemplo de la posible reducción de la carga térmica, se pudo verificar que, manteniendo el material de base, ladrillo macizo, es posible reducir la mencionada carga en siete veces, reemplazando un muro LC30 oscuro, por un muro LC15aisl claro, con un incremento del costo del 20%. Si analizamos ambos elementos de color claro la reducción será de tres veces y media. La utilización de nuevos materiales no garantiza la mayor eficiencia del sistema constructivo, aún con costos superiores.

#### **REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA:**

- Gonzalo G (2003). Manual de Arquitectura Bioclimática, 2da. Edición. pp. 222. ISBN 950-43-9028-5.
- Ledesma S.L., Nota V.M., Cisterna M.S., Martínez C.F., Gonzalo G.E. (2014) Condiciones térmicas en aulas de escuelas de Tucumán y la respuesta del usuario. Alternativas de optimización. Actas de la XXXVII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 2, pp. 05.109-05.118. ISBN 978-987-29873-0-52014
- Ledesma S.L., Martínez C.F, Quiñones, G.I.; Llabra, C.; Márquez Vega, S. G.; Mostajo M., Orio S. (2016) Análisis tipológico-ambiental del parque edilicio escolar de Tucumán- IAA-FAU-UNT.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2002) Normas IRAM 11601: Aislamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (1996) Normas IRAM 11.605: Valores máximos de transmitancia térmica para cerramiento opacos.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2012) Normas IRAM 11603: Clasificación bioambiental de la República Argentina.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2000) Normas IRAM 11625: Verificación de riesgo de condensación de vapor de agua.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2007) Normas IRAM 11.659: Acondicionamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en refrigeración.
- Remess Pérez, M. y Winfiel Reyes, F. (2008) Espacios educativos y desarrollo: Alternativas desde la sustentabilidad y la regionalización. Investigación y ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. 42: 45-50.
- Venhaus Held M.I; Alías H. M.; Jacobo G. (s/f) Mejoramiento del desempeño térmico de sistemas de construcción no convencional en el NEA: evaluación y propuesta de atenuación de puentes térmicos. ADNea Revista de Arquitectura y Diseño del Nordeste argentino N°5. ISSN 2347-064X
- Balter J.; Ganem C., Discoli C. (2015) Edificios residenciales en altura. Comportamiento térmicoenergético en construcciones másicas y livianas en la ciudad de Mendoza. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 19, pp.05.23-05.34, 2015. ISSN 2314-1433

#### **THERMAL AND ECONOMIC EVALUATION OF CONSTRUCTION SOLUTIONS FOR BUILDING ENVELOPE IN SAN MIGUEL DE TUCUMAN**

**ABSTRAC:** This paper aims to analyze and evaluate the incidence of design decisions on the thermal behavior of the opaque vertical envelope in school buildings built by the State in San Miguel de Tucumán. For this, with the use of programs developed by the CEEHAS, the evaluation of thermal transmission in different walls construction systems was carried out. The traditional systems were taken as a starting point, evaluated under different design conditions. Constructive solutions that include more recent use materials were also analyzed. The results achieved allow quantifying the incidence of orientation, surface color, use of sunscreens and constructive materialization of the envelope, on the thermal transmission.

**Keywords:** thermal transmission, energy, schools

## DETERMINACIÓN IN SITU DE LA RESISTENCIA TÉRMICA DE MUROS EN EDIFICIOS HISTÓRICOS: MÉTODOS ESTACIONARIO Y DINÁMICOS

Marcos Hongn<sup>1</sup>, Marcelo Valdéz<sup>1</sup>, Silvana Flores Larsen<sup>2</sup>, Camila Gea Salim, Silvina González  
INENCO – Universidad Nacional de Salta – CONICET - Avda. Bolivia 5150, 4400 Salta, Argentina  
Tel. 0387-4255424 – Fax: 0387-4255389  
E-mail: mhongn@unsa.edu.ar

Recibido 16/08/19, aceptado 23/10/19

**RESUMEN:** En los últimos años, el consumo de energía de los edificios se ha convertido en un importante problema mundial. Para evaluar el desempeño energético de los mismos, se requiere una estimación in situ confiable de la resistencia térmica de las paredes (valor  $R$ ). Métodos dinámicos y estacionarios se han probado satisfactoriamente en la determinación de  $R$ , cuando los edificios se encuentran acondicionados (calefaccionados y/o refrigerados). Sin embargo, es escasa la información sobre los métodos aplicados a edificios de funcionamiento libre, en cuanto a los períodos de medición requeridos, la convergencia de los resultados, etc. El presente trabajo tiene como objetivo la determinación de  $R$  a través de medidas in situ, implementando dos métodos dinámicos: *Pentaur* y *Grey Box* (resistor-capacitor) y un modelo estacionario: *Promedio*, para un muro masivo correspondiente a un edificio histórico de la ciudad de Salta y para condiciones aleatorias de funcionamiento (libre). De los resultados obtenidos, cabe destacar que los métodos dinámicos tienen la capacidad de converger, en algunos días, a valores confiables de  $R$  dependiendo del periodo de datos seleccionados y de la correcta configuración en los parámetros de cada método.

**Palabras clave:** resistencia térmica, edificios históricos, funcionamiento libre, método Promedio, métodos dinámicos.

### INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, el consumo energético de los edificios representa más del 30% de la demanda de energía final, el 55% de la demanda eléctrica final y el 26% de las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía (IEA, 2017). El porcentaje de calefacción y refrigeración en dicho sector varía entre el 18% y el 73% en todo el mundo, entre el 35% y el 70% en Europa y del 35% al 40% en América Latina (Ürge-Vorsatz et al., 2015; Atsonios et al., 2017), dependiendo del clima, características del edificio, y uso. La principal estrategia para reducir el consumo destinado a la calefacción/refrigeración de espacios es la mejora de la eficiencia de la envolvente del edificio, en parte cuantificada por la resistencia térmica ( $R$ ). Mientras que en la mayoría de los países en desarrollo, aún no hay restricciones o controles adecuados para los valores  $R$  de paredes y techos, en los países desarrollados los valores  $R$  están limitados por las regulaciones de construcción en edificios nuevos y antiguos renovados. Además, es necesario conocer la resistencia térmica para una variedad de aplicaciones tales como cumplimiento de normas de construcción, etiquetado energético, evaluación térmica post-renovación de envolventes edilicias y como entrada de datos para el modelado del desempeño energético de los edificios. Principalmente, la información de  $R$  proviene de las hojas de datos de los materiales, proporcionadas por los fabricantes, y los estándares de la literatura. Pero, en la práctica, los valores reales pueden ser muy diferentes de los teóricos, principalmente debido a características de construcción desconocidas (como el porcentaje de contenido de mortero), la calidad de la mano de obra, la presencia de huecos y grietas, el contenido de humedad, la degradación del material debido al envejecimiento y la exposición al aire libre, la falta de homogeneidad de las paredes, etc. (Lucchi,

---

<sup>1</sup> Investigador Asistente CONICET

<sup>2</sup> Investigador Adjunto CONICET

2017; Rotilio et al., 2018). Por lo tanto, la medición in situ de valores reales de  $R$  resulta de mayor interés y desde los años 80 ha sido objeto de estudio de muchos trabajos de investigación.

Existen dos enfoques principales para la estimación in situ de  $R$ : métodos cuasi-estacionarios (o métodos Promedio y Promedio Modificado) y dinámicos (redes RC, ARX, Estocásticos, etc.). Ambos enfoques requieren la medición de las temperaturas de las superficies interna y externa y el flujo de calor a través de la pared, durante períodos de varios días. El flujo de calor a través de la pared generalmente se mide del lado interno donde el flujo de calor es más estable que en el lado exterior. En condiciones cuasi-estacionarias, los métodos estandarizados ISO 9869 y ASTM C 1155 son los más utilizados ya que producen resultados confiables en condiciones de medición óptimas (es decir, sin inversiones de flujo de calor y diferencias de temperaturas promedio superiores a 10 °C) y son simples de implementar, sobre todo por usuarios no experimentados. Sin embargo, con frecuencia, la naturaleza intrínsecamente variable de las condiciones meteorológicas hace que no se alcance el estado cuasi-estacionario y éstos métodos no responden adecuadamente (Roulet et al., 1985). Por otro lado, los métodos dinámicos tienen mayor probabilidad de proporcionar resultados confiables, independientemente de las condiciones de medición, a costa de requerir la implementación de algoritmos complejos y de un análisis con más detalle de las series de datos medidos debido a su metodología sofisticada (Atsonios et al., 2017).

Comparativamente, incluso para grandes gradientes térmicos y largos periodos de monitoreo, las mediciones del valor  $R$  de la misma pared utilizando diferentes métodos no siempre estuvieron de acuerdo, como se muestra en la literatura (Atsonios et al., 2017). Gaspar et al. (2016) compararon los métodos ISO promedio y dinámico y concluyeron que ambos funcionan igual de bien cuando las condiciones de medición son óptimas. En el caso de una diferencia de temperatura baja, sólo el método dinámico conduce a resultados confiables. Roulet et al. (1985) comparó métodos promedios y dinámicos y concluyó que los resultados eran estables cuando la temperatura interior era constante antes y durante el período de medición. Deconinck y Roels (2016) compararon los métodos cuasi-estacionarios (Promedio y Promedio Modificado) y los dinámicos (Pentaur, ARX y Estocásticos) para una pared lisa, en cuatro estaciones. Encontraron que los métodos dinámicos tienen un mejor rendimiento en comparación con los otros mencionados y pueden generar estimaciones confiables de resistencia térmica a partir de las mediciones típicas de verano, contrariamente a los métodos semi-estacionarios. Evangelisti et al. (2018) sugirió que la probabilidad de obtener grandes errores aumenta cuando las temperaturas del aire interior presentan grandes variaciones en comparación con la diferencia de temperatura entre ambos lados de la pared o cuando la pared recibe el impacto de la radiación solar u otras influencias térmicas. Recientemente, Flores-Larsen et al., (2019) analizaron el comportamiento de diferentes métodos en la determinación de  $R$ , bajo condiciones de funcionamiento libre. En aquella ocasión, los autores midieron sobre una pared liviana de ladrillo hueco, con orientación norte (asoleada) y en distintas épocas del año. El método Pentaur arrojó los mejores resultados, obteniendo convergencia en todas las series (in-situ y simuladas). La convergencia se entiende como la tendencia a un valor estable de  $R$  (en el tiempo), cumpliendo con ciertos criterios de variabilidad preestablecidos. La correcta selección del rango de datos y de los parámetros, como el tiempo de influencia, son importantes para alcanzar valores representativos de  $R$ .

Las condiciones de medición mencionadas anteriormente, donde las variables monitoreadas dependen solamente de las características de la envolvente del edificio y de las condiciones climáticas externas, sin accionamiento de sistemas de calefacción y/o refrigeración, se denominan de funcionamiento libre. Estas condiciones son las más desfavorables y las más aleatorias en la medición in situ de  $R$ . En los edificios de funcionamiento libre, como los edificios históricos, no es posible, generalmente, mejorar las condiciones de los ensayos mediante el forzamiento de la temperatura interna de los locales ya que las temperaturas de las salas suelen oscilar dentro de un rango controlado. Por ejemplo, Genova y Fatta (2018) resaltaron las dificultades para cumplimentar los requerimientos descritos en ISO 9869 para muros masivos de piedra en un convento en Palermo, Italia. Para determinar la resistencia térmica, los autores llevaron a cabo 16 tandas de medición *in-situ* en periodos de verano e invierno, con periodos de duración entre 6 y 21 días. Los autores también concluyeron que, en algunos casos, a pesar de haber logrado cumplir los criterios de convergencia, los valores de  $R$  para paredes similares diferían mucho entre sí. Otro desafío en los edificios históricos de *funcionamiento libre* es la presencia de la gran masa térmica de paredes con gran espesor. En estos casos, incluso aumentar el período de

medición no garantiza que se logre la convergencia, para el caso de climas templados (Desogus *et al.*, 2011).

En el presente trabajo, se estimó la resistencia térmica de una pared de gran masa térmica correspondiente al Cabildo de la ciudad de Salta, un edificio histórico, para el cual no se dispone de información fehaciente sobre la tipología de sus muros. Para ello, se tomaron mediciones en condiciones de funcionamiento libre, y se implementaron los métodos dinámicos Pentaur (Anderlind, 1996), y Grey Box (modelo tipo circuito eléctrico R-2C), y el modelo estacionario promedio (ISO 9869). La determinación de las propiedades térmicas de las edificaciones históricas es de vital importancia ya que permite dilucidar su tipología constructiva (material constructivo principal) y, en consecuencia, definir las estrategias de acondicionamiento térmico más adecuadas. Las metodologías de medición, las propuestas de aplicación de métodos de estimación de resistencia térmica de materiales, y los resultados de este trabajo son aportes novedosos que contribuirán en la rehabilitación de edificios históricos en la Argentina, como así también, en las tareas de etiquetado de viviendas<sup>3</sup> en un futuro cercano.

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### *Cabildo de Salta*

El Cabildo de Salta, construido alrededor de 1780, es sede actual del Museo Histórico del Norte. Éste se encuentra ubicado frente a la plaza principal de la provincia (fig. 1a). Las tareas de restauración en la década de 1940 pusieron en evidencia la coexistencia de construcciones de distinto tipo y épocas: hay partes de adobe, con muros de gran espesor, otras de ladrillo y gran parte de piedra (Buschiazzo, 1959).



Figura 1: a) Cabildo de Salta, vista de la fachada norte. Muro sensado, b) lado externo y c) lado interno.

Para llevar a cabo el estudio, se colocaron los sensores en el muro de la oficina de investigación y extensión sobre la planta alta de la construcción. Debido a la falta de documentación fehaciente, se desconocen los detalles constructivos del muro analizado. El mismo cuenta con un espesor de 0.63 m y divide el ambiente interno de una galería externa orientada hacia el sur (fig. 1b), por lo que dicha superficie no recibe radiación solar directa. Se presume que los muros de esta ala del edificio están contruidos de adobe, material cuya conductividad térmica varía entre 0.4 y 0.8  $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  dependiendo de su densidad, entre otros factores, Cuitiño *et al.*, (2015).

Las mediciones fueron realizadas durante 26 días, entre el 1 y el 27 de Julio del año 2019. Los registros de datos se tomaron con un intervalo de 15 minutos.

### *Equipos y medición*

<sup>3</sup> <https://www.argentina.gob.ar/energia/ahorro-y-eficiencia-energetica/vivienda/programa-nacional-de-etiquetado-de-viviendas>

Para aplicar los métodos, se requiere del registro de las temperaturas superficiales de la pared (interna y externa) y la tasa de flujo de calor a través de la misma. Las temperaturas se midieron cada 15 minutos con termocuplas tipo K conectados a los dataloggers HOBO U12-014 (12 bits, resolución 0.32 °C, exactitud de 0.40 °C a 30 °C). El flujo de calor a través de la pared se midió con un sensor termoeléctrico de placa Hukseflux HP01 instalado en el lado interno de la pared, fig.1b, y cerca del termopar interno. La resistencia térmica de los sensores de flujo de calor es inferior a  $6.25 \times 10^{-3} \text{ m}^2\text{K W}^{-1}$  y puede considerarse despreciable en relación con la resistencia térmica total de la pared estudiada. La sensibilidad del sensor es de  $61.26 \mu\text{V W}^{-1}\text{m}^2$  y está conectado a un sistema de adquisición de datos NOVUS LOGBOX-AA IP65.

## MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE R

### *Método Promedio (ISO 9869)*

El método Promedio, según lo establecido en la norma ISO 9869, se ha convertido en el método más extendido y aceptado para la caracterización térmica in situ de los elementos de construcción (Rasooli e Itard, 2018). Es un método de estado estacionario basado en el hecho de que el promedio de las temperaturas y los flujos de calor en largos periodos de tiempo de medición anula los efectos transitorios. Para un conjunto de  $n$  mediciones,  $R$  se calcula como:

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n (T_{in,j} - T_{ex,j})}{\sum_{j=1}^n q_j} \quad (1)$$

Donde,  $T_{in,j}$ ,  $T_{ex,j}$ ,  $q_j$  son la  $j$ -ésima medida de la temperatura de la superficie interior, la temperatura de la superficie exterior y el flujo de calor a través de la cara interna de la pared, respectivamente. Este método funciona adecuadamente si la temperatura exterior es siempre más baja (o más alta) que la temperatura interior y si el período de medición es lo suficientemente largo. Generalmente se recomienda una diferencia  $> 10$  °C entre la temperatura interior y exterior (Bienvenido-Huertas et al., 2019).

La norma establece que, para los elementos de construcción de alta capacidad calorífica, el análisis debería realizarse en intervalos de tiempo múltiples enteros de 24 horas, con al menos 72 horas para materiales de construcción ligeros y 96 horas para elementos con grandes capacidades de calor. El cambio en el calor acumulado en la pared no debe ser más del 5% del calor que pasa a través de la pared durante el período de medición. Generalmente, el test termina cuando el valor  $R$  no difiere más del  $\pm 5\%$  del valor obtenido 24 horas antes. Además, la diferencia entre el valor  $R$  obtenido en los primeros 2/3 del tiempo de medición y en los últimos 2/3 del mismo no debe superar el 5%. Si estos criterios se cumplen, es necesario extender el tiempo de medición o bien reiniciarse la toma de datos.

### *Método Pentaur de Anderlind*

El modelo Pentaur se clasifica como un modelo estadístico auto-regresivo con variables exógenas (ARX) desarrollado por Anderlind (1996), aunque el propio Anderlind establece que se trata de un modelo con base física y estadística. Este método establece que las variaciones en el flujo de calor a través de una componente constructiva del edificio puede ser modelada mediante cuatro partes diferentes: una primera parte incluye el comportamiento estacionario en el flujo de calor, mientras que los términos restantes describen las fluctuaciones momentáneas del flujo de calor como respuesta a los cambios de temperatura en ambas caras de la pared y la diferencia en el flujo de calor, todo para tiempos pasados, Así, el flujo de calor estimado se escribe:

$$q_p = \frac{(T_{in,p} - T_{ex,p})}{R} + \sum_{n=1}^k dT_{in,n} A_n + \sum_{n=1}^k dT_{ex,n} B_n + \sum_{n=1}^k dq_n C_n \quad (2)$$

donde  $k$  es el número de pasos de tiempo (pasado) considerados significativos (el "tiempo de influencia", un valor entre 12 y 48 horas),  $q_p$  es la densidad del flujo de calor estimada en el tiempo  $t_p$  ( $p > k$ ),  $T_{in,p}$  y  $T_{ex,p}$  son las temperaturas de la superficie interior y exterior en el tiempo  $t_p$ , respectivamente,  $dT_{in,n}$ ,  $dT_{ex,n}$  y  $dq_n$  son la diferencia de temperatura interior, exterior y flujo de calor, respectivamente, entre los dos tiempos consecutivos  $t_{n-1}$  y  $t_n$ . Los parámetros a determinar son

$R^{-1}, A_n, B_n, C_n$  (1+3k parámetros). La técnica de regresión lineal con múltiples variables, explicada claramente en Coelho-Barros et al., (2008), es implementada para resolver el conjunto anterior de ecuaciones y encontrar los coeficientes desconocidos, incluida la resistencia térmica  $R$ . La evidencia muestra que el modelo Pentaur es efectivo en la mayoría de los casos experimentales, incluso en paredes multicapa no simétricas con alta masa térmica (Anderlind, 1996), o cuando el flujo de calor es muy bajo, por ejemplo, en verano (Anderlind, 2017). En este trabajo, se consideró que la convergencia de los métodos dinámicos se alcanza cuando al menos transcurrieron 72 horas de medición, cuando el valor de  $R$  en el tiempo  $t_p$  difiere en menos de  $\pm 5\%$  del valor 24 horas antes, y, además, el coeficiente de variación (conocido también como la desviación estándar relativa) en un periodo de tres días consecutivos debe ser menor al 5% (acorde a lo establecido en norma ISO), Atsonios et al., (2017). La programación de estos dos primeros métodos se realizó en Python 3.6.

#### Método Grey Box para un circuito del tipo R2C

Los modelos de redes RC simplifican la descripción de la transferencia de calor en un espacio mediante la consideración del calor transferido entre nodos en un circuito eléctrico equivalente. Estos circuitos incluyen resistencias y capacitores (capacidad térmica del elemento) en diferentes configuraciones para representar el equivalente térmico. Seem (1987) propuso una configuración sencilla R2C para describir el comportamiento térmico de un muro simple, indicado de manera esquemática en la fig. 2. En este caso, el muro de espesor  $e(m)$ , conductividad térmica  $k (Wm^{-1}K^{-1})$ , densidad  $\rho (kg m^{-3})$  y calor específico  $c_p (J kg^{-1}K^{-1})$  se representa mediante dos nodos con un capacitor en cada uno (donde  $C \left(\frac{J}{m^2K}\right) = \rho c_p e$ ), y una resistencia  $R \left(\frac{m^2K}{W}\right) = \frac{e}{k}$  conectando ambos nodos. Este mismo modelo puede obtenerse partiendo de la ecuación de calor unidimensional, al aplicar diferencias finitas a las derivadas espaciales de la densidad de flujo. Si se considera una discretización del muro con un único nodo interior y un nodo sobre cada una de las caras se puede mostrar que para el nodo en la cara interior se obtiene lo siguiente:

$$\frac{dT_{in}}{dt} = -\frac{T_{in} - T_{ex}}{RC} + \frac{q_{in}''}{C} \quad (3)$$

Esta ecuación diferencial, fija la estructura matemática del modelo, pero contiene los parámetros desconocidos  $R$  y  $C$ , los cuales serán estimados empíricamente, ajustando los datos de las mediciones. Este método es en consecuencia un método de caja gris (Grey Box Modeling). El ajuste de los parámetros  $R$  y  $C$  se realizó mediante el System Identification Toolbox<sup>4</sup> de Matlab, el cual posee funciones especiales para el modelado con caja gris. En la ec. (3) la variable estimada es  $T_{in}$ , conocidas las entradas  $T_{ex}$  y  $q_{in}''$ . Esto difiere del modelo Pentaur el cual estima los valores de  $q_{in}''$ . Distintos valores de  $R$  y  $C$  se obtienen ajustando el modelo a series de datos progresivamente más grandes. Esto permite analizar la sensibilidad de los parámetros a la cantidad de datos empleados. Los criterios de convergencia de estos parámetros son los descritos en el apartado anterior.

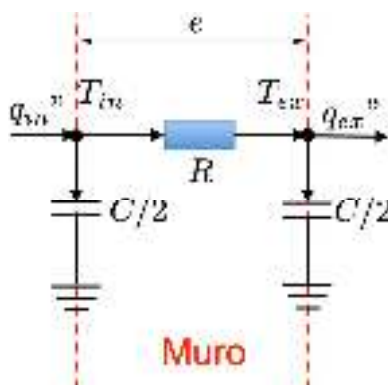


Figura 2: Circuito R2C para caracterizar la transferencia de calor en un muro simple, Seem (1987).

<sup>4</sup> <https://au.mathworks.com/help/ident/grey-box-model-estimation.html>

## RESULTADOS

De los 2950 datos registrados, como lo indica la fig. 3, se utilizaron los registros desde el sexto día de medida (pintados en amarillo). Esta selección tiene lugar desde el punto de vista de la estabilidad y convergencia de los métodos, ya que los resultados presentan mayor exactitud cuando los datos, con los que se determinan los parámetros, presentan mayor uniformidad. Al inicio de la tanda de medida, se observa intermitencia entre días soleados y nublados, y probablemente el encendido de calefacción auxiliar (calo-ventor) hasta el 4to o 5to día. Luego, y como se pretende medir bajo condiciones de aleatoriedad (funcionamiento libre), se observa una secuencia de varios días despejados (en donde no se encendió la calefacción debido al poco uso de la oficina) por lo que se aplican los métodos desde el rango mencionado. Cabe mencionar que, una vez alcanzada la convergencia, se almacenan los parámetros  $R$  y  $C$ , según el modelo, y se procede a validar los resultados empleando el rango de datos desde el día de convergencia hasta el final de los datos. De la fig. 3, los periodos de validación se establecen desde la línea vertical punteada negra, para Pentaur, y desde la línea punteada gris, para R2C. Por otro lado, el método Promedio no permite realizar un contraste entre datos medidos y simulados debido a su formulación.

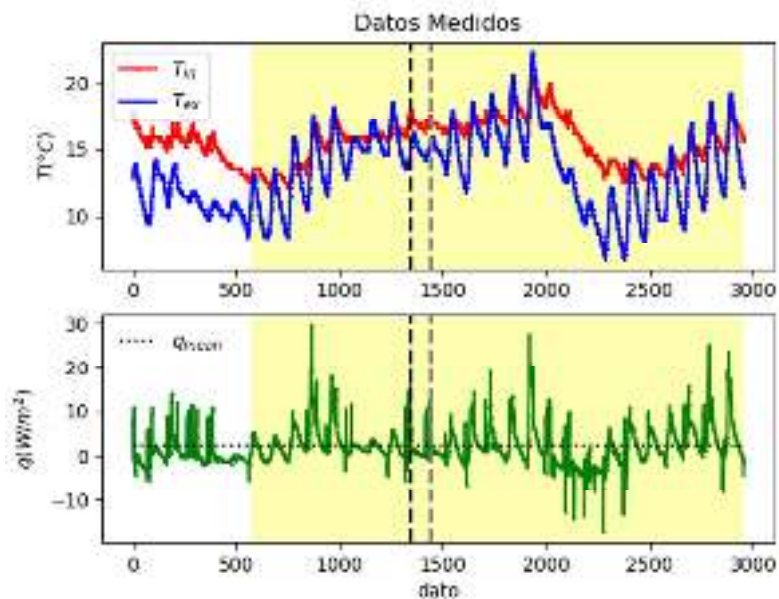


Figura 3: Datos medidos: temperaturas interna y externa sobre superficie, arriba, y tasa de flujo de calor, abajo. Días de convergencia (líneas verticales): en negro Pentaur y en gris R2C.

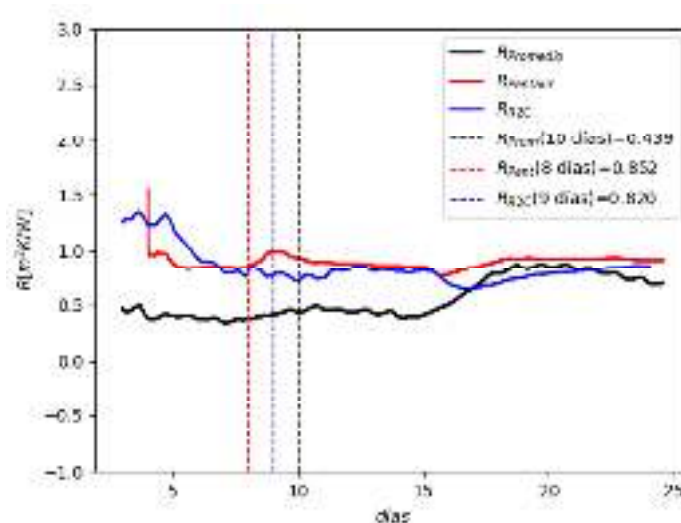


Figura 4: Valores de  $R$  obtenidos con los diferentes métodos: Promedio (curva negra), Pentaur (curva roja) y R2C (curva azul). Los días de convergencia se representan mediante líneas punteadas verticales.



La evolución de los valores de  $R$ , determinados con cada modelo, se muestran en la fig. 4. El modelo Pentaur converge luego de 8 días a un valor de  $0.852 \text{ m}^2\text{K W}^{-1}$ . Las fluctuaciones del día 9 y 17 se deben a los cambios abruptos en la tendencia de los datos (condiciones meteorológicas), esto se repite en los otros modelos. En este caso, para el modelo Pentaur se empleó un tiempo de influencia de 24 horas con una frecuencia de 4 datos por hora. Este tiempo de influencia puede incrementarse a 36 horas, ya que la pared posee gran masa, ganando exactitud en la predicción, pero alcanzando la convergencia en 12 días. El modelo R2C, resuelto con el método *grey box*, estima un valor de resistencia de  $0.820 \text{ m}^2\text{K W}^{-1}$  convergiendo luego de 9 días, según los criterios establecidos en el apartado anterior. Éste modelo, además, estima valores de capacidad térmica. Se determinó un valor de  $C = 7.29 \times 10^5 \text{ J m}^{-2}\text{K}$ , al alcanzar la convergencia mencionada. El valor teórico de  $C$  puede encontrarse en un rango entre  $6.8$  y  $8.5 \times 10^5 \text{ J m}^{-2}\text{K}$ , para densidades entre  $1300$  y  $1600 \text{ (kg m}^{-3}\text{)}$ , para una capacidad calorífica de  $840 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ . El método Promedio, por otro lado, llega a la convergencia luego de 10 días, alcanzando un valor de  $0.439 \text{ m}^2\text{K W}^{-1}$ . La inversión en la dirección del flujo de calor a través de la pared (valores positivos y negativos) es la principal causa de la significativa subestimación del valor de  $R$  a través del método Promedio, ya que no es recomendable su aplicación en tales condiciones. Sin embargo, entre los días 17 y 21, donde el flujo de calor se mantuvo negativo (sin cambiar dirección), el método estima valores de  $R$  similares a los métodos dinámicos. Cabe destacar también, como se mencionó con anterioridad, que los criterios de convergencia entre los métodos dinámicos y estacionarios, difieren en rigurosidad.

Los métodos dinámicos indicarían que el material del muro es adobe, donde el valor de resistencia térmica teórica puede variar entre  $0.79$  y  $1.0 \text{ m}^2\text{K W}^{-1}$  suponiendo una conductividad térmica entre  $0.6$  y  $0.8 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ , para un espesor de  $0.63 \text{ m}$ .

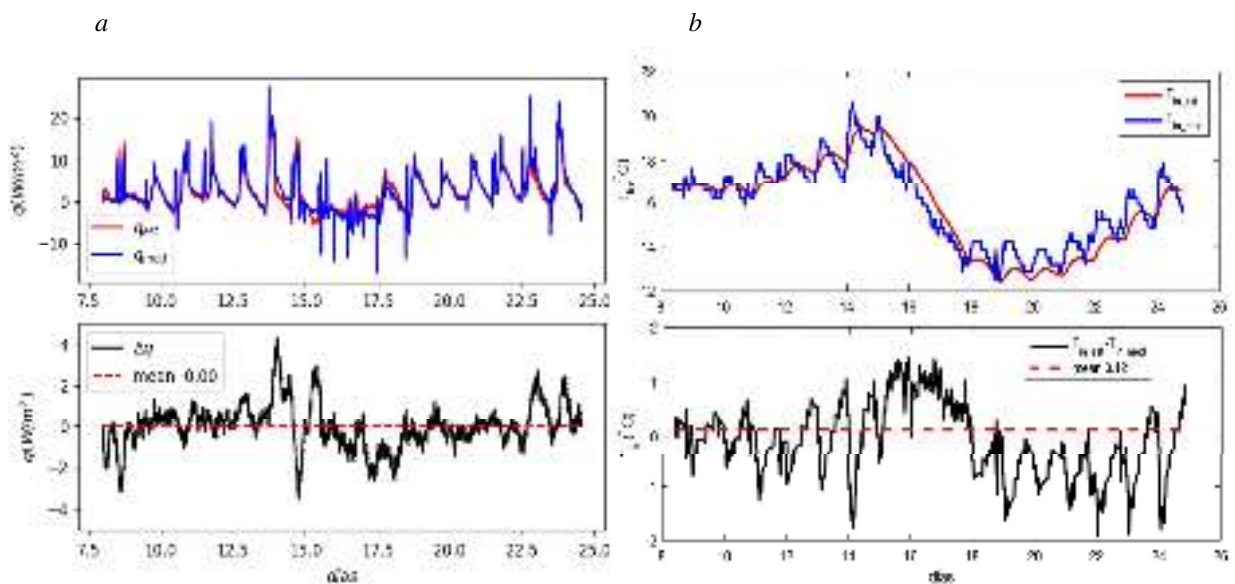


Figura 5: Contraste entre datos medidos versus estimados, a) tasa de flujo de calor, estimada con Pentaur (rojo) y medida (azul), en b) temperatura superficial interna estimada con el modelo R2C (rojo) y medida (azul).

El ajuste entre datos simulados, mediante los métodos dinámicos, y los datos experimentales se muestra en la fig. 5. Cualitativamente, se puede observar que el modelo Pentaur reproduce adecuadamente los datos experimentales obtenidos, cuando  $R$ , en la ec. (2), se fija en el valor de convergencia ( $0.852 \text{ m}^2\text{K W}^{-1}$ ). Además, en el periodo de validación (fig. 5a-inferior), se observa que el promedio del error en el flujo de calor estimado es cero, siendo este error más significativo en los periodos con mayor variación de las condiciones meteorológicas (cercano al día 15). El adecuado ajuste se verifica cuantitativamente desde los parámetros estadísticos mostrados en tabla 1.

Si bien el método de resolución por medio de caja gris implica conocer y desarrollar las ecuaciones físicas, la simplicidad de la red térmica R2C da lugar a valores estimados de temperatura interna superficial con una exactitud menor al caso anterior. El modelo tiene sus fundamentos en la implementación de excitaciones sinusoidales (temperatura superficial y flujo de calor) para la

determinación de los parámetros característicos de la red  $R$  y  $C$ . Esto da lugar a que los valores simulados capturen la tendencia de la temperatura medida, aunque no es posible representar la evolución detallada de la misma, fig. 5b. Aun así, el ajuste es aceptable y el valor de la resistencia térmica que se determinó es confiable. El grado de ajuste entre las series de datos, se describe en término de los parámetros estadísticos *raíz del error cuadrático medio normalizado* (NRMSE), *coeficiente de correlación* (Corr) y *desvío estándar relativo* (STDr), para el rango de datos utilizados para validación (una vez alcanzada la convergencia). Estos valores se presentan en la tabla 1. Los indicadores estadísticos empleados se definen en las ecs. (4), (5) y (6) a continuación:

$$\text{NRMSE} = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

$$\text{Corr} = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{N\sigma_x\sigma_y} \quad (5)$$

$$\text{STDr} = \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \quad (6)$$

Donde  $x_i$  e  $y_i$  son los valores estimados y medidos, respectivamente,  $\bar{x}$  es el valor medio de las estimaciones e  $\bar{y}$  el valor medio de las observaciones, mientras que  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$  son las desviaciones estándar de las estimaciones y mediciones, respectivamente.

	<i>Promedio</i>	<i>Pentaur</i>	<i>Grey Box</i>
R (m <sup>2</sup> K/W)	0.439	0.852	0.820
C (J/m <sup>2</sup> K)	-	-	7.29x10 <sup>5</sup>
Días para Convergencia	10	8	9
Validación (una vez alcanzada la convergencia)			
NRMSE	-	0.77	0.62
Corr	-	0.97	0.94
STDr	-	0.97	1.13

Tabla 1: Resumen de los resultados y análisis estadístico del periodo de validación.

## CONCLUSIONES

Se propusieron dos modelos dinámicos como Pentaur y red térmica R2C-*grey box*, y el modelo estacionario (método Promedio) establecido por la norma ISO 9869, para estimar la resistencia térmica de un muro de gran masa térmica. Basado en la similitud de valores de  $R$  obtenido con los métodos dinámicos, y el nivel de confianza en el modelo Pentaur, el cual ha sido probado con éxito en otras tipologías constructivas, se puede conjeturar que el muro monitoreado está construido en su mayoría con bloques de adobe. Se observó que el método promedio converge en 10 días a un valor más pequeño de lo esperado, esto se debe a las condiciones altamente fluctuantes en las temperaturas superficiales y flujo de calor. Por esto, la convergencia del método estacionario no asegura la obtención de un valor confiable de  $R$  en esta situación y no se recomienda la implementación de éste método bajo condiciones de funcionamiento libre. El método Pentaur obtiene un valor confiable de resistencia térmica con la menor cantidad de datos experimentales (convergencia en 8 días). Para el periodo de validación, los datos simulados ajustan adecuadamente los datos medidos a juzgar por los valores de correlación y desvío estándar relativo obtenidos. Por otro lado, el modelo de caja gris (R2C), además de la resistencia térmica, estima la capacidad térmica del material, asociada con su densidad y calor específico. Este modelo converge al valor de  $R$  luego de 9 días de medición. La simplicidad en la configuración de la red térmica hace que sólo dos parámetros,  $R$  y  $C$ , sean necesarios para describir el fenómeno de transmisión de calor en el muro, en contraste con modelo Pentaur que requiere 289 parámetros siendo sólo uno de ellos de interés ( $1/R$ ). Los valores de resistencia térmica obtenidos con los modelos dinámicos se encuentran dentro del rango teórico estipulado para el adobe, inclusive el valor de capacidad térmica determinado con el modelo de caja gris. No es posible la comparación de los valores estimados a partir de un valor teórico ya que no se dispone de la

información constructiva del muro. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, el modelo Pentaur ha sido verificado en condiciones similares en otros muros por lo que brinda confianza sobre el valor de resistencia obtenido. Además, el modelo R2C también arrojó valores similares.

Por último, se destaca que la importancia de este trabajo radica en que sienta un precedente sobre la utilización de los métodos de estimación (mostrando cuales son adecuados y cuales no) y la metodología de medición en condiciones libres para muros de gran masa térmica. Se muestra que ambos métodos dinámicos requieren al menos 10 días de mediciones para obtener un valor confiable de resistencia térmica. Este trabajo puede constituir una referencia importante para las tareas de relevamiento de construcciones cuyo tipo constructivo es desconocido (tales como los edificios históricos) y así beneficiar a otras actividades que requieren la información obtenida (reacondicionamiento de edificios, etiquetado energético, etc.) Por ejemplo, los resultados de este trabajo pueden emplearse para acotar los tiempos de medición en base al tiempo de convergencia de métodos dinámicos.

Como trabajo futuro, se propone la implementación de redes neuronales (caja negra) para captar con detalle el comportamiento térmico de la pared frente a cambios en las temperaturas superficiales, el entrenamiento se deberá realizar mediante algún modelo propuesto para obtener, finalmente, la resistencia térmica que se encontrará implícita en los resultados.

## AGRADECIMIENTOS

El trabajo se desarrolló en el marco del proyecto CIUNSa-B N°2575: “Modelación y experimentación de sistemas de refrescamiento por acumulación estructural orientados a mejorar la eficiencia energética en edificios”.

## REFERENCIAS

- Anderlind G. (1996). GullfibR and Pentaur Models Two Models for Analysing In Situ Thermal Measurements on a Construction with One-dimensional Heat Flow. Proceedings of Building Physics'96, Espoo, Finland, September 9-10, 1996.
- Anderlind G. (2017). Comparison of two methods for analyzing in situ thermal measurements. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/318307463\\_Comparison\\_of\\_two\\_methods\\_for\\_Analyzing\\_In\\_Situ\\_Thermal\\_Measurements](https://www.researchgate.net/publication/318307463_Comparison_of_two_methods_for_Analyzing_In_Situ_Thermal_Measurements)
- Atsonios I.A., Mandilaras I.D., Kontogeorgos D.A., Founti M.A., (2017). A comparative assessment of the standardized methods for the in-situ measurement of the thermal resistance of building walls, *Energy Build.* 154, 198–206.
- Bienvenido-Huertas D., Moyano J., Marín D., Fresco-Contreras R., (2019). Review of in situ methods for assessing the thermal transmittance of walls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 102, 356–371.
- Buschiazzo M, (1959). Argentina: Monumentos históricos y arqueológicos. Instituto Panamericano de Geografía e Historia. Vol XI.
- Cohelo Barros E., Angeloti P., Achcar J., Zangiacomini E., Shimano A. C., (2008). Métodos de estimação em regressão linear múltipla: aplicação a dados clínicos. *Revista Colombiana de Estadística*, vol. 31, no. 1, pp. 111-129.
- Cuitiño, G., Esteves, A., Maldonado, G., Rotondaro, R., (2015). Análisis de la transmitancia térmica y resistencia al impacto de los muros de quincha. *Informes de la Construcción*, 67(537): e063, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.12.082>.
- Deconinck A., Roels S., (2016). Comparison of characterisation methods determining the thermal resistance of building components from onsite measurements. *Energy and Buildings* 130, 309–320.
- Desogus, G., Mura, S., Ricciu, R., (2011). Comparing different approaches to in situ measurement of building components thermal resistance. *Energy and Buildings* 43 (10), 2613–2620.
- Evangelisti L. Guattari C., Asdrubali F., (2018). Influence of heating systems on thermal transmittance evaluations: Simulations, experimental measurements and data post-processing. *Energy & Buildings* 168, 180–190.

- Flores-Larsen S., Hongn M., Castro N., González S., (2019). Comparison of four in-situ methods for the determination of walls thermal resistance in free-running buildings with alternating heat flux in different seasons. *Construction and Building Materials* 224, 455-473.
- Gaspar K., Casals M., Gangolells M., (2016). A comparison of standardized calculation methods for in situ measurements of facades U-value. *Energy and Buildings* 130, 592–599.
- Genova E., Fatta G., (2018). The thermal performances of historic masonry: In-situ measurements of thermal conductance on calcarenite stone walls in Palermo. *Energy & Buildings* 168, 363–373.
- IEA, (2017). International Energy Agency. Energy technology perspectives 2017. Catalysing Energy Technology Transformations. OECD/IEA 2017.
- ISO 9869 (2014). Thermal Insulation—Building Elements—In-Situ Measurements of Thermal Resistance and Thermal Transmittance, International Organization for Standardization, Geneva, 2014.
- Lucchi E., (2017). Thermal transmittance of historical stone masonries: a comparison among standard, calculated and measured data, *Energy Build.* 151, 393–405.
- Rasooli A., Itard L., Ferreira C.I., (2016). A response factor-based method for the rapid in-situ determination of wall's thermal resistance in existing buildings, *Energy Build.* 119, 51–61.
- Rotilio M., Cucchiella F., De Berardinis P., (2018). Thermal Transmittance Measurements of the Historical Masonries: Some Case Studies. *Energies*, 11(11), 2987.
- Roulet C., Gass J., Markus I., (1985). In-situ U-value measurement: reliable results in shorter time by dynamic interpretation of measured data, in: *Buildings III Conference*. <https://web.ornl.gov/sci/buildings/conf-archive/1985%20B3%20papers/057.pdf>
- Ürge-Vorsatz D., Cabeza L.F., Serrano S., Barreneche C., Petrichenko K., (2015). Heating and cooling energy trends and drivers in buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 41, pp. 85-98.

## ABSTRACT

In recent years, buildings' energy consumption has become a major global issue. In order to assess the actual energy performance of buildings, a reliable in-situ estimation of the thermal resistance of walls (R-value) is required. In conditioned buildings, there are many well-known steady and dynamic methods to determine R-value. Nevertheless, in free-running buildings, there is no much information about the usefulness of the different available methods, the required measuring periods, convergence, etc. The objective of this work is to determinate the R-value for a massive wall in a historical building for free-running conditions, employing two dynamics methods: Pentaur and Grey Box (resistor-capacitor model) and the Average stationary method indicated in ISO 9869. From the obtained results, it can be said that the dynamic methods reached convergence in few days to reliable R-values, depending on the period of data selected and the correct setting of the parameters for each model.

**Keywords:** Thermal resistance, historical buildings, free-running building, average method, dynamic methods.

## **CONFORT TÉRMICO EN AULAS ESCOLARES DEL TRÓPICO, A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE DISEÑO BIOCLIMÁTICAS PASIVAS**

**Montoya Olga <sup>(1)</sup>, Viegas Graciela <sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup> Programa de Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Arte y Diseño (FAAD). Universidad de San Buenaventura, Cali. Avenida 10 de mayo, La Umbría, vía a Pance. C.P. 76001. Colombia.

Tel: 057-2-4882222 ext. 8059. E-mail: [olmontoy@usbcali.edu.co](mailto:olmontoy@usbcali.edu.co)

<sup>(2)</sup> Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC-CONICET/UNLP).

Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU), Universidad Nacional de La Plata (UNLP)

Calle 47 N°162, La Plata, C.P. 1900 – Prov. de Buenos Aires

Tel. 0221-4236587/90 int. 250.e-mail: [gachiviegas@yahoo.com.ar](mailto:gachiviegas@yahoo.com.ar)

*Recibido 15/08/19, aceptado 23/10/19*

**RESUMEN:** El presente trabajo tiene por objetivo evaluar el confort térmico alcanzado en un aula típica de escuela localizada en Cali, Colombia, a partir de la aplicación de estrategias bioclimáticas pasivas. La escuela fue construida siguiendo los parámetros establecidos en la Norma Técnica Colombiana (NTC) 4595. Se pretende determinar su pertinencia como documento normativo que regula el diseño y la construcción de los establecimientos educativos del país. La metodología desarrolla: i. modelos de simulación térmica del aula prototípica en EnergyPlus 8.7, tanto en el estado de base como luego de la aplicación de 15 estrategias de diseño; y, ii. La evaluación del confort térmico alcanzado a partir de aplicar dichas estrategias bajo el modelo de confort adaptativo (ASHRAE55). Se pudo concluir que todas las estrategias resultaron dentro del rango de confort, sin embargo, se identifican algunas estrategias que se podrían incluir y otras modificar, con el fin de conseguir un mejor desempeño térmico.

**Palabras clave:** confort térmico adaptativo, aulas escolares, clima tropical, estrategias de diseño, simulación térmica.

### **INTRODUCCION**

La educación se ha convertido en factor clave para el desarrollo de los países y es cada vez más imperiosa la necesidad de transformar no sólo la estructura curricular sino las formas organizacionales, de planificación y gestión de todas las actividades. Asimismo la brecha entre la oferta y la demanda respecto a edificios escolares es grande y no puede ser solucionada sólo por el aumento cuantitativo. Una de las soluciones es el mejoramiento cualitativo del parque existente, según los recursos técnicos, económicos y sociales, con los que se cuenta (San Juan, 2009).

Se asume que la arquitectura escolar debe responder a dos aspectos fundamentales para lograr un ambiente saludable: lograr buenas condiciones de confort y obtener un nivel de eficiencia energética óptimo (tendiente al mínimo consumo, con el máximo de calidad). Respecto a las condiciones de confort, deben ser coherentes con la actividad realizada, proporcionando un bienestar deseable. Si nos remitimos al ambiente escolar, se considera que la mejor condición del ambiente, redundando en una mejor relación enseñanza-aprendizaje, en la disminución de problemas fisiológicos y en el aumento de la productividad escolar (Niclas y Bailey, 1996). Respecto a la eficiencia energética en edificios escolares (relacionada al uso de los recursos escasos, principalmente los energéticos no renovables), se entiende que los distintos espacios componentes de una escuela (salón de usos múltiples, circulaciones, aulas, administración, etc.) son demandantes de una cierta calidad ambiental, lo que implica demandas energéticas distintas y acciones proyectuales diferentes o similares. Pero la demanda de calidad y energía en el “sector aulas” es la principal (puede llegar al 60% o más del total del edificio). Es por ello que se considera el ámbito de mayor diseño. En este sentido, los países cuentan con normativas y directrices que generan recomendaciones de diseño y parámetros mínimos y máximos a cumplir para alcanzar ciertos niveles de confort y comodidad en los edificios escolares. Si

---

<sup>1</sup> Investigador FAAD-USB.

<sup>2</sup> Investigador Independiente CONICET-UNLP.

nos remitimos al caso del diseño de edificios escolares en Colombia, la norma NTC 4595: *Ingeniería Civil y Arquitectura. Planeamiento y diseño de instalaciones y ambientes escolares*, la misma establece las condiciones de comodidad térmica, visual y auditiva de los espacios destinados a la educación. En este marco, en relación a la comodidad térmica, la normativa se enfoca en la morfología y la constitución de los edificios, apuntando a que no se utilicen equipos mecánicos especializados para lograr que la mayoría de las personas no consideren el clima como factor perturbador del desarrollo de sus actividades (NTC, 2006). Esta norma establece ciertos parámetros de interés, diferenciados por tipo de climas: básicos: moderado, frío y templado, cálido seco y cálido húmedo; algunos de ellos generales, principalmente en cuanto a la ventilación y protección solar. Por un lado establece que el área efectiva de aberturas óptima para ventilar debe ser entre 1/6 y 1/9 del área de la planta del espacio a ventilar, para las aulas de los climas cálido húmedo y seco respectivamente. Por otro lado propone una clasificación climática bastante confusa, la cual fue tratada en profundidad en trabajo anterior (Zapata et al., 2018).

Para el clima de Cali, el cálido húmedo, la norma ofrece indicaciones de orientación de las aberturas para que el viento incida con ángulos entre 30° y 90° para su aprovechamiento, y en caso contrario, recomienda la instalación de elementos como aletas que ayuden a direccionarlo. Se promueve la ventilación natural de manera constante y homogénea a través de ventanas, celosías puertas abiertas entre otros; preferiblemente tomada de espacios exteriores o patios. En cuanto a la protección de la radiación solar, se recomienda orientar la mayor cantidad de aberturas y superficies de manera perpendicular al eje norte-sur. Además de contar con aleros y otros elementos que prevengan el ingreso directo de los rayos solares. Por otro lado, se recomiendan materiales que presenten un porcentaje de factor de ganancia de calor solar (o ganancia solar incidente), siendo de 7.5% para las superficies hacia el norte y sur; de 5% las superficies con orientaciones diferentes; y de 4% para la cubierta. En esta última se recomienda la aparición de cielorraso con cámara de aire. Más allá de los criterios sobre ventilación y protección de la radiación solar planteados, no especifica rangos de confort o metodología para su análisis, tema de interés en el diseño de espacios educativos.

La palabra Confort, se refiere a un estado ideal del hombre que supone una situación de bienestar y salud, en un ambiente donde no exista molestia ni distracción que lo afecte física o mentalmente. Esta sensación compleja, depende por un lado de la sensibilidad de cada persona, así como de la actividad que desarrolla a partir de factores físicos, fisiológicos, sociológicos y psicológicos, en donde el cuerpo humano se siente cómodo y en equilibrio con su entorno. La organización Mundial de la Salud (OMS, 1964), lo define como “un estado de completo bienestar físico, mental y social”. El confort térmico en escuelas se comenzó a investigar en países con estaciones climáticas diferenciadas, en donde las condiciones de confort se dan, la mayor parte del año, gracias a sistemas mecánicos de climatización. Esta situación es diferente a los entornos ventilados naturalmente. Varias investigaciones se han dado a la tarea de comparar la sensación térmica de las personas en aulas con aire acondicionado y ventiladas naturalmente (Kwok, 1997; Tablada et al., 2005), demostrando que hay mayor exigencia térmica (menores temperaturas), en las personas habituadas a espacios con aire acondicionado, frente a las que habitan espacios sin climatización artificial.

En este sentido la *Norma Técnica Colombiana 5316: Condiciones Ambientales Térmicas de Inmuebles para Personas* (ICONTEC, 2004), idéntica traducción (IDT) de la norma ASHRAE 55 (Standard, 2017), reglamenta las condiciones de confort en edificaciones. Define para Colombia un rango de confort para verano de  $22.5\text{ }^{\circ}\text{C} < \text{Temperatura Operativa } (T_o) < 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 60 % HR, y unidad de tasa metabólica (met)  $\leq 1.2$ , donde se acepta como máximo el 10 % de la población insatisfecha. Por su parte, el standard ASHRAE 55 retoma la escala de sensación térmica y establece dos métodos para determinar el confort térmico de los edificios.

Se considera entonces, muy importante generar auditorías ambientales y simulaciones térmicas para identificar los niveles reales de los parámetros involucrados, en función de lo establecido por las normativas nacionales e internacionales vigentes, y de esta manera arribar a conclusiones y recomendaciones que colaboren en el diseño de edificios escolares nuevos o existentes (Retrofit). En particular las simulaciones térmicas son una herramienta que permite conocer la situación de base de las condiciones de confort, y realizar modificaciones para mejorar dichas condiciones. La etapa de simulación, implica realizar modelos edilicios teóricos a partir de un programa de simulación térmica denominado EnergyPlus<sup>(3)</sup>. La utilidad del modelo radica en que se pueden evaluar diferentes

---

<sup>3</sup>[http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/?utm\\_source=EnergyPlus&utm\\_medium=redirect&utm\\_campaign=EnergyPlus%2Bredirect%2B1](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/?utm_source=EnergyPlus&utm_medium=redirect&utm_campaign=EnergyPlus%2Bredirect%2B1)

alternativas de mejoramiento si correspondiera. Una vez desarrolladas las simulaciones es posible evaluar el comportamiento de cada edificio ante la modificación de variables como la orientación, las características constructivas, el control de la ganancia solar, y la aplicación de medidas de acondicionamiento de la envolvente y mejoramiento de la ventilación, entre otros.

Si bien en Colombia, existen antecedentes de trabajo sobre el confort térmico en aulas (Zapata et al., 2018; Montoya y San Juan, 2018), no se observan suficientes estudios sobre la temática mencionada. En este marco, el objetivo de presente trabajo es evaluar el confort térmico de un aula prototípica de una escuela de Cali, Colombia, a partir de la aplicación de las estrategias de diseño que propone la norma colombiana NTC4595 en un modelo de simulación térmica transitoria de la misma.

## METODOLOGÍA

El presente análisis se realizó sobre una escuela localizada en la ciudad de Cali, representativa del universo de análisis. En Cali la temperatura promedio ronda los 24°C, con variaciones durante el día y la noche entre 17 y 34°C. El clima cuenta con dos estaciones al año: una estación seca en los meses de diciembre a febrero y en julio y agosto; el tiempo de lluvias se desarrolla durante los meses de marzo a mayo y entre septiembre y noviembre. La humedad relativa del aire es menor del 70% durante los meses secos y en los meses de más lluvia puede alcanzar un máximo de 76%. Durante un año, la época más ventilada puede durar 4 meses y se da entre los meses de octubre y febrero con velocidades promedio del viento de más de 5,2 kilómetros por hora. La dirección predominante promedio también varía durante el año, sin embargo, los vientos del norte y el noreste se repiten durante todo el año.

Desde el punto de vista de la infraestructura, se trabajó con una escuela de gestión oficial que hubiera sido construida después del año 2000, garantizando así que siguiera los parámetros arquitectónicos y de uso de la Norma Técnica Colombiana (NTC) 4595 previamente mencionada, que entró en rigor en el año 1999. Cabe aclarar que este trabajo es parte de una investigación que se fundamenta en la observación y evaluación ambiental de aulas que han sido construidas siguiendo los parámetros establecidos en dicho documento, con el objetivo de definir, entre otras cosas, su pertinencia como documento normativo que regula el diseño y la construcción de los establecimientos educativos del país.

En la escuela analizada se eligió un aula con condiciones y acomodación típica, basándonos en la premisa de que en Colombia aún se aplica un modelo educativo con pedagogías tradicionales de tipo magistral. El aula es utilizada por niños entre 5to y 6to grado en cualquier horario y está ubicada en un piso superior, con cubierta expuesta a la radiación solar.

Como antecedente al presente trabajo, se realizaron auditorias térmico energéticas sobre la escuela caso de estudio y se observó que las mediciones realizadas por más de un mes dieron como resultado temperaturas promedio al interior de las aulas entre 19°C y 31°C en el mes de agosto. En el caso de la humedad relativa, presentó valores que superaron el 80%. Las temperaturas interiores en las aulas aumentaban a partir de las 7:00 aproximadamente, y alcanzaban su mayor valor entre las 13:00 y las 16:00 hs.

Para el desarrollo del trabajo se realizó el modelo de simulación en base a un conocimiento previo y real de la escuela, para evaluar en una situación denominada caso base. El ajuste del modelo se logra gracias a la ventilación natural; la correlación entre el modelo simulado y el aula medida in situ se presenta en la primera parte de los resultados. En una etapa posterior se propusieron medidas de mejoramiento las cuales fueron evaluadas bajo el modelo de confort adaptativo estipulado en el estándar ASHRAE55.

El modelo adaptativo, se basa en la temperatura promedio exterior, y se aplica exclusivamente para espacios ventilados naturalmente. Las ecuaciones para determinar el límite superior (1) y el inferior (2), en el que el 80% de los ocupantes estarán en To de confort bajo el modelo adaptativo, se presentan a continuación (ANSI/ASHRAE Standard 55-, 2017):

$$1) \text{ Aceptabilidad superior al 80\%} = 0.31 * \overline{T_{pma(out)}} + 21.3$$

$$2) \text{ Aceptabilidad inferior al 80\%} = 0.31 * \overline{T_{pma(out)}} + 14.3$$

Dónde:  $\overline{T_{pma(out)}}$  = Temperatura promedio mensual exterior



La misma versión del ASHRAE propone como definición para la temperatura operativa-  $T_o$ , como el promedio de las temperaturas medias radiantes y la temperatura interior, ponderadas por el coeficiente de transferencia de calor. Y para su identificación, la siguiente ecuación (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**):

$$1) \quad T_o = A * T_a + (1 + A)T_{mr}$$

Dónde:  $T_o$ = Temperatura operativa;

$T_a$ = Temperatura del aire/

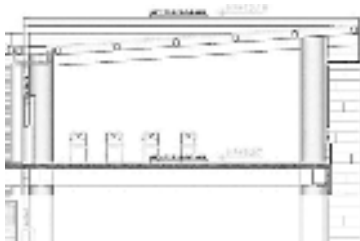
$T_{mr}$ = Temperatura media radiante

$A$  (valor en función de la velocidad del aire) = 0.5 (si <0.2m/s); = 0.6 (0.2 a 0.6 m/s); = 0.7 (0.6 a 1.0 m/s).

En la documentación del software EnergyPlus se explica en detalle las formulas seguidas para identificar la tanto la  $T_o$  como la  $T_{mr}$  basadas en la norma ASHRAE (Big Ladder Software LLC, n.d., 2019). Una vez descriptos los tipos de modelos de confort, se desarrolla la estructura del trabajo. El análisis de resultados se organiza en tres instancias: i. Análisis de las temperaturas promedio en la situación de base y bajo la aplicación de estrategias de mejoramiento; ii. Análisis de confort bajo el modelo adaptativo. A continuación, se describe el diseño del modelo de simulación térmica del edificio, focalizado en el aula prototípica estudiada, y luego se describen las estrategias de diseño para el mejoramiento de aulas.

#### *Diseño del modelo de simulación*

Se trata de un modelo de simulación que representa una escuela construida en tres niveles, que sintetiza las condiciones generales del universo de análisis (Figuras 1, 2 y 3). De este modelo se toma un aula sobre la cual se aplican las estrategias de diseño que propone la norma, con el fin de validarlas, y por otro lado otras mejoras que permitan alcanzar el confort al interior del aula. Se establece un aula del piso superior, como la representativa, ya que guarda similitud con la situación térmica de la planta baja, siendo más crítica por no estar en contacto con el terreno y por tener cubierta expuesta al cenit.



*Figura 1: Corte aula. Fuente: Secretaría de Educación Municipal*



*Figura 2: Interior aula*



*Figura 3: Exterior aula*

*Fuente: archivo de la investigación.*

Se trata de un aula típica de 8 x 8 m de desarrollo en planta, con una altura interior del espacio de 3 m. Su fachada está orientada y expuesta en sentido sur, con una ventana cuya superficie es 1/6 del área de la planta, y sus medidas son 5.33m de ancho por 1.07m de alto (24% de fachada expuesta); y posee una ventana en la fachada interior hacia el corredor con las mismas dimensiones (24% de fachada), como se muestra en la.Figura 4

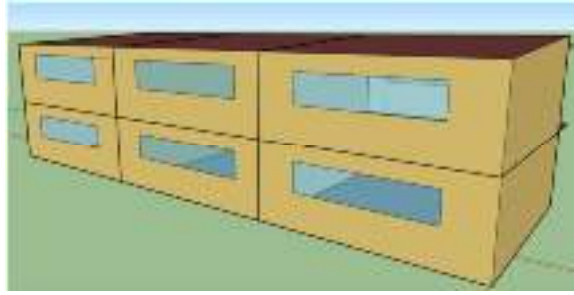


Figura 4: Modelo de aula típica en entorno EnergyPlus

La simulación se realiza en el programa EnergyPlus versión 8.7. Los datos de localización utilizados son: latitud 3.55 norte, longitud 76.38 oeste. El huso Horario es -0.5, y la altitud de 969 msnm. Con respecto a los parámetros de la simulación desarrollada, los mismos pueden observarse en la Tabla 1.

DESCRIPCION	VALORES	EXPLICACION
Tipo de edificio	Aula Piso superior	Se realizan las simulaciones para el aula tipo en la condición más desfavorable
Dimensiones (m3)	8 x 8 x 3 (192m3)	El aula tipo tiene cubierta al exterior, y ventanas en las fachadas opuestas.
Conductividad cerramientos exteriores (W/m.K)	1.11	Los cerramientos exteriores son de bloque de concreto de 20 cms de espesor
Espesor (m)	0.2032	Bloque de concreto con cámara de aire interior
Porcentaje de vidrio en fachada principal (%)	24	Ambas fachadas tienen aberturas hacia el exterior o la galería
Porcentaje de vidrio en fachada galería (%)	24	
Conductividad del panel de vidrio fachada(W/m.K)	0.9	Vidrio doble
Espesor (m)	0.003	
Transmitancia solar	0.837	
Transmitancia luminica	0.89	
Transmitancia (U) de elementos de cubierta (W/m²C):	1.19	Espesor (m) (Metal=0.0008; aislamiento=0.025; metal=0.0008). Conductividad ( $\lambda$ ) (metal=45.2; aislamiento=0.3; metal=45.2)
DESCRIPCION	VALORES	EXPLICACION
Transmitancia (U) de elementos de entrepiso (W/m²C):	2.03	Espesor (m) (Losa concreto=:0,10; lamina panel yeso=0,019). Conductividad ( $\lambda$ ) (Losa concreto=0,53; lamina panel yeso=0,16). Resistencia (R) cámara de aire= 0,18.
Conductividad de muros interiores (W/m.C)	0.53	Concreto: espesor (m)=0.10; conductividad ( $\lambda$ )=0.53
Conductividad carpinterías semi-interiores (W(m.C)	45.2	Metal: espesor (m)=0.0008; conductividad ( $\lambda$ )=45.2
Ganancias internas por usuarios (W/m²)	2.15	Usuarios del aula en condiciones de actividad con poco movimiento
Ratio de ocupación	Laborables	7:00 a 08.00; 0.1, a 12:00; 0.2, a 23.00; 0.7, a 24.00; 1
	Festivos y fines de	00.000 a 24.00; 1
Ventilación natural (RXH)	12 RXH	12 Renovaciones Por Hora (RXH) en horario de uso, y 20% permanente ejemplificando la ventilación constante por persianas.
Nivel de actividad (met)	Según estándar	Nivel de actividad en reposo
Aislamiento por vestimenta (clo)	Según estándar	Liviana para la condición de verano

Tabla 1: Parámetros utilizados en la simulación térmica del edificio

Una vez desarrollado el modelo y evaluada su situación de base, se plantean las estrategias de diseño en función de las recomendaciones de normas, y otras que permiten el complemento de las anteriores.

*Estrategias de diseño para el mejoramiento de aulas basadas en la norma NTC 4595*

Las alternativas de diseño aplicadas al caso base se muestran en las **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** a la 4, resaltando en fondo gris las características que cambian en cada variación. Estas se basan en las recomendaciones de la norma y se organizan por grupos. El grupo 1 corresponde a diferentes áreas de ventanas en relación con el área de la planta: 1/5 y 1/9, propuestas por la norma en su versión primera y segunda versión respectivamente. En el grupo 2, están las protecciones solares horizontales y verticales, aplicadas al caso base, si bien la norma no especifica el tipo y número de protecciones, se analizan estas dos como alternativas básicas (Tabla 2).

COMPONENTES	CASO BASE	GRUPO 1		GRUPO 2	
Denominación de la medida	<b>1. VENTANA 1/6 CASO BASE (VE 1/6 CB)</b>	<b>1. VENTANA (VE 1/5)</b>	<b>1. VENTANA (VE 1/9)</b>	<b>2. PROTECCION HORIZONTAL (HO)</b>	<b>2. PROTECCION VERTICAL (VE)</b>
Orientación fachada principal	Sur	Sur			
Cubierta exterior	Superficie metálica +25mm aislamiento +superficie metálica	Superficie Metálica+25mm aislamiento + superficie metálica			
Losa entrepiso	100 mm concreto ligero	100mm concreto ligero			
Muros	200 mm bloque concreto	200mm bloque concreto			
Ventanas (proporción en relación con respecto al área del salón)	10.6 m <sup>2</sup> (relación de 1/6)	12.8 m <sup>2</sup> (relación 1/5)	7 m <sup>2</sup> (relación 1/5)	10.6 m <sup>2</sup> (relación de 1/6)	

*Tabla 2: Grupo 1 y 2, alternativas basadas en áreas de ventanas y elementos de protección solar.*

En grupo 3 presentado en la tabla 3, están las variantes en los materiales que constituyen la envolvente del aula: i. por un lado para los muros con las alternativas de la norma: bloque de concreto (en el caso base) y ladrillo, como también se compara en este trabajo el desempeño del panel yeso + cámara de aire + panel; ii. Por el otro la cubierta, constituida por una teja metálica tipo sándwich con poliuretano en el centro; y una losa de hormigón (la cual no es considerada por la norma como adecuada para el clima de Cali por tener un factor de ganancia solar de 9.1%); ambas situaciones si simulan con cielo raso con cámara de aire y sin cielo raso (en el caso base).

COMPONENTES	GRUPO 3				
Denominación de la medida	<b>3. MURO LADRILLO (MU LA)</b>	<b>3. MURO PANEL YESO+AIRE+ PANEL (MU (PA+A+PA))</b>	<b>3. CUBIERTA CONCRETO SIN CIELO RASO (CU CON SIN)</b>	<b>3. CUBIERTA CO CON CIELO RASO (CU CON CON)</b>	<b>3. CUBIERTA (ME+AISL+ME) CON CIELO RASO (CU (ME+AIS+ME) CON)</b>
Orientación fachada principal	Sur				
Cubierta exterior	Superficie Metálica+25mm aislamiento + superficie metálica		Losa en concreto sin cieloraso	Losa en concreto con cámara de aire y 19mm panel yeso	(Superficie Metálica+25mm aislamiento + superficie metálica) con cámara de aire y 19mm panel yeso
Losa entrepiso	100mm concreto ligero				
Muros	Muro ladrillo cerámico de 100mm de espesor	19mm panel yeso + cámara de aire+ 19 mm lamina panel yeso	200mm bloque concreto		
Ventanas	10.6 m <sup>2</sup> (relación de 1/6 respecto al área del salón)				

*Tabla 3: Variantes en los materiales que constituyen la envolvente del aula*

En el cuarto y último grupo están las alternativas de orientación de la fachada principal del aula respecto al caso base. La norma recomienda orientación de las fachadas hacia el norte y sur, sin embargo, admite una variación hasta de 10°. Con el fin de validar dichas recomendaciones, se verifica el comportamiento de la exposición de la fachada con ángulos mayores como 20°, 45° y hasta 90°, los cuales no serían adecuados para la norma (tabla 4).

COMPONENTES	GRUPO 4					
Denominación de la medida	4. ROTACION 10° OESTE (10° O)	4. ROTACION 10° ESTE (10° E)	4. ROTACION 20° OESTE (20° O)	4. ROTACION 20° ESTE (20° E)	4. ROTACION 45° OESTE (45° O)	4. ROTACION 90° OESTE (90° O)
Orientación fachada principal	10° al Oeste	10° al Este	20° al oeste	20° al este	45° al oeste	90° al oeste
Cubierta exterior	Superficie Metalica+25mm aislamiento + superficie metálica					
Losa entepiso	100mm concreto ligero					
Muros	200mm bloque concreto					
Ventanas	10.6 m <sup>2</sup> (relación de 1/6 respecto al área del salón)					

Tabla 4: Alternativas de orientación del aula

## RESULTADOS

La temperatura exterior promedio anual simulada fue de 23.2°C. Las temperaturas máximas promedio alcanzan los 29.2°C en los meses de Julio y agosto, y las mínimas promedio bajan hasta 18.3°C en enero. En cuanto a la temperatura interior, el modelo simulado y la situación medida presentan una correlación alta ( $R^2 = 0.75$ ) como se presenta en la Figura 5. El modelo se ajusta principalmente a partir de la ventilación natural, hasta 12 renovaciones por hora (RPH), en coherencia con la relevancia dada a la ventilación natural en los diseños de las aulas en una ciudad del trópico como Cali. La temperatura promedio tanto del modelo medido, como al interior del aula en agosto es de 27°C.

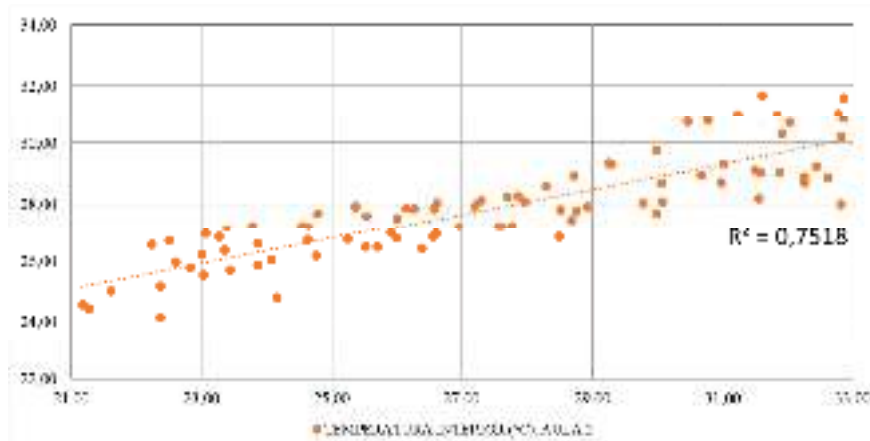


Figura 5: Correlación entre la temperatura (°C) medida al interior del aula en agosto (eje x) y la temperatura interior simulada (eje Y). Fuente: elaboración propia

*Análisis de las temperaturas promedio en la situación de base y bajo la aplicación de estrategias de mejoramiento*

En la Figura 6: *Comparación de To promedio anual en las estrategias de diseño* se pueden observar los resultados de las temperaturas operativas (To) promedio al año alcanzadas en el aula, tanto en el caso base como incorporando las alternativas de diseño recomendadas en la norma y enunciadas en Tabla 2. En el caso base la To promedio interior resultante fue de 26.5°C. En general y en forma anual, las medidas no generan significativos cambios en la To, lo que podría deberse a la falta de

exigencia en los aislamientos recomendados por la Norma. Las máximas  $T_o$  promedio fueron de  $27^\circ\text{C}$  en la cubierta en losa de concreto sin cielorraso (medida 3. CU CON SIN) y  $26.9^\circ\text{C}$  con la presencia cielorraso con cámara de aire (3.CU CON CO), este mismo valor se presenta en la rotación de la fachada a  $90^\circ$  hacia el oeste. El caso base muestra un promedio de  $T_o$  adecuado, situación mejorada solo con el grupo 2. HOR, modelo con elementos de protección horizontal ( $26.3^\circ\text{C}$ ); y 2. VER, modelo con los elementos de protección verticales con  $26.4^\circ\text{C}$ .

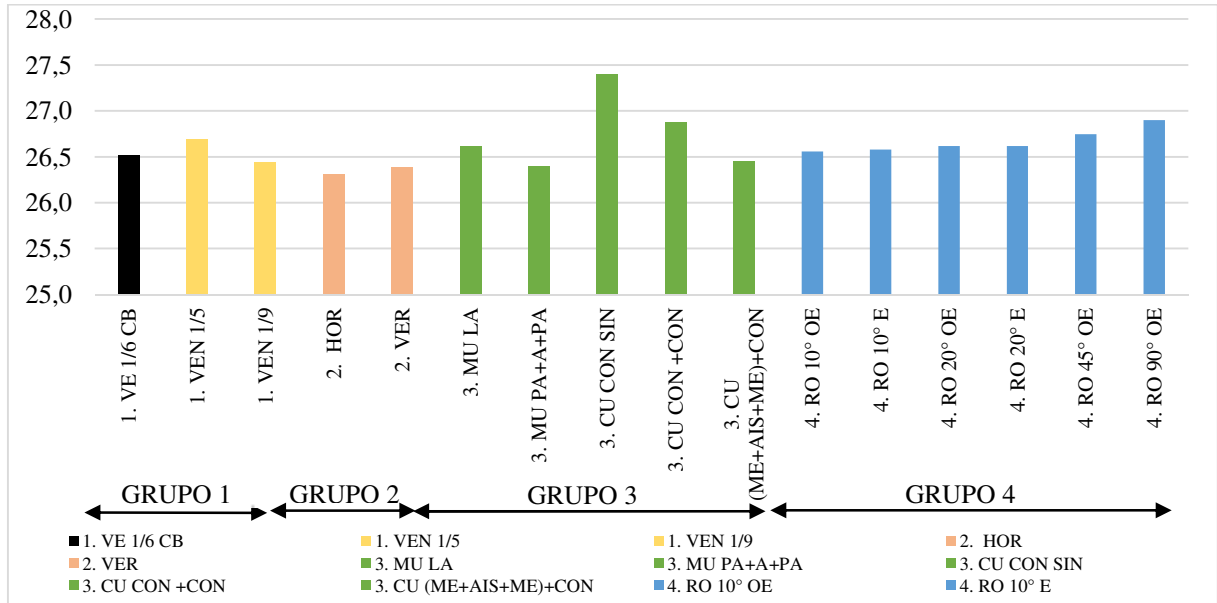


Figura 6: Comparación de  $T_o$  promedio anual en las estrategias de diseño

Una vez analizado el comportamiento térmico de las aulas aplicando las medidas en forma general, se procede a analizar las condiciones resultantes de acuerdo al confort bajo modelo adaptativo.

#### Análisis de confort bajo el modelo adaptativo

De acuerdo a la elaboración del modelo de confort adaptativo, el rango de temperaturas se encuentra entre  $21.5^\circ\text{C}$  y  $28.5^\circ\text{C}$  (ASHRAE, 2017). En las siguientes figuras se muestra el desempeño del caso base (línea color negro) con cada grupo de alternativas, para una mejor visualización. En la Figura se observa que la proporción 1/5 de ventana presenta temperaturas un poco más elevadas que el resto de las variaciones, sin embargo este incremento, no excede el rango de confort. En cuanto a las protecciones horizontales y verticales, logran disminuir las temperaturas en  $0.5^\circ\text{C}$ , especialmente en los meses de octubre a enero.

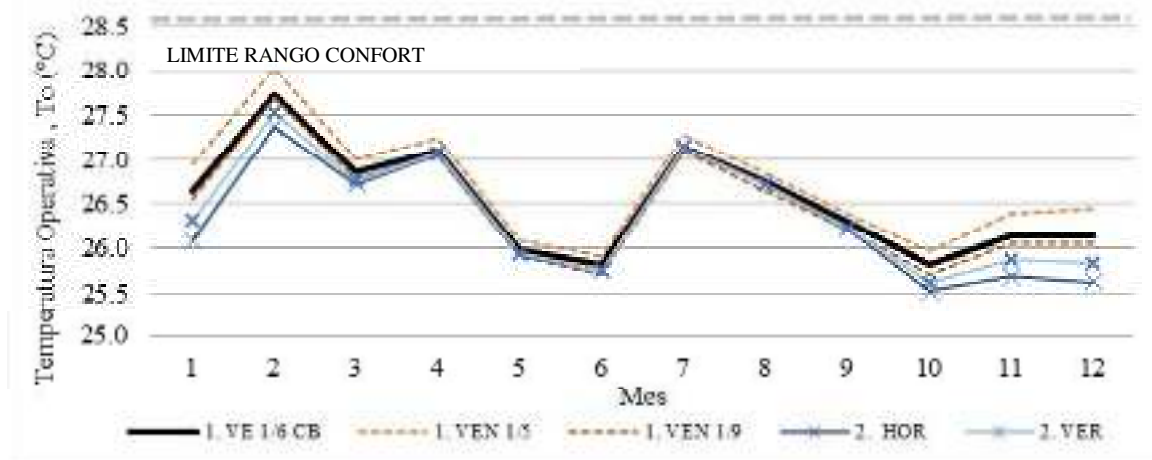


Figura 7: Temperatura operativa promedio mensual alcanzada en el aula a partir de las estrategias de diseño de los GRUPOS 1 y 2 Nota: Las estrategias son para el GRUPO 1: 1. VE 1/6 CB=ventana 1/6 CASO BASE; 1. VE 1/5=ventana 1/5; 1. VEN 1/9: ventana 1/9. GRUPO 2: 2. HO= Ventana con protección horizontal; 2. VER=ventana con protección vertical. Fuente: elaboración propia



La figura 8 presenta como el comportamiento del caso base simulado, es bastante favorable en comparación con las variaciones realizadas, resultando similar, o con temperaturas ligeramente más bajas, los modelos con la cubierta tipo sándwich con cielorraso (3. CU (ME+AISL+ME) CON y 3. Muro en panel yeso con cámara de aire (3.MU PA+A+PA). En cuanto al desempeño de la envolvente en ladrillo, se observa como presenta un comportamiento similar al del caso base en bloque de concreto. Por último, las variaciones con peor desempeño son las de la cubierta en concreto, con y sin cielorraso, las cuales son permitidas por la norma con acabado en color claro y reflectivo.

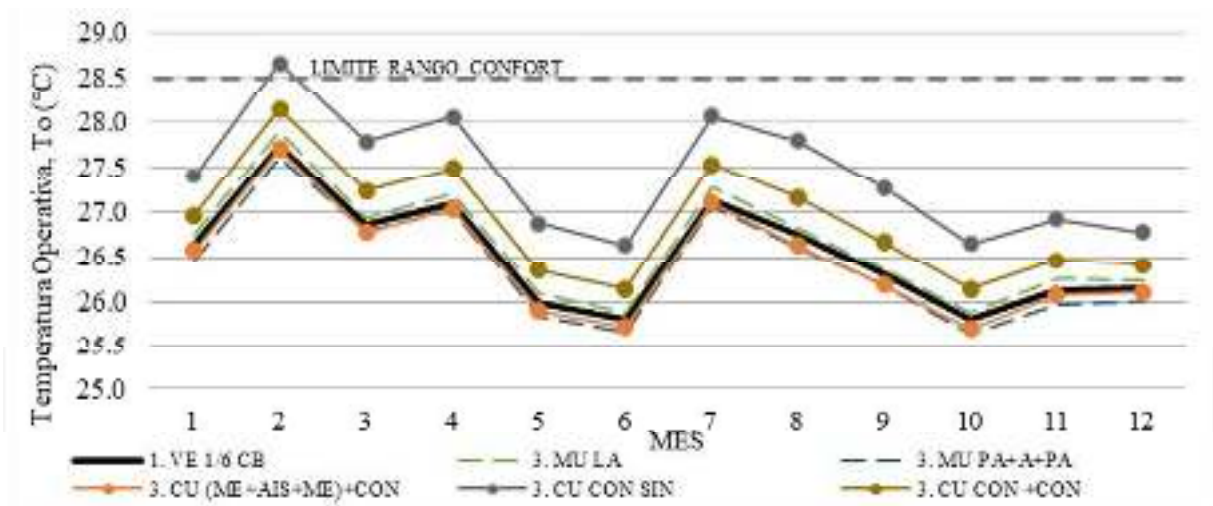


Figura 8: Temperatura operativa promedio mensual alcanzada en el aula a partir de las estrategias de diseño del GRUPO 3. Nota: **GRUPO 3:** 3.MU LA=muro en ladrillo; 3.MU (PA+A+PA): Muro Panel yeso + aislamiento +panel yeso; 3. CU CO SIN: Cubierta concreto sin cielo raso; 3. CU CO CON: Cubierta concreto con cielo raso con cámara de aire; 3. CU (ME+AISL+ME) CON: Cubierta metálica con aislamiento con cielo raso con cámara de aire. Fuente: elaboración propia.

En el último grupo de variaciones, el de las rotaciones, en la figura 9 se presentan las rotaciones admitidas por la norma (hasta 10°) y el resto, propuesto en este trabajo con fines de verificación. Como se puede observar las rotaciones hacia el este y oeste hasta 20° presentan desempeño térmico similar. Caso contrario a ángulos mayores como el de 45° y 90°, los cuales incrementan en 0.5°C y hasta 1°C la To al interior.

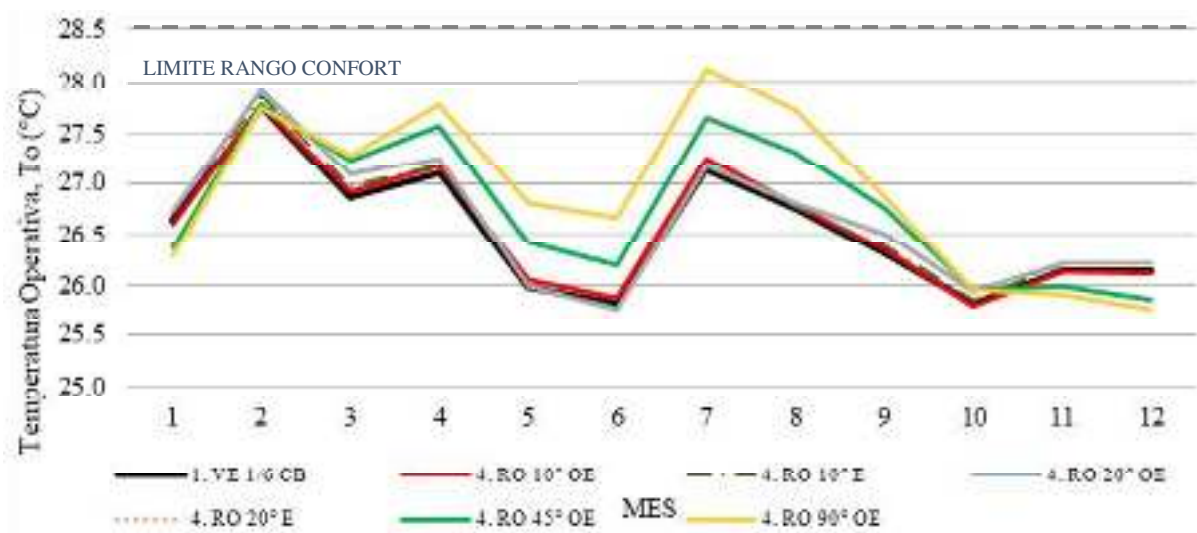


Figura 9: Temperatura operativa promedio mensual alcanzada en el aula a partir de las estrategias de diseño del GRUPO 4. Nota: **GRUPO 4:** 4.10°O= orientación de 10°oeste; 4.10°E=orientación de 10° este; 4. 20°O= rotación de 20° al oeste; 4. 20° E= rotación de 20° al este; 4. 45° O=rotación 45° Oeste; 4.90°O=rotación 90° Oeste. Fuente: elaboración propia.

## CONCLUSIONES

El presente trabajo presenta los avances alcanzados hasta el momento en la evaluación de las estrategias arquitectónicas, morfológicas, y de diseño, estipuladas en la Norma Técnica Colombiana (NTC) 4595, que tiene como fin alcanzar la comodidad ambiental en escuelas. Para ello se seleccionó una escuela de construcción oficial de la ciudad de Cali, Colombia, y se desarrolló un modelo de simulación térmica de la misma, centrándose en el análisis del espacio prioritario de la misma, el aula. El modelo base buscó representar de la manera más fehaciente el edificio, en base a un conocimiento previo del mismo y de la realización de auditorías térmico energéticas y socio-ambientales. Por otro lado, el análisis se centró en el modelo de confort adaptativo, propio para el clima de Cali, basándose en el ANSI/ASHRAE Standard 55 (2017), a partir de los cuales se evaluaron las estrategias arquitectónicas aplicadas en el aula base.

En cuanto a los resultados de las temperaturas operativas alcanzadas a partir de la aplicación de estrategias se pudo concluir que:

- i. Presentó mejor desempeño la alternativa con mayor masa térmica como el bloque de concreto, y el muro en panel yeso con cámara de aire, frente al ladrillo. Si bien la norma privilegia el uso del bloque de concreto, las diferencias con respecto al ladrillo no son muy distantes.
- ii. En esa misma línea, presentan mejor desempeño la cubierta tipo sándwich con y sin cámara de aire, frente a cubiertas másicas como la losa de concreto macizo, aun cuando presente cámara de aire.
- iii. Con relación al área de vidriados, se concluyó que a pesar que funciona mejor térmicamente una menor área de ventana (con una relación de área ventana vs área de piso en planta de 1/9), que mayor área de ventana (relación 1/5), la diferencia no es muy marcada. En cuanto a las protecciones hacia el norte y sur, estas logran bajar entre 0.5°C y 1°C.
- iv. Con relación a la orientación del edificio, las orientaciones norte y sur, presentan un desempeño similar a rotaciones leves de 10°C permitidas por la norma. Cuando el ángulo de exposición es mayor en 20°, los resultados son similares. Las diferencias de 1°C se presentan en fachadas expuestas a 45°C y 90°C hacia el oeste.

Las estrategias de diseño recomendadas por la (NTC) 4595, resultaron dentro del amplio rango de confort bajo el modelo adaptativo. Sin embargo, a partir del análisis anterior, la norma podría realizar las siguientes revisiones:

- v. Revisar las diferentes dimensiones de las ventanas, las cuales presentan un desempeño similar en las proporciones propuestas.
- vi. Profundizar en el estudio y caracterización de los elementos de protección solar, los cuales logran disminuciones en la  $T_o$ ; sin embargo, hacia el norte y sur, no hay una disminución amplia en las temperaturas internas, sin embargo, este tema no se puede revisar aisladamente del confort visual y el riesgo de no proteger fachadas y sufrir el disconfort por deslumbramiento o brillo.
- vii. Avanzar en la caracterización térmica de la envolvente que permita una mayor exploración y combinación de materiales por parte de los diseñadores.
- viii. Revisar los ángulos de exposición de la fachada, los cuales pueden ser mayores, al propuesto por la norma, sin recurrir a incrementos en la temperatura operativa.

Se considera importante complementar estudios como el propuesto **con** la validación del modelo analítico en el contexto tropical. También, continuar estudios como el presentado, permiten validar no solo los rangos propuestos por las normas nacionales y las internacionales, sino, la pertinencia de las estrategias de diseño propuestas por las mismas.

## REFERENCIAS

ANSI/ASHRAE Standard 55-. (2017). Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Big Ladder Software LLC. (n.d.). Engineering Reference — EnergyPlus 8.0.



- ICONTEC. (2004). Norma Técnica Colombiana NTC 5316. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*.
- Kwok, A. (1997). Thermal comfort in naturally-ventilated and air-conditioned classrooms in the tropics.
- Montoya, O., Y San Juan, G. (2018). Calidad ambiental de las aulas de colegios en el trópico: Evaluación subjetiva y objetiva del confort térmico, Visual y sonoro. In ASADES (Ed.), *Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol 6* (pp. 133–144).
- Nicol, F., Humphreys, M., y Roaf, S. (2012). *Adaptive thermal comfort: principles and practice*. Routledge.
- NTC, N. T. C. (2006). 4595. *Planeamiento y Diseño de Instalaciones y Ambientes Escolares*.
- Standard, A. (2017). Standard 55–2017 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. *Ashrae: Atlanta, GA, USA*.
- Tablada, A., de la Peña, A., y De Troyer, F. (2005). Thermal comfort of naturally ventilated buildings in warm-humid climates: field survey. *Environmental Sustainability. The Challenge of Awareness in Developing Societies. Proceedings of Passive Low Energy Architecture (PLEA), Beirut*, (November), 191–196. Retrieved from <http://www.arquitecturatropical.org/EDITORIAL/documents/Thermal Comfort of Naturally Ven.pdf>
- Zapata Rueda, C., Viegas, G., San Juan, G., & Et all. (2018). *Comodidad ambiental en aulas escolares. Incidencia en la salud docente y en el rendimiento cognitivo de los estudiantes en colegios públicos de Bogotá, Medellín y Cali* (1st ed.). Editorial Bonaventuriana; Ediciones Unisalle; Universidad Nacional de la Plata.

## ABSTRACT

The purpose of this paper is to carry out an evaluation of thermal comfort in a classroom in Cali, Colombia, based on the application of passive bioclimatic strategies. The school was built following the parameters of the Colombian Technical Standard (NTC) 4595. And determine the relevance as a normative document that regulates the design and construction of educational establishments in the country. The methodology develops: i. Thermal simulation models of the prototypical classroom in the EnergyPlus 8.7, in the basic state, and after the application of 15 design strategies; and, ii. The evaluation of thermal comfort under adaptive model (ASHRAE 55), after applying these strategies. It was concluded that all the strategies were within the comfort range, however, some strategies that could be included and others modified were identified, in order to achieve a better thermal performance.

**Key words:** adaptive comfort, school classrooms, tropical climate, design strategies, thermal simulation.

## **EVALUACION DE PROPUESTAS DE DISEÑO PARA LA OPTIMIZACION DEL DESEMPEÑO LUMINICO EN AULAS DEL TROPICO, BASADAS EN METRICAS DINAMICAS**

**Montoya Olga <sup>(1)</sup>, San Juan Gustavo <sup>(2)</sup>, Saavedra Lina <sup>(3)</sup>**

<sup>(1)</sup> Programa de Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Arte y Diseño (FAAD). Universidad de San Buenaventura, Cali. Avenida 10 de mayo, La Umbría, vía a Pance. C.P. 76001. Colombia. Tel: 057-2-4882222 ext. 8059. E-mail: olmontoy@usbcali.edu.co

<sup>(2)</sup> Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC-CONICET/UNLP). Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU), Universidad Nacional de La Plata (UNLP). Calle 47 N°162, La Plata, C.P. 1900 – Prov. de Buenos Aires. Tel. 0221-4236587/90 int. 250. e-mail: gustavosanjuan60@hotmail.com

<sup>(3)</sup> Estudiante último año. Programa de Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Arte y Diseño (FAAD). Universidad de San Buenaventura, Cali. Avenida 10 de mayo, La Umbría, vía a Pance. C.P. 76001. Colombia. Tel: 057-2-4882222 ext. 8059. E-mail: olmontoy@usbcali.edu.co

*Recibido 16/08/19, aceptado 22/10/19*

**RESUMEN:** El trabajo presenta el análisis de las estrategias de diseño para alcanzar la comodidad visual en aulas, en el marco de la norma colombiana NTC 4595. La metodología se basa en el diseño experimental con un modelo virtual, localizado en Cali, Colombia, al cual se le aplican variaciones de diseño propuestas por la norma, y otras, resultado del estudio, y se analizan a partir de las métricas dinámicas para simulación anual: UDI, sDA y ASE. Los resultados evidencian la necesidad de considerar las condiciones exteriores inmediatas, plantear elementos de protección solar en fachadas expuestas hacia el norte y sur, evitar la exposición directa de la fachada hacia este-oeste, y aplicar materiales claros al interior. Lo anterior, aporta a la norma local, para promover diseños con el máximo aprovechamiento de iluminación natural que logren satisfacer los requerimientos lumínicos de los estudiantes y los valores recomendados en la norma.

**Palabras clave:** Aulas escolares, desempeño lumínico, clima tropical, métricas dinámicas, simulación,

### **INTRODUCCION**

Un adecuado proceso de enseñanza y aprendizaje, requiere condiciones confortables y satisfactorias en el espacio del aula escolar. (San Juan et al., 2014). Son diversos los estudios que señalan cómo las condiciones ambientales inadecuadas, inciden en las actividades de aprendizaje de los estudiantes, como también en la fatiga y estrés docente (Zapata et al., 2018).

En el tema del confort visual, es tan importante la sensación psicofisiológica de un individuo sobre el ambiente lumínico en el que se encuentra (Arango, 2011), como la posibilidad de desarrollar las tareas visuales, con el menor esfuerzo, riesgo y perjuicio a la vista (Lamberts et al., 2012). Por lo tanto, es necesario contar con los niveles lumínicos adecuados sobre la superficie de trabajo, controlar los brillos y contrastes excesivos, evitar reflejos molestos y favorecer la buena reproducción de los colores. (Zapata et al., 2018). Una inadecuada resolución de la envolvente edilicia, puede generar brillos indeseados y altos contrastes por falta de uniformidad, además, condiciones térmicas inadecuadas e ineficiencia energética como señalan Wu y Ng (2003).

La Norma colombiana NTC4595 (primera versión año 2000 y actualización en el 2015), establece recomendaciones de diseño con el objetivo de alcanzar la comodidad en los temas visual, térmico y auditivo, para diferentes tipos de clima: moderado, frío y templado; cálido seco y cálido húmedo. Para el clima cálido seco, en el cual se inscribe la ciudad de Cali en la primera versión de la Norma (por presentar temperaturas entre 5°C y 35°C, y humedad relativa entre 40% y 60%; a pesar que los rangos

climáticos cambian con la actualización de la norma, lo cual agrega confusión y es objeto de análisis en un trabajo previo (Zapata et al., 2018). Adicional a esto, las disposiciones en cada uno de los temas no guardan relación, ni coherencia entre ellos, llegando a contradecirse entre los mismos (Montoya y San Juan, 2018).

Para la comodidad visual, la Norma establece *indicaciones sobre la cantidad y calidad de la luz y disposiciones varias* (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), pág. 15), haciendo énfasis en el aprovechamiento de la luz natural durante la mayor parte de la jornada, sin necesidad del uso de iluminación artificial. Lo anterior es posible y favorece ahorros entre el 50% y 80% sobre el consumo total de una institución (Monteoliva y Pattini, 2013), sin embargo, como lo indica Pattini (2009), esto depende de la presencia de sol y la luminosidad de la bóveda celeste del lugar

La dimensión de las aberturas (ubicadas por encima del plano de trabajo), deben ser 1/5 en relación con el área del salón, y si presentan materiales opacos, el área debe aumentar 20%, y hasta 60% en caso de presentar celosías de concreto y otros elementos que obstruyan el paso de la luz. En cuanto a las condiciones del exterior, se promueve el acceso de luz desde el exterior, sin elementos que lo impidan. La orientación debe ser perpendicular al eje norte-sur, y de no ser así, deben aparecer elementos que obstruyan el paso directo de los rayos solares al espacio. Las últimas disposiciones de la norma se refieren a los coeficientes de reflexión de las superficies al interior de los espacios, las cuales no deben ser inferior al 15% en pisos, 50% en paredes distintas a las aberturas o sus enfrentadas, 74% en las paredes con las aberturas o sus enfrentadas, y 80% en cielo raso.

El nivel de iluminancia recomendado sobre plano de trabajo es de 300 lux para la versión de la Norma del año 2000; y de mayor exigencia, 500 lux, para la versión del año 2015. Este último en el mismo rango indicado por las normas en Argentina y Holanda, superando el umbral de países en condiciones similares como México (400 lux) y Brasil (200 lux) (Pattini, 2000). Sin embargo, estudios recientes enfatizan sobre el carácter dinámico de la luz al interior de los espacios, y las limitaciones al caracterizar los espacios a través de valores absolutos o instantáneos en el tiempo (Monteoliva et al., 2014), además de la conveniencia de combinar diferentes métricas para definir el ambiente lumínico, especialmente, en el caso de la iluminación natural (Yamin et al., 2014).

Entre las dificultades que el tema visual implica, está la imposibilidad de estandarizar un método para predecir el comportamiento lumínico con las condiciones reales climáticas (Nabil y Mardaljevic, 2006), y el carácter dinámico de la luz al interior de los espacios como lo señala Pattini (2000). Además, la norma deja abierta la posibilidad de modificar todas las recomendaciones realizadas, a través de simulaciones o cálculos que demuestren el cumplimiento de los rangos establecidos (Díaz et al., 2013).

## **METODOLOGÍA DE TRABAJO**

El diseño experimental se realizó a partir de un modelo de aula construido virtualmente, que sintetiza las condiciones generales de las aulas. El caso se localiza en Santiago de Cali, ciudad de Colombia, 3°25' latitud Norte, 76°30' longitud Oeste, entre 950 y 1100 msnm. La temperatura media anual es 24.8°C, la media máxima anual 29.9 °C y la media mínima 19.4 °C; y la humedad relativa anual es de 72.2%. La irradiación solar media es de 4332.6 Wh/m<sup>2</sup> X DIA), y 1.56 es el promedio de días al mes sin brillo solar; como lo indican los promedios anuales presentados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia IDEAM.

El rango confort visual para aulas escolares en la primera versión de la norma NTC 4595 (año 2000), es de 300 lux promedio. Para la segunda versión, en el año 2015, propone los siguientes valores:

- Nivel promedio 500 lux
- Factor de Luz Día-FLD debe ser superior al 2%
- Coeficiente de uniformidad-U<sub>o</sub> = 60%

- Y otras disposiciones como el deslumbramiento máximo-UGR=19 y eficiencia energética = VEEI = 4

#### *Métricas para el análisis*

Para el análisis se utilizaron las métricas dinámicas basadas en archivos climáticos de radiación solar, con las cuales se realizaron simulaciones teóricas. Estas métricas además de permitir el desempeño lumínico anual de un espacio, permiten tener datos más certeros sobre el tipo de cielo utilizado, derivado de la información de radiación contenida en el archivo climático. Las métricas dinámicas usadas son:

- **Rango útil de iluminancia, UDI**, por sus siglas en inglés (Useful Daylight Illuminance) desarrolladas por Mardaljevic y Nabil (2005), la cual permite identificar el porcentaje de tiempo al año con presencia de iluminancias entre rango útil de 100(lux) a 2000 (lux). Lo que sugiere que valores por fuera de dicho rango, no son útiles (Monteoliva et al.,2016). El porcentaje de tiempo con el rango útil recomendado al año, es de 70% (Mardaljevic y Nabil, 2005).

La Sociedad de Ingenieros en Iluminación de Norteamérica IESNA (2012), por sus siglas en inglés (Illuminating Engineering Society of North América), desarrollaron dos métricas que permiten complementarse (Heschong et al., 2012) y robustecer el análisis sobre desempeño lumínico:

- **Autonomía de luz en el espacio, sDA** por sus siglas en inglés (Spatial Daylight Autonomy), indica el porcentaje de área con un valor de iluminancia (de 300 lux en este caso), el 50% del tiempo al año. El porcentaje recomendado por Heschong et al. (2012) es 75%.

- **Exposición solar anual, ASE** por sus siglas en inglés (Annual Sunlight Exposure), se refiere al porcentaje del área del piso que recibe al menos 1000 lux por al menos 250 horas ocupadas al año (Elghazi et al., 2014), siendo un indicador relacionado con el deslumbramiento, o disconfort como lo indican Kazanasmaz et al. (2016). El valor aceptado para dicho indicador es máximo 10% (U.S. Green Building Council-USGBC, 2013).

- **Factor de Luz Día, DF**, por sus siglas en inglés (Daylight Factor), es la relación en porcentaje  $[(I_{int} / I_{ext}) \cdot 100]$  entre la iluminancia en un punto del espacio interior ( $I_{int}$ ) y la iluminancia exterior ( $I_{ext}$ ), en condiciones de cielo uniforme, nublado y sin obstrucciones, de acuerdo con la definición realizada por Moon y Spencer en 1942, citado por Reinhart et al. (2006). El porcentaje adecuado es del 2% para el tipo de trabajo de oficina y aulas, de acuerdo a lo indicado por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y certificación (ICONTEC) (2006).

#### *Caracterización del modelo base:*

Tipo de cielo: intermedio entre soleado y nublado. El caso “base”, corresponde con un aula típica de 8 por 8 mts, con altura de 3 mts. Orienta su fachada expuesta en sentido sur, con ventana que corresponde a 1/6 del área de la planta de 5.33 de ancho, 1.07 de alto (22% de fachada); y ventana en fachada hacia el corredor con las mismas dimensiones (22% de fachada), (Figura 1). Al interior hay dos paredes de color claro (ubicadas en las paredes del pizarrón y su enfrentada), y dos de color gris concreto (en las paredes con las ventanas). Los coeficientes de reflexión de estas, como el del cielorraso y piso, se indican en la Tabla 1, de acuerdo a las características generales de las aulas del estudio.

Las ventanas se constituyen por un vidrio simple claro. El modelo base no cuenta con ningún elemento de protección en fachada que impida el ingreso de sol directo. El plano de trabajo se ubicó a 0.70 mts sobre nivel del suelo, acorde con la altura de los puestos de trabajo de los estudiantes, y una grilla de puntos distribuidos horizontalmente cada 50 cms.

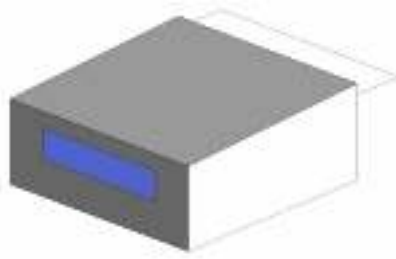


Figura 1: modelo base en entorno DIVA para RHINOCEROS 5

DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICA	REFLECTANCIA	DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICA	REFLECTANCIA
Cielo raso opaco	OutsideFacade	30	Piso opaco	GenericFloor	20
Pared blanca	Whiteinteriorwall	70	Puerta opaca	OutsideFacade	30
Pared opaca	OutsideFacade	30	Ventana	Glazing_SinglePane	88

Tabla 1: características de los materiales caso base \*Los valores de reflectancia son tomados del software DIVA 4.1.0 para Rhinoceros 5

#### Parámetros de simulación

La simulación se basa en el archivo climático para la ciudad de Cali (con extensión epw), y se realizó exclusivamente para iluminación natural, con el fin de analizar el desempeño lumínico del aula durante la jornada escolar, con el aprovechamiento máximo de la luz solar, tal y como lo promueve la norma. Se desarrollaron en la herramienta DIVA 4.1.0 (Jakubiec y Reinhart, 2012) para Rhinoceros 5. La ocupación del espacio se tomó de 8 a.m. a 5 p.m., de lunes a viernes, de acuerdo al horario de uso de los salones para uso escolar.

#### Diseño del Caso base y alternativas aplicadas

Las alternativas de diseño exploradas aplicadas al caso “base”, se derivan de las recomendaciones de la norma NTC 4595 para la comodidad visual, organizadas en cinco grupos: El primer grupo (G1), está definido por los tamaños de ventanas, en relación con el área de la planta 1/5, 1/9 y 1/4. Esta última si bien no es parte de la Norma, se incluye por ser la relación predominante en las aulas de colegios construidos en la ciudad bajo la norma, estudiadas a profundidad en trabajos anteriores adelantados por Montoya y San Juan (2018) y por Zapata et al. (2018). (Tabla 2).


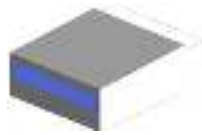

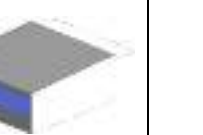
MODELO		GRUPO 1: DIMENSIONES DE ABERTURAS							
		1/6 CASO BASE-CB		1/5		1/9		1/4	
									
PRINCIPAL	Largo	5,00	22%	7,60	38%	6,00	31%	7,60	44%
	Alto	1,07		1,20		0,83		1,39	
GALERIA	Largo	5,00	22%	6,00	15%	5,00	9%	6,40	22%
	Alto	1,07		0,61		0,43		0,84	

Tabla 2: grupo 1 de alternativas de diseño. Fuente: elaboración propia

El segundo grupo (G2) contiene las alternativas con el cambio de color de las superficies internas, a blanco con reflectancia de 70% solo en cielorraso; blanco en todas las superficies; y blanco solo en piso, para verificar la incidencia del color recomendado por la Norma, ver Tabla 3.

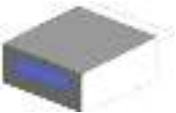
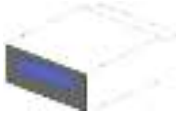


MODELO	GRUPO 2: COLOR MATERIALES INTERIORES			
	CASO BASE-CB	CIELO	PAREDES	PISO
				
PARED TABLERO Y OPUESTA	Blanco (70% reflectancia)	Blanco (70% reflectancia)	Gris (30 % reflectancia)	Blanco (70% reflectancia)
PARED VENTANA Y GALERIA	Gris (30 % reflectancia)	Gris (30 % reflectancia)	Gris (30 % reflectancia)	Gris (30 % reflectancia)
CIELORRASO		Blanco (70%)		Gris (30 % reflectancia)
PISO	Gris (30 % reflectancia)			

Tabla 3: grupo 2 de alternativas de diseño. Fuente: elaboración propia

El tercer grupo (G3) de alternativas se refieren a los elementos de protección solar en fachada y se aplican al caso 1/4 de ventana, ya que corresponde a un aumento del 60% con respecto al caso base (1/6), indicado por la Norma NTC 4595 para conservar el nivel lumínico adecuado (Tabla 4 y 5).

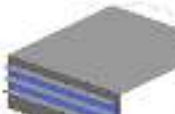
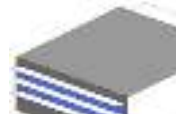

MODELO	GRUPO 3: ELEMENTOS DE PROTECCION SOLAR EN FACHADA		
	HORIZONTALES (HOR)	HORIZONTALES BLANCOS (HOR BLA)	+HORIZONTALES (+HOR)
			
Cantidad y Dimensión de elementos	3 elementos (7,60 X 0.60 c/u)	3 elementos (7,60 X 0.60 c/u)	5 elementos (7,60 X 0.60 c/u)

Tabla 4: grupo 3 de alternativas de diseño elementos horizontales. Fuente: elaboración propia

MODELO	VERTICALES (VER)	VERTICALES BLANCOS (VER BLA)	+ VERTICALES (+ VER)	CALADOS (CAL)
				
	Cantidad y Dimensión de elementos	9 elementos (1.39 X 0.60 c/u)	9 elementos (1.39 X 0.60 c/u)	16 elementos (1.39 X 0.60 c/u)

Tabla 5: grupo 3 de alternativas de diseño elementos verticales. Fuente elaboración propia

Al cuarto grupo (G4) se le aplican diferentes orientaciones: hacia el sur este y sur oeste, con el objetivo de analizar una mayor exposición de la fachada principal, como se presenta en la Tabla 6.


MODELO	GRUPO 4: ORIENTACION FACHADA PRINCIPAL			
	SURESTE 1 (SE1)	SUROESTE 1 (SO1)	SURESTE 2 (SE2)	SUROESTE 2 (SO2)
				
Angulo (%)	45%	45%	67.5 %	67.5 %

Tabla 6: Grupo 4 de alternativas de diseño. Fuente: elaboración propia

En el quinto grupo (G5), se exploran diferentes situaciones para las condiciones exteriores como patio descubierto mayor a 3 mts (recomendación de la norma), y dos alternativas no consideradas por la norma como son: el patio cubierto con material opaco y árbol, como elementos de obstrucción al exterior inmediato, con el fin de caracterizar algunas situaciones que se puedan presentar, así (Tabla 7):


MODELO	GRUPO 5: CONDICIONES EXTERIORES		
	PATIOS	DISTANCIA ENTRE EDIFICIOS (EDIFICIO)	ARBOL
			
Especificaciones	Patio de 8 X 8 mts	Distancia entre edificios de 4 mts con una cubierta en cielo opaco (30% reflectancia)	Árbol de 6 mts alto, 3 mts Ø, y 3 mts distancia a fachada

Tabla 7: Obstrucciones exteriores. Fuente: elaboración propia

## RESULTADOS Y ANALISIS

Para una mayor ilustración, se presentan a continuación los resultados descriptivos de las simulaciones en cada una de las métricas de análisis en las tablas 8 a la 10:








GRUPOS	GRUPO 1: DIMENSIONES ABERTURAS				GRUPO 2: COLOR MATERIALES		
	1/6 CB	1/4	1/5	1/9	CIELO	PAREDES	PISO
LEED SDA <sub>300</sub> , 50%							
	44.6%	73.0%	60.6%	59.2%	25.6%	48.4%	44.6%
UDI <sub>300-3000 lux</sub>	82.5%	81.2%	80.3%	64.8%	84.91%	86.32%	82.36%
DF	3.6%	6.1%	5.0%	2.8%	4.1%	3.8%	3.7%
LEED ASE	12.1%	14.5%	13.5%	12.8%	12.1%	12.1%	12.1%

Tabla 8: Resultados simulación visual, grupo 1 y 2. . Fuente: elaboración propia





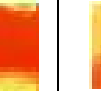


GRUPOS	GRUPO 3: ELEMENTOS DE PROTECCION SOLAR EN FACHADA						
	HOR	HOR BLA	+ HOR	VER	VER BL	+ VER	CAL
LEED SDA <sub>300</sub> , 50%							
	96,20%	96,20%	89,60%	89,60%	89,60%	90,00%	35,60%
UDI <sub>300-3000 lux</sub>	94,49%	93,52%	87.8%	85,79%	85,79%	87,40%	80,57%
DF	2,90%	3,30%	1,80%	4,60%	4,60%	3,90%	3,00%
LEED ASE	0,70%	0,70%	0,00%	12,10%	12,10%	12,10%	10,40%

Tabla 9: Resultados simulación visual grupo. Fuente: elaboración propia

GRUPOS	GRUPO 4: ORIENTACION FACHADA PRINCIPAL				GRUPO 5: OBSTRUCCIONES EXTERIORES		
	SE 1	SO1	SE 2	SO 2	PATIOS	EDIFICIO	ARBOL
LEED SDA <sub>300</sub> , 50%							



	49,80%	28,40%	59,20%	65,10%	45,70%	39,40%	44,60%
UDI <sub>300-3000 lux</sub>	82,19%	80,85%	80,95%	80,38%	80,58%	68,35%	82,52%
DF	3,70%	3,70%	3,70%	3,70%	3,60%	3,10%	3,60%
LEED ASE	24,90%	32,20%	56,10%	60,60%	12,10%	12,10%	12,10%

Tabla 10: Resultados simulación visual, grupos 4 y 5. Fuente: elaboración propia

### Análisis

Se puede observar en la Figura 2, que en el grupo 1, las dimensiones de las ventanas en relación 1/6, 1/5 y 1/4, presentan un % de UDI<sub>300-3000</sub> muy similar, mientras la relación 1/9 sugerida en la versión de la Norma del año 2015 (Específica en comodidad térmica), representa un desempeño menor del nivel recomendado, en detrimento de la calidad visual del espacio. El resto de las estrategias aplicadas presentan el rango de iluminancia por encima del 70% del tiempo al año (Mardaljevic y Nabil, 2005).

También se puede observar, en la misma figura 2, que las estrategias con mejor UDI<sub>300-3000</sub> son aquellas que presentan elementos de protección solar en fachada, siendo las estrategias del grupo 3, las de mejor desempeño. En estas, las protecciones horizontales (3. HO y 3. HO BL) son las de mejor desempeño, con 94%, seguido de las protecciones verticales (3.VE y 3.VE BLA) con 85% de UDI<sub>300-3000</sub>. Por el contrario, la estrategia con menor UDI<sub>300-3000</sub>, además de la ventana en proporción 1/9 del grupo 1 explicada anteriormente, es la separación menor entre edificaciones (5. EDIFICIO) del grupo 5. Reafirmando la importancia de esta recomendación de la norma NTC 4595.

En cuanto a las rotaciones de orientación exponiendo la fachada hacia el este (4. SE1 y SE) y oeste (4. SE1 y 4.SE2), no representan un mejor UDI<sub>300-3000</sub>, por el contrario, presentan un comportamiento similar al caso “base” (1.1/6 CB) orientado hacia el sur, lo cual reafirma la necesidad de una orientación norte-sur, adecuada en la latitud del estudio, para alcanzar los niveles lumínicos adecuados y generar espacios cómodos visualmente (Díaz et al., 2013).

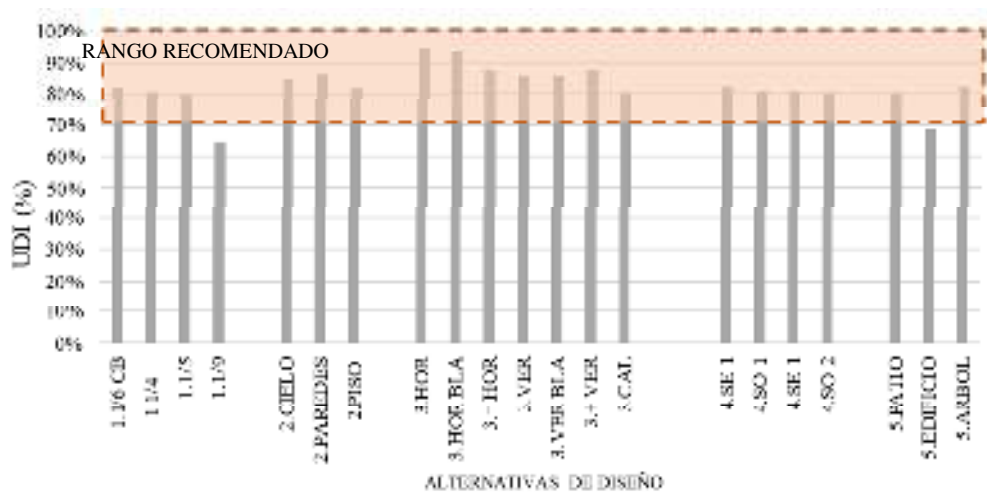


Figura 2: Comparación del Rango útil de iluminancia UDI<sub>300-3000</sub> entre las estrategias de diseño

### Rango útil de iluminancia (UDI<sub>300-3000</sub>) y + autonomía espacial de luz diurna (sDA<sub>300, 50%</sub>)

Al comparar las estrategias a partir de la combinación de UDI<sub>300-3000</sub> y sDA<sub>300, 50%</sub> vemos en la Figura 3, que las estrategias con mejor desempeño son las que presentan elementos de protección solar horizontales y verticales (2.HO, 2.VE BL, 2. + VE), resaltadas en el gráfico; y las de más bajo desempeño, son: la relación 1/9 de abertura en relación con la fachada y la distancia entre edificaciones cubierta; las dos reducen los porcentajes en las dos métricas. El resto de las estrategias, cumplen en el 70% recomendado para el UDI<sub>300-3000</sub> (Mardaljevic y Nabil 2005); sin embargo, no alcanzan el 75% mínimo recomendado por el sDA (Heschong et al., 2012).

Lo anterior muestra, que estrategias como: la fachada con calados (2.CA), cielo blanco (2.CI) y la fachada orientada al suroeste (4.SO) a pesar de presentar un UDI<sub>300-3000</sub> adecuado, no logran el sDA<sub>300, 50%</sub>, o el mínimo porcentaje del espacio con iluminancia superior a 300 lux el 50% de tiempo al año.

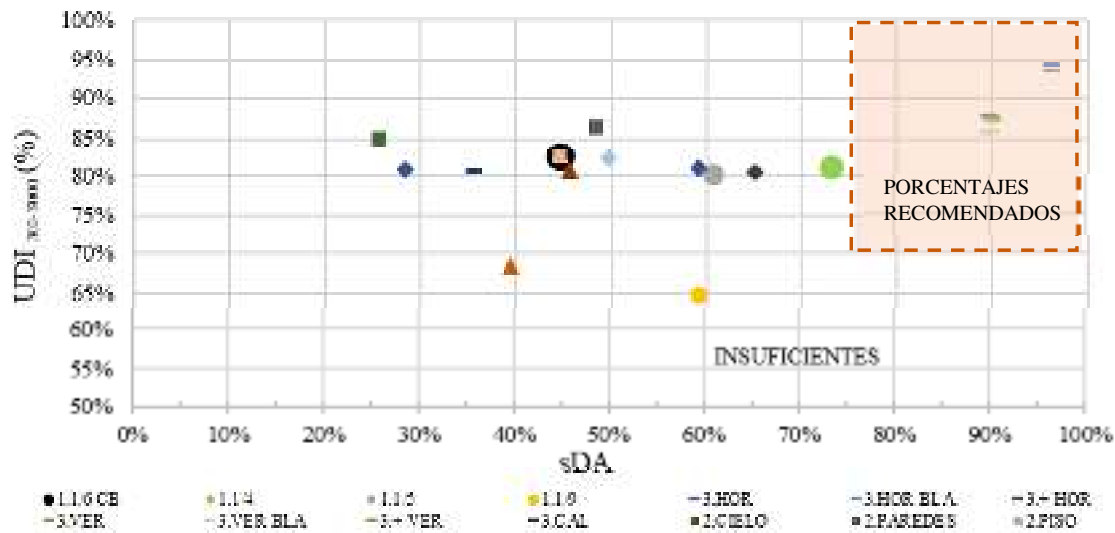


Figura 3: Comparación porcentaje (%) UDI y sDA entre las estrategias de diseño

### Exposición solar anual (ASE) y factor de luz diurna (DF)

Al cruzar la información anterior con la métrica ASE, se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** que la mayoría de las estrategias sobrepasan el porcentaje mínimo de 10% recomendado (U.S. Green Building Council-USGBC, 2013). Las estrategias que logran el valor, son las estrategias con elementos de protección horizontal en concreto (2. HO), más elementos de protección solar (2. +HO) y color claro (2. HO BL), demostrando la efectividad de estas protecciones frente a los ángulos de inclinación y azimut solar en esta orientación y en la latitud tropical del caso de estudio. Por el contrario, todas las estrategias con rotación de orientación del caso “base” hacia el este y el oeste, generan ingreso de luz directa al espacio por encima del 25%, demostrando lo inadecuado de ésta sobre exposición en el caso de estudio. En cuanto al DF, la mayoría de las estrategias cumplen con valores superiores al 2%, con excepción de la mayor cantidad de elementos horizontales (2+HO). (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

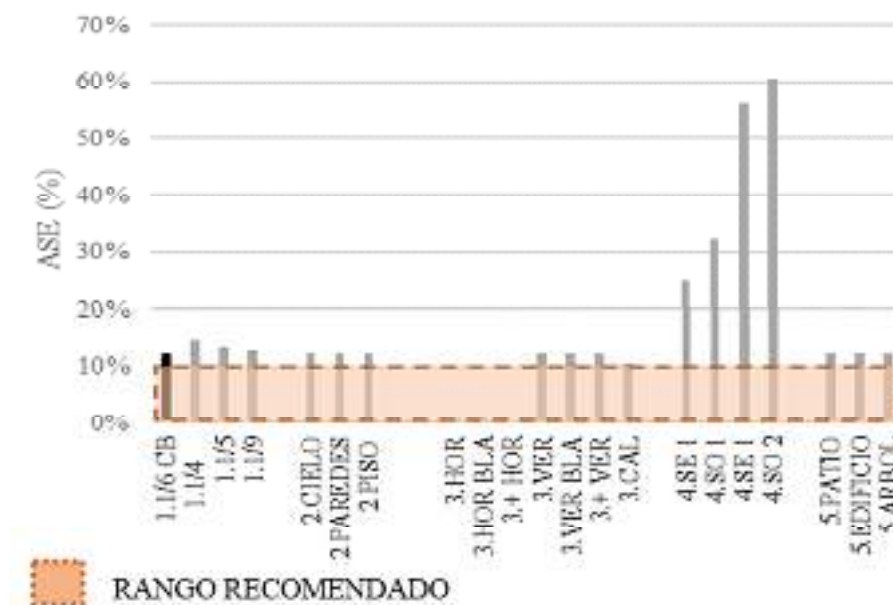


Figura 4: Comparación ASE estrategias de diseño



Figura 5: Comparación DF estrategias de diseño

También se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** que el DF aumenta proporcionalmente con el área de la fachada, presentando los menores valores no solo en la menor área de ventana (1.1/9), sino en las estrategias que presentan protección horizontal (2.HO, 2.HO BL y +HO), mostrando en este caso mejor desempeño las protecciones verticales y las rotaciones.

## CONCLUSIONES

El análisis del confort visual de aulas, a partir de la implementación de métricas dinámicas como UDI<sub>300-3000</sub>, el sDA<sub>300, 50%</sub> ASE y DF, muestran la importancia del uso complementario de las anteriores, con el fin de lograr una mejor caracterización del espacio. A partir de este análisis combinado, se pueden determinar las mejores estrategias de diseño.

La mayor cantidad de estrategias recomendadas por la norma NTC 4595, presentaron un desempeño adecuada bajo la métrica UDI<sub>300-3000</sub>. Sin embargo, el análisis posterior bajo el sDA<sub>300, 50%</sub> evidenció, que, si bien en el aula se presentan los niveles de iluminancia en el rango útil, estos no se presentan en la mayoría del aula, el 50% del año. Lo anterior indica, que las áreas con los rangos adecuados, seguro se concentran en las zonas cercanas a las ventanas, mientras los puestos alejados de esta zona, no tendrán los niveles recomendados, con el agotamiento visual a largo plazo que esto implica.

Las estrategias dentro de los porcentajes recomendados de UDI<sub>300-3000</sub> y el porcentaje del área con iluminancia superior a 300 lux la mitad del tiempo sDA<sub>300, 50%</sub>, y el control en los valores en el ingreso solar directo al espacio (ASE), resultaron los **Elementos de protección horizontal en fachada**, los cuales gracias al análisis posterior del factor de luz diurna (DF), deben tener acabado de color blanco. Se evidencia la necesidad de plantear de manera permanente elementos de protección solar (de preferencia horizontal) en la latitud de los casos de estudio, en las orientaciones norte y sur.

Las estrategias analizadas, demuestran la necesidad de actualizar la norma colombiana NTC 4595 con criterios dinámicos del carácter de la luz en el espacio, a través de cumplimientos anuales, y no con valores estáticos, limitados en su caracterización espacial. Así mismo, se demostró a lo largo del trabajo, la necesidad de mayor definición en los elementos de protección en fachada, los cuales presentan comportamiento diferenciados, finalmente se sustenta el que las estrategias propuestas por la norma NTC 4595 como: colores al interior, dimensiones de aberturas, rotaciones, no son efectivas de manera aislada, y que obliga a un abordaje integral y complejo para la comodidad visual en los espacios educativos.

## REFERENCIAS

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y certificación (ICONTEC) (2006). Norma Técnica Colombiana NTC 4595 Ingeniería Civil y Arquitectura Planeamiento y Diseño de Instalaciones y Ambientes Escolares. Bogotá.
- Arango L. (2011). Ensaio do método para análise integrada da iluminação natural e da conveniência solar. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Zapata C. M., Viegas, G. M., San Juan, G. A., Ramos, H., Coronado, J. A., Ochoa, J., ... Montoya, O. L. (2018). Comodidad ambiental en aulas escolares. Incidencia en la salud docente y en el rendimiento cognitivo de los estudiantes en colegios públicos de Bogotá, Medellín y Cali (1st ed.). Editorial Bonaventuriana; Ediciones Unisalle; Universidad Nacional de la Plata.
- Arango L., Vásquez, N., Cano L., Cuervo, A. (2013). Revisión de las recomendaciones de la NTC 4595 con relación a las aberturas de los salones de clase. *DEARQ: Revista de Arquitectura de La Universidad de Los Andes*, (13), 214–229.
- Elghazi Y., Wagdy A., Mohamed S., y Hassan A. (2014). Daylighting driven design : optimizing kaleidocycle facade for hot arid climate. *Aachen: Fifth German-Austrian IBPSA Conference, RWTH Aachen University*, 314–321.
- Heschong L., Wymelenberg V., Den Andersen M., Digert N., Fernandes, L., Keller, A., Mosher, B. (2012). Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE). IES-Illuminating Engineering Society.
- Kazanasmaz T., Grobe L., Bauer C., Krehel M., y Wittkopf, S. (2016). Three approaches to optimize optical properties and size of a South-facing window for spatial Daylight Autonomy. *Building and Environment*, 102, 243–256.
- Lamberts R., Dutra L., y Pereira F. (2012). Eficiência Energética na Arquitetura (3rd ed.). Florianópolis.
- Mardaljevic J., y Nabil A. (2005). Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in Buildings. *Lighting Research and Technology*, 37 (1), 41–59.
- Monteoliva J. M., Aceña A., Villalba A. M., Pattini A. E. (2016). Modelo simplificado para el cálculo de iluminancia por luz natural (UDI) en espacios individuales perimetrales de cielos claros: Caso de estudio: Mendoza, Argentina. *Hábitat Sustentable*, 6(1), 50–59.
- Monteoliva J. M., y Pattini A. (2013). Iluminación natural en aulas: análisis predictivo dinámico del rendimiento lumínico-energético en clima soleados. *Ambiente Construido*, 13(4), 235–248.
- Montoya, O. L., San Juan, G. A. (2018). Calidad ambiental de las aulas de colegios en el trópico: Evaluación subjetiva y objetiva del confort térmico, Visual y sonoro. In ASADES (Ed.), *Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol 6 (pp. 133–144).
- Nabil A., Mardaljevic J. (2006). Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. *Energy and Buildings*, 38(7), 905–913.
- Pattini A. (2009). Elementos De Control De Luz Solar Directa En Fachadas Vidriadas De Edificios No Residenciales De Ciudad Oasis. *Rediseño Para Aulas*. 179–186.
- Reinhart C. F., Mardaljevic J., y Rogers Z. (2006). Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. *LEUKOS - Journal of Illuminating Engineering Society of North America*, 3(1).
- U.S. Green Building Council-USGBC. (2013). LEED Reference Guide for Building Design and Construction. Washington DC.
- Wu, W., y Ng, E. (2003). A review of the development of daylighting in schools. *Lighting research y technology*, 35(2), 111-124.
- Yamin J. A., Colombo E. M., Rodríguez R. G., y Pattini A. E. (2014). Acta del I Encuentro Nacional sobre Ciudad, Arquitectura y Construcción Sustentable Evaluación de confort visual en escenas con iluminación natural directa, 54 (261), 189–199.
- Zapata C. M., Viegas G. M., San Juan G. A., Ramos H., Coronado J. A., Echeverría N., Ochoa, J., Tilano L., Rendón L., Tafur L., Montoya, O. L. (2018). Identificación de factores de desempeño ambiental (acústico, térmico y visual) determinantes de la salud mental de docentes de escuelas públicas de Bogotá, Medellín y Cali. In *Alapsa. VIII Congreso Latinoamericano de Psicología de La Salud* (p. 2018). La Habana.

# EVALUATION OF DESIGN PROPOSALS FOR THE OPTIMIZATION OF LIGHTING PERFORMANCE IN TROPICAL CLASSROOMS, BASED ON DYNAMIC METRICS

## ABSTRACT

The paper presents the analysis of design strategies to achieve visual comfort in classrooms, proposed by the Colombian standard NTC 4595. The methodology is based on experimental design, based on a virtual model, located in Cali, Colombia, to which design variations proposed by the standard are applied, and others, the result of the study, which are analyzed based on the dynamic metrics for annual simulation: UDI, sDA and ASE. The results show the need to consider the immediate exterior conditions, to propose sun protection elements on facades exposed to the north and south, to avoid direct exposure of the facade to the east-west, and clear materials inside. These results are intended to provide to the guidelines of the local norm, which, despite the efforts, are of low effectiveness when providing classrooms with the maximum use of natural lighting to meet the lighting requirements indicated in the standard.

**Key words:** School classrooms, Lighting performance, tropical climate, dynamic metrics simulation.

## **CALIDAD DEL AGUA UTILIZADA PARA CONSUMO HUMANO EN EL SALAR DE PIPANACO. CATAMARCA**

**M. Saracho<sup>1</sup>, L. Segura<sup>1</sup>, P. Lobo<sup>1</sup>, N. Agüero<sup>1</sup>**

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Facultad de Humanidades. Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas. Grupo de Energías Renovables Catamarca, INENCO. – CONICET  
Universidad Nacional de Catamarca, Avda. Belgrano 300 C.P. 4700 – Catamarca  
Tel. 0383-154407189. E-mail: martasaracho@gmail.com

*Recibido 13/08/19, aceptado 22/10/19*

**RESUMEN:** El acuífero freático es la única fuente de agua para consumo humano en puestos del Salar de Pipanaco, Pomán, provincia de Catamarca. El objetivo es determinar la calidad química del agua utilizada para bebida por las poblaciones de los parajes: Taco Suna, San Jerónimo, Tucumanao, Balde de la Pampa, San Nicolás, Puesto Corazón de Jesús, San Roque, Maderera de San Antonio y Zapi Cruz, ubicados en el Salar de Pipanaco y su relación con los aspectos hidrogeológicos del área. Se determinaron las concentraciones de iones mayoritarios y minoritarios, se caracterizó geoquímicamente la calidad del agua utilizando los diagramas de Schoeller y Piper, se evaluó su aptitud en función del CAA y la OMS y se analizaron antecedentes hidrogeológicos del Salar de Pipanaco. La magnitud de exposición de las personas a enfermedades de origen hídrico es alta ya que las concentraciones de fluoruro, arsénico y sulfato superan los límites para consumo humano fijados por las normativas consultadas.

**Palabras clave:** calidad del agua, consumo humano, Salar de Pipanaco, Catamarca

### **INTRODUCCION**

El acceso a fuentes de agua potable y segura, como también al saneamiento son un derecho humano esencial para el goce pleno de la vida y de todos los derechos humanos, reconocido por la Asamblea General de las Naciones Unidas (Resolución 64/292; ONU, 2010). Uno de los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS 6) plasmados en la Agenda 2030 sostiene como meta lograr hasta el 2030 el acceso universal y equitativo al agua potable a un precio asequible para todos (ONU, 2015). La escasez de agua para consumo humano se agrava en algunas regiones, donde el recurso hídrico no solo es limitado sino que la población debe afrontar dificultades en cuanto a infraestructura, disponibilidad y/o calidad en el acceso al agua. Según la OMS/UNICEF (2019) 2.200 millones de personas carecen de acceso a servicios de agua potable gestionados de manera segura. En este sentido, uno de los principales problemas es la presencia de fluoruro, arsénico y/o exceso de sales en el agua que se extrae de fuentes de agua superficial, pozos cavados o perforaciones y que en la mayoría de los casos es no recomendable para el consumo humano (Auge et al., 2006).

El ion fluoruro es un micronutriente acumulable en humanos, esencial para la formación de huesos y dientes, ya que promueve la precipitación de calcio y fosfato. Sin embargo, si existe un consumo excesivo de flúor de forma continua durante largos períodos de tiempo, se convierte en una sustancia tóxica con efecto acumulativo que puede ocasionar fluorosis dental (moteado y oscurecimiento del esmalte dental), deficiencia renal y hepática, anorexia, abortos, malformaciones o hasta fluorosis óseas (osteoesclerosis esquelética), en casos agudos puede provocar también diferentes tipos de cánceres (Licata, 2010). La fluorosis dental se da por la ingesta de agua con más de 2 mg/l de flúor

<sup>1</sup> Personal Subsecretaría de Planificación de los Recursos Hídricos. Provincia de Catamarca

durante el período de desarrollo dentario; cuando el esmalte ha madurado deja de ser susceptible. (Reynoso et al., 2016; Lahermo, 1987).

El arsénico está presente de forma natural en el agua debido a que las formaciones geológicas por donde circula pueden contener este elemento en concentraciones significativas, superando a veces los niveles de riesgo para la salud humana. Estos valores elevados se podrían asociar con aguas bicarbonatadas sódicas en ambientes levemente oxidantes (Gómez et al., 2009). Investigadores (Barrachina et al., 1995) estudiaron la toxicología del arsénico y encontraron que la principal vía de entrada de este elemento en la cadena alimentaria humana es la ingesta directa de agua, aunque los alimentos contaminados de origen vegetal y animal pueden ser otra vía importante de captación.

El consumo prolongado de arsénico puede desarrollar un síndrome tóxico, crónico y adquirido denominado Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico (HACRE), caracterizado por lesiones cutáneas benignas, que surgen luego de 1 a 15 años de ingesta de aguas contaminadas con arsénico o sus sales inorgánicas. El HACRE se desarrolla gradualmente, comprometiendo diversos órganos y sistemas, principalmente la piel, pudiendo ocasionar neoplasias. Este síndrome no cuenta con un tratamiento curativo, pero es prevenible (Palacios et al., 2012). La OMS (2006) teniendo en cuenta los efectos tóxicos del arsénico inorgánico sobre los seres humanos y otros organismos vivos, ha recomendado un límite de 10 µg/l de arsénico en agua para consumo humano. La reducción de los niveles de arsénico en aguas de consumo humano representa uno de los retos ambientales prioritarios a nivel mundial (Thirunavukkarasu et al. 2002)

La provincia de Catamarca está inserta en una región con problemas de fluoruro y arsénico en sus fuentes de agua (Vilches et al, 2005) particularmente en el área del Salar de Pipanaco donde se localizan numerosos parajes y/o poblaciones aisladas. Estos puestos se encuentran muy dispersos a lo largo del Salar, tienen características similares y se agrupan en función de la zona de influencia de las escuelas que funcionan en este espacio desértico. En esta zona la única fuente de agua disponible es el recurso hídrico subterráneo y la población solo dispone de pozos cavados de donde se extrae agua del acuífero freático.

Por lo expuesto, este trabajo se plantea como objetivos determinar la calidad del agua utilizada para consumo humano por las poblaciones de los paraje/ puestos de: Taco Suna, San Jerónimo, Tucumanao, Balde de laPampa, San Nicolás, Puesto Corazón de Jesús, San Roque, Maderera San Antonio, Zapi Cruz ubicados en el Salar de Pipanaco, departamento Pomán, provincia de Catamarca y su relación con los aspectos hidrogeológicos del área.

## **MATERIALES Y METODOS**

La cuenca endorreica del Salar de Pipanaco, con una superficie de 12.200 km<sup>2</sup>, se extiende al oeste de la provincia de Catamarca y al norte de provincia de La Rioja, Argentina. Contiene una llanura central donde las precipitaciones no superan los 100 mm/año. El acuífero está formado por materiales detríticos Plio-cuaternarios con espesores variables, incrementando sus potencias hacia las zonas de piedemonte. La recarga se produce preferentemente a través de los sectores laterales coincidente con los frentes montañosos y la principal salida del agua del sistema sería por evapotranspiración en la zona de playa del salar y vegetación principalmente freatófita aledaña. En la zona de estudio existen grandes fracturas regionales que pueden suponer zonas de circulación preferente de agua, e incluso suponer una vía de egreso del agua del sistema. Los análisis químicos e isotópicos sugieren que la composición química del agua en el acuífero tendría cuatro orígenes: agua de recarga por los frentes montañosos, agua del río Salado, agua salina antigua y agua termal de circulación rápida y profunda (CONHIDRO S.R.L.-IHLLA-DPHYERH, 2013 y 2015).

La cuenca, integrada en la provincia de Catamarca por los departamentos Belén, Andalgalá, Pomán y parte sudeste del departamento Tinogasta, se ubica en el Sector Noroccidental de la Provincia Geológica de Sierras Pampeanas (González Bonorino, 1950). En ellas afloran diferentes tipos litológicos, con características hidrogeológicas propias y muy variables tales como basamento rocoso cristalino (no acuífero, presentan permeabilidad secundaria por fracturación), unidades sedimentarias



terciarias (acuíferos con permeabilidad restringida) y cuaternarias (acuíferos con elevada permeabilidad).

La geología de la zona de estudio no presenta grandes variaciones, pues tratándose de una región llana, está cubierta casi totalmente por sedimentos del Cuaternario con depósitos de abanicos aluviales cuya litología presenta rodados, arenas, limos y arcillas. La playa salina está compuesta por evaporitas. En áreas muy reducidas, tales como al sur y sudoeste de los parajes, objeto de investigación, se aprecian afloramientos del Terciario Superior -Formación Salicas (Sosic, 1973), cuya litología está compuesta de areniscas, limolitas y conglomerados. El basamento cristalino aflora muy distante, rocas migmatíticas y graníticas se observan en la sierra de Velazco, en jurisdicción de provincia de La Rioja y esquistos cristalinos inyectados hasta migmatitas en la sierra de Ambato, en jurisdicción de la provincia de Catamarca; ambas sierras se sitúan al sudoeste y sudeste del área de estudio respectivamente. El clima es desértico. El área de estudio analizada abarca el centro-sur de la cuenca anteriormente descripta. (Figura 1).

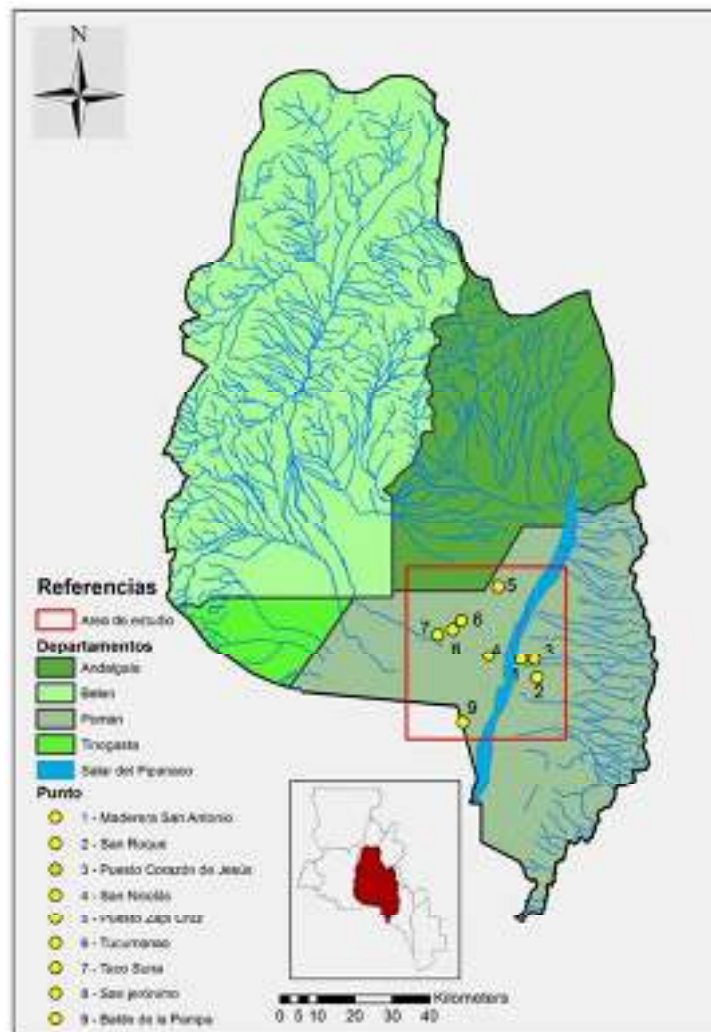


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio en la Cuenca del Salar de Pipanaco. Catamarca.

### Calidad del agua

**Muestreo:** El monitoreo se realizó durante el período 2016-2018, con una frecuencia semestral, en nueve pozos cavados utilizados por la población para consumo humano y usos múltiples, ubicados en los parajes / puestos: Taco Sana, San Jerónimo, Tucumanao, Balde de la Pampa, San Nicolás, Puesto Corazón de Jesús, San Roque, Maderera San Antonio y Zapi Cruz, situados en el sector centro-sur de la cuenca. (Figuras 2, 3, 4 y 5). El muestreo fue llevado a cabo por integrantes del grupo de investigación en colaboración con personal técnico de la Subsecretaría de Planificación de los



Figura 2. Extracción de muestras de agua. Pozo Escuela Balde de la Pampa

Figura 3. Extracción de muestras de agua. Pozo Escuela San Roque

Figura 4. Extracción de muestras de agua. Pozo Escuela San Nicolás

Figura 5. Extracción de muestras de agua. Pozo Escuela Tucumanao

#### Técnicas de análisis

Se determinaron las concentraciones de iones mayoritarios, pH, conductividad y componentes minoritarios (arsénico y fluoruro) utilizando las técnicas normalizadas descritas en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF; 2005). La concentración de arsénico total fue determinada por Espectrometría de Absorción Atómica, utilizando un equipo Perkin Elmer AA 400 con horno de grafito (HGA 900). La detección de la concentración de fluoruro se realizó aplicando la técnica del SPADNS mediante un Espectrofotómetro marca HACH DR 6000.

#### Análisis de los datos

Los datos obtenidos fueron procesados estadísticamente y evaluados en función de las Guías para la Calidad del Agua Potable de la OMS (2006) y de los Estándares de Calidad del Agua Potable fijados por el Código Alimentario Argentino (CAA, 2007; 2012). Se utilizó el software ARGIS para generar los mapas de conductividad, concentraciones de los iones fluoruro, arsénico, sulfato y ubicación georeferenciada de las fuentes de agua para consumo humano monitoreadas. Para la clasificación hidroquímica se utilizaron los diagramas de Piper y Schoeller. La caracterización hidrogeológica del área de estudio estuvo basada en el análisis de la Hoja Geológica 14e Salar de Pipanaco, que cubren la superficie del Salar de Pipanaco y posterior chequeo de campo.

## RESULTADOS Y DISCUSION

La ubicación georeferenciada de las fuentes de agua estudiadas se observa en la Figura 1. Las características constructivas de las captaciones y los niveles hidrostáticos de las más representativas se muestran en la Tabla 1.

Sitio de Monitoreo	Establecimiento Educativo	Profundidad de la captación (m)	Revestimiento de la captación	Nivel Hidrostático (m)
Maderera San Antonio	Escuela N° 165	22,00± 0,05	Cemento	19,40 ± 0,06
San Roque	Anexo Escuela N° 66	40,00± 0,07	Ladrillo	S/D
San Nicolás	Anexo Escuela N° 165	12,00± 0,03	Madera	10,31 ± 0,03
Zapi Cruz	Escuela N° 170	18,00± 0,06	Ladrillo	17,30 ± 0,05
Tucumanao	Escuela N° 73	17,00± 0,05	Cemento	9,16 ± 0,02
Balde de la Pampa	Escuela N° 66	9,00± 0,03	Cemento	5,30 ± 0,04

Tabla 1: Características constructivas y niveles hidrostáticos de las captaciones subterráneas estudiadas

Los niveles estáticos en los pozos cavados más representativos del área de estudio varían entre 5,30 m en Balde de la Pampa y 19,40 m en Maderera San Antonio, siendo la captación subterránea más profunda la ubicada en el paraje San Roque con 40,00 m.

Los valores medios de conductividad, STD, sulfato, pH, fluoruro y arsénico se muestran en la Tabla 2.

Sitio de Monitoreo	Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	STD (mg/l)	$\text{SO}_4$ (mg/l)	pH	F(mg/l)	As ( $\mu\text{g}/\text{l}$ )
Maderera San Antonio	$376 \pm 6$	$188 \pm 8$	$109 \pm 5$	$8,3 \pm 0,3$	$8,1 \pm 0,3$	$30 \pm 2$
San Roque	$399 \pm 5$	$199 \pm 6$	$43 \pm 4$	$7,8 \pm 0,2$	$3,1 \pm 0,5$	$11 \pm 1$
Puesto Corazón de Jesús	$762 \pm 3$	$381 \pm 4$	$185 \pm 8$	$8,6 \pm 0,5$	$6,0 \pm 0,6$	$37 \pm 4$
San Nicolás	$859 \pm 2$	$430 \pm 3$	$152 \pm 5$	$8,1 \pm 0,3$	$4,0 \pm 0,4$	$48 \pm 7$
Zapi Cruz	$1281 \pm 8$	$640 \pm 4$	$223 \pm 9$	$7,9 \pm 0,1$	$6,0 \pm 0,3$	$189 \pm 5$
Tucumanao	$1237 \pm 6$	$618 \pm 5$	$179 \pm 6$	$7,9 \pm 0,2$	$5,0 \pm 0,2$	$207 \pm 8$
Taco Suna	$1270 \pm 9$	$635 \pm 7$	$344 \pm 7$	$8,0 \pm 0,3$	$2,9 \pm 0,1$	$125 \pm 5$
San Jerónimo	$2040 \pm 30$	$1020 \pm 10$	$459 \pm 8$	$7,5 \pm 0,5$	$1,4 \pm 0,1$	$40 \pm 3$
Balde de la Pampa	$3530 \pm 50$	$1765 \pm 10$	$760 \pm 9$	$7,8 \pm 0,4$	$2,1 \pm 0,6$	$18 \pm 2$

Tabla 2: Características físico-químicas del agua de las captaciones subterráneas estudiadas

Teniendo en cuenta la salinidad, evaluada a través de la conductividad y STD se identificaron dos grupos de fuentes de abastecimiento con calidades de agua diferentes: el ubicado en el sector centro-este del área de estudio con conductividades menores a  $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$  y el situado en el área noroeste y sudoeste de la zona estudiada con conductividades mayores a  $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$  (Figura 1). En función de esta característica se analizaron los resultados obtenidos con los diagramas de Schöeller y Piper que se muestran en las Figuras 6, 7, 8 y 9.

El diagrama de Schöeller construido con los valores promedios de los resultados de los análisis químicos (iones mayoritarios) de las muestras obtenidas en las captaciones subterráneas – pozos cavados - ubicadas en Maderera San Antonio, Puesto Corazón de Jesús, San Nicolás y San Roque, sector centro-este del área de estudio, con conductividades menores de  $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$  se muestra en la Figura 6.

De acuerdo al diagrama de Schöeller, el agua de las muestras analizadas se clasifica como bicarbonatada-sulfatada-sódica a excepción del agua del puesto San Roque que es bicarbonatada sódica.

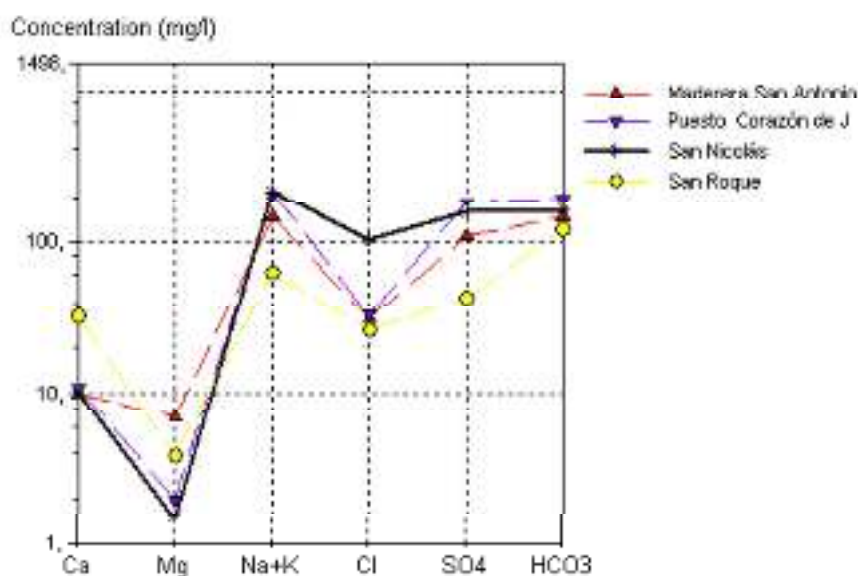


Figura 6. Diagrama de Schöeller. Pozos cavados con conductividades menores de  $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Salar de Pipanaco. Departamento Pomán.

El diagrama de Piper (Figura 7) construido para caracterizar el agua de los pozos cavados ubicados en el sector centro- este del área de estudio, muestra el predominio del ion sodio en el campo catiónico, sulfato y/o bicarbonato en el campo aniónico.

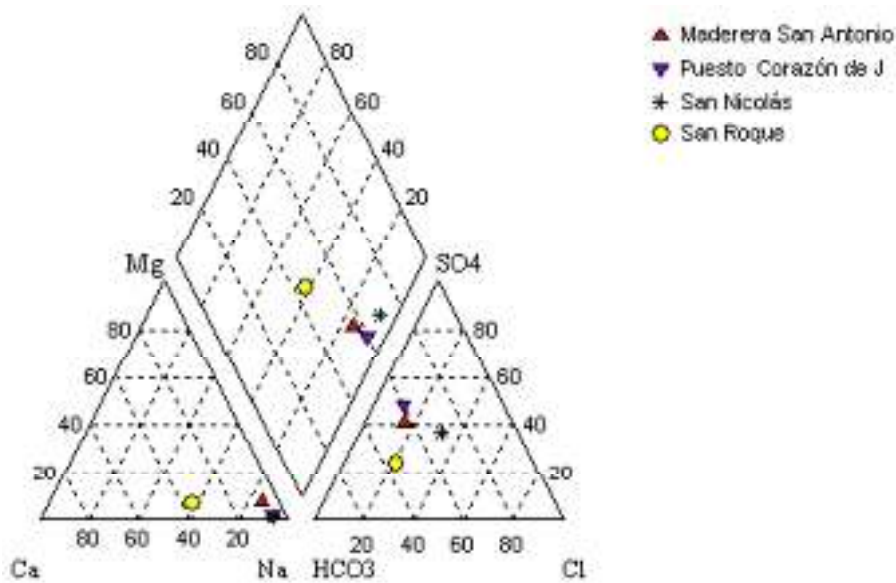


Figura 7. Diagrama de Piper. Pozos cavados con conductividades menores de 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Salar de Pipanaco. Departamento Pomán.

En las Figuras 8 y 9 se pueden observar los diagramas de Schoeller y Piper correspondientes a los pozos cavados ubicados en los sectores noroeste y sudoeste del área de estudio, donde la conductividad de las muestras analizadas supera los 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . El agua de mayor salinidad (conductividad > 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), detectada en el agua de Balde de la Pampa y San Jerónimo es sulfatada-clorurada-sódica mientras que el agua de los puestos Tucumanao, Zapi Cruz y Tacosuma ( $1237 \mu\text{S}/\text{cm} \leq \text{conductividad} \leq 1281 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) es sulfatada-sódica.

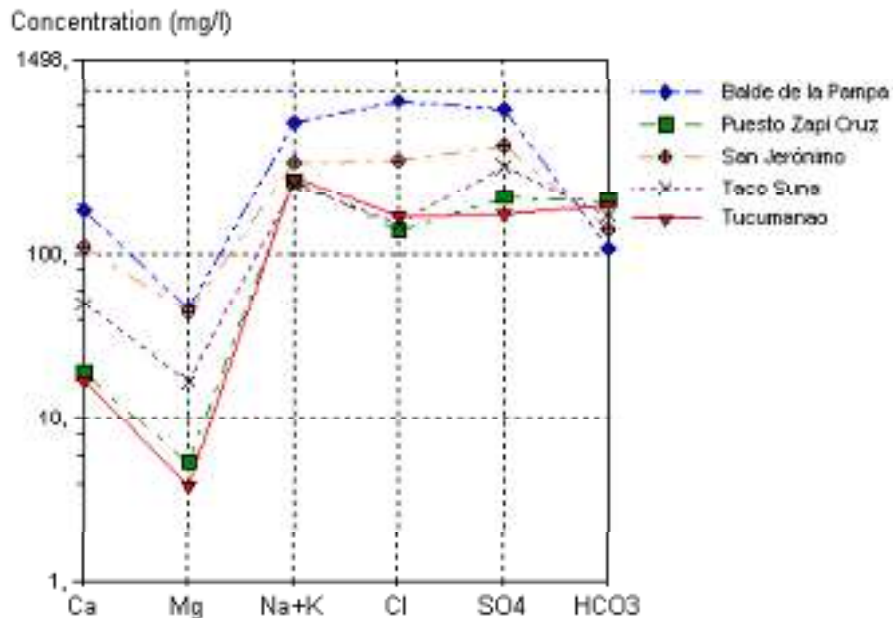


Figura 8. Diagrama de Schöeller. Pozos cavados con conductividades mayores de 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Salar de Pipanaco. Departamento Pomán.

El diagrama ternario de Piper (Figura 9) muestra para este grupo de pozos cavados el predominio en sus aguas del ion sodio en el campo catiónico, cloruro y/o sulfato en el campo aniónico.



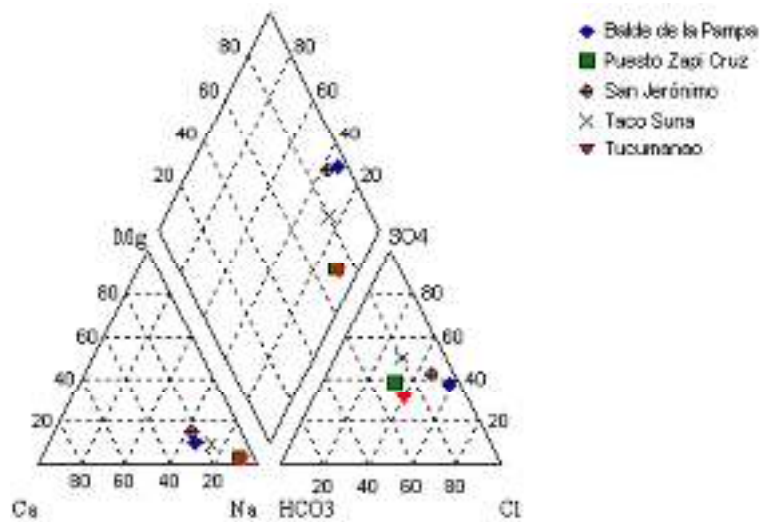


Figura 9. Diagrama de Piper. Pozos cavados con conductividades mayores de  $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Salar de Pipanaco. Departamento Pomán.

Las concentraciones promedio de los iones mayoritarios determinadas en las muestras extraídas se ajustan tanto a los límites fijados por el CAA para aguas de consumo humano, como a las recomendaciones de la OMS para dicho uso a excepción de los valores medios de STD en Balde de la Pampa ( $> 1500 \text{ mg}/\text{l}$ ) y sulfato en dicho paraje y en San Jerónimo ( $> 400 \text{ mg}/\text{l}$ ). Los valores medios de pH, STD y conductividad permiten clasificar el agua analizada como alcalina con conductividad media y alta.

La distribución espacial de la concentración media del ion arsénico en el área de estudio se muestra en la Figura 10:

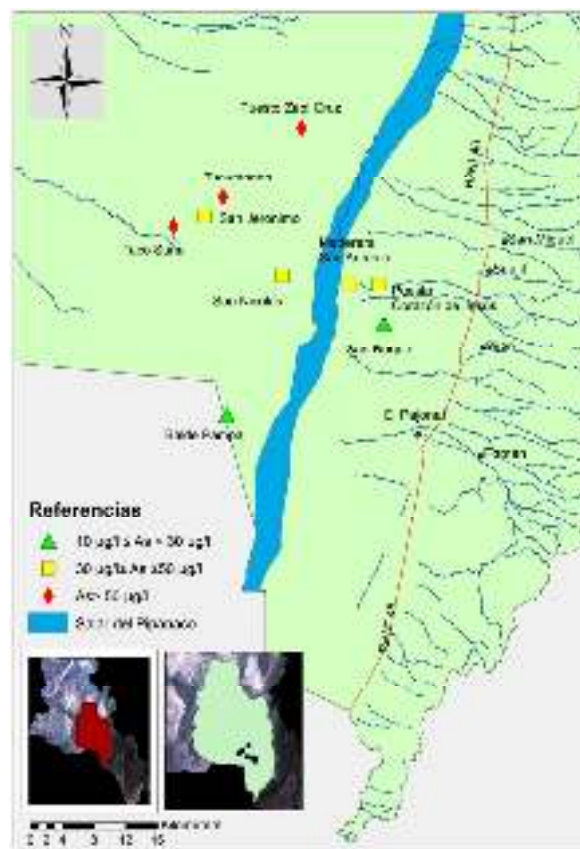


Figura 10. Concentración media del ión arsénico en los pozos cavados monitoreados. Salar de Pipanaco. Pomán

En la matriz estudiada, la concentración media de arsénico total detectada en los pozos ubicados en la zona noroeste y sudoeste, donde la problemática adquiere mayor relevancia por los valores detectados se corresponde con aguas sulfatadas-sódica (Taco Suma) y bicarbonatada-sulfatadas-sódicas (puestos Zapi Cruz y Tucumanao), con pH alcalino, condiciones propicias para la geodisponibilidad de este ión en el acuífero en estudio (Cabrera et al., 2005; Gomez et al, 2009).

Se observa que la concentración media del ion arsénico en las muestras analizadas exceden el valor guía recomendado por la OMS (2006) y el límite tolerable de este ión en agua para consumo humano establecido por la normativa nacional, el CAA (Resolución N°68/2007 y N°196/2007, modificada por Resolución Conjunta SPReI N° 34/2012 y SAGyP N° 50/2012) que en ambos caso es de 10 µg/l.

En la Figura 11 se muestra la distribución espacial de la concentración media del ion fluoruro en las fuentes de agua estudiadas.

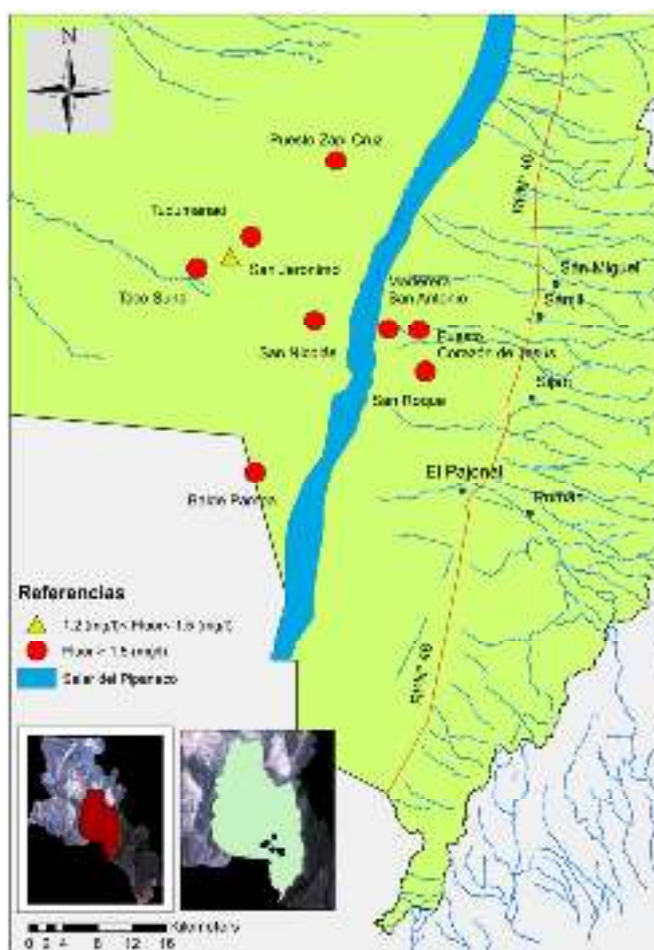


Figura 11. Concentración media del ión fluoruro en los pozos cavados monitoreados

Con respecto a la concentración media del ion fluoruro, los valores medios detectado ( $8,1 \leq F \leq 1,4$ ) mg/l exceden ampliamente el límite máximo tolerable de 1 mg/l, fijado por la normativa nacional (CAA) que se da en función de la temperatura media anual de la zona (21°C), considerando el consumo diario de agua de bebida. Solo el valor medio de este ion detectado en San Jerónimo se encuentra por debajo del nivel guía propuesto por la OMS que es de 1,5 mg/l.

Estudiando la correlación entre las concentraciones medias de los iones arsénico y fluoruro en las muestras analizadas se encontró que dicha correlación es significativa ( $R^2 = 0,8$ ) en las zonas NO y SO donde se detectaron las mayores concentraciones de arsénico y conductividades mayores a 2000 µS/cm (agua sulfatada, clorurada, sódica). A diferencia de lo anterior, en la zona centro - este del área de estudio se obtuvo un  $R^2 = 0,06$  que indica una correlación no significativa entre dichos iones (Figuras 12 y 13)

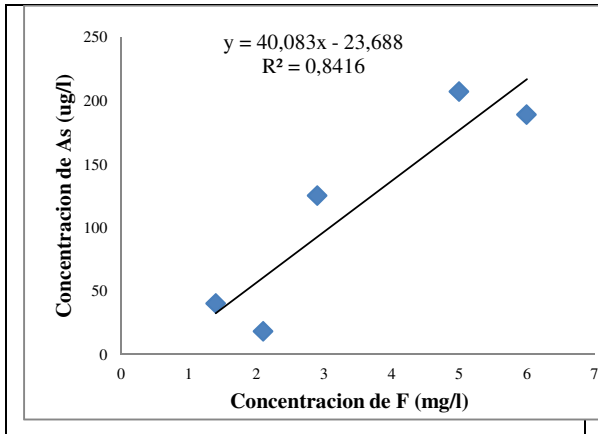


Figura 12. Relación As y F. Zona NO-SE

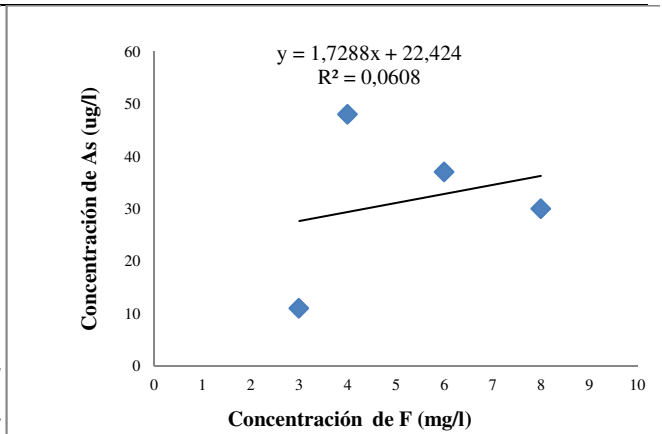


Figura 13. Relación As y F. Zona Centro-Este

Como se observa en las Figuras 14 y 15, la zona donde se detectó baja conductividad (< 1000  $\mu$ S/cm), centro-este del área de estudio, se corresponde con concentraciones de sulfato menores a 250 mg/l, valor guía para este ion recomendado por la OMS, mientras que en los sectores NO y SO de la zona de estudio donde están localizados los pozos de Tucumanao, Zapi Cruz y Taco Suna la conductividad aumenta hasta valores de 2000  $\mu$ S/cm y las concentraciones de ion sulfato detectadas se encuentran dentro del límite aceptado para consumo humano por el CAA (< 400mg/l). Superan este valor las concentraciones medias de sulfato medidas en los pozos de San Jerónimo y Balde de la Pampa donde se detectó el agua de consumo humano de mayor mineralización (conductividad > 2000  $\mu$ S/cm y  $SO_4^-$  > 400 mg/l), que puede ser atribuida a la influencia de aportes del río Salado y a la intensa heliofanía en la zona de estudio que favorece la precipitación de evaporitas, tales como halita y yeso.

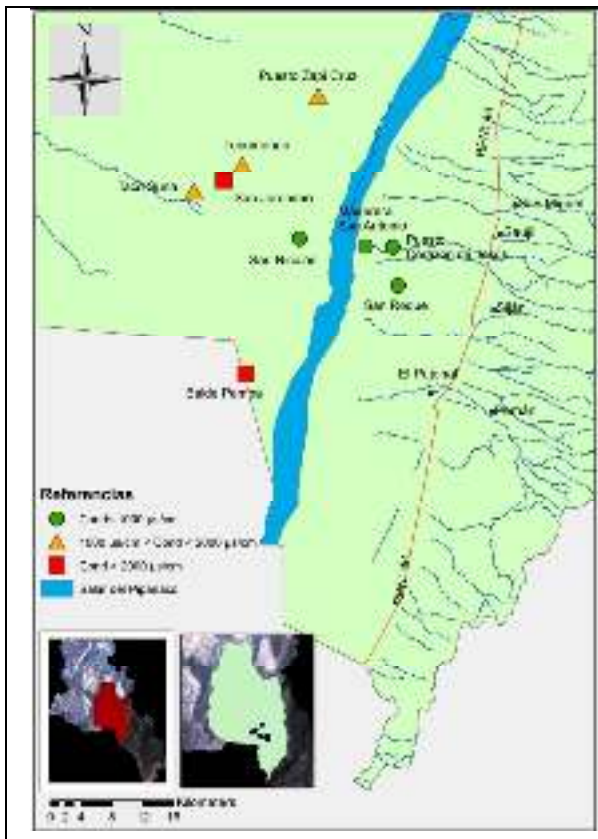


Figura 14. Concentración media de conductividad en los pozos cavados monitoreados

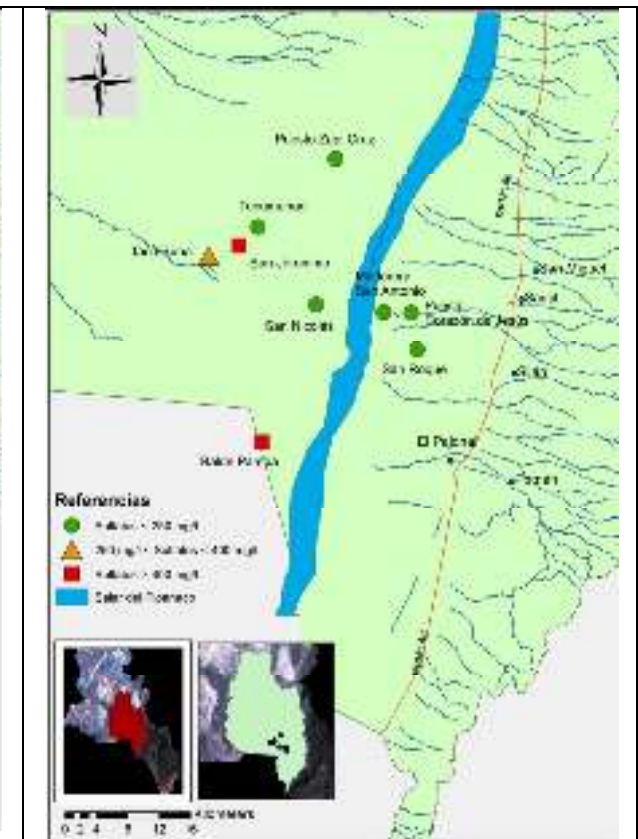
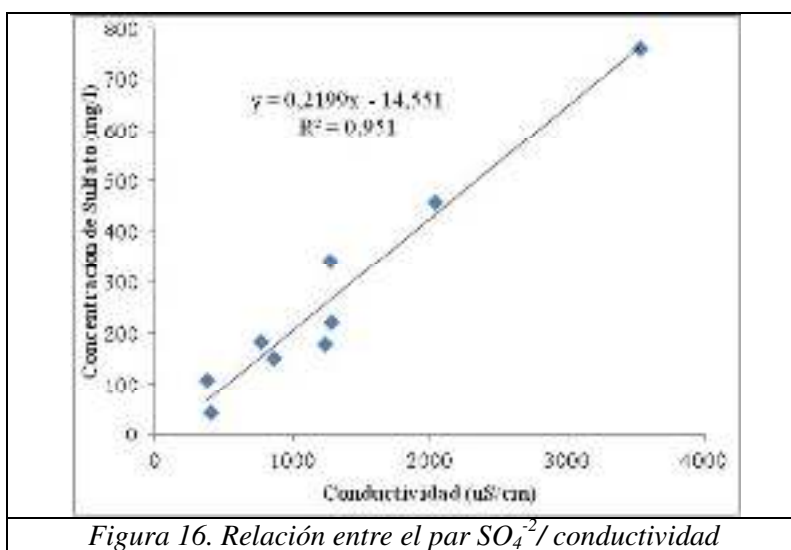


Figura 15. Concentración media de ión sulfato en los pozos cavados monitoreados



La correlación entre la concentración de ion sulfato y conductividad en la población estudiada se muestra en la Figura 16.



Se observa una correlación positiva, con una alineación asimilable a una recta, situación ratificada por el valor del coeficiente de correlación: 0,971, indicativo de la vinculación entre ambas variables. Por lo cual se puede inferir que el principal responsable de la salinidad adquirida por las aguas subterráneas del lugar es el ión sulfato, derivado del yeso contenido en los sedimentos terciarios aflorantes y subaflorantes de la zona de estudio.

De acuerdo a los resultados obtenidos y para mitigar el problema de calidad química del agua, utilizada para consumo humano se considera necesario implementar tecnologías que se adecúen a las condiciones ambientales, socioeconómicas y demanda de la población tal como osmosis inversa, alimentada con energía solar fotovoltaica.

Además, sería importante continuar con el monitoreo de la calidad del agua entregada a la población del área de estudio y de los efluentes producidos por los equipos de osmosis inversa a instalar.

## CONCLUSIONES

La composición química del agua del acuífero freático en explotación para consumo humano de los puestos/parajes ubicados en la cuenca del Salar de Pipanaco, departamento Pomán, situados al naciente de la playa salina es bicarbonatada-sulfatada-sódica de mineralización baja. Esta composición puede ser atribuida a la influencia hídrica de los ríos que drenan la vertiente occidental de la sierra de Ambato y que alimentan el acuífero freático de la zona y superficialmente al salar.

Al poniente de la playa salina, donde el aporte de los cursos superficiales proveniente del oeste al acuífero freático es más restringido se detectaron dos grupos de pozos cavados con calidad de agua diferente: los situados en San Jerónimo y Balde Pampa abastecen de agua sulfatada-clorurada-sódica de mineralización alta, mientras que las captaciones de Zapi Cruz, Taco Suna y Tucumanao proveen de agua sulfatada-sódica de mineralización media.

Las concentraciones medias de los iones arsénico y flúor en las fuentes de agua estudiadas superan los valores guías de la OMS y límites máximos fijados por el CAA. La geodisponibilidad del arsénico y fluoruro se ve favorecida por las características hidroquímicas del agua (bicarbonatada-sódica con pH ligeramente alcalino). Las concentraciones detectadas pueden ser atribuidas a la litología de sedimentos terciarios con aportes volcánicos que afloran al SO, al pie de la sierra de Velazco.

Se determinó una correlación positiva y significativa entre las concentraciones medias de los iones As y F en las zonas NO y SO del área de estudio, donde se detectaron las mayores concentraciones de

arsénico y alta mineralización, mientras que en la zona este la correlación entre estos iones es baja. Por los altos valores de F y As en el agua analizada se puede considerar que la magnitud de exposición de las personas a enfermedades de transmisión hídrica, es alta.

La concentración media de ion sulfato en las zonas NO y SO, donde se detectó agua de alta mineralización, supera el límite aceptado para consumo por el CAA. En función del análisis realizado se puede inferir que el principal responsable de la salinidad adquirida por el agua utilizada para consumo humano de la zona de estudio es el ión sulfato, derivado del yeso contenido en los sedimentos terciarios aflorantes y subaflorantes y de los sedimentos cuaternarios intercalados con halófilas próximos a la playa salina.

Los resultados de este estudio contribuyen a disponer de un diagnóstico de la distribución y concentraciones de arsénico y fluoruro en el área considerada y aportan información a las autoridades sanitarias para que adopten metodologías de abatimiento compatibles con la realidad socioeconómica y ambiental de la región.

## REFERENCIAS

- APHA.-A.W.W.A.-W.E.F. (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Edición 21. pp 3-25; 3-38, 3-61; 4-85. United States of America.
- Auge M., Wetten G., Baudino G., Bonorino G., Gianni R., Gonzalez N. (2006). Hidrogeología de Argentina. Boletín Geológico y Minero, 117 (1): 7-23. ISSN: 0366-0176
- Barrachina, A., Beneyto, F. y Carbonell, F. (1995). Arsénico en el sistema suelo-planta: significado ambiental. Universidad de Alicante. Gráficas Vidal Leuka, S. L. pp. 6-17, 103-107.
- Cabrera A., Blarasin M., Cabrera S., Matteoda., Gómez M., Villalba G., Hildmann F., Bettera A. (2005). Arsénico y flúor en el acuífero freático en el sur de Córdoba: Línea de base hidroquímica y problemática ambiental vinculada. Arsénico en agua: origen, movilidad y tratamiento. Taller. II Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de hidrología subterránea - IV Congreso Hidrogeológico Argentino. Río Cuarto. Córdoba. Argentina. pp 41-52.
- Código Alimentario Argentino. (2007). Capítulo XII. Art. N° 982. Resolución N°68/2007 y N°196/2007. Modificación 2012 (Resolución Conjunta SPReI N° 34/2012 y SAGyP N° 50/2012). Ministerio de Salud. Bs. As. Argentina.
- CONHIDRO-IHLLA-DPhyERH, 2013. Modelo conceptual sobre el funcionamiento hidrogeológico del Salar de Pipanaco (Catamarca, Argentina). Informe técnico. Gobierno Catamarca, 176 pp.
- CONHIDRO-IHLLA-DPhyERH, 2015. Modelo conceptual sobre el funcionamiento hidrogeológico del Salar de Pipanaco (Catamarca, Argentina). Informe técnico, Etapa 2. Gobierno Catamarca, 108 pp.
- Gómez, M. Blarasin, M., Martínez, D. (2009). Arsenic and fluoride in a loess aquifer in the central area of Argentine: Environmental Geology, 57, 143–155.
- González Bonorino, F. (1950). Algunos problemas geológicos de las Sierras Pampeanas. Revista Asociación Geológica Argentina. N° 5 (3): 81-110. Buenos Aires.
- Lahermo P.W. (1987). The occurrence and pathways of abnormally high fluoride concentrations in the environment and their impact on human health in northern Tanzania. Elements and Disease Proc. On the first. Int. cont. on Elements. Pp. 30-43.
- Licata M (2010). Flúor en la Nutrición. <https://www.zonadiet.com/nutricion/fluor.htm>
- OMS. (2006). Guías para la Calidad de Agua Potable. Primer Apéndice de la Tercera Edición. Volumen I. Recomendaciones. Ginebra. Suiza.
- Organización de las Naciones Unidas (2015) Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible A/RES/70/1. Naciones Unidas.
- ONU (2010). Resolución 64/292 aprobada por la Asamblea General 28 de Julio de 2010. Pagina consultada el 18/10/19
- [www.politicaspUBLICAS.net/panel/agua/dhagua/667-onu-2010-resolucion-agua.html](http://www.politicaspUBLICAS.net/panel/agua/dhagua/667-onu-2010-resolucion-agua.html).
- OMS-UNICEF (2019). Progress on household drinking water, sanitation and hygiene I 2000-2017. Pagina consultada el 18/10/19. [https://www.unicef.org/nicaragua/informes/avances-en-agua-potable-saneamiento-e-higiene-especial-atenci%C3%B3n-las-desigualdades-2000\\_2007.Nicaragua.UNICEF.html](https://www.unicef.org/nicaragua/informes/avances-en-agua-potable-saneamiento-e-higiene-especial-atenci%C3%B3n-las-desigualdades-2000_2007.Nicaragua.UNICEF.html)

- Palacios, S., Guglielmino, C., Vereá, M. y Pecotche, D. (2012). H.A.C.R.E. Hidroarsenicismo Crónico Regional y Endémico. Arch. Argent. Dermatol (pp. 62, 233-238).
- Resolución Conjunta SPReI N° 34/2012 y SAGyP N°50/2012.  
[http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:m06niM\\_gW3MJ:infoleg.mecon.gov.ar/infolegInternet/anexos/190000-194999/194461/norma.htm](http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:m06niM_gW3MJ:infoleg.mecon.gov.ar/infolegInternet/anexos/190000-194999/194461/norma.htm)
- Resolución Conjuntas SPRyRS N° 68/2007 y SAGPyA N° 196/2007.  
<http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/125000-129999/128630/norma.htm>
- Reynoso S., Ramirez A., Arguelles C. (2016). Estudio de la concentración de flúor, en el agua subterránea de Santiago del Estero (Dptos. Copo y Alberdi). Calidad del Agua Subterránea. IX Congreso Argentino de Hidrogeología. Pp 109-114.
- Sosic M.(1973). Descripción Geológica de la Hoja 14e, Salar de Pipanaco. Provincias de Catamarca y La Rioja. Carta Geológico, Económica de la Republica Argentina. Escala 1:200.000. Boletín N° 137. Servicio Nacional Minero Geologico. Leonardo Impresora. Bs. As
- Thirunavukkarasu O., Viraraghavan T., Subramanian K., Tanjore S. (2002). Organic arsenic removal from drinking water. *Ukrban Water*. 4,415-421.
- Vilches F., Palomeque L., Cordoba G., Fuentes S., Navarro Garcia L. (2005) “El Arsénico en la Provincia de Catamarca”. *Arsénico en Agua Origen, Movilidad y Tratamiento*. [digital.csic.es/bitstream/10261/4019/1/Galindo\\_et\\_al-Arsenico-2005.pdf](http://digital.csic.es/bitstream/10261/4019/1/Galindo_et_al-Arsenico-2005.pdf). pp. 103-110.

## **QUALITY OF WATER USED FOR HUMAN CONSUMPTION IN THE SALAR OF PIPANACO. CATAMARCA**

### **ABSTRACT**

The freatic aquifer is the only source of water for human consumption at posts in the Salar de Pipanaco, Pomán, province of Catamarca. The objective is to determine the chemical quality of the water used for drinking by the populations of the places: Taco Suna, San Jerónimo, Tucumanao, Balde de la Pampa, San Nicolás, Puesto Corazón de Jesús, San Roque, Maderera de San Antonio and Zapi Cruz, located in the Salar de Pipanaco and its relationship with the hydrogeological aspects of the area. The concentrations of major and minor ions were determined, water quality was geochemically characterized using the Schoeller and Piper diagrams, their aptitude was evaluated according to the CAA and the WHO and hydrogeological antecedents of the Salar de Pipanaco were analyzed. The magnitude of exposure of people to hydric origin diseases is high since the concentrations of fluoride, arsenic and sulfate exceed the limits for human consumption set by the regulations consulted.

**Keywords:** water quality, human consumption, Salar de Pipanaco, Catamarca

## REVISIÓN DE LOS RANGOS DE CONFORT INVIERNAL DE VIVIENDAS EN CORDOBA COMO CONDICIÓN PARA EL ACONDICIONAMIENTO NATURAL

Gabriela Arrieta<sup>1,2</sup>, Arturo Maristany<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Facultad de Arquitectura Urbanismo y Diseño (FAUD), Centro de investigaciones Acústicas y luminotécnicas (CIAL)

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

El Cordobazo s/n – Ciudad Universitaria – Córdoba Capital - C.P:5000 - <http://cial.faudi.unc.edu.ar>

Tel: 0351 433-3037 e-mail: [g.arrieta@live.com.ar](mailto:g.arrieta@live.com.ar)

*Recibido 19/08/19, aceptado 22/10/19*

**RESUMEN:** Este trabajo presenta los resultados de un estudio de campo realizado en la ciudad de Córdoba con el objetivo de verificar los rangos de confort a partir de la valoración subjetiva de las condiciones de temperatura interior y HR en las que habitan las personas en viviendas de la ciudad. El estudio se realizó en 12 viviendas, consiguiendo un total de 416 encuestas respondidas durante los meses de junio y julio del 2019, considerando un periodo representativo de invierno. Se estimaron temperatura y humedad relativa neutra y rangos de confort con el método de medias por intervalo de sensación térmica (MIST), comparando el rango de confort con el establecido por otros autores. El objetivo de este estudio es, a partir de las condiciones de temperatura y humedad relevadas en las viviendas, verificar los rangos de preferencia térmica valorados en invierno y si, tomando los mismos como objetivo, es posible incluir estrategias de acondicionamiento pasivo para reducir la climatización mecánica en el periodo invernal sin perder de vista las actuales exigencias de confort térmico.

**Palabras claves:** Confort térmico, ambiente interior, adaptación pasiva.

### INTRODUCCIÓN

El incremento de la demanda energética, producto del crecimiento de la población mundial y de los estándares de confort, hace necesario aprovechar al máximo los recursos energéticos disponibles (Azqueta, 2014). Gran parte de la demanda proviene del sector residencial, por lo que el etiquetado de eficiencia energética de edificios ha cobrado gran importancia a nivel mundial, siendo necesario combinar el uso racional de la energía con construcciones sustentables (Coronato et al., 2017). Con el aumento de la contaminación y el cambio climático, los estándares en sí mismos caerán en descrédito e incluso en desuso si ignoran este problema. Los estándares térmicos que, por muy deseables que sean, requieren una cantidad excesiva de energía para su cumplimiento, tenderán a sufrir más (Nicol y Humphreys, 2002). Al dar real importancia al creciente y constante calentamiento global, son trascendentes las acciones destinadas a reducir la demanda excesiva de energía ocasionada por la cada vez mayor demanda de confort térmico en ambientes interiores residenciales. Se debe encontrar la forma de diseñar edificios residenciales adaptados al clima, que permitan mantener confortable al exigente usuario de la actualidad, sin involucrar en la capacidad de adaptación (Arrieta y Maristany, 2018), considerando la capacidad biológica innata del ser humano de adaptarse a climas variados y sus fluctuaciones temporales.

La llamada zona de confort, es aquella situación en la que la mayoría de los usuarios se sienten satisfechos con el ambiente térmico. Definiéndose un rango de condiciones como la temperatura y la humedad para delimitarla. La explicación operativa del confort térmico se reduce en consecuencia a un estado de equilibrio resultante del balance de las cargas térmicas que se intercambian entre el cuerpo humano y su ambiente inmediato, debido al proceso químico del metabolismo y al proceso fisiológico de termorregulación en respuesta a los elementos externos del clima: radiación, temperatura, humedad y movimiento del aire, como elementos principales (Critchfield, 1974 por

Gómez-Azpeitia et al., 2007). Cuando el balance térmico arroja un valor cero, es decir cuando el cuerpo humano no gana ni cede calor, significa, que las personas experimentan objetivamente una sensación térmica de confort. Arballo et. al., (2016) destacan como válida la hipótesis de que los usuarios necesitan ser activos en función a su ambiente térmico, y ser proveídos de suficientes oportunidades para tener cierto control personal del mismo. Esta posibilidad los habilita a desarrollar más tolerancia, e inclusive aumentar la aceptabilidad, sobre un mayor rango de amplitud térmica.

El clima de la ciudad de Córdoba, es particularmente complejo porque está afectado por enormes amplitudes térmicas diarias. Para este tipo de climas, a diferencia de los extremos, no hay estrategias precisas y absolutas de diseño a considerar. Esto se traduce en una gran posibilidad para definir pautas relativas y flexibles, orientadas a lograr viviendas eficientes que colaboren para el acondicionamiento térmico a través de la adaptabilidad de sus envolventes y eviten la dependencia de los mecanismos de acondicionamiento artificial. El estudio de la sensación térmica percibida en la vivienda permite establecer lineamientos de diseño para la habitabilidad térmica con base en la percepción de los sujetos (García Gómez et al., 2011)

En la mayoría de las descripciones meteorológicas, Córdoba se describe como ubicada en clima templado. Específicamente en la capital se diferencian mejor las cuatro estaciones, y las temperaturas son algo más frescas que en el resto de la provincia, determinadas por la altitud de la ciudad y por los vientos fríos de origen antártico de la Pampa. Así, la temperatura media en la ciudad es de aproximadamente 18°C–19°C. Las máximas se producen en enero y pueden alcanzar en ocasiones los 40°C. Las mínimas, por su parte, se registran en junio y julio y en ocasiones suelen bajar de los 0°C. Estas temperaturas se agudizan más en el centro urbano, donde son algunos grados superiores que en la periferia. Los veranos en la ciudad son calurosos y moderadamente húmedos. Es común que olas de calor de varios días aparezcan en la ciudad dejando temperaturas de hasta 35°C–40°C. Son los meses más lluviosos con promedios de 120 mm mensuales. Al comienzo del otoño los días suelen ser calurosos al mediodía y durante la tarde, mientras que por la mañana y la noche refresca bastante. Abril es un mes muy seco y en mayo pueden aparecer las primeras heladas. El clima de Córdoba en invierno es fresco durante el día y frío o muy frío por las noches. Las máximas pueden alcanzar los 16°C–18°C durante el día y bajar hasta -5°C por la noche, siendo meses muy secos en la ciudad. La primavera de Córdoba se caracteriza por ser muy variable y muy ventosa, de grandes amplitudes térmicas diarias.

Según la norma de referencia (IRAM 11603: 2011) utilizada en Argentina, Córdoba se encuentra localizada dentro de la zona bioambiental IIIa. Definido como clima Templado cálido. Esta zona se subdivide en dos sub zonas: a y b, en función de las amplitudes térmicas. Sub zona IIIa: amplitudes térmicas mayores que 14 °C (dentro de la que se encuentra la ciudad de Córdoba). Sub zona IIIb: amplitudes térmicas menores que 14°C. Para esta zona la norma define que los veranos son relativamente calurosos y presentan temperaturas medias comprendidas entre 20 °C y 26 °C, con medias máximas mayores que 30°C, sólo en la faja de extensión Este-Oeste. El invierno, según la norma de referencia, no es muy frío y presenta valores medios de temperatura comprendidos entre 8°C y 12°C, y valores mínimos que rara vez son menores que 0°C. La IRAM 11603 invita a utilizar estos datos para balances térmicos tendientes a dimensionar instalaciones de acondicionamiento ambiental activo, como elemento de apoyo para el diseño y la evaluación del comportamiento térmico de edificios.

Datos climáticos de invierno según IRAM:

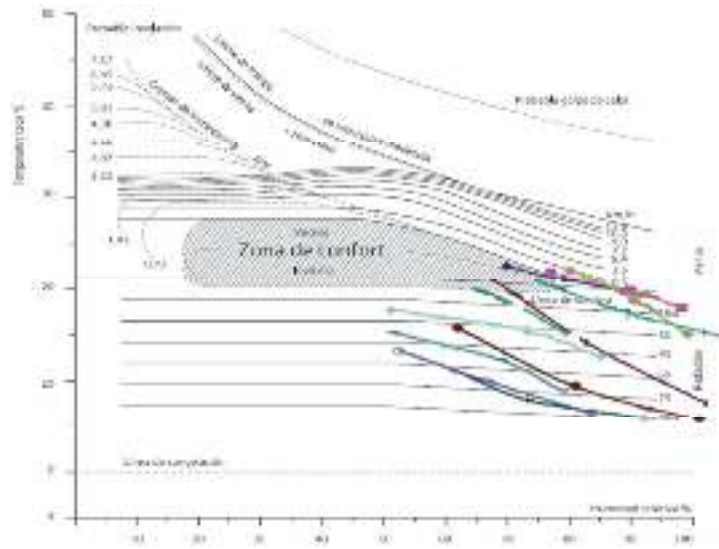
ESTACION	TMED	TMAX	TMIN	TMA	PREC	HR
CBA obs.	<b>13,46</b>	19,9	7,1	-5,2	45	<b>66</b>

Datos climáticos de verano según IRAM:

ESTACION	TMED	TMAX	TMIN	TMA	PREC	HR
CBA obs.	<b>23,65</b>	29,8	17,6	41	493	<b>68,8</b>

Diferentes metodologías (Olgay, Givoni, Evans) permiten, a partir de los datos climáticos, evaluar el grado de aproximación de las oscilaciones de temperatura y humedad a zonas de confort de referencia

predefinidas, y como complemento establecer estrategias de acondicionamiento o recomendaciones de diseño. Las graficas de las figuras 1, 2 y 3 muestran la situación de Córdoba, a partir de los datos climáticos de la estación Córdoba Observatorio (Obs.), tomando los registros desde el año 2007 al 2017 inclusive.



*Figura 1: Diagrama de Olgyay teniendo en cuenta datos medios mensuales de temperatura y humedad de Córdoba desde 2007 hasta 2017. Software desarrollado por el Arq. G. Gonzalo.*

Olgyay (1963) define una zona de confort (Figura 1) entre los 21,1°C y los 27,5°C aproximadamente y entre 30% y 65% de humedad relativa que puede ser ampliada para zonas con baja y alta humedad, también tiene una variación para el invierno, con una relación para corregir la gráfica con respecto a latitudes menores de 40°C (Chávez del Valle, 2002).

Givoni, (1981) desarrolla el conocido método donde define, sobre el diagrama psicrométrico, una zona de confort para invierno, y una para verano a partir de la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa (Figura 2). Y fuera de esta zona, estrategias para alcanzarla según cada rango de variación de temperatura y humedad.

En el triángulo de confort propuesto por Evans (2011), se adopta la temperatura media diaria mínima de 18°C, y máxima de 28°C, para lograr confort en actividades sedentarias con ropa adecuada en espacios interiores en invierno. Con estas temperaturas medias no se admiten oscilaciones de temperatura, pero a medida que la temperatura media se acerca a los 22°C, se puede aceptar mayor amplitud, representando el llamado “triángulo de confort”. En el gráfico de los triángulos de confort de la figura 3 se indican los datos de temperatura media y amplitud térmica de la ciudad de Córdoba. Las amplitudes diarias normalmente superan los 8°C (Limite del triángulo de confort definido por Evans y alcanzan en ocasiones extremas hasta los 28°C, siendo esto último un factor determinante.



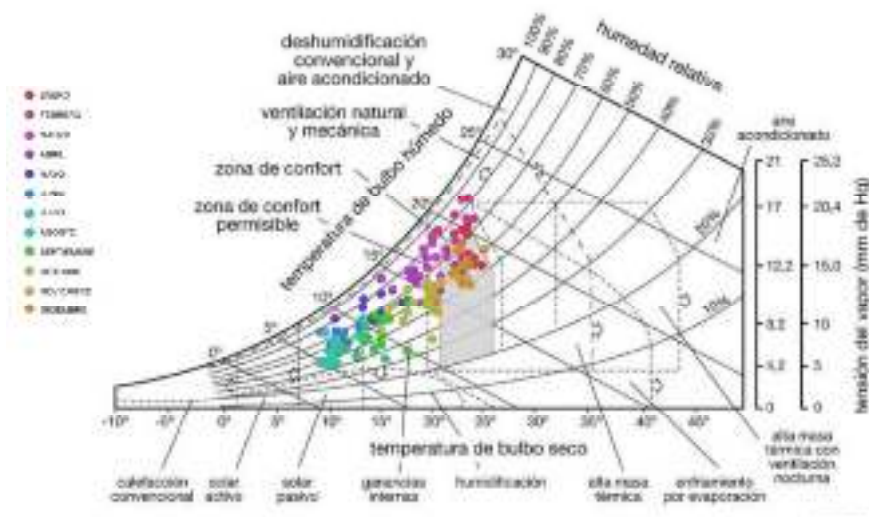


Figura 2: Abaco psicrométrico con datos medios mensuales desde el 2007 al 2017 inclusive.

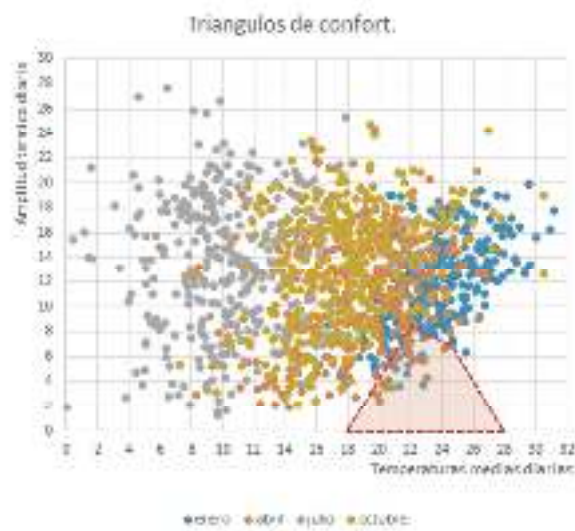


Figura 3: Triángulos de confort de Evans. Temperaturas y amplitudes diarias de Córdoba 2007/2017 de enero/abril/julio/octubre.

Observando la descripción del clima de Córdoba, según la Norma de referencia en la construcción y la relación de los datos climáticos con criterios generalizados de delimitación de la zona de confort, comienza a quedar en evidencia la falta de relación entre los criterios preestablecidos de confort y la respuesta subjetiva de los usuarios en climas templados de grandes oscilaciones térmicas. Mostrando el claro potencial que ofrece adoptar criterios de confort adaptativo en climas con estas características. Para lo cual es necesario revisar los criterios de delimitación de las zonas de confort y las estrategias recomendadas para estos casos.

## DESARROLLO

### Encuesta

Se realizó un estudio de las valoraciones de los usuarios enfocándose en las sensaciones subjetivas de confort de las personas que habitan viviendas en la ciudad de Córdoba y su correspondencia con la temperatura interior. Para ello, se tomaron como casos de estudio 12 viviendas de la ciudad, sin tener requisitos de tipología específica, se consideró que sea una muestra variada en ubicación, orientación, antigüedad y materialidad para lograr un monitoreo representativo de la tipología vivienda en general. (Tabla 1).



N	Tipología	Condición	NP	Techo	Terminación	Materialidad	Terminación	espesor	Ubicación	Orientación
1	Vivienda unifamiliar	entre medianeras	0	Inclinado	Tejas	Bloque cementico	Bolseado	20cm	Periurbana	Sur
2	Departamento	entre medianeras	9	plano	Habitado	Bloque cerámico	Revoque grueso y fino	20cm	Centro	Norte
3	Departamento	entre medianeras	21	plano	losa	Bloque cerámico	Ladrillo visto	20cm	Centro	sur Este
4	Vivienda unifamiliar	aislada	0	plano	Habitado	Retak	Revoque grueso y fino	20cm	Periurbana	Norte
5	Departamento	aislada	9	plano	losa	ladrillo común	Revoque grueso y fino	20 cm	centro	Sur Este
6	Departamento	aislada	24	plano	Habitado	ladrillo común	Ladrillo visto	20 cm	centro	Este
7	Vivienda unifamiliar	entre medianeras	0	Inclinado	Losa	Bloque cementico	Bolseado	20 cm	Periurbana	Sur
8	Departamento	aislada	30	plano	Losa	Bloque cerámico	Revoque grueso y fino	20 cm	Centro	Norte
9	Vivienda unifamiliar	Aislada	0	Plano	Losa de viguetas	Ladrillo común	Revoque grueso y fino	30 cm	Periurbana	Norte
10	Vivienda unifamiliar	aislada	0	plano	Losa	Bloque cerámico	Fachada Ventilada	30 cm	Centro	Norte
11	Vivienda unifamiliar	Aislada	0	Inclinado	Chapa con aislación	Bloque cerámico	Revoque grueso y fino	20 cm	Periurbana	Norte
12	Vivienda unifamiliar	aislada	2	inclinado	losa	ladrillo común	Ladrillo visto	28 cm	Periurbana	Noroeste

*Tabla 1: Relevamiento de viviendas estudiadas. Elaboración propia.*

Estas viviendas fueron monitoreadas durante los meses de junio y julio del 2019 a través de sensores Hobo data logger (HDL) en los espacios interiores de estar, se registraron temperatura de bulbo seco y humedad relativa cada 15 minutos.

Complementando estas mediciones, se realizaron encuestas con el objetivo de vincular las temperaturas interiores en que se mantienen las viviendas y las sensaciones del usuario promedio en relación a éstas. El ensayo se realizó durante los meses de junio y julio del 2019, considerando los meses de invierno. Los sujetos de estudio fueron hombres y mujeres en el rango de entre los 20 a 60 años que estuvieran dentro del recinto monitoreado en el momento de completar la encuesta. Se desarrolló un instructivo de como completar las encuestas. Éstas, fueron enviadas a través de un formulario online diseñado en base a la norma ISO 10551 (UNE-EN ISO 7730, 2006), que el usuario debía completar un mínimo de dos veces diarias mientras estuviera en el recinto monitoreado.

El cuestionario consistía en 6 preguntas de opciones múltiples que se detalla a continuación:

- 1 - ¿Está utilizando en este momento algún medio de acondicionamiento mecánico?
  - SI
  - NO
- 2 - ¿Qué siente usted en este momento? (marcar la casilla apropiada) Tengo...
  - -3 Mucho frío
  - -2 Frío
  - -1 Un poco de frío
  - 0 Ni frío ni calor
  - 1 Un poco de calor
  - 2 Calor
  - 3 Mucho calor
- 3 - Se encuentra usted...
  - Cómodo
  - Algo incómodo
  - Incómodo
  - Muy incómodo
  - Extremadamente incómodo
- 4 - En este momento preferiría tener...
  - -3 Mucho más frío
  - -2 Más Frío
  - -1 Un poco más de frío
  - 0 Ni más frío ni más calor

- 1 Un poco más de calor
  - 2 Más Calor
  - 3 Mucho más calor
- 5 - Teniendo en cuenta únicamente sus preferencias personales, ¿aceptaría usted este ambiente térmico en lugar de rechazarlo?
- Si
  - No
- 6 - En su opinión, este ambiente térmico es...
- Perfectamente tolerable
  - Un poco difícil de tolerar
  - Bastante difícil de tolerar
  - Muy difícil de tolerar
  - Intolerable.

Los usuarios de las viviendas monitoreadas respondieron las preguntas en relación a cómo se sentían con el ambiente térmico. Se realizaron un total de 416 encuestas en simultáneo con las mediciones para conocer las valoraciones subjetivas de las personas bajo las condiciones monitoreadas.

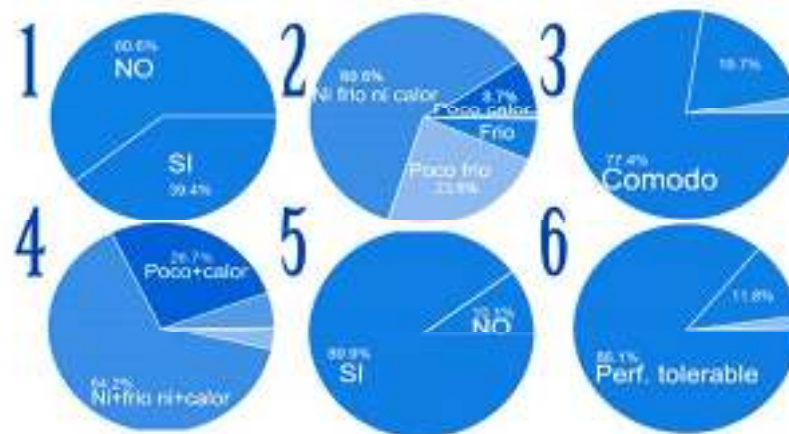


Figura 4. Resumen de las respuestas obtenidas de las encuestas.

En los gráficos de la figura 4 se muestra la distribución general de las respuestas a las seis preguntas de la encuesta. A pesar de estar en el periodo invernal, la mayoría de las viviendas, no estuvieron acondicionadas mecánicamente y de todas formas más de la mitad valoró sentirse en el punto de confort 0 (“ni frío ni calor”). Si se desglosa esta observación, se detecta que las valoraciones 0 “ni frío ni calor” y la valoración -1 “un poco de frío” ocupan casi un 90% de las respuestas en ambos casos (con y sin acondicionamiento mecánico), es decir que estén o no las viviendas calefaccionadas un 90% de las personas se encuentran en el rango de confort esperado para invierno. (Figura 5).



Figura 5: Valoraciones subjetivas en viviendas con y sin acondicionamiento mecánico.

#### Rangos de confort MIST

El objetivo de este procedimiento es determinar el valor medio de temperatura o humedad de todas las respuestas en cada nivel de sensación térmica percibida de acuerdo a cada una de las siete categorías de

respuesta de confort según *UNE-EN ISO 10551:1995, 2002*. Se realizaron dos o más encuestas diarias a los habitantes de las 12 viviendas estudiadas y se vincularon las sensaciones valoradas en relación a las temperaturas registradas simultáneamente en el ambiente interior. (Figura 9 y 10). De esa forma se calculó el valor promedio de la temperatura y de la humedad en la que los sujetos valoraron sentirse en confort (valor 0), pero también de quienes expresaron sentir calor ó frío (valores +1 y -1).

Posteriormente se establecieron los rangos de distribución para cada categoría de respuesta. Se calculó la desviación estándar y a partir del valor medio de temperatura o humedad correspondiente ( $T_n$ Media,  $HR_n$ Media) se calculó la adición de  $\pm 1DS$ . Este primer rango incluye teóricamente 68% de las personas que expresaron tener una misma sensación térmica. Se repite el procedimiento y se adiciona  $\pm 2DS$  a la  $T_n$ Media o  $HR_n$ Media, con lo que teóricamente se incluye 95% de la población que emitió un mismo voto de sensación térmica (Figura 9 y 10).

Por último, se realizó una regresión lineal con los valores que fueron obtenidos, a fin de determinar las rectas correspondientes a los límites extensos de los rangos definidos por  $T_n$ Media y  $HR_n$ Media  $\pm 2DS$ , y a los límites reducidos definidos por  $T_n$ Media o  $HR_n$ Media  $\pm 1DS$ . También se hizo lo propio con los valores de  $T_n$ Media y  $HR_n$ Media. La intersección de cada una de las líneas de regresión con la ordenada cero (que representa la sensación térmica de confort: ni calor, ni frío) determinan el valor de la temperatura o humedad relativa neutra según el método MIST, así como los valores límites de los rangos de confort térmico. Esta metodología ha sido aplicada por otros autores (Bojórquez et al, 2010; Bojórquez et al, 2015; Garcia Gomez et al, 2011; Herrera Sosa, 2013) en diferentes climas, obteniendo de cada uno de éstos la temperatura neutral ( $T_n$ ) y rangos de confort según valoraciones subjetivas de los habitantes encuestados en cada caso, con el fin de establecer lineamientos para la habitabilidad térmica.

## EVALUACION DE RESULTADOS

Se hizo un barrido por datos arrojados de los diferentes diagramas de confort y las zonas establecidas por los distintos autores. En el diagrama de Olgay, que se muestra en la figura 1, se observa, que los datos de temperatura y humedad media mensuales de la ciudad de Córdoba, durante casi todos los meses del año, se mueven en una zona más fría y húmeda que la delimitada por la zona de confort. Quedando dentro de la zona de condiciones esperadas solo una pequeña porción de los meses de abril y mayo.

En el diagrama bioclimático (figura 2) desarrollado por Givoni (1981), donde las variables consideradas son también temperatura y humedad media mensual, el área donde se mueven las condiciones registradas en Córdoba durante los 11 años medidos, demuestra condiciones más frías y más húmedas que las consideradas confortables para la mayoría de las personas. Quedando casi todo el tiempo fuera de la zona esperada incluso el verano por los altos valores de humedad relativa.

Y por último, en el diagrama de los triángulos de confort propuesto por Evans (figura 3), se observa, como factor fundamental para considerar que las amplitudes son mucho mayores a las admitidas como confortables por el autor, siendo también las temperaturas interiores más frías.

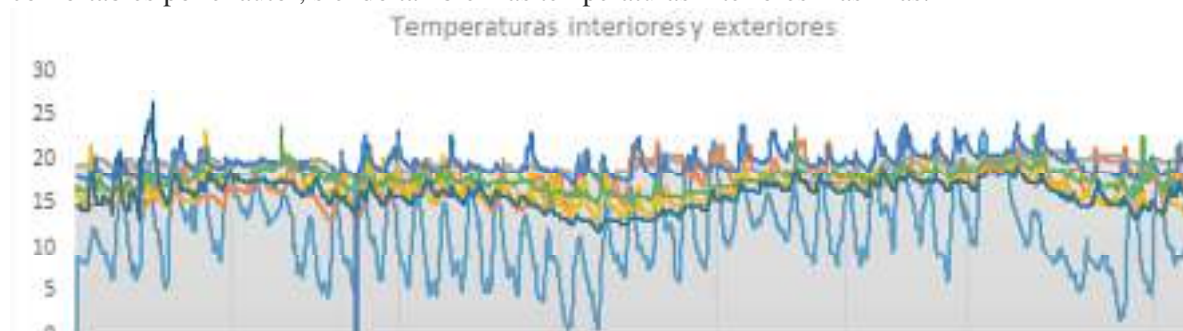


Figura 6: variaciones de la temperatura exterior y las temperaturas interiores de cada vivienda monitoreada

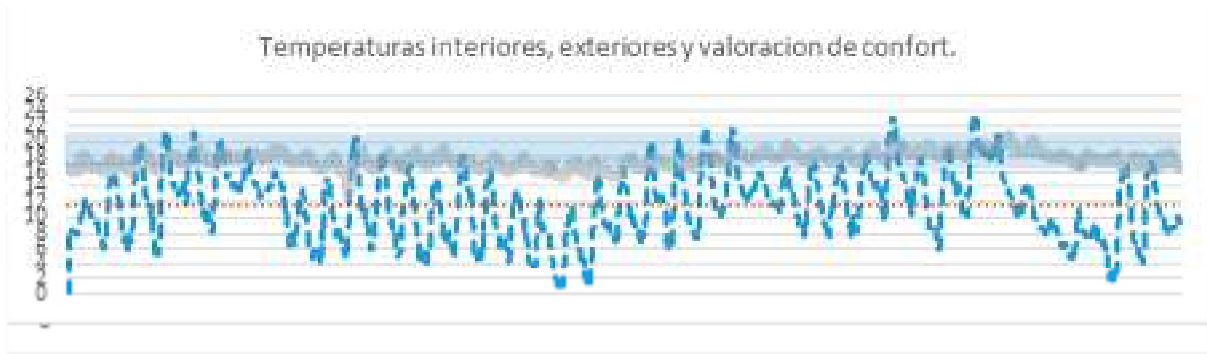


Figura 7: Variación de la temperatura exterior y el promedio de las temperaturas interiores de las viviendas. Línea de tendencia de cada una. Valoración de confort para el 95% de las personas según MIST (16,6 °C - 21,8 °C).

Los métodos anteriormente mencionados, describen una zona de confort según las condiciones de temperatura y humedad exterior. Las temperaturas de Córdoba, van desde menos de 1°C a los 25°C durante el periodo de estudio (junio y julio 2019). Se vincularon estas temperaturas exteriores con los datos interiores registradas en las viviendas estudiadas durante el mismo periodo. Las temperaturas interiores, se mantuvieron entre los 12 y 25°C en su mayoría, alcanzando casi los 30°C en algunas ocasiones. Se detecta entonces que a pesar de ser viviendas de clase media, de formas, tipologías, antigüedad, sistemas de protección, orientaciones, materialidades y diseños ampliamente variables, se mantienen con cierta inercia térmica en relación a las temperaturas exteriores. Favoreciendo las condiciones de confort esperadas. (Figura 6 y 7). Se verifica, que las viviendas monitoreadas, se mantuvieron en temperaturas interiores cercanas a las sensaciones de confort a pesar de las bajas temperaturas exteriores registradas. La línea de tendencia del promedio de las temperaturas interiores se delimita a los 17 °C, quedando dentro del rango de confort obtenido con el método (MIST) para el 95% de las personas y unos 6 °C por encima de la línea de tendencia de las temperaturas exteriores registradas.

Como se esperaba, el rango de confort que se obtuvo de las valoraciones encuestadas para un 68% de las personas, se mantiene entre los 19 °C y 20,5 °C, (punto máximo de la campana. Figura 8). Aunque se puede observar la diferencia en el rango de confort valorado por las personas en viviendas acondicionadas mecánicamente y las que no tienen acondicionamiento adicional. Si bien las temperaturas medias de confort son iguales, en los ambientes sin calefacción (a la derecha de la figura 8) el rango de confort es más amplio y hay mayor tolerancia a temperaturas más bajas. Mientras que con calefacción (a la izquierda) el rango es más estrecho, no se mencionan las bajas temperaturas y hay sobrecalentamiento de los locales fuera del rango de confort.

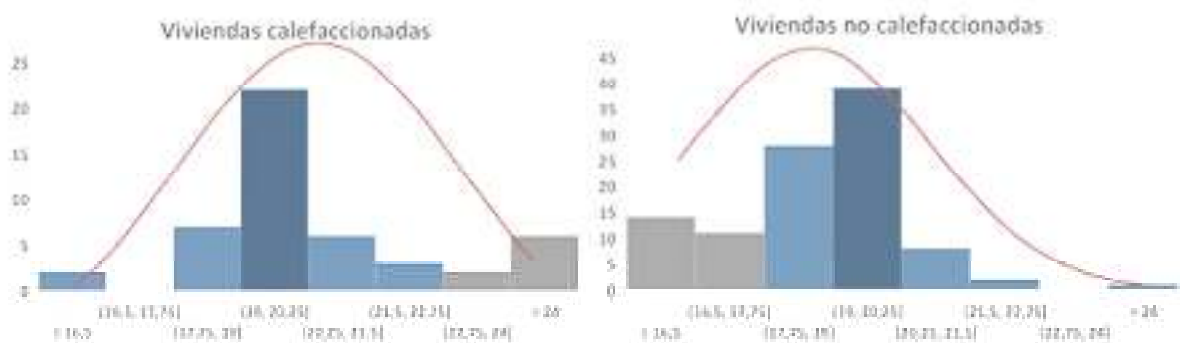


Figura 8: relación entre rango de confort de viviendas calefaccionadas y no calefaccionadas

En todos los casos, se verifica que las condiciones climáticas de la ciudad de Córdoba durante los últimos 11 años, son más frías y más húmedas que la zona de confort referenciada por los autores mencionados. Mientras que las estrategias de diseño que propone la norma de referencia, son orientadas a una zona templada cálida. El grafico 9 y 10 muestran el rango de confort obtenido a través de valoraciones subjetivas encuestadas en relación a las condiciones monitoreadas en viviendas

de la ciudad de Córdoba. Este análisis de datos se llevó a cabo con el método de medias por intervalo de sensación térmica (MIST), propuesto por Gonzalo Bojórquez et al., (2015) en relación al confort mediante métodos adaptativos. Logrando obtener, como era esperado, un rango de confort muy parecido a lo que establece la norma para la época de invierno. Es decir, que las personas en general, se sienten en confort dentro de los límites normalizados (18°C - 21°C) (IRAM 11659-1, 2004). Los documentos reglamentarios son fundamentales para la aceptación e implementación de una estrategia en la práctica arquitectónica y de ingeniería. Sin embargo, aunque los documentos reglamentarios se actualizan periódicamente, persisten algunas ambigüedades en la aplicación de modelos adaptativos de confort térmico en el diseño y operación de edificios (Carlucci et al., 2018).

Valoraciones y Mediciones de Temperatura.

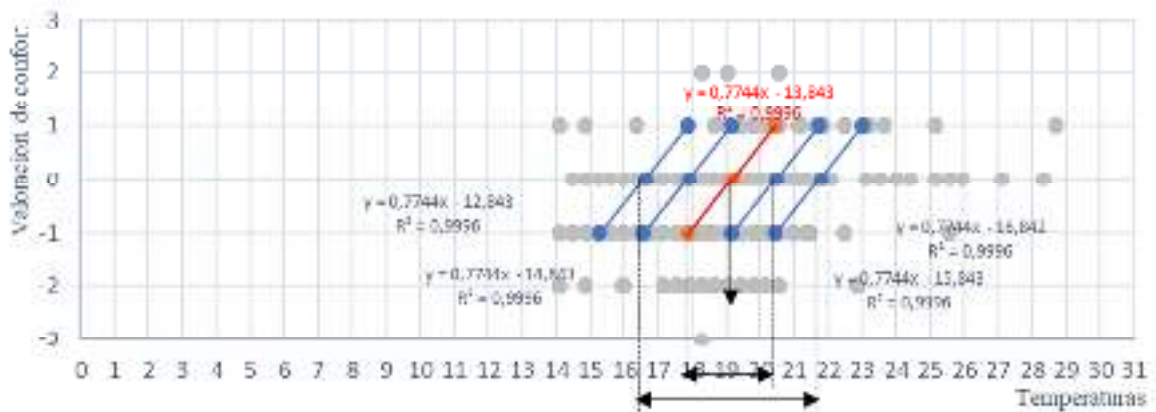


Figura 9: Tn y rangos de confort estrecho y extendido según el método (MIST).



Figura 10: HR neutral y rangos de confort estrecho y extendido según el método (MIST).

Autor	confort verano		confort invierno		meses en confort	clima de cordoba	estrategias
Olgvay	21,5°C - 27,5°C	30% - 65%	20°C - 24°C	30% - 60%	abril - mayo	Frio y humedo	Radiacion
Givoni	18°C - 23°C	20% - 80%	21°C - 26°C	20% - 80%	Noviembre - Diciembre - Enero	Frio y humedo	Sistemas solares pasivos.
Evans	18°C - 28°C	Ampl. 8°C	18°C - 28°C	Ampl. 8°C	Enero - Abril	Frio y amplitud	ganancias solares - ganancias internas - inercia termica
MIST			16,6°C - 21,8°C	45% - 49%	-	Frio y humedo	-
IRAM 11603	22°C - 27°C	50% - 55%	18°C - 21°C	50%	-	Templado calido	viviendas agrupadas - evitar orientacion oeste - proteccion solar - colores claros exteriores

Tabla 2: Resumen de autores, zonas de confort establecidas por cada uno, definición del clima y estrategias propuestas para alcanzar el confort para la ciudad de Córdoba.

A su vez, la enorme amplitud térmica diaria, mensual y estacional, juega un rol fundamental en la definición de estrategias de diseño arquitectónico en la ciudad de Córdoba, que pierden relevancia cuando no apuntan específicamente a la problemática real del clima. En la tabla 2 se resumen los distintos autores mencionados.

## CONCLUSIONES:

Córdoba, está definido como clima templado cálido y la normativa de referencia tiene recomendaciones de diseño en esa dirección. Pero las condiciones de los últimos 11 años nos determinan un clima frío y húmedo con requerimiento de estrategias diferentes. Considerando los resultados para el clima de Córdoba con las condiciones monitoreadas en los últimos 11 años en la estación meteorológica del Observatorio de Córdoba. Se observa, que la norma que se considera como referencia para la construcción (IRAM 11603), es la única fuente de las estudiadas que considera el clima de la ciudad en estudio como templado cálido, casi incluso despreciando la condición invernal. En los gráficos establecidos por los demás autores, se ubica en la zona de un clima mayormente frío, con alta humedad relativa y amplitudes térmicas excesivas.

Como consecuencia, las estrategias de diseño de la normativa en vigencia, son orientadas para evitar ganancias. Cuando en realidad lo que necesitamos es aprovecharlas la mayor parte del año, sumar elementos que contribuyan a la inercia térmica y aun así, se necesitaría complementar con ganancias internas en ciertas ocasiones por las grandes amplitudes. El resultado de esto se refleja en el excesivo consumo de energía, calefaccionando viviendas que podrían abastecerse casi en su totalidad con métodos adaptativos si se supieran los requerimientos exactos.

La valoración subjetiva de las personas expresada en el estudio realizado y descrito, establece que en la ciudad de Córdoba en el periodo invernal, para el 68% de las personas, el rango de confort se establece en los 18 °C /20 °C y para el 95% de las personas en el rango de los 16.6 °C a los 21.7 °C. El promedio de temperaturas en que se mantuvieron las viviendas sin calefacción fue de 18°C, es decir que se mantuvieron con parámetros interiores dentro del rango de confort establecido por el mayor porcentaje de los usuarios. Como se demuestra en el desarrollo del estudio, las personas sin acondicionamiento mecánico consideran confortable un rango más amplio y de menores temperaturas que las calefaccionadas. Como también éste segundo grupo experimenta sobrecalentamientos innecesarios. El promedio de las condiciones donde las personas valoran sentir ni frío ni calor, varía unos pocos grados, siendo para las personas en ambientes calefaccionados de 20.4°C y para las personas en ambientes no calefaccionados de 18.6°C. Ambos valores, con 2°C de diferencia, se mueven dentro del rango valorado por el 95% de las personas como confortable. Lo que reafirma que las viviendas de la ciudad de Córdoba, podrían acondicionarse a través de métodos adaptativos durante el periodo invernal si se ajustaran al real clima de Córdoba las estrategias de diseño recomendadas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Arballo, B., Kuchen, E., Scientific, N., y Naranjo, Y. A. (2016). Evaluación de modelos de confort térmico para interiores, (October).
- Arrieta, G., y Maristany, A. (2018). CAMBIANDO LOS PARADIGMAS: REVISIÓN DEL CONCEPTO DE CONFORT HIGROTÉRMICO DESDE LOS 60' HASTA LA ACTUALIDAD. *ASADES*, 12.
- Bojórquez, G., Gómez-Azpeitia, G., García-Cueto, R., Luna, A., y Romero, R. (2010). Confort Higrotérmico para actividades en espacios exteriores: Período cálido. *6CTV Mexicali2010*, 1–15. Retrieved from [http://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/12847/1/07\\_Bojorquez\\_Gomez-A\\_Garcia-C\\_Luna\\_Romero.pdf](http://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/12847/1/07_Bojorquez_Gomez-A_Garcia-C_Luna_Romero.pdf)
- Bojórquez, Gonzalo, Gómez-Azpeitia, L. G., García-Cueto, O. R., Ruiz-Torres, R. P., y Luna, A. (2015). Temperatura neutral y rangos de confort térmico para exteriores, período cálido en clima cálido seco. *Ambiente Construido*, 10(2), 133–146. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212010000200009>



- Carlucci, S., Bai, L., de Dear, R., y Yang, L. (2018). Review of adaptive thermal comfort models in built environmental regulatory documents. *Building and Environment*, 137(March), 73–89. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.053>
- Coronato, T., Navone, H. D., y Abalone, R. (2017). EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE UNA VIVIENDA DEL PLAN PROCREAR. PRIMERAS PROPUESTAS DE MEJORAS. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 58(10), 3375–3379.
- Evans, M. (2011). LOS TRIANGULOS DE CONFORT: UNA NUEVA HERRAMIENTA PARA LA SUSTENTABILIDAD. *MACDES*.
- García Gomez, C., Bojórquez Morales, G., y Ruiz Torres, P. (2011). Sensación térmica percibida en vivienda económica y auto-producida, en periodo cálido, para clima cálido húmedo. *Ambiente Construido*, 11(4), 099–111. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212011000400008>
- Givoni, B. (1981). Building Bioclimatic Chart.
- Gómez-Azpeitia, G., Morales, G. B., y Torres, R. P. R. (2007). El confort térmico: dos enfoques teóricos enfrentados/Thermal comfort: two confronted theoretical focuses. *Palapa*, 2(1), 45–57. Retrieved from <http://revistasacademicas.uco.mx/index.php/palapa/article/view/43>
- Herrera Sosa, L. (2013). Temperatura y rangos de confort térmico en viviendas de bajo costo en clima árido seco. *Hábitat Sustentable*, 3(1), 26–36.
- IRAM 11603. (1996). IRAM 11603. ACONDICIONAMIENTO TERMICO DE EDIFICIOS. Clasificación Bio Ambiental de la República Argentina. Instituto Argentino de Normalización.
- IRAM 11659-1. (2004). Aislamiento térmico de edificios Verificación de sus condiciones higrotérmicas Ahorro de energía en refrigeración. *Norma Argentina*, 1–36.
- Nicol, J. F., y Humphreys, M. A. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings*, 34(6), 563–572. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00006-3)
- Olgay. (1963). Diagrama bioclimático de Olgay. Retrieved from <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:EOMoOOkeTNgJ:editorial.cda.ulpgc.es/ftp/ambiente/03-MasterUrb%2BPaisaje/2002-Acond-Ambiental-urbano/2-Comodo%2BClima/Comodidad/Diagrama%2520bioclimatico%2520de%2520Olgay-2p.doc+&cd=9&hl=es-419&ct=clnk>
- UNE-EN ISO 10551:1995. (2002).
- UNE-EN ISO 7730. (2006). Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local (ISO 7730:2005). *AENOR*, 58.

## **REVIEW OF WINTER COMFORT RANGE FOR HOUSING IN CORDOBA AS A REQUIREMENT FOR NATURAL CONDITIONING**

**ABSTRACT:** This work presents the results of a field study carried out in the city of Córdoba with the objective of verifying the comfort ranges from the subjective evaluation of the indoor temperature and HR conditions in which people live in the city's homes.

The study was carried out in 12 homes, obtaining a total of 416 surveys answered during the months of June and July 2019, and evaluations a representative winter period. Neutral temperature and relative humidity and comfort ranges are estimated with the method of means by thermal sensation interval (MIST), comparing the comfort range with that established by other authors.

The objective of this study is, from the temperature and humidity conditions relieved in the homes, to verify the thermal preference ranges valued in winter and if, taking them as an objective, it is possible to include passive conditioning strategies to reduce air conditioning mechanics in the winter period without losing sight of the current requirements of thermal comfort.

**Keywords:** Thermal comfort, indoor environments, passive adaptation.



## **EVALUACIÓN TÉRMICA Y DE CONFORT EN SALAS DEL CABILDO DE SALTA EN INVIERNO**

**Camila Gea Salim, Marcos Hongn, Silvina González, Silvana Flores Larsen**

INENCO - Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)- Universidad Nacional de Salta (UNSa)  
Tel. +54 387 4255424- Fax +54 387 4255489 e-mail: seflores@unsa.edu.ar

*Recibido 16/08/19, aceptado 23/10/19*

**RESUMEN:** En este trabajo se realizaron estudios de las condiciones térmicas del ambiente interior del Cabildo de Salta, sede actual del Museo Histórico del Norte, con el objeto de estudiar en el futuro las tecnologías aplicables a la envolvente que permitan disminuir el consumo energético y mejorar las condiciones higrotérmicas interiores de edificios con valor patrimonial. En este tipo de edificios la rehabilitación energética debe ser respetuosa y no invasiva. Para un periodo de 15 días de invierno, se recopilaron datos de temperatura y humedad en diferentes espacios del edificio a intervalos de 15 minutos. Los locales relevados funcionan actualmente como salas de exposición del museo, oficinas administrativas y talleres de conservación o reservas del museo. Se incluyó en el análisis una evaluación de las condiciones de confort según ASHRAE-55 (Voto Medio Predicho y Porcentaje de Personas Insatisfechas), como así también las condiciones de conservación de los objetos expuestos, en un grupo de cuatro espacios destinados a salas de exposiciones.

**Palabras clave:** edificio histórico, masa térmica, monitoreo higrotérmico, confort

### **INTRODUCCIÓN**

Salta cuenta con un importante patrimonio arquitectónico de la época colonial, entre los que se destacan el Cabildo Histórico (de inicios del 1600 y el más completo que se conserva en la Argentina), la Casa de Güemes (1789), la Casa de Hernández (1780), la Casa de Arias Rengel (mediados del S. XVIII), la Catedral Basílica (1858), Iglesia San Francisco (1767), Convento San Bernardo (fines del S. XVI), entre otros. Este legado ha ido sufriendo transformaciones y restauraciones a lo largo del tiempo, la mayoría sin registro del tipo de intervención realizado por lo que se dispone de poca información sobre los materiales o sistemas constructivos utilizados. Por otra parte, la ciudad está emplazada en una zona sísmica con movimientos permanentes que deterioran las construcciones y las someten a constantes procesos de mantenimiento y restauración. Muchos de los edificios históricos de Salta funcionan como oficinas para administración y como museos, muchos sin sistemas de acondicionamiento de aire, en los que las condiciones higrotérmicas pueden alejarse significativamente de la zona de confort. Estos edificios presentan posibilidades interesantes de rehabilitación energética, la cual involucra estrategias que pueden ser más complicadas debido a las restricciones arquitectónicas (y artísticas, en caso de muros con frescos) que obligan a preservar la integridad de los edificios (Paoletti *et al.*, 2013; Quagliarini *et al.*, 2013; Georgescu *et al.*, 2017). Los avances más relevantes en este tema han sido realizados en Italia, en los que la rehabilitación energética ligada a técnicas de conservación del patrimonio se considera uno de los puntos fundamentales del desarrollo de las ciudades sustentables del futuro (Pisello *et al.*, 2016; Filippi M., 2015, Di Ruocco *et al.*, 2017).

El Cabildo de Salta, sede actual del Museo Histórico del Norte, se encuentra ubicado frente a la plaza principal de la provincia, en calle Caseros N° 417 (Figura 1). En 1937 fue declarado Monumento Histórico Nacional por Ley N° 12.345. En las décadas de 1930 y 1940 se consideró a la arquitectura colonial como producción heredada del pasado, capaz de representar los valores identitarios de la nación argentina. En ese contexto, se catalogaron y protegieron edificaciones representativas como capillas, conventos, templos, cabildos y viviendas. Salta, ubicada en el Noroeste argentino, es una de

las provincias que conserva mayor cantidad de edificaciones de dicho período y este Cabildo, es considerado uno de los Cabildos mejor conservados del país (Cuervo Álvarez, 2019).



*Figura 1: Fachada Norte Cabildo de Salta (izq.), Patio interior (centro) y Sala Capitular (der.).*

Construido alrededor de 1780, se realizaron trabajos de restauración realizados en la década de 1940 (Arq. M. Buschiazzo) con los que se evidenció que coexisten construcciones de muy distinto tipo y épocas: hay partes de adobe, con muros de gran espesor, otras de ladrillo y gran parte de piedra. Se trata de un edificio de paredes gruesas y masivas (del orden de 0.5 m de espesor o más), de aberturas pequeñas, que se corresponde con la tipología de diseño y estructura de la mayoría de los edificios históricos de la ciudad de Salta. Dada su gran inercia térmica, presenta un comportamiento térmico diferente al de las nuevas construcciones. Para la preservación del edificio y de la colección misma del museo se debe contar con un microclima interior adecuado; para eso es importante conocer su comportamiento térmico. Del mismo modo, la rehabilitación energética de este tipo de construcciones con alto valor patrimonial requiere como punto de partida de un diagnóstico térmico cuidadoso.

El presente trabajo describe este primer diagnóstico para el Cabildo de Salta. Se realizó un monitoreo continuo de la temperatura y humedad en los espacios interiores del edificio durante 15 días consecutivos de invierno, que incluyeron un periodo nublado y un periodo soleado, con el edificio en condiciones de pleno uso debido a las vacaciones de invierno. Se presentan los resultados del monitoreo y se analizan las condiciones térmicas interiores. Además, se estima mediante ASHRAE 55 las condiciones de confort interior (Porcentaje de Personas Insatisfechas PPD y Voto Medio Predicho PMV) en los ambientes que funcionan como salas de exposiciones abiertas al turismo.

## **METODOLOGÍA**

### **Monitoreo higrotérmico**

Se realizó un monitoreo continuo de temperatura y humedad durante 15 días consecutivos de invierno, del 1 al 16 de Julio de 2019, en el interior de los locales del edificio. Se utilizaron adquirentes de datos HOBO (modelos U12-12) de temperatura (exactitud:  $\pm 0.35^{\circ}\text{C}$ , resolución:  $0.03^{\circ}\text{C}$  a  $25^{\circ}\text{C}$ ) y humedad ( $\pm 2.5\%$ ,  $0.03\%$ ). Los sensores están calibrados en el rango de temperaturas a mapear, con calibración de antigüedad menor a 1 año y un error de calibración menor a  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ . Se instalaron 16 sensores (ver Figura 2) y se los programó para registrar y almacenar cada 15 minutos los datos de las variables mencionadas. Uno de los sensores se ubicó en la galería del ala oeste del patio central del edificio (planta baja), protegido del sol, que registra la temperatura y humedad relativa de referencia del entorno exterior. Los sensores restantes se ubicaron en el interior de los diferentes espacios (oficinas administrativas y salas de exposición del museo). Del grupo monitoreado, solamente cuatro locales cuentan con un calientador que se utilizó para calefaccionar (Secretaría administrativa, Oficina del Director, Oficina Administrativa y Taller de Conservación). Los once locales restantes no cuentan con ningún tipo de sistema de acondicionamiento de aire.

La radiación solar sobre superficie horizontal en el periodo fue obtenida de la estación meteorológica Davis Vantage Pro ubicada en el predio del INENCO (Universidad Nacional de Salta-CONICET), a aproximadamente 10 km del centro de la ciudad.



Figura 2: vista en planta del edificio del Cabildo (Buschiazzo, 1946) y ubicación de los sensores de medición.

### Análisis de confort térmico

Para realizar el análisis de confort se utilizó la norma ANSI/ASHRAE 55. Dicha norma permite estimar la sensación de confort mediante el PMV (Voto Medio Predicho) y el PPD (Porcentaje de Personas Insatisfechas). El método analítico calcula ambas variables en base al índice de arropamiento, la tasa metabólica, la velocidad de aire, la temperatura operativa y la humedad. El método predice el PMV en una escala con 7 rangos: Muy frío ( $PMV < -2.5$ ), Frío ( $-2.5 < PMV < -1.5$ ), Fresco ( $-1.5 < PMV < -0.5$ ), Neutral de confort ( $-0.5 < PMV < +0.5$ ), Cálido ( $+0.5 < PMV < +1.5$ ), Caluroso ( $+1.5 < PMV < +2.5$ ), Muy caluroso ( $PMV > +2.5$ ). La zona de confort establece las condiciones en las que el 80% de las personas, en actividad sedentaria o de actividad ligera, encuentran el ambiente térmicamente aceptable.

Las condiciones de cálculo que se utilizaron para determinar la sensación de confort de los locales son las definidas según norma ANSI/ASHRAE 55 (índice de arropamiento en invierno: 1 clo; tasa metabólica: 1.3 met y velocidad del aire (mínima): 0.1 m/s). Se utilizaron los datos de temperatura y humedad relativa registrados en el monitoreo, suponiendo que la temperatura operativa es similar a la temperatura registrada por los sensores. Esta simplificación deberá ser verificada una vez que se estime la temperatura media radiante mediante simulación computacional detallada, a realizarse en el futuro.

### Condiciones de mantenimiento de los objetos en exposición

Si bien el objetivo del trabajo es el análisis térmico y de confort de los ambientes en vistas a la rehabilitación energética, es muy importante conocer las condiciones de conservación de los objetos allí expuestos, siendo los textiles aquellos más expuestos a la degradación. En los textiles, la humedad es la variable que presenta mayor incidencia en el daño, puesto que desencadena o acelera los procesos de deterioro físico, químicos y biológicos. Humedades relativas muy altas o muy bajas producen que las fibras se expandan o contraigan, influyendo en la elasticidad de la fibra y acelerando su envejecimiento. Según la literatura consultada (Alvarado *et al.*, 2002), el nivel recomendado de humedad relativa para conservación de textiles es de entre 45% y 65%, dependiendo de la zona geográfica, pero lo importante es evitar las grandes fluctuaciones en periodos cortos de tiempo. Humedades relativas por encima del 70% favorecen el desarrollo de microorganismos, lo cual se incrementa aún más si hay bajas renovaciones de aire, oscuridad y altas temperaturas. Esto puede

causar descoloramiento de tinturas, manchas y corrosión de elementos metálicos (clavos en las sillas, hilos y bordados metálicos, etc.). Por otra parte, humedades relativas inferiores al 30% pueden causar resecamiento y rotura de las fibras. En cuanto a la temperatura, los textiles deben almacenarse idealmente en ambientes fríos, con temperaturas entre 18°C y 21°C. Al igual que lo que sucede con la humedad relativa, puede aceptarse una cierta variación pero evitando fluctuaciones grandes en breves lapsos de tiempo.

## RESULTADOS

### Análisis térmico

Para el análisis se seleccionaron 4 espacios interiores de la planta baja (Sala de Período Prehispánico II, Secretaría Administrativa, Sala de Objetos de Hierro y Escribanía de Güemes) y 4 de la planta alta (Reserva de Objetos de Hierro, Taller de Conservación, Sala de Arte Sacro Grande y Sala de Arte Sacro Chica), cuya ubicación en el edificio se muestra en la Figura 2.

Las figuras 3 y 4 muestran las temperaturas registradas entre el 1 y el 16 de Julio de 2019 en los interiores seleccionados para el análisis. Se observa que la temperatura exterior del periodo osciló entre 7,7 y 21,3 °C, con una media de 13,6 °C. Como es de esperar, los días con mayores temperaturas corresponden a los días claros con buenos niveles de irradiación solar. Del período monitoreado se seleccionaron para el análisis: 3 días nublados con bajas temperaturas (4, 5 y 6 de Julio; las temperaturas exteriores oscilaron entre 6 y 10 °C) y 3 días de cielo claro sin nubes (9, 10 y 11 de Julio; las temperaturas oscilaron entre 6 y 24° C y la irradiación solar alrededor de 650 W/m<sup>2</sup>). Esto permite conocer cómo se comportan los interiores en días con baja irradiación solar y en días de cielo claro. Las tablas 1, 2 y 3 muestran las temperaturas mínimas absolutas, medias y máximas absolutas de los días nublados, soleados y del período completo, respectivamente.

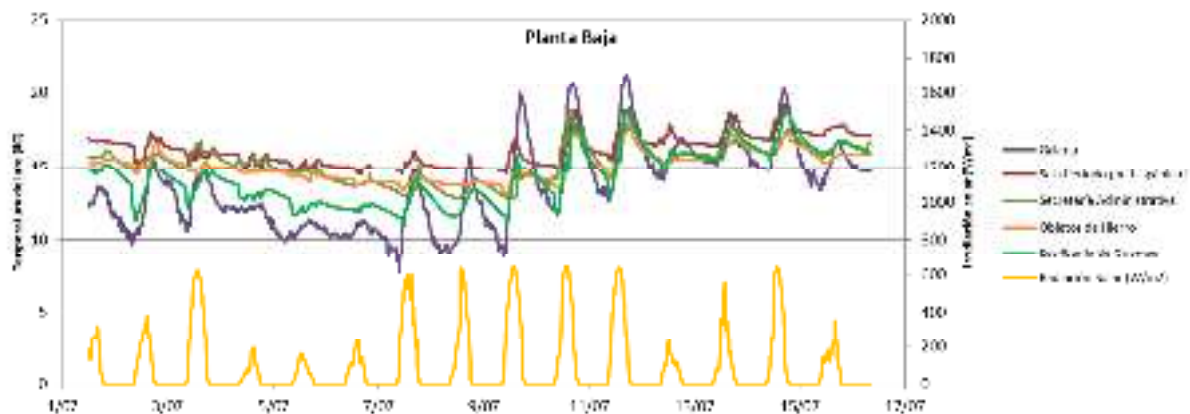


Figura 3: Temperaturas registradas del 1 al 16 de Julio para locales en planta baja.

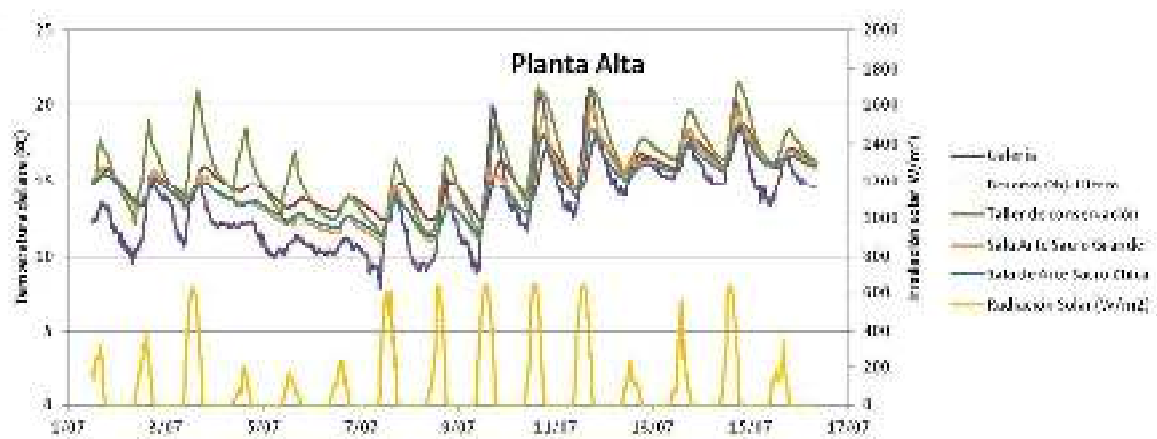


Figura 4: Temperaturas registradas del 1 al 16 de Julio para locales en planta alta.

En la planta baja, en la Escribanía de Güemes, se registraron las temperaturas más bajas para los días nublados (11,6°C) y para los días soleados las mayores amplitudes (de 7,4°C) alcanzando una de las temperaturas más altas del sector (18,8°C). Se trata de una sala de muros exteriores macizos de 0,6 m orientados al este y al oeste. No cuenta con ganancia solar directa. El muro oeste está protegido por una galería y el muro este está expuesto al sol en gran parte de su superficie, excepto en una porción sombreada parcialmente por una enredadera. Las temperaturas del periodo completo en esta sala oscilaron entre 11,2 y 18,8°C, con una media de 14,3°C.

La Sala del Período Pre Hispánico II de planta baja es el espacio con mayores temperaturas (alrededor de 3,7°C por encima del exterior en días nublados), debido a que es el local con menor área de muros expuestos al ambiente exterior. Sin embargo, la temperatura nunca superó los 16°C en los días nublados.

En la planta alta, las mayores temperaturas se registraron en el local calefaccionado (Taller de conservación), en donde se observa el efecto de la calefacción durante las horas de ocupación del espacio, que alcanzó temperaturas de 21,4°C durante el período de días soleados. Para los días nublados se registraron temperaturas de 18,5, 14,5 y 12,5°C de máxima, media y mínima respectivamente, con una diferencia de más de 3°C con respecto al exterior.

En general, se observa el efecto de la acumulación en la masa térmica del edificio, que causa bajas amplitudes térmicas diarias y temperaturas medias por encima del ambiente exterior inclusive en el periodo nublado (debido a la acumulación en los días soleados previos). En las salas de exposición, que no están calefaccionadas, las cargas térmicas internas no resultan significativas. La envolvente de la sala únicamente recibe cargas térmicas internas por parte de los visitantes del museo. Ingresan a las salas en pocas cantidades y permanecen poco tiempo dentro. En cuanto a los locales calefaccionados, el taller de conservación muestra en el gráfico, un comportamiento similar a la radiación solar. Se trata de una sala constructivamente diferente al resto, ejecutada hace pocos años. Posee más superficie en contacto con el exterior que el resto de los locales, sus muros de menor espesor acumulan menos calor y la cubierta con poca aislación térmica. Durante las horas de trabajo utilizan un calientador de 2000W para calentar el ambiente. En la planta baja, la Secretaría administrativa utiliza un dispositivo similar de calefacción y es el local que posee las temperaturas más altas de todas las registradas. Las amplitudes térmicas diarias pequeñas son beneficiosas para la conservación de objetos de valor histórico (mobiliario y textiles, principalmente). Pero, por otra parte, las bajas temperaturas pueden producir deterioro en algunos de los objetos expuestos, principalmente en los textiles y maderas, debido a que pueden alcanzarse las temperaturas de punto de rocío que favorecen la aparición y/o proliferación de moho, hongos y demás organismos.

	PB					PA				4, 5 y 6 de Julio de 2019
	Galería	Sala período pre hispánico II	Secretaría administrativa	Sala Objetos Hierro	Escribanía Güemes	Reserva objetos de hierros	Taller de conservación	Arte Sacro grande	Arte Sacro Chica	
MAXIMO	12,3	16,0	15,7	14,9	14,1	15,5	18,5	14,3	14,4	Días nublados
PROMEDIO	11,1	15,2	14,6	14,3	12,6	13,9	14,5	12,7	12,9	
MINIMO	9,9	14,4	13,6	13,6	11,6	13,0	12,5	11,5	11,9	

Tabla 1: temperatura media, máxima y mínima en las salas de planta baja (PB) y planta alta (PA), para el período de días nublados (4, 5 y 6 de julio de 2019).

	PB					PA				9, 10 y 11 de Julio de 2019
	Galería	Sala período pre hispánico II	Secretaría administrativa	Sala Objetos Hierro	Escribanía Güemes	Reserva objetos de hierros	Taller de conservación	Arte Sacro grande	Arte Sacro Chica	
MAXIMO	21,3	18,9	18,7	18,0	18,8	18,0	21,4	20,0	18,4	Días Soleados
PROMEDIO	15,2	16,1	15,2	15,0	14,7	15,2	16,6	15,2	14,7	
MINIMO	8,8	14,5	12,8	13,0	11,4	12,4	11,7	11,1	11,3	

Tabla 2: temperatura media, máxima y mínima en las salas de planta baja (PB) y planta alta (PA), para el período de días soleados (9, 10 y 11 de julio de 2019).



	PB					PA				1 al 16 de Julio de 2019
	Galería	Sala período pre hispánico II	Secretaría administrativa	Sala Objetos Hierro	Escritanía Güemes	Reserva objetos de hierros	Taller de conservación	Arte Sacro grande	Arte Sacro Chica	
MAXIMO	21,3	19,2	18,7	18,0	18,8	18,8	21,7	20,0	18,8	Periodo completo
PROMEDIO	13,6	16,1	15,2	15,0	14,3	15,1	16,0	14,7	14,5	
MINIMO	7,7	14,4	12,8	13,0	11,2	12,4	11,5	10,9	11,3	

Tabla 3: temperatura media, máxima y mínima en las salas de planta baja (PB) y planta alta (PA), para el período completo monitoreado (1 al 16 de julio de 2019).

### Confort térmico

El análisis de la sensación de confort se realizó para cuatro espacios del edificio accesible a los turistas: Sala de Objetos de Hierro, Escritanía de Güemes y Sala del Período Pre Hispánico II, en la planta baja, y Sala de Arte Sacro Chica, en la planta alta. Los resultados se observan en la figura 5, donde se representa mediante un código de colores la sensación térmica (PMV), para condiciones standard de índice de arropamiento 1clo, tasa metabólica de 1.3 met, velocidad de aire de 0.1 m/s (mínima) y temperatura y humedad relativa sensada de manera horaria en cada ambiente.

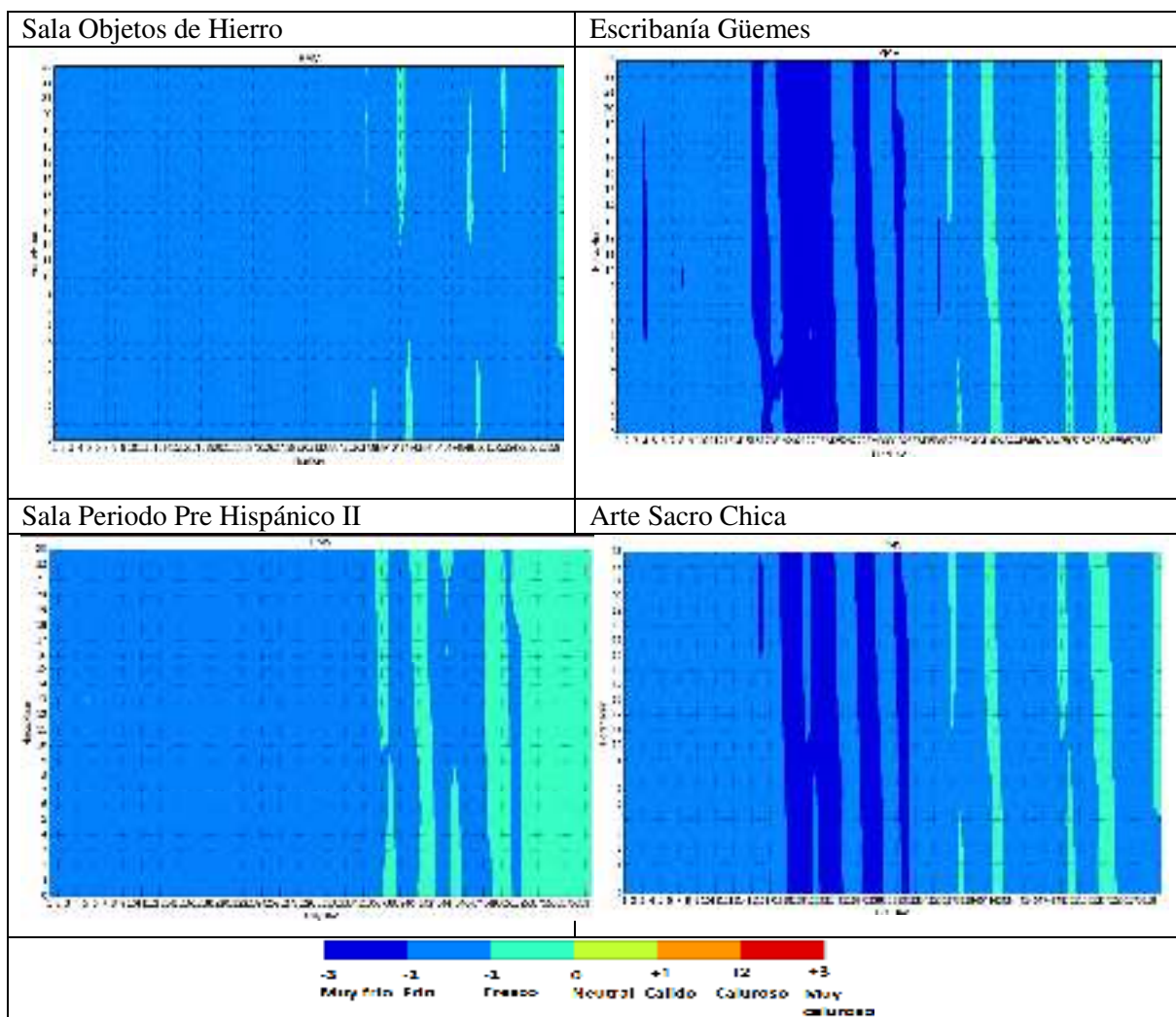


Figura 5: sensación térmica analizada a través de los siete niveles de PMV de ASHRAE-55.

Se observa que, en general, estas salas presentan sensaciones térmicas “frías” a “muy frías”. Los días con mayores temperaturas exteriores y niveles de radiación solar, la sensación térmica es “fresca”.

El caso que presenta la situación más favorable es la Sala del Período Pre Hispánico II: sobre el final del período monitoreado la sensación térmica es netamente “fresca”. Se observa en el gráfico de temperaturas registradas en el periodo cómo ha ido aumentando sensiblemente su temperatura interior con el correr de los días a pesar de que los niveles de radiación se mantuvieron constantes. Esta sala tiene condiciones edilicias particulares (figura 2): no se accede desde la galería, como el resto de los locales, si no que se accede desde otra sala por lo que las pérdidas de calor son menores.

Las condiciones más constantes las tuvo la Sala de Objetos de Hierro: “Frío” en casi todo el período, tanto para los días nublados como para los soleados. Esta sala es uno de los espacios de mayores dimensiones de todo el edificio y está protegida por otros locales y por una galería en la mayor parte de su perímetro, lo cual explica las pocas variaciones de su comportamiento térmico.

La figura 6 muestra los valores horarios del PMV (Voto Medio Predicho) y del PPD (Porcentaje de personas insatisfechas) en la Escribanía de Güemes. Durante los días nublados el 80% de las personas se encontrará en disconfort térmico y sintiendo el ambiente frío (temperaturas del aire de alrededor de 12°C), mientras que después del mediodía de días soleados (entre las 14 y las 16) se observan un mejoramiento de la sensación térmica, con porcentajes de personas en disconfort del 20% (temperaturas del aire de alrededor de 18°C).



Figura 6: PMV y PPD (%) para la Escribanía de Güemes.

### Condiciones de mantenimiento de los objetos en exposición

Como se mencionó, las condiciones más favorables de conservación para textiles son temperaturas entre 18°C y 21°C y humedades relativas entre 45% y 65%. Las Figuras 7 y 8 muestran dichas variables para las salas estudiadas en el apartado anterior. Se observa que, salvo algunas pocas horas del mediodía de días cálidos, ninguna de las salas alcanza temperaturas dentro del rango sugerido para la conservación. La humedad relativa es crítica en la Escribanía de Güemes en todo el periodo monitoreado. Por otra parte, a partir del 12 de Julio las condiciones de humedad empeoran para todas las salas, excediendo el límite recomendado de 65%. Considerando ambas variables (temperatura y humedad relativa), se puede concluir que los objetos en exposición nunca verifican las condiciones de conservación requeridas, lo cual deberá ser evaluado por los curadores del museo para tomar medidas preventivas que eviten el daño futuro de los objetos de la exposición.



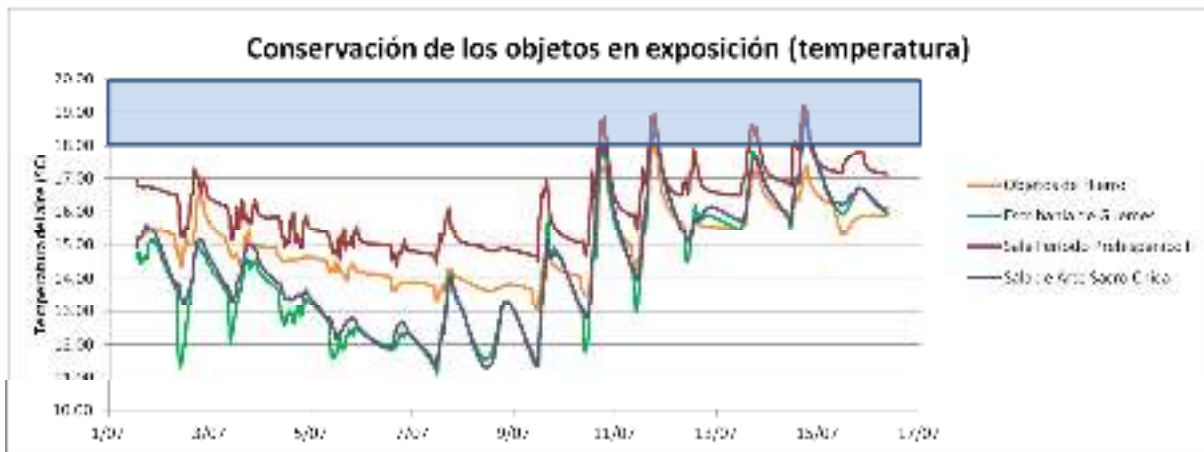


Figura 7: Temperaturas de las salas y rango sugerido de conservación de objetos textiles en exposición en recuadro azul (1 al 16 de Julio de 2019).

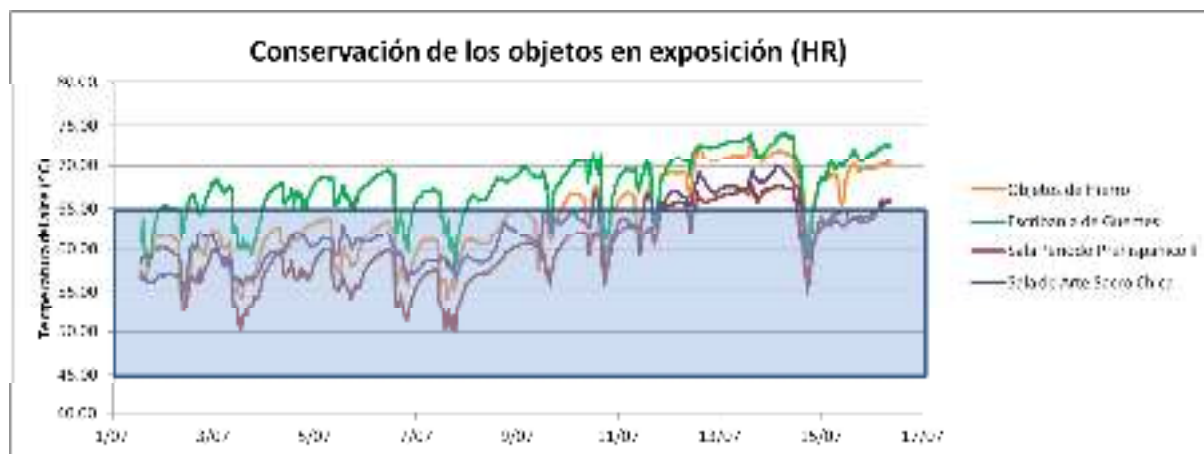


Figura 8: Humedad relativa de las salas y rango sugerido de conservación de objetos textiles en exposición en recuadro azul (1 al 16 de Julio de 2019).

## CONCLUSIONES

La conservación y la rehabilitación energética del patrimonio arquitectónico son dos aspectos complementarios de la puesta en valor de edificios históricos. Ambas requieren de un enfoque multidisciplinario que involucra una variedad de profesionales y organizaciones.

El relevamiento de las condiciones higrotérmicas actuales de las salas del Cabildo Histórico de Salta presenta algunas conclusiones interesantes. Durante los días nublados, la temperatura interior en planta baja no superó los 16°C, con medias de entre 12,6°C y 15,2°C, mientras que en los días soleados estas medias suben apenas 1°C. Particularmente la Escríbanía de Güemes registró las temperaturas más bajas, lo cual es peligroso para los textiles que se exponen en esta sala. En particular, aquí se encuentra el sombrero bicornio de Güemes, el cual está sujeto a temperaturas que pueden alcanzar la temperatura de rocío favoreciendo la aparición y proliferación de organismos causantes del deterioro biológico de este objeto. En las otras salas la situación se repite, con lo que es una situación que debe abordarse en el futuro si se pretende preservar los objetos allí expuestos.

En cuanto a la sensación térmica registrada, en todas las salas se obtuvieron valores preponderantes de “Frío” o “Muy frío”, con lo que la percepción de incomodidad es evidente para los turistas que visitan el edificio y para el personal que trabaja en el mismo. Dada la gran masa térmica de los muros, la instalación de sistemas de acondicionamiento de aire puede conllevar a gastos energéticos excesivos si no se incluyen previamente estrategias de rehabilitación energética que respeten las condiciones estéticas y el valor patrimoniales del edificio. Este análisis será realizado en el futuro, para lo cual es de fundamental importancia el monitoreo descrito en el presente trabajo. Por otra parte, se está

realizando paralelamente un estudio para determinar, in-situ, la resistencia térmica de los muros. Esta información, sumada a los resultados experimentales, permitirá validar los modelos físicos con los que se trabajará para optimizar las estrategias a aplicar en la rehabilitación energética del edificio.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por PICT ANPCYT 2014-2605 y por la Universidad Nacional de Salta (CIUNSa-A N°2489).

Se agradece especialmente al Director del Museo Histórico del Norte: Arq. Mario Lazarovich, a la conservadora del Cabildo María Campero de Larran y todo el personal del Museo por su excelente predisposición y colaboración en los monitoreos del edificio.

## REFERENCIAS

- ANSI/ASHRAE Standard 55 (2017). "Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy".
- Buschiazzo M. J. (1946). Cabildos del Virreinato del Río de la Plata. Buenos Aires.
- Cuervo Álvarez B. (2019). "El Cabildo de Salta, Argentina". Disponible en: <https://www.otromundoesposible.net/el-cabildo-de-salta-argentina/>
- Di Ruocco G., Sicignano C., Sessa A. (2017). Integrated methodologies energy efficiency of historic buildings. *Procedia Engineering* 180, 1653 – 1663.
- Filippi M. Remarks on the green retrofitting of historic buildings in Italy. *Energy and Buildings* 95 (2015) 15-22.
- Georgescu M.S., Ochinciuc C.V., Georgescu E.S., Colda I. Heritage and Climate Changes in Romania:
- the St. Nicholas church of Densus, from degradation to restoration. *Energy Procedia* 133 (2017) 76-85.
- Paoletti D., Ambrosini D., Sfarra S., Fabio Bisegna. Preventive thermographic diagnosis of historical buildings for consolidation. *Journal of Cultural Heritage* 14 (2013) 116–121.
- Pisello A.L., Petrozzi A., Castaldo V.L., Cotana F. (2016). On an innovative integrated technique for energy refurbishment of historical buildings:
- Thermal-energy, economic and environmental analysis of a case study. *Applied Energy* 162, 1313-22.
- Quagliarini E., Esposito E., del Conte A. The combined use of IRT and LDV for the investigation of historical thin vaults. *Journal of Cultural Heritage* 14 (2013) 122–128.
- Alvarado I., Alvarado M., Espinoza F., Gruzmacher M.L. (2002). Manual de Conservación Preventiva de Textiles. Proyecto Catastro del Patrimonio Textil Chileno. Disponible en: <http://www.cnct.cl/documentos/manualconservacion.pdf>

## THERMAL AND COMFORT EVALUATION OF THE SPACES IN THE HISTORIC CITY HALL (CABILDO) OF SALTA CITY IN WINTER

**ABSTRACT:** In this work, the thermal conditions of the interior spaces of the Cabildo de Salta building were studied. The building is the current headquarters of the Northern Historical Museum. The main aim is to study, in the future, the optimal technologies that can be applied to the envelope that allow to reduce consumption or improve the indoor thermal conditions in buildings with heritage value. In this type of buildings it is necessary that energy rehabilitation must be respectful and non-invasive. For a period of 15 winter days, temperature and humidity data were collected in different spaces of the building at 15-minute intervals. The building spaces are used as museum showrooms, administrative offices and for conservation activities or storage of art pieces. An assessment of comfort conditions according to ASHRAE-55 (Average Predicted Vote and Percentage of Disatisfaction) was included in the analysis in a group of four exhibition hall spaces.

**Keywords:** historic building, thermal mass, hygrothermal monitoring, comfort

## **SIMULACION POR EQUEST DE UNA CELDA DE ENSAYO AL EXTERIOR PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA EFICIENCIA ENERGETICA DE COMPONENTES DE EDIFICIOS**

**María E. Soldatti, Norberto S. Odobez, Carlos Godoy**

Centro CEA (Centro de I + D en Energía y Ambiente), Facultad Regional Delta; Universidad Tecnológica Nacional. San Martín 1171 - Campana C.P. 2804 - Buenos Ares  
Tel. 03489-420400. Int. 5111 e-mail: soldattm@frd.utn.edu.ar

*Recibido 20/08/19, aceptado 25/10/19*

**RESUMEN:** La creciente necesidad del uso de materiales de diferentes valores de coeficiente global de transferencia de calor ( $U$ ), para la composición de componentes de envolventes de edificios, nos obliga a conocer con certeza ese valor  $U$ . Para la aplicación de normas, como las incluídas en el Decreto 1030/10 –Ley 1305 de la provincia de Buenos Aires, entre otras. Para este fin el centro CEA cuenta con una celda de prueba al exterior que permite determinar  $U$ . Dado la complejidad de construir componentes de diferentes materiales, su disponibilidad, y costos; se optó por parametrizar la celda en el programa eQuest y utilizar éste antes de construir el componente y colocarlo en la celda. De esta forma se realizará la construcción cuando hay una certeza de su ventaja en el uso, en relación a la eficiencia energética. Así se validó esta parametrización realizando diferentes pruebas, comparando los valores de temperatura interna y los flujos medidos en la zona de ensayo. Luego se comparó el consumo de energía para cada componente simulado, observando una relación coherente entre los valores de transmitancia térmica y los consumos energéticos en la celda, lo que determina la validación de este método aplicado.

**Palabras clave:** Simulación, celda de ensayo, eficiencia energética, componentes de edificios

### **INTRODUCCIÓN**

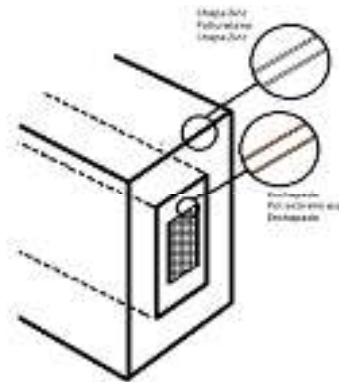
El uso de un Celda de Ensayos al Exterior Delta, "CEED", diseñada como un instrumento para la evaluación en exteriores de las características termofísicas de muestras a escala real de componentes para la construcción. (PH. Baker, H.A.L. van Dijk, 2008), permite caracterizar muros (el valor del coeficiente global de transmisión del calor  $U_A$ ) y ventanas (el valor  $U_A$  más el valor de ganancia solar  $g$ ) bajo condiciones reales de exposición o funcionamiento. (Jensen, S. Ø. 1995).

Esta Celda está compuesta por una cámara ubicada dentro de otra cámara, concepto de DOBLE ENVOLVENTE ATEMPERADA. A la cámara interior la llamamos Zona de Ensayo (ZE) y al espacio entre la cámara interior y la cámara exterior lo llamamos Zona de Guarda (ZG) (Figura 1), la cual está climatizada por un equipo "frío – calor" del tipo Rooftop, marca Surrey de 3TR.

Ambas cámaras comparten una cara, en nuestro caso, que estamos en el hemisferio sur, es la cara norte. Esta cara compartida es intercambiable y es en la cual se coloca el espécimen (componente constructivo) a ensayar. (Figura 1).

La cara norte (Figura 2 y Figura 3) tiene la particularidad de estar compuesta por dos estructuras, una exterior y linder a la zona de guarda, construida como el resto de la celda con paneles prefabricados de chapa galvanizada prepintada, corazón de poliuretano y chapa galvanizada prepintada de espesor 50mm y otras que están en contacto con la zona de ensayo cuyas características son: capa exterior e interior de fenólico contra enchapado de espesor 0,015 m y con un relleno de 0,2 m de poliestireno (telgopor). Ambas zonas son removibles según el ensayo a realizar, la interior tiene una medida

estándar, para el ensayo de ventanas de 1,48 m de alto por 1,28 m de ancho, o un componente opaco. También se podría colocar utilizando toda el área expuesta al exterior.



*Figura 1: Esquema de la cara norte con su doble característica*

Dicho esto, el componente a ensayar se coloca en la cara norte. Teniendo en cuenta que construir un componente que tenga diferentes capas de materiales con diferentes valores de U, ya sea apartir de los datos de conductividad informados por fabricantes o normas, determinar su prestación hacia el ahorro de energía en un edificio, sería en muchos casos complejo o costoso. Si uno quiere variar en forma rápida los diferentes componentes, se pensó optar por la alternativa previa de hacer la simulación del uso de este componente con el programa eQuest, (eQuest versión 3-7) (2014) como si fuera colocado en la celda, y luego de obtener la certeza de que puede ser un componente de valor para el ahorro de energía, hacer la construcción y determinar, colocándolo en la celda, el valor real de U en condiciones ambientales reales de uso.

#### *Información sobre la Celda*

Ubicación física y geográfica: La celda se encuentra a una altura de 8 m, en la parte superior del edificio del Centro CEA de la Facultad Regional Delta. Ubicación geográfica: Latitud: -54,178 Longitud: -58,961, como se observa en la Figura 2.



*Figura 2: Foto de la Facultad Regional Delta donde se puede ver la celda CEED*

Equipo HVAC: Se trata de una Unidad Rooftop con calefacción por Bomba de Calor, con capacidad nominal de 3 TR. El mismo ofrece una SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratios) (Eficiencia de

Energía Estacional) de 10.0. El objetivo del equipo HVAC instalado es mantener en la zona de guarda una temperatura constante de 20°C, sea cual fuere la temperatura del ambiente exterior, figura 4.



Figura 3: Vista de la Cara Norte



Figura 4: Vista General del Equipo HVAC

## PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN

Se definieron los parámetros de la simulación, teniendo en cuenta, el archivo climático anual, la envolvente (dimensiones, diseño y los materiales de construcción), el HVAC, las cargas y el schedule (cronograma de trabajo de la celda).

Archivo climático: se utilizó el de nuestra estación meteorológica (<http://meteo.frd.utn.edu.ar/>), previo proceso de configuración a la extensión solicitada por el programa, .bin. Tomando en cuenta luego solamente el período de ensayo real.

Equipo HVAC: El equipo de HVAC se modeló como RESYS2, en el mismo encontramos todas las características del Equipo Surrey de 3TR.

Cargas: Las cargas de calor latente fueron consideradas nulas en la ZE, no así las sensibles dado que se colocó un equipo calefactor con una resistencia eléctrica controlada. En la ZE se consideró una infiltración mínima, resultado de una ecuación que interviene, una constante más una variable dependiente del viento (valor nulo), más una variable por diferencia de temperatura. Resultando en un valor variable según la diferencia de temperaturas. Para la ZG, se consideraron nulas las cargas latentes y sensibles. Se consideró además una infiltración por la puerta de acceso exterior, ubicada en la pared sur de la celda.

Schedule: Se definieron los respectivos cronogramas para la ocupación de ZE y ZG, vacíos; ventilador, para la ZG, refrigeración (constante en 20°C), calefacción (constante en 20°C), para el período de ensayo especificado.

Ajuste de temperaturas:

ZE: Zona No acondicionada. Temperatura de diseño frío=temperatura de diseño calor = 75,5°F = 24 °C

ZG: Acondicionada. Temperatura de diseño frío = temperatura de diseño calor = 20°C = 68 °F

Envolvente: Con las dimensiones expresadas en la Tabla 2, se dimensionó la forma rectangular de la planta de la ZG con su respectiva altura y posteriormente lo mismo para la ZE teniendo en cuenta las coordenadas de posición relativas.

Se tuvieron las siguientes consideraciones:

- Las paredes de la ZG son consideradas exteriores, a las cuales se les incluye el techo y el piso.

- El piso de la ZG se encuentra sometido a las condiciones ambientales, el mismo se encuentra apoyado en cinco hileras de ladrillo de 25 cm. de alto. Esto hizo que al definir el piso fuera necesario agregarle una resistencia adicional.
- Todas las paredes, incluso pisos y techos, fueron creadas en el modo de capas, lo que implica que tienen inercia térmica.
- La puerta de acceso, también fue creada de la misma manera, pero teniendo en cuenta la infiltración sugerida por la norma Ashrae para puertas con burletes, (coeficiente: 2,4).
- Las paredes este, oeste, sur y las superficies de piso y techo de la ZE, fueron definidas como paredes interiores, con ello el programa asume que no recibe radiación teniendo además el coeficiente de convección diferente.

Existe un toldo que protege la pared sur de la ZG, el cual también fue incluido y un cobertor del techo de la ZG y la Cara Norte compartida por ambos ambientes.

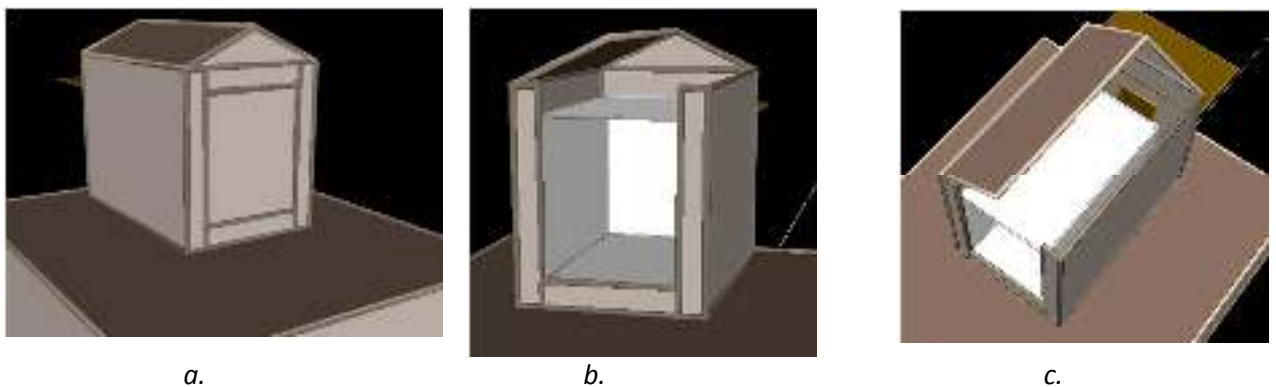


Figura 5 a, b y c: Esquemas abiertos de la Celda en el Simulador.

## METODOLOGIA

La celda de ensayo fue mejorada en sus prestaciones desde los últimos trabajos presentados, dado que se logró instalar en las paredes interiores de la zona de ensayo, sensores de flujo de calor que fueron diseñados, fabricados y calibrados por el centro CEA, Odobez N.S. et.al. (2017), de esta manera se puede conocer los flujos de calor que se intercambian entre la zona de ensayo (ZE) y la zona de guarda (ZG) y también se colocaron en la cara norte, que es donde se colocará el espécimen a ensayar. Ver figura 6



Figura 6: Sensores de flujo aplicados sobre la zona de ensayo

Por otro lado, se colocó en el interior de la zona de ensayo un equipo calefactor provocando de esta manera una generación de energía adicional en su interior. El mismo es con una forma de pulso que va desde los 50W (solo el aporte del motor del ventilador de recirculación), hasta los 250W en promedio, que es cuando se hace funcionar la resistencia eléctrica, de forma automática. Con esto lo que se quiere lograr, es provocar un cambio de temperaturas en el interior para que se genere un desacople de



la temperatura que se genera en el interior en relación a la que ingresa de la cara norte que es la que está en contacto directo con el exterior.

En estas condiciones la metodología empleada consistió en hacer funcionar la celda, por un período de una semana desde el 10 de abril al 17 de abril de 2019, se midieron las variables de trabajo con un registrador de datos AGILENT 34980A. Los mismos fueron: los valores de temperatura en la zona de ensayo (ZE), siete sondas de temperatura de aire y seis de superficie en las caras, en la ZG se colocaron sensores de temperatura de superficie en las paredes interiores y techo que es, al exterior de la ZE, y tres sensores de temperatura de aire en las caras este, oeste y sur. Los valores de flujo de calor en las cinco caras de la zona de ensayo, como se muestran esquemáticamente los grupos en cada cara, en la figura 7.

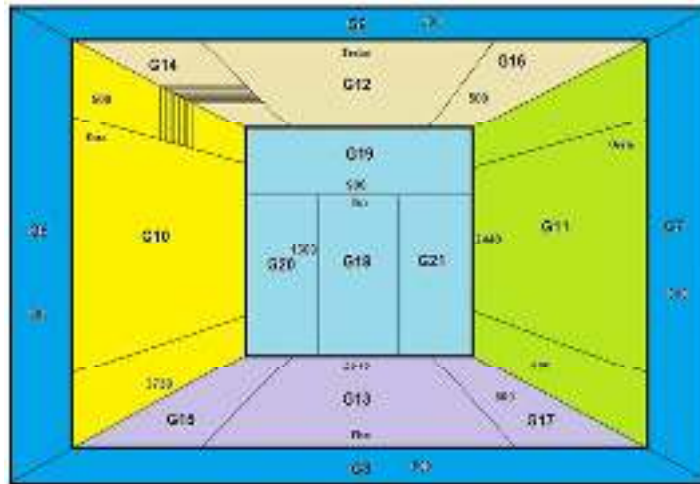


Figura 7: Esquema de la distribución de los grupos de sensores

También se midieron los valores de temperatura superficial interior y exterior y los flujos de calor en tres puntos de la cara norte.

De esta forma se midieron y obtuvieron todos los datos necesarios para comparar con las condiciones de parametrización realizada de la celda en el programa eQuest.

La segunda etapa entonces consistió en parametrizar toda la celda, con las nuevas condiciones, en el programa eQuest; mediante la entrada de todos los datos requeridos por el software como son los que corresponden a la envolvente del edificio (los materiales que conforman la envolvente), las cargas y el equipo de climatización, los datos de clima y la carga interior.

La carga interior en la ZE, especifica el peso compuesto del piso, el mobiliario (en nuestro caso prácticamente nulo) y las paredes interiores de un espacio dividido por el área del piso del espacio. Este valor de entrada determina los factores de ponderación asociados con el espacio. Los valores más altos dan un tiempo de retraso más largo entre las ganancias de calor y las cargas de enfriamiento resultantes, y una mayor amortiguación de las cargas máximas.

Una vez parametrizado, lo que se realizó, fue comparar los valores medidos con los valores simulados de las variables que nos pueden dar certeza de que la simulación y la parametrización es comparable con la realidad medida.

Luego de varias corridas del programa, se fueron ajustando por ejemplo los valores de emisividad.

Surface	emissivity
Aluminum sheet	0.12
Steel, galvanized, bright	0.25
Regular glass	0.04
Building materials (wood, masonry, non metallic paints)	0.90

\* From 2005 ASHRAE Fundamentals, p.23-5

Figura 8. Tabla de emisividades del eQuest.

Los que permitieron llegar a un ajuste final aceptable, que se muestran en los parámetros de flujo de las cinco caras de la ZE y la temperatura interior de la ZE., etc.  
Ver figuras 9 y 10 respectivamente.



Figura 9: Temperaturas en la Zona de Ensayo



Figura 10: Comparación de la potencia intercambiada.

En este estado de situación, con la certeza que la simulación refleja la operatoria de la celda, es que podemos ahora hacer modificaciones sobre la cara norte y colocar de forma simulada diferentes componentes de diferentes valores de transmitancia de calor U (Figura 11) y determinar, por medio de los valores del consumo que nos suministra el Equipo HVAC, el potencial ahorro de energía que se obtendría con estos componentes.

Fenólico-Telgopor-Fenólico	Una pulgada de Fenólico	Ladrillo hueco revocado
<p>Surface Construction Parameters</p> <p>Construction: <input type="text" value="Fenóloporista Const"/></p> <p>Specification Method: <input type="text" value="Layers Input"/></p> <p>Calculated U-value: 0.230 W/m²·K</p> <p>Surface Roughness: 1</p> <p>Ext. Color (absorpt.): 0.200</p>	<p>Surface Construction Parameters</p> <p>Construction: <input type="text" value="Fenológica de 1 pulg"/></p> <p>Specification Method: <input type="text" value="Layers Input"/></p> <p>Calculated U-value: 0.410 W/m²·K</p> <p>Surface Roughness: 3</p> <p>Ext. Color (absorpt.): 0.700</p>	<p>Surface Construction Parameters</p> <p>Construction: <input type="text" value="Ladrillo hueco"/></p> <p>Specification Method: <input type="text" value="Layers Input"/></p> <p>Calculated U-value: 0.500 W/m²·K</p> <p>Surface Roughness: 3</p> <p>Ext. Color (absorpt.): 0.700</p>
Stucco	GreenHouse	
<p>Surface Construction Parameters</p> <p>Construction: <input type="text" value="Cinta PVC Stucco"/></p> <p>Specification Method: <input type="text" value="Layers Input"/></p> <p>Calculated U-value: 2.400 W/m²·K</p> <p>Surface Roughness: 1</p> <p>Ext. Color (absorpt.): 0.400</p>	<p>Surface Construction Parameters</p> <p>Construction: <input type="text" value="Cinta PVC Stucco"/></p> <p>Specification Method: <input type="text" value="Layers Input"/></p> <p>Calculated U-value: 2.117 W/m²·K</p> <p>Surface Roughness: 3</p> <p>Ext. Color (absorpt.): 0.700</p>	

Figura 11: Valores de transmitancia de calor U de los componentes simulados

## RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

En la tabla 1 y figura 12 se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas con los diferentes materiales colocados en la cara Norte de la celda. Observando las diferencias de consumos de energía que se producen en el sistema HVAC, las cuales son coherentes con los diferentes valores de la transmitancia U.

Consumo de energía:

	Original	Fenolico 1"	Stucco	Ladrillohueco	MassLess
Refrigeración	5.98	7.86	7.06	6.22	8.27
Calefacción	2.78	3.74	3.76	2.45	4.01
Ventiladores	2.36	3.11	2.89	2.36	3.29
Auxiliares	0.6	0.59	0.58	0.58	0.59

Tabla 1: Consumos energéticos según material, expresados en KWh.



Figura 12: Gráfico comparativo de los consumos discriminados.

## CONCLUSIÓN

Se logró parametrizar la celda CEED con todos los nuevos elementos incorporados como fueron la potencia adicional en la zona de ensayo y los sensores de flujo tanto en las cinco paredes interiores de la zona de ensayo de la celda y el componente de la cara norte. Además de los ajustes correspondientes sobre los otros elementos constructivos y de medición con que contaba la celda.

De esta forma se pudo simular, logrando obtener entre los valores medidos y simulados que se corresponden entre sí y aseguran la parametrización correcta.

Luego realizando la simulación de los nuevos componentes colocados en la cara norte, los cuales tienen características constructivas diferentes y también un coeficiente de transferencia de calor menor al de la cara original de parametrización, se pueda comprobar que el consumo de energía, al funcionar la celda se modifica de forma coherente a los esperado en relación a la diferencia en la capacidad térmica de los componentes simulados, como lo muestra la tabla 1. Logrando de esta forma el objetivo planteado de contar con una herramienta de simulación para realizar los análisis previos de los componentes a ensayar en el futuro con la celda.

## REFERENCIAS

- PH. Baker, H.A.L. van Dijk. (2008) "PASLINK and dynamic outdoor testing of building components" Building and Environment . Vol 43. pp.143-151.
- Jensen, S. Ø. (1995). Validation of building energy simulation programs: a methodology" Energy and Building Vol 22. 133-144
- Odobez N.S., García Ebbens C.A., Soldatti M. E., Godoy C., Taddei E. (2017) "Diseño, fabricación y calibración de sensor para la medición de flujo de calor en superficies" XL Reunión de Trabajo de

**EQUEST SIMULATION OF AN EXTERNAL TEST CELL  
FOR THE STUDY OF THE BEHAVIOR OF THE ENERGY EFFICIENCY OF BUILDING  
ELEMENTS**

**ABSTRACT**

The growing need for the use of materials of different values of global heat transfer coefficient (U), for the composition of building envelope components, forces us to know with certainty that U value. For the application of standards, such as those included in Decree 1030/10 - Law 1305 of the province of Buenos Aires, among others. For this purpose, the CEA center has an external test cell that allows U to be determined. Given the complexity of building components of different materials, their availability, and costs; it was decided to parameterize the cell in the eQuest program and use it before building the component and placing it in the cell. In this way the construction will be carried out when there is a certainty of its advantage in use, in relation to energy efficiency. Thus, this parameterization was validated by performing different tests, comparing the internal temperature values and the flows measured in the test zone. The energy consumption for each simulated component was then compared, observing a coherent relationship between the thermal transmittance values and the energy consumption in the cell, which determines the validation of this applied method

**Keywords:** Simulation, test cell, energy efficiency, building components

## **ENTALPÍA ISOSTÉRICA DE ADSORCIÓN DE METANOL EN CARBONES ACTIVADOS CON ALTO GRADO DE MICROPOROSIDAD**

**Andrés Sartarelli<sup>1</sup>, Ernesto Cyrulies<sup>2</sup>**

<sup>1-2</sup> Instituto de Desarrollo Humano, Universidad Nacional de General Sarmiento (IDH, UNGS)  
J.M. Gutiérrez 1150, (C.P.1613) Los Polvorines, provincia de Buenos Aires  
Tel. 011- 4469-7500 ; e-mail: asartare@campus.ungs.edu.ar

*Recibido 13/08/19, aceptado 21/10/19*

**RESUMEN:** En el marco del desarrollo de dispositivos de refrigeración por energía solar, el presente trabajo tiene como objetivo caracterizar la capacidad de adsorción de metanol en carbón activado y para ello se calcula la entalpía isostérica. El cálculo se realiza a partir de la medida de un conjunto de isotermas, considerando el potencial químico y sin apelar a ningún modelo que describa la adsorción en volumen como por ejemplo el de Dubinin-Astakhov (DA). Se sintetizan los principales resultados del análisis de varias muestras. Con la entalpía se revelan otras características que no están claramente presentes cuando se utiliza el modelo DA para obtener parámetros de adsorción a través de las isotermas, por ejemplo, que en las muestras analizadas existen rangos de concentración de adsorbato en el adsorbente donde la interacción se intensifica para algunas de ellas, más que en otros carbones que presentan mayor capacidad global de adsorción.

**Palabras clave:** Refrigeración solar, Adsorción, Entalpía de Adsorción

### **INTRODUCCIÓN**

Los carbones activados se caracterizan por su extensa área superficial, esta se desarrolla en una microestructura formada por macro, meso, micro y ultra microporos. Mediante dispersión de rayos X con bajo ángulo de incidencia se estableció que la estructura microporosa de carbones puede ser representada por un sistema polidisperso con una distribución continua del tamaño de microporo (Plavnick, 1984). Previamente a esto, Huber et al. (1978) hicieron la suposición de que para sistemas porosos heterogéneos la distribución es una función continua y se describe por la función de Gauss.

La alta capacidad de adsorción está asociada tanto a la porosidad como así también a grupos funcionales y radicales libres de diferentes especies químicas que se encuentran en su estructura. Cualquier carbón activado contiene poros de diferentes tamaños. El área específica de cualquier adsorbente poroso corresponde al área interna de los poros y al área externa de las partículas que lo constituyen. En general la contribución del área externa al área específica es extremadamente pequeña y por ende se puede despreciar. Los poros se clasifican de acuerdo a su diámetro medio que notaremos con " $D_p$ " en: macroporos ( $50 \text{ nm} < D_p$ ), mesoporos ( $2 \text{ nm} < D_p < 50 \text{ nm}$ ), microporos ( $0,7 < D_p < 2 \text{ nm}$ ) y ultramicroporos ( $D_p < 0,7 \text{ nm}$ ) Los carbones activados analizados están formados por estas cuatro clases de poros pero, generalmente, la mayor parte del área específica se encuentra en los microporos.

Adsorbentes como por ejemplo los formados por fibras de carbón activado, poseen una distribución uniforme de tamaño de poros, mientras que los carbones activados más comunes y las Zeolitas (aluminosilicatos) poseen una distribución normal. La fabricación de carbón activado consiste básicamente en la carbonización de la materia prima (a temperaturas por debajo de los  $800^\circ\text{C}$  y en ausencia de oxígeno) y el posterior tratamiento del producto resultante mediante determinados compuestos químicos, generalmente a temperaturas del orden de los  $1000^\circ\text{C}$ .

En este proceso el material carbonizado se convierte en una masa que contiene un gran número de poros distribuidos de manera aleatoria con diferentes formas y tamaños, esto resulta en un incremento considerable del área específica (Bansal et al., 1998). El carbono, principal constituyente del carbón activado, representa entre 85 y 95 % en peso, el resto corresponde a determinadas cantidades de átomos de oxígeno, hidrógeno, nitrógeno, y varios grupos funcionales que dependen del proceso de activación empleado que también determina las propiedades finales del producto (Bansal et al., 2000; Marsh et al., 1997).

La adsorción es un fenómeno superficial que involucra la acumulación de sustancias (adsorbato) sobre una superficie, se clasifica en física o química dependiendo del tipo de interacción entre el adsorbato y el adsorbente. La adsorción física es un fenómeno reversible, que resulta generalmente de la existencia de fuerzas intermoleculares de atracción débil, tipo Van der Waals, entre la superficie interna del sólido poroso y las moléculas del adsorbato. Las moléculas no se adsorben sobre un sitio específico en la superficie y además se pueden mover casi libremente en la estructura porosa del adsorbente. Este proceso se caracteriza por ser exotérmico, con un calor muy similar al calor latente de condensación del fluido que se adsorbe, como líquido, en el interior del adsorbente (en nuestro caso la temperatura de trabajo está por debajo de la temperatura crítica del fluido).

Por otro lado, la adsorción química se debe a una reacción química entre los compuestos que se generan luego del proceso de activación y las moléculas del adsorbato, y se caracteriza porque generalmente ocurren con una elevada energía de activación, en el orden de 10-100 kcal/g-mol (Dash, 1975). En este caso el calor de adsorción puede alcanzar valores bastantes más altos que para el caso físico muy similares al calor generado por reacción química entre grupo funcionales específicos y las moléculas del adsorbato (sin importar demasiado la presencia del resto del adsorbente). Esta adsorción es por lo general irreversible y muy específica, en cuanto a que ocurre solamente sobre cierto tipo de sitios activos de la superficie del adsorbente, donde se ubican especies químicamente muy activas en relación al adsorbato. En los dispositivos de refrigeración solar pueden ocurrir ambos tipos de procesos dependiendo tanto de las características químicas del carbón activado utilizado, así como de las características químicas del adsorbato y también de los contaminantes presentes, tanto en el adsorbente como en el adsorbato, que pueden favorecer dichas reacciones a modo de catalizadores de las mismas.

## **FUNCIONAMIENTO DE UN REFRIGERADOR TERMO-SOLAR POR ADSORCIÓN**

El esquema de este dispositivo puede observarse en la figura 1 y el ciclo de funcionamiento en la figura 2. Durante las primeras horas de la mañana, cuando aún la radiación solar es débil, la temperatura  $T_1$  del colector y del carbón en su interior es prácticamente igual a la del ambiente; luego, debido al incremento de la radiación solar, esta temperatura se incrementa y el metanol adsorbido en el carbón activado es liberado en estado de vapor, esto comienza a ocurrir cuando el colector alcanza los 40-50 °C (dependiendo del tipo de carbón). Esta temperatura es inferior a la que se indica en el ciclo ideal denotada por  $T_2$ , (el ciclo ideal está marcado en el gráfico con línea punteada). A partir de allí la concentración de adsorbato comienza a disminuir levemente y la presión del sistema se sigue incrementando hasta que alcanza la presión de saturación de vapor fijada por la temperatura del condensador ( $T_c$ ), cuyo valor no es constante, pues depende de la temperatura ambiente y también de la humedad relativa, de esta forma el valor de  $p_{sat(T=T_c)}$ , puede variar considerablemente (y así las posiciones de los puntos 2, 2' y 3 indicadas en el ciclo están muy lejos de permanecer constantes durante esas horas del día). Una vez alcanzada esta presión, la concentración de metanol adsorbido desciende considerablemente hasta alcanzar un valor mínimo que depende de las variables termodinámicas, pero también del tipo de carbón. La máxima temperatura que alcanza el colector, que en el gráfico se señala con  $T_3$ , es de unos 120 °C aproximadamente. El metanol, ya condensado, se deposita en el evaporador. Durante todo el proceso de condensación (que dura lo que duran las horas de sol) la presión del sistema queda fijada a  $p_{sat(T=T_c)}$ . En el punto señalado con 3, en este ciclo, la concentración de metanol alcanza un mínimo  $x_{min}$  (en el ciclo ideal este mínimo permanece constante hasta el punto señalado con 4). La parte descripta corresponde al tramo 1-2'-3 del gráfico en la figura 2. Aquí es conveniente tener en cuenta que parte de la condensación, de acuerdo a como se diseñe el sistema, se puede producir también en el mismo evaporador. Esto, en sistemas tan simples como los



mostrados en el esquema de la figura, depende básicamente de la dinámica del flujo de metanol en su movimiento del colector al evaporador, lo que modificaría aún más el ciclo mostrado. Por la tarde-noche, cuando el colector desciende su temperatura por debajo de los aproximadamente 70-80 °C (dependiendo del carbón), se pierde nuevamente la condición isostérica (en el ciclo ideal esta temperatura se indica con  $T_4$ ), el metanol depositado en el evaporador incrementa su tasa de evaporación y desciende su temperatura llegando a un valor mínimo de aproximadamente -3 °C ( $T_E$ ) dependiendo del diseño del evaporador, a partir de ese momento la presión de todo el sistema queda fijada a la presión de saturación de vapor  $p_{sat}(T=T_E)$  que define  $T_E$ . Cabe señalar aquí que a diferencia de  $p_{sat}(T=T_C)$ , el valor de esta presión no depende prácticamente de las condiciones diarias, de esta forma durante el resto de la noche y primeras horas del día el carbón alcanza la máxima concentración de metanol en el carbón ( $x_{max}$ ). Esta dinámica se ha estudiado mediante el desarrollo de un software que nos permite simular el ciclo de funcionamiento del dispositivo y así poder ensayar su desempeño para diferentes condiciones de diseño.

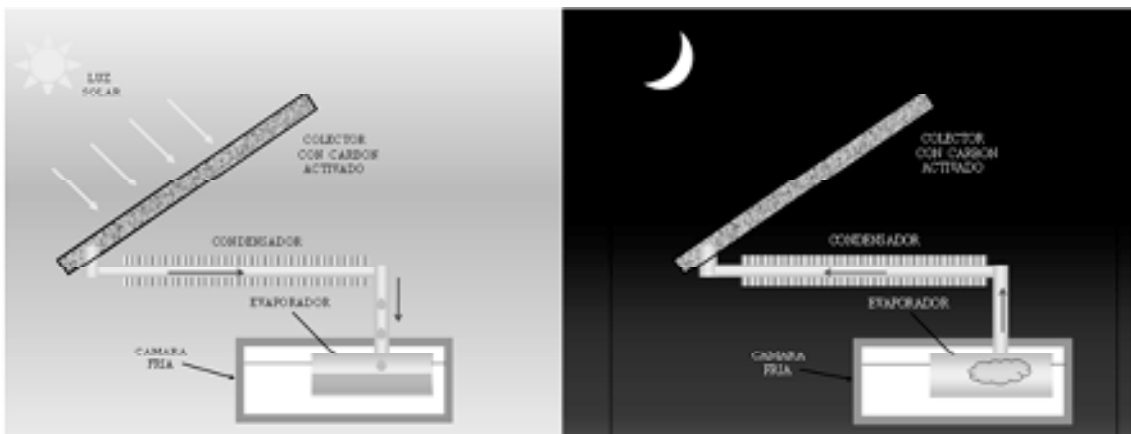


Figura 1: esquema de un refrigerador solar que funciona por el principio de adsorción de metanol en carbón activado

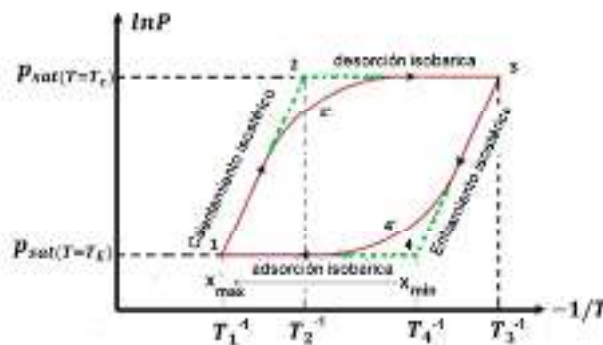


Figura 2: ciclo termodinámico del sistema (ver texto): durante el día la temperatura del colector asciende a aproximadamente 100 °C en promedio y esto hace que el metanol contenido en los tubos del colector se desorba (esto corresponde al tramo 1-2'-3) en esta etapa el metanol se licúa y se acumula en el evaporador. Durante la noche o cuando la temperatura del colector desciende, el metanol es readsorbido por el carbón activado (tramo: 3-4'-1). La curva en trazo punteado corresponde al ciclo ideal. Los valores señalados con  $x_{max}$  y  $x_{min}$  corresponden a la máxima y mínima concentración que alcanza el metanol en el carbón. Estos valores dependen, además de las variables termodinámicas, fundamentalmente del tipo de carbón activado utilizado.

Estos ciclos de adsorción/desorción transcurren durante el paso de los días permitiendo la producción y acumulación de hielo en la cámara fría. Pueden verse más detalles en trabajos previos (Vera et al., 2008; Vera et al., 2011)

## LA QUÍMICA SUPERFICIAL DEL CARBÓN ACTIVADO Y LA EFICIENCIA DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Las propiedades adsorbentes del carbón activado derivan fundamentalmente del proceso de activación (Von Kienle, 1986; Baker, 1992). La superficie interna de este adsorbente se compone de una superficie no polar (constituida por capas grafénicas) donde la adsorción se realiza mediante fuerzas de dispersión (tipo Van der Waals). Por otro lado, los bordes de los contornos que constituyen la estructura cristalina del carbón (donde se ubican los grupos funcionales y también radicales libres) pueden ser químicamente muy reactivos. Entre los diversos grupos funcionales que se destacan están los compuestos oxigenados, que determinan la densidad electrónica de las capas grafénicas. Así los grupos carboxílicos, unidos a los bordes de las capas grafénicas, disminuyen la densidad electrónica, mientras que los grupos fenólicos la incrementan. Estos grupos funcionales también generan carga eléctrica en la superficie debido a su disociación química. Esta carga depende del pH del medio y de otras características superficiales (Radovic, 2001; Moreno Castilla, 2004). La carga negativa proviene de la disociación de grupos de carácter ácido (grupos carboxílicos y fenólicos). En cambio, aún no está del todo claro cuál es el origen de la carga positiva (en carbones sin grupos nitrogenados), ya que pueden proceder de regiones ricas en electrones  $\pi$  o de grupos oxigenados de carácter básico como pironas y cromenos (Moreno Castilla, 2004). Los grupos superficiales oxigenados además afectan la hidrofobicidad superficial del carbón activado: un incremento de los mismos se traduce en una disminución de la hidrofobicidad. Esto da lugar a la formación de un “entrelazado” de moléculas de agua sobre la superficie del carbón, pudiendo reducirse así la adsorción de moléculas de otros adsorbatos. Por otro lado, la materia mineral contenida en este adsorbente en general perjudica el proceso de adsorción, ya que puede bloquear la porosidad de la materia carbonosa, y además por su carácter hidrófilo, reducir la retención del adsorbato. Todos estos mecanismos pueden disminuir drásticamente en forma inmediata, o a largo plazo, la eficiencia de los sistemas de refrigeración de este tipo.

### ADSORCIÓN FÍSICA DE METANOL SOBRE CARBÓN ACTIVADO

La adsorción del metanol es muy intensa en el interior de los microporos. Existen muchas expresiones para modelar este proceso. Si la microporosidad está homogéneamente distribuida se utiliza generalmente la expresión de Dubinin-Raduskevick, basada en la teoría del potencial de adsorción de Polanyi (Polanyi, 1932; Bering et al., 1972). Utilizando el formalismo que Gibbs desarrolló para estudiar procesos de adsorción (modelo de la superficie divisora) se puede considerar la adsorción de un gas sobre una superficie sólida, idealmente como el intercambio de materia entre dos fases<sup>1</sup>: en este proceso la fase gaseosa que se adsorbe pierde un grado de libertad, pasando de tres dimensiones a una fase superficial bidimensional. La consecuencia inmediata de esta transición (definida como “adsorción”) es entonces una disminución en principio de la entropía y de la energía libre de Gibbs “ $\Delta G$ ” (donde  $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ , siendo  $H$  la entalpía,  $T$  la temperatura absoluta y  $S$  la entropía). Una consecuencia inmediata de este formalismo es que los potenciales químicos de la “fase” adsorbida y la fase fluida son iguales cuando el proceso de adsorción alcanza el equilibrio termodinámico. Adaptando luego la teoría del potencial de adsorción de Polanyi se llega a la siguiente expresión:

$$x(P, T) = w_0 \rho_l(T) \exp \left[ - \left( \frac{1}{E_c} RT \ln \frac{P_{SAT}}{P} \right)^2 \right] \quad (1)$$

En esta expresión  $x(P, T)$  representa la concentración de adsorbato (la razón entre la masa de metanol adsorbido y la de carbón utilizado como adsorbente),  $P$  es la presión de equilibrio,  $w_0$  es el máximo volumen de metanol que se adsorbe en la masa unidad de carbón. Este parámetro está directamente relacionado con el volumen total de los microporos (ya que este alcohol se adsorbe mayormente en los microporos). La densidad del metanol adsorbido es  $\rho_l$  y depende de la temperatura siendo:  $\rho_l(T) = \rho_0 [1 - \alpha(T - 10)]$ , donde el factor de expansión volumétrica vale  $\alpha = 0,00149$  (1/°C). La energía

<sup>1</sup> En un sistema real existe un gradiente de concentración a través de la fase adsorbida, es justamente ésta la razón por la que no puede considerarse al fluido adsorbido como una “fase” (este gradiente se genera debido a los defectos que se encuentran en la superficie del adsorbente, que desequilibran las fuerzas de cohesión de las moléculas).

característica de adsorción  $E_C$  depende del potencial de interacción entre las moléculas del alcohol y los átomos que conforman la estructura del carbón (por ende, depende del tamaño de los poros y también de su geometría). Esta energía se puede considerar como la energía libre promedio de adsorción. La presión de equilibrio líquido-vapor del fluido es  $P_{SAT}$  y el término  $RT \ln(P_{SAT}/P)$  es el potencial de Polanyi. Si el adsorbente posee una distribución heterogénea de microporos y si por otro lado la probabilidad de encontrar poros de diámetro característico "r" se expresa como:  $P_r = f_d(r)dr$  (o sea:  $\int_0^\infty f_d(r)dr = 1$ ) teniendo en cuenta la expresión de Dubinin-Radushkevich (DR) la concentración valdría:

$$x(P, T) \rightarrow \int_0^\infty w_0(r) \rho_l(T) \exp \left[ - \left( \frac{1}{E_C} RT \ln \frac{P_{SAT}}{P} \right)^2 \right] f_d dr \quad (2)$$

Si se considera que  $f_d$  es una distribución uniforme (caso del carbón activado), entonces la expresión anterior se puede escribir como (ecuación de Dubinin-Astakhov o DA):

$$x(P, T) = w_0 \rho_l(T) \exp \left[ - \left( \frac{1}{E_C} RT \ln \frac{P_{SAT}}{P} \right)^n \right] \quad (3)$$

Donde "n" es un parámetro que da cuenta de cuan heterogénea es la distribución. Según algunos autores este parámetro puede variar entre 1 y 4 (Clarkson et al., 1997). Mientras que otros afirman que el valor de este parámetro debería estar entre 2 y 6 (Rouquerol et al., 2014). El carbón activado con valor de parámetro n menor que 3 posee una distribución muy heterogénea y una amplia dispersión de tamaño de microporos. Más allá de todo esto ninguna de estas expresiones es adecuada para modelar la adsorción a concentraciones de adsorbato muy reducidas ya que a estas presiones, tanto DR como DA posee derivada prácticamente nula, luego no permiten reproducir la ley de Henry (en las muestras analizadas los ajustes no eran buenos a presiones relativas del orden de 0,005). El problema es que justamente en estas presiones (donde los niveles de concentración son reducidos) es donde se manifiesta con mayor relevancia la interacción entre el adsorbato y el adsorbente. Para los materiales que poseen una distribución heterogénea de tipo normal (por ejemplo, las Zeolitas), las expresiones anteriores no permiten un ajuste adecuado (Rychlicki, 1995).

Otro tipo de poros como los mesoporos no aportan demasiado al volumen adsorbido, sin embargo su presencia es fundamental: pues a pesar de que en ellos la interacción es intensa sólo a cortas distancias de su superficie interna (aunque bastante menor a la de los microporos) es muy poca la proporción de microporos que se conectan directamente con la superficie macroporosa del adsorbente; de esta manera los mesoporos son los conductos principales que conectan a los microporos con el resto de la estructura del adsorbente. Por otro lado, Dubinin postula que a la ocupación de los microporos no le antecede la formación de policapas, como ocurre en el caso de los mesoporos, sino que el proceso de la adsorción se verifica por el mecanismo del llenado volumétrico instantáneo (Dubinin, 1955; Dubinin et al., 1960).

## ENTALPÍA DE ADSORCIÓN

Ciertos parámetros termodinámicos son esenciales a la hora de diseñar, modelar y/o simular el comportamiento de sistemas de refrigeración solar que emplean justamente la adsorción como mecanismo de producción de frío. La entalpia de adsorción (calor isostérico diferencial) es uno de ellos. La cuantificación de este calor permite revelar particularidades estructurales de los materiales y permite analizar la capacidad de adsorción de diversos adsorbentes. Para un sistema compuesto por una fase fluida adsorbida en equilibrio termodinámico con su vapor, los potenciales químicos ( $\mu_a$  y  $\mu_v$  respectivamente) han de ser iguales. Por otro lado:

$$d\mu_v = \left. \frac{\partial \mu_v}{\partial P} \right|_T dP + \left. \frac{\partial \mu_v}{\partial T} \right|_P dT \quad (4)$$

$$d\mu_a = \left. \frac{\partial \mu_a}{\partial x} \right|_{T,P} dx + \left. \frac{\partial \mu_a}{\partial T} \right|_{P,x} dT + \left. \frac{\partial \mu_a}{\partial P} \right|_{T,x} dP \quad (5)$$

Según la relación de Gibbs-Duhem:  $\mu N = VdP - SdT$  (donde:  $S$  es la entropía,  $N$  es el número de partículas, y  $V$  es el volumen). Teniendo en cuenta estas expresiones resulta:

$$v_V dP - s_V dT = \left. \frac{\partial \mu_a}{\partial x} \right|_{T,p} dx - s_a dT + v_a dP \quad (6)$$

Luego en el caso isoterico ( $dx = 0$ ), la expresion (6) se reduce a:

$$\left. \frac{dP}{dT} \right|_x = \frac{s_V - s_a}{v_V - v_a} \quad (7)$$

Donde  $s_V, s_a$  son las entropías molares medias de la fase de vapor y de la fase adsorbida (en estado líquido) y  $v_V, v_a$  son los volúmenes molares medios del vapor y del líquido adsorbido, respectivamente. Considerando que la fase de vapor se comporta prácticamente como un gas ideal y además que el volumen molar de la fase adsorbida es despreciable frente al volumen molar de la fase de vapor ( $v_V \gg v_a$ ) se llega a que:

$$\frac{h_V - h_a}{RT^2} = \frac{\Delta h_{st}}{RT^2} = \left. \frac{d \ln \left( \frac{P}{P_{sat}} \right)}{dT} \right|_x \quad (8)$$

Ecuación de tipo Clausius-Clapeyron, dónde:  $R$  es la constante de gas ideal,  $h_a = H_a/N_a$  es la entalpía molar media de las moléculas adsorbidas ( $N_a$  es el número de moléculas adsorbidas y  $H_a$  es la entalpía de adsorción). Análogamente  $h_V$  es la entalpía molar media correspondiente a la fase de vapor,  $\Delta h_{st}$  es el calor isostérico diferencial. Este calor representa la diferencia de energía entre el estado del sistema antes y después de la adsorción de una cantidad “pequeña” (diferencial) de partículas sobre esa superficie (en este caso dentro del volumen del microporo). La expresión (8) puede reescribirse como:

$$\Delta h_{st} = R \left. \frac{d \ln \left( \frac{P}{P_{sat}} \right)}{d \left( -\frac{1}{T} \right)} \right|_x \quad (9)$$

Esta expresión será la utilizada para calcular la entalpía de adsorción a través de la medida de las isotermas de las respectivas muestras de carbones activados. Nótese por otro lado que la expresión de DA junto con la ecuación obtenida para  $\Delta h_{st}$  permite relacionar a la energía característica de adsorción con la entalpía isostérica, lo cual implicaría poder calcular la entalpía a través de  $E_C$  (donde la energía característica se obtiene ajustando una sola isoterma con el modelo DA). Esto estaría limitado obviamente al rango de ajuste que permite el modelo DA para una muestra dada.

## RESULTADOS OBTENIDOS

Se analizaron algunas muestras de carbones activados que constituyen pares refrigerantes (Metanol - Carbón Activado) utilizados en nuestros prototipos de refrigeradores solares. Las muestras de carbón analizadas consisten en carbón granular (pellet) con granos de tamaño del orden del milímetro, con una densidad aparente que ronda aproximadamente el valor promedio de  $0,4 \text{ g/cm}^3$  y áreas BET que en promedio (según datos reportados por el fabricante) rondan los  $1000\text{-}1200 \text{ m}^2/\text{g}$  (medidas mediante técnicas de adsorción de nitrógeno). Todas estas muestras tienen en común el hecho de poseer una estructura de isotermas que indican que son adsorbentes fundamentalmente microporosos; en todas se observó también ciclos de histéresis reducidos lo que indica presencia de mesoporos aunque en proporción reducida. Los fabricantes no reportan, en ninguno de los casos, parámetros característicos que hagan referencia a la adsorción específicamente de metanol en este tipo de carbones; por otro lado, en el contexto de este trabajo los datos obtenidos a partir de adsorción de nitrógeno son poco relevantes pues la molécula de nitrógeno posee características distintas a la del metanol (en cuanto a geometría, actividad química y potenciales de interacción). En este trabajo solo se midieron las isotermas de adsorción de metanol para con ellas poder calcular la entalpía isostérica en relación a la adsorción de este alcohol. En todos los casos las isotermas corresponden a temperaturas entre los  $15$  y los  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ . El metanol utilizado posee una pureza del  $98,9 \%$ . En las gráficas siguientes (figura 3) se

muestran, los conjuntos de isotermas de las muestras medidas. Todas las mediciones fueron realizadas con un medidor de sorción de marca comercial: BELSORP. El dispositivo inyecta en la muestra un determinado volumen de metanol y mide los cambios en la presión hasta que la variación de la misma se ubica por debajo de los  $10^{-4}$  Pa; bajo esa condición acepta el último valor de presión medida.

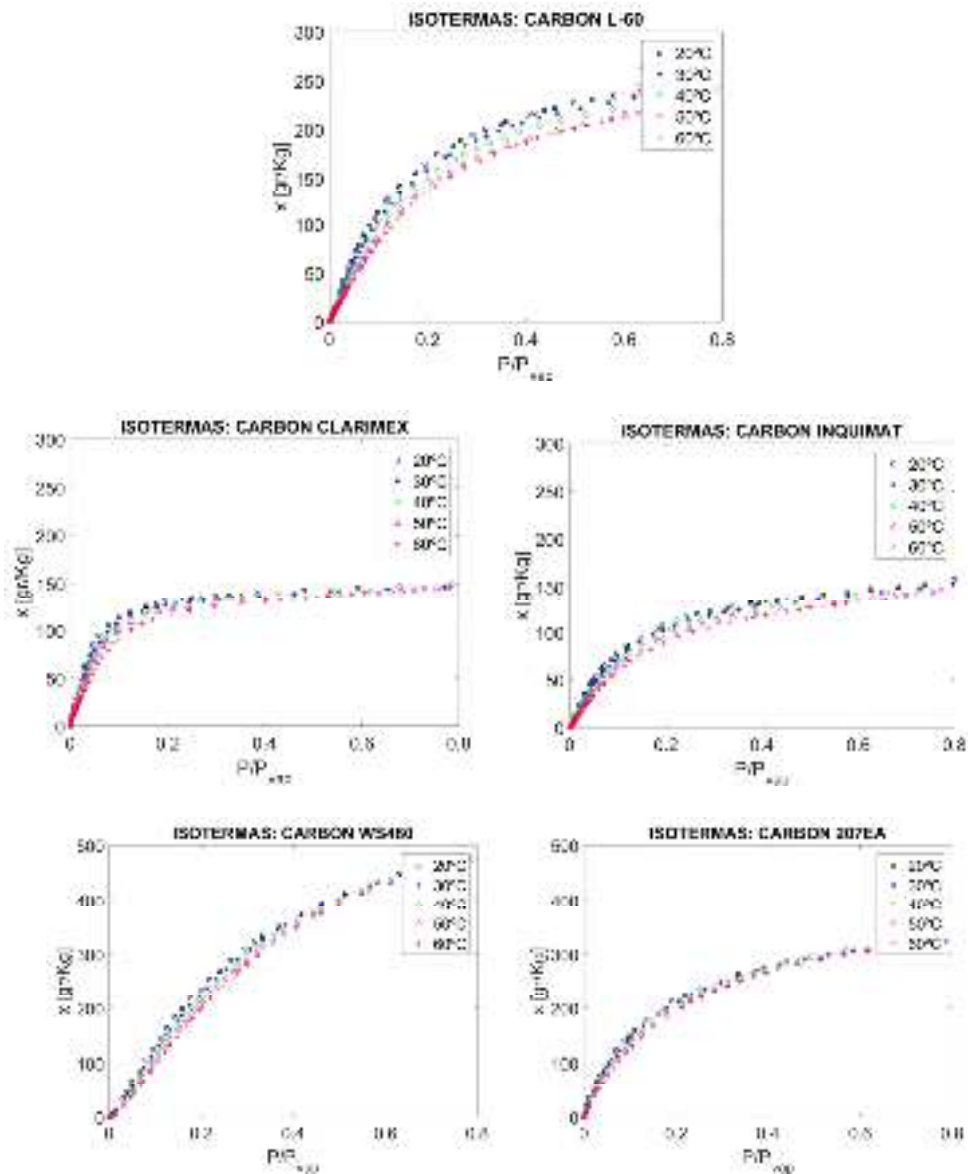


Figura 3: isotermas de adsorción, correspondientes a datos experimentales de los carbones activados analizados. Estas isotermas fueron medidas adsorbiendo metanol al 98,9 % de pureza en el carbón activado. En el eje de ordenadas se tabularon los valores de concentración de metanol en el carbón (en gramos de metanol por kilogramo de carbón). En el eje de abscisas se tabularon los valores de presión relativa  $\frac{P}{P_{VAP}}$  (donde  $P_{VAP}$  es lo que antes se denominó  $P_{sat}$ ).

Previas a ser medidas, las muestras se sometieron a un proceso de descontaminación que consiste en calentarlas a unos 300 °C durante 6 horas, en una atmósfera de nitrógeno seco con presión reducida (del orden de  $10^{-4}$  Pa). El proceso de descontaminación se realiza en el mismo equipo de medición, previo a la medición del volumen adsorbido y permite eliminar el agua que pueda contener la muestra elegida, así como los gases atmosféricos u otros contaminantes naturalmente presentes en las muestras en general. Las isotermas de adsorción así medidas consisten en una serie de valores de volumen adsorbido vs presión. Los valores de volumen se traducen a valores de masa teniendo en cuenta el coeficiente de expansión volumétrica del metanol. Una vez medidas, cada una de las isotermas se

interpola con splines cúbicos, mediante software Matlab (dividiendo al intervalo de presiones de manera tal que la curva de ajuste se desvíe de los valores experimentales a lo más, en un 1 % en todo el rango de presiones relativas).

En la figura 4, a modo de ejemplo, se muestra el ajuste de dos isothermas (20°C y 60°C) correspondiente al carbón de denominación comercial: L-60. El gráfico de la derecha en la misma figura muestra el buen ajuste logrado en el rango de bajas concentraciones (bajas presiones relativas) para el mismo carbón. Luego de este primer paso se procede a utilizar el resultado de los ajustes de isothermas; la figura 5 muestra a modo de ejemplo, como se procedió en este caso considerando solo tres isothermas: se toma (para cada muestra) una dada concentración " $x_0$ " y los puntos de intersección entre las isothermas (sus curvas ajustadas por splines) y la recta  $p' = x_0$ , se ajustan mediante cuadrados mínimos, a una recta, en el plano  $x, \ln p'$  (recta L en el gráfico de la derecha de la figura 5), luego, según la ecuación 9 la entalpía para esa concentración se obtiene multiplicando por R ese valor de pendiente. Para realizar los gráficos de la figura 6 se dividió al intervalo de concentraciones en unas 100 partes y se tomaron cinco isothermas, en lugar de tres isothermas como en el ejemplo, pues hemos comprobado que con sólo tres la dispersión en el valor obtenido de la entalpía puede ser grande (dependiente del valor de concentración elegido).

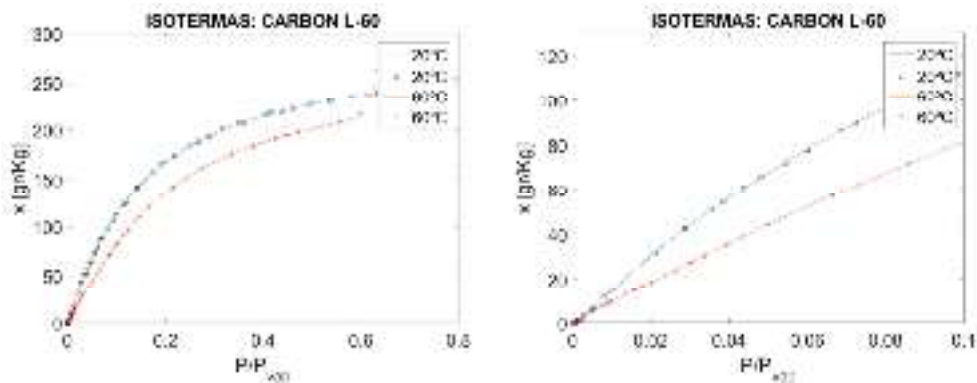


Figura 4: Ajuste de los datos experimentales (cuadrados y puntos que corresponden a 20 y 60 °C respectivamente) de las isothermas de una de las muestras (marca comercial L-60) mediante splines cúbicos. El gráfico de la derecha es un detalle del ajuste logrado en el rango de bajas concentraciones (bajas presiones relativas). La curva de línea llena corresponde la generada por splines cúbicos.

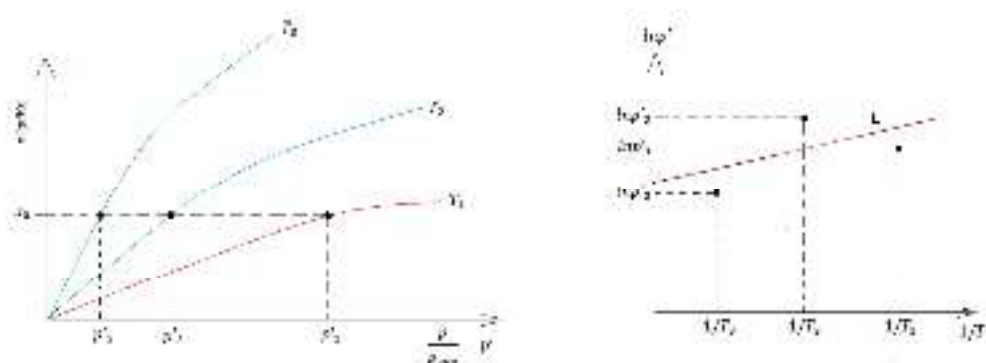


Figura 5: procedimiento con el cual se obtuvo la entalpía isostérica (ver texto)



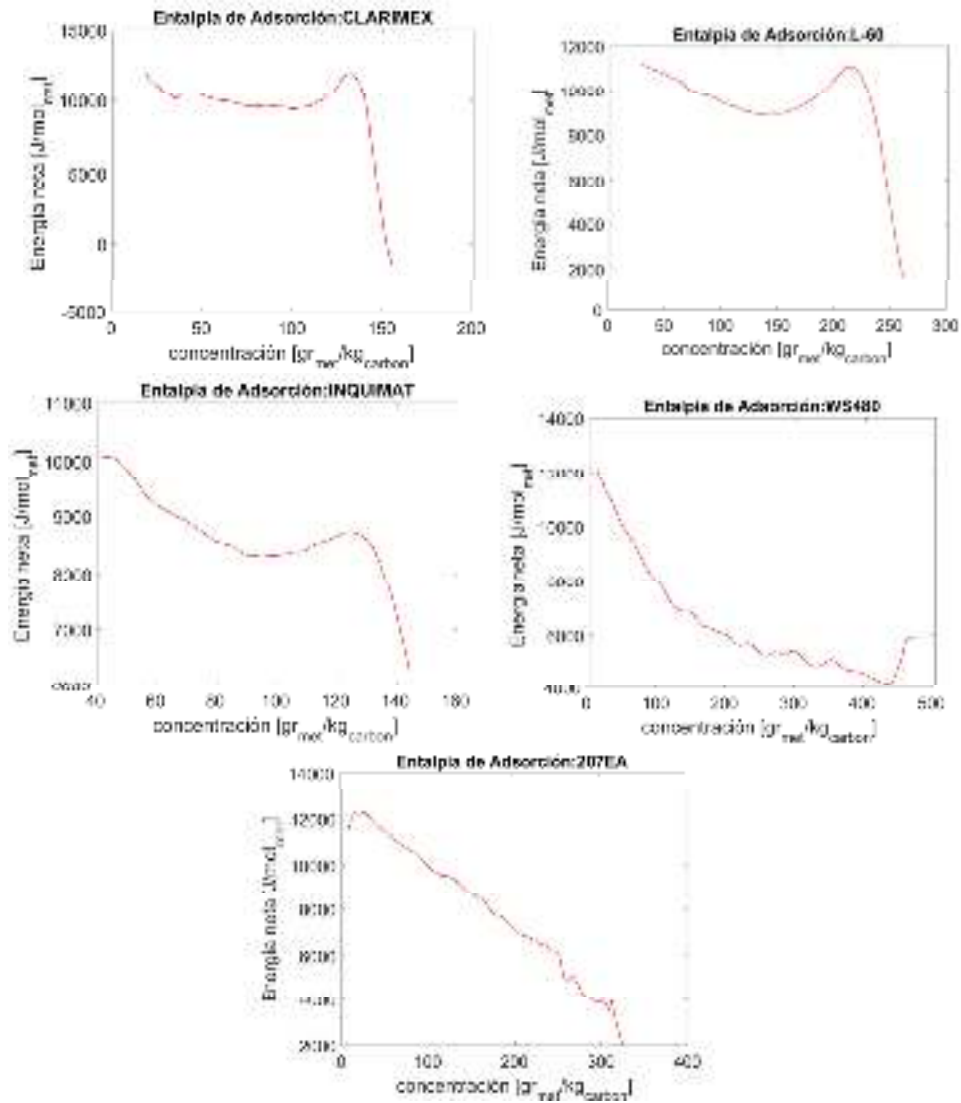


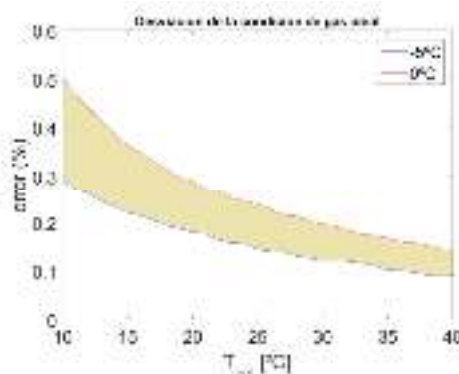
Figura 6: Entalpías diferenciales de adsorción para las muestras analizadas. Se muestra cómo cambia la entalpía por mol de metanol adsorbido en función de la concentración de metanol adsorbido.

Por otro lado, se analizaron las desviaciones que pueden aparecer en el valor de entalpía así calculado en el caso en que el vapor de metanol se considere como no ideal. La desviación de la condición de gas ideal conduce a la siguiente expresión para la entalpía:

$$\Delta h_{st} = T \left( \frac{dp}{dT} \right) \bigg|_x (1/\rho_V) = R \frac{d \ln \left( \frac{p}{p_{sat}} \right)}{d \left( \frac{1}{T} \right)} \bigg|_x \frac{p}{\rho_V R T} \quad (10)$$

Donde  $\rho_V$  es la densidad del vapor. Según datos experimentales correspondientes al metanol (extraídos de: Webbook of Chemistry of National Institute of Standards and Technology) se comprueba que tales desviaciones son muy pequeñas para el rango de densidades de vapor en el que se trabaja, vale decir que los valores de entalpía prácticamente no se modifican si se considera al vapor de metanol como gas ideal. Para analizar cuánto vale la desviación de la condición de gas ideal para presiones y temperaturas en el rango de trabajo de los dispositivos de refrigeración solar, hay que tener en cuenta que cuando el metanol se adsorbe en el carbón activado la presión del sistema alcanza un valor mínimo que corresponde al de la temperatura más baja que puede alcanzar el metanol cuando está dentro del evaporador (ver esquema del refrigerador en la figura 1). Según mediciones sobre nuestro dispositivo de refrigeración la temperatura de la masa de metanol contenida en el evaporador puede

descender aproximadamente a  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  en promedio y está estratificada (la superficie libre del metanol que está más alejada del agua que rodea al evaporador puede descender aún más su temperatura, dependiendo de la geometría de la cuba que conforma al evaporador). Analizamos entonces las condiciones de adsorción isobárica en este rango de temperaturas de colector y para temperaturas del evaporador entre  $0$  y  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Por otro lado, el metanol se adsorbe sobre un lecho de carbón activado cuya temperatura puede oscilar entre los  $10$  y los  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (temperatura nocturna). En el siguiente gráfico (figura 7) mostramos los resultados obtenidos.



*Figura 7: Desviación porcentual de la condición de gas ideal del vapor de metanol para el vapor a temperaturas que varían entre  $10$  y  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (temperatura del colector en la fase de adsorción). En este caso la presión del sistema queda fijada por la temperatura del evaporador (es decir es la presión de saturación de vapor que corresponde a esa temperatura que puede variar entre  $0$  y  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ )*

Como se observa, la máxima desviación (obtenida como cabe esperar para las densidades molares más altas) no supera el  $0,5\%$  de la condición de gas ideal.

## CONCLUSIONES

1- Creímos conveniente utilizar polinomios de interpolación por splines cúbicos en vez de cualquiera de los modelos existentes para el ajuste de las isotermas, pues ninguno de éstos permite un buen ajuste en un amplio rango de presiones relativas, especialmente a muy bajas concentraciones (y por ende presiones relativas).

2- Los ajustes de isotermas, mediante el modelo DA, de todas las muestras aquí estudiadas, dan valores para los respectivos exponentes ( $n$ ) de este modelo, inferiores a  $2$  (Sartarelli et al., 2012). Por ejemplo, para el caso de las muestras 207EA y WS-480 el valor de los exponentes arrojó el valor  $1,6$  aproximadamente (considerando un ajuste razonable para el rango de presiones relativas inferiores a  $0,01$ . En este caso, los exponentes para ambas muestras arrojan un valor de  $1,6$  y esto ajusta las isotermas, en ese rango de presiones, con desviaciones inferiores al  $7\%$  aproximadamente). Esto indica que las muestras analizadas poseen una distribución muy heterogénea de microporos, con una amplia dispersión de tamaños.

3- En función de los resultados obtenidos se observa que el calor isostérico de adsorción posee rangos donde disminuye con la concentración de adsorbente, lo cual indica una fuerte interacción adsorbente-adsorbato. En todas las muestras esto se da para concentraciones muy bajas lo cual indica que la interacción entre adsorbato y adsorbente es mayor a la interacción entre moléculas del adsorbato. A medida que el adsorbente incrementa la concentración de adsorbato las moléculas de adsorbato ingresantes interactúan prácticamente con las del adsorbato retenido en la estructura del adsorbente, en este caso la entalpía debe ser prácticamente igual a la de vaporización del fluido (metanol en nuestro caso). El descenso de la energía se da con mayor ritmo en el WS480 que en el 207EA, lo que indicaría que la interacción entre el WS480 y el metanol es más intensa que para el 207EA en determinado rango. Recordemos que no nos referimos a una interacción carbono-metanol, sino de la interacción entre el metanol y la estructura de microporos del carbón, donde la interacción depende también fuertemente de la geometría de los poros. La interacción de una molécula de metanol en el interior de un poro de diámetro similar, puede ser prácticamente del orden de  $4$  veces más intensa que la que se presentaría entre la misma molécula de metanol y una superficie plana uniforme del mismo material

que compone a la pared interna del poro. Como se comentó antes, todos estos materiales poseen una amplia y heterogénea distribución de tamaño de poros. Todo parece indicar que en el caso del WS480 existen más cantidad de microporos de interacción más intensa que para el 207EA. En los restantes carbones analizados las interacciones se notan menos intensas (algo que también se refleja en la forma de sus isothermas de adsorción). En ellos se nota además la presencia de más un máximo, es decir el descenso en energía no es uniforme, lo que indica que compiten las interacciones adsorbente-adsorbato con las adsorbato-adsorbato, donde estas últimas prevalecen sobre las primeras cuando aumenta la concentración como es el caso de estas muestras en ciertos rangos intermedios de concentraciones. Esto podría responder por ejemplo a un llenado de microporos, seguramente no tan intensos como los de las muestras WS480 y 207EA, que se llenarían a bajas concentraciones hasta alcanzar el mínimo local, momento en que la concentración alcanza un valor tal, que el gradiente de concentración favorece, por un mecanismo de difusión, el llenado de ciertos poros (micros o ultramicroporos) que de alguna manera están interconectados con los anteriores poros. Estos mecanismos podrían incluso depender de la temperatura (nosotros estamos suponiendo aquí que la entropía de adsorción no depende de la temperatura, en un rango ciertamente limitado). Creemos conveniente realizar un futuro estudio complementario que arroje más detalles sobre la estructura microporosa de estos carbones.

## REFERENCIAS

- Baker, F.S. (1992). Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. 4ª ed. Vol. 4, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York.
- Bansal, R.C., Donnet, J.B. and Stoeckli, H.F. (1998). Active Carbon. Marcel Dekker, New York.
- Bansal, R.P. and Goyal, M. (2000) Activated Carbon Adsorption. Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA.
- Bering, BP, Dubinin M.M. and Serpinsky V.V. (1972). On the thermodynamics of adsorption in micropores. *J. Colloid Interface Sci.* 38:185-194.
- Clarkson, C. R.; Bustin, R.M. and Levy, J. H. (1997). Application of the Mono/Multilayer and Adsorption Potential Theories to Coal Methane Adsorption Isotherms at Elevated Temperature and Pressure. En: *Carbon*, vol. 35, no. 12, p. 1689-1705.
- Dash, J.G. (1975). Films on solid surfaces: The physics and chemistry of physical adsorption. Academic Press, New York, San Francisco – London. 378-393.
- Dubinin, M.M. (1955). *Quart. Rev. Chem. Soc.* 9, 101-112.
- Dubinin, M.M. *Zh. Fiz. Khim.* (1960). 34, 959-968. *Chem. Rev.* 60, 235-241.
- Huber, U.; Stoeckli, F. and Houriet, J. P. J. (1978). *Colloid Interf. Sci.* 67, 195-203.
- Marsh, H., Heintz, E.A. y Rodríguez Reinoso, F. (1997). Introduction to Carbon Technologies. Universidad de Alicante, España. pp.35-101.
- Montes-Morán, M.A.; Suarez, D. and Menéndez, J. A.; Fuente, E. (2004). On the nature of basic sites on carbon surface: An overview. *Carbon*, 42, 1219-1225.
- Moreno-Castilla, C. (2004). Adsorption of organic molecules from aqueous solutions on carbon materials. *Carbon*, 42, 83-94.
- Plavnick, G. M. *Russian Journal of Physical Chemistry.* (1984). 58, 643-647.
- Polanyi M. (1932) Section III – Theories of adsorption of gases. A general survey and some additional remarks. *Trans. Far. Soc.* 28:316-333.
- Radovic, L. R.; Moreno-Castilla, C. and Rivera-Utrilla, J. (2001). Carbon Materials as adsorbents in aqueous solutions, *Chemistry and Physics of Carbon*. Ed. L.R. Radovic Marcel Dekker Inc., Nueva York, 27, 227-405.
- Rouquerol, F. Rouquerol, J.; Sing, K.S.; Lowell, P. and Maurin, G. (2014). Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications. 2nd Ed. Marseilles: Academic Press, p.1-626.
- Rychlicki, G.; Terzyk, A.P. and Lukaszewicz, J. P. (1995). Determination of carbon porosity from low-temperature nitrogen adsorption data. A comparison of the most frequently used methods. *Colloids Surf. A* 96, 105.
- Sartarelli, A., Cyrulies, E., Echarri, R., Vera, S. y Samson, I. (2012). Método para la determinación de parámetros de adsorción del par metanol-carbón activado utilizado en sistemas de refrigeración solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 16.

- Vera, S.; Echarri, R.; Sartarelli, A.; Cyrulies, E. y Samson, I. (2008). Construcción de una heladera solar por adsorción. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 12.
- Vera, S.; Sartarelli, A.; Echarri, R.; Cyrulies, E. y Samson, I. (2011). Prototipos de refrigeradores solares por adsorción. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 15.
- Von Kienle, H. (1986). "Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry". 5th ed., Vol. A5, VCH Publishers, Nueva York.

## **ISOSTERIC ENTHALPY OF ADSORPTION OF METHANOL ON ACTIVATED CARBONS WITH HIGH DEGREE OF MICROPOROSITY**

**ABSTRACT:** Within the framework of the development of solar refrigerators, the present work aims to characterize the absorption capacity of methanol in activated carbon, for this the isosteric enthalpy is calculated. The calculation is made from the measurement of a set of isotherms, considering the chemical potential and without resorting to any model that describes adsorption in volume such as that of Dubinin-Astakhov (DA). The main results of the analysis of several samples are summarized. The enthalpy reveals other characteristics that are not clearly present when the DA model is used to obtain adsorption parameters through the isotherms, for example, that in the analyzed samples there are ranges of adsorbate concentration in the adsorbent where the interaction is intensified for some of them, more than in other carbons that have greater overall adsorption capacity.

**Keywords:** Solar refrigerator, Adsorption, Enthalpy of adsorption

## **UTILIZACIÓN DE BOTELLAS DE PET Y CAPTADORES FLOTANTES PARA EL CALENTAMIENTO DE ESTANQUES**

**Mareva Y. Gutierrez S<sup>1</sup>., Gustavo R. Figueredo<sup>1</sup>, Ruben A. Spotorno<sup>1</sup>, Juan J. Pochettino<sup>1</sup>, Hugo D. Zurlo<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Grupo de Investigación de Tecnologías Energéticas Apropriadas (GITEA)  
Universidad Tecnológica Nacional  
Facultad Regional Resistencia – French 414 C.P. 3500 –Resistencia, Chaco  
Tel. 0362-4426014 – Fax 0362-4432928 e-mail: grfigueredo@gmail.com

*Recibido 12/08/19, aceptado 15/10/19*

**RESUMEN:** Los peces son afectados por las temperaturas bajas del agua durante los meses invernales, lo que ocasiona disminución de la tasa de reproducción y de la producción en la acuicultura. Se efectuaron ensayos en dos modelos de estanques, en el primero se colocaron materiales flotantes y el segundo funcionó como testigo. Buscando morigerar los descensos de temperatura del agua, se ensayaron botellas de PET y captadores solares flotantes con doble cubierta de acetato. Las experiencias fueron efectuadas bajo las condiciones climáticas del NEA, durante el invierno y la primavera. El captador solar flotante tuvo una respuesta aceptable respecto al incremento de temperatura buscado. Pueden obtenerse efectos mejores maximizando el área de la superficie transparente captadora de la radiación y disminuyendo el área de los bordes del captador. Se presentan las diferencias de temperatura entre las dos piletas de ensayo para los distintos modelos de captadores, además de otros parámetros climáticos.

**Palabras clave:** Acuicultura, captadores solares flotantes, estanques piscicultura.

### **INTRODUCCIÓN**

La piscicultura experimenta actualmente un creciente desarrollo en el NEA, pero adolece aún de algunos problemas que dificultan un mayor crecimiento. Dentro de los problemas a resolver y que atentan contra el desarrollo de la actividad, se encuentra el estancamiento del crecimiento de los peces durante el invierno debido a las bajas temperaturas. Cuando la temperatura del agua desciende por debajo de los 20 °C, los peces dejan de alimentarse, acotando el período de cultivo a 200-250 días dependiendo de las condiciones locales. A ello debe sumarse que en situaciones de fríos extremos y prolongados, la temperatura del agua del estanque puede descender a menos de 10 °C, favoreciendo la aparición de enfermedades e inclusive ocasionando la muerte de los peces.

Existen varios parámetros críticos en la acuicultura, ellos son la temperatura, el pH, el oxígeno disuelto y el amoníaco. Estos se tienen que medir diariamente o a lo largo de todo el día en el caso de sistemas intensivos de producción continua. Estos parámetros influyen las propiedades físicas y composición química del agua y consecuentemente un correcto manejo de los mismos puede mejorar el comportamiento de los peces (salud y crecimiento). Por el contrario, si no son correctamente atendidos, las consecuencias pueden ser serias, yendo desde bajas tasas de crecimiento hasta stress y mortalidad.

El uso térmico de la energía solar para sistemas de calentamiento de agua es una de las tecnologías más difundidas a nivel mundial. Los invernaderos son los sistemas más aplicados ya que proveen incrementos significativos en la temperatura del agua, las mantas solares también presentan resultados similares. Sin embargo, hay poca información disponible sobre captadores solares probablemente debido a su elevado costo inicial. Los invernaderos constituyen la opción más difundida para

contrarrestar el enfriamiento excesivo de los estanques durante el invierno, sin embargo, exhiben algunos inconvenientes como ser su alto costo inicial y complicada operación para evitar sobrecalentamientos durante el verano. Las otras alternativas para calentar el agua, como las bombas de calor, calderas a combustibles fósiles o resistencias eléctricas implican altos costos iniciales y operacionales y además tienen un impacto negativo para el ambiente a causa de la emisión de gases con efecto invernadero. Una medida adicional, en el caso de presentarse temperaturas bajas, es cubrir los estanques con mantas térmicas como las utilizadas en las piscinas, el problema que presenta esta alternativa es que reduce el intercambio de oxígeno con el aire, dificulta la manipulación de los peces y en general habría que ponerlo y quitarlo diariamente porque de lo contrario impediría el calentamiento diurno del estanque con la radiación solar. Otra opción es considerar calentar el agua por medio de captadores solares para temperaturas cercanas al ambiente, sin cubierta de vidrio, que pueden contribuir al incremento de la temperatura del agua hasta cerca de 5 °C por sobre el ambiente. Otros inconvenientes asociados a esta tecnología son la necesidad de usar bombas para hacer circular el agua por los captadores con el consiguiente consumo de electricidad, el ensuciamiento que se podría producir debido a la elevada cantidad de sólidos disueltos que puede contener el agua del estanque y también elevados costos iniciales debido a las grandes superficies necesarias. Aparece como una alternativa a evaluar calentar “in situ” directamente el agua del estanque mediante los captadores solares flotantes y usar la gran masa del agua del estanque para almacenar energía y evitar descensos pronunciados de temperatura durante los días muy fríos, reduciendo simultáneamente la evaporación y las pérdidas por radiación nocturna hacia el cielo (Farias et al., 2015).

Hasta el presente, numerosos autores han informado sobre el modelado térmico de un estanque de invernadero de piscicultura para predecir la temperatura del estanque durante todo el año. Klemestson y Rogers (1985) probaron un estanque de refugio de invernadero o plástico que podría lograr un aumento de 2,8-4,4 °C en la temperatura del agua de cada mes del año en comparación con un estanque al aire libre.

Zhu et al., (1998) mediante modelizaciones analizaron las principales pérdidas de calor del agua para un sistema de invernadero y concluyeron que la mejor manera de reducirlas es controlando la convección entre la cubierta transparente y el aire exterior, la radiación térmica entre la cubierta transparente y el cielo y la radiación térmica entre la cubierta y la superficie del agua. Además reportaron que un sistema de estanques de invernadero puede lograr una mejora de 5,2 °C en la temperatura del agua de un estanque de 1 m de profundidad, en comparación con la temperatura del aire exterior.

Dilip (2007) presentó un modelo analítico transitorio de la eficiencia de un invernadero para calentamiento de un estanque para piscicultura. Los estudios paramétricos involucraron los efectos de longitud, ancho, profundidad e inclinación del revestimiento del estanque de peces. El rendimiento del estanque de peces se evaluó en términos de ganancia de temperatura, eficiencia térmica media y nivelación de la carga térmica. La principal restricción económica en las actividades invernales de un estanque de cultivo de peces es la necesidad de realizar operaciones en un estanque cubierto para mantener las temperaturas adecuadas del agua.

En 2015, se arrojaron 96 millones de “shade balls” de plástico que flotan en el depósito de agua de Los Ángeles. Era un plan para ahorrar agua durante la sequía evitando la evaporación. Las bolas se desplegaron en el depósito desde agosto de 2015 hasta marzo de 2017. Durante ese tiempo, evitaron que se evaporaran alrededor de 1,7 millones de metros cúbicos de agua (De Graaf, 2015). Siendo que la evaporación es el principal flujo de pérdida de calor, surgió la idea de usar botellas descartables transparentes para evitar la evaporación y permitir la entrada de radiación solar.

Se analizaron alternativas de bajo costo para el calentamiento de agua de estanques para piscicultura y se presentan las evoluciones en función del tiempo para diferentes condiciones climáticas de: i) las temperaturas, ii) los flujos de calor intercambiados; para dos estanques: a) un estanque abierto a la atmósfera, utilizado como testigo, sin utilizar ningún dispositivo adicional y b) otro estanque en el que sucesivamente se ubicaron botellas de PET recicladas o captadores flotantes para incrementar la



temperatura. Se establece cuales son las características que más influyen y cuál es el dispositivo que mejor resultado ofrece.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para ensayar los diferentes modelos de captadores solares se construyeron dos piletas, que simulan a un estanque a escala, de 0,65 m de profundidad, 0,60 m de ancho x 1,10 m de largo. Se utilizaron placas de 3 cm de espesor de poliestireno expandido como aislante en el fondo y las paredes. La impermeabilización se logró con un film de polietileno de color negro y la estructura se basó en un marco de perfiles de hierro, cerrado por chapas galvanizadas. La superficial de la interfase agua-aire es de 0,57 m<sup>2</sup> por pileta (Figura 1).

Para la determinación de la temperatura del agua en las piletas se realizaron mediciones cada 15 minutos mediante sensores de temperatura tipo Pt100 envainados en acero inoxidable, conectados mediante 3 conductores con un sistema de adquisición de datos de 6,5 dígitos de la marca Rigol. En cuanto a la medición de la temperatura ambiente, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar y otras variables meteorológicas se realizaron mediciones cada 10 minutos mediante una estación meteorológica modelo Vantage PRO2 de la marca Davis que incluye: pluviómetro, anemómetro y sensores de temperatura, humedad y radiación solar. Para mejor precisión, los sensores de humedad y temperatura estuvieron ubicados en su correspondiente abrigo meteorológico.



*Figura 1: Piletas de Ensayo: Pileta 1 (izquierda) y Pileta 2 (derecha).*

A lo largo de un proceso iterativo de ensayo, detección de inconvenientes y optimización, se diseñaron varios modelos de captadores flotantes con diferentes formas, dimensiones y materiales, de los cuales se presenta un modelo. El captador está formado por un marco rectangular de poliestireno expandido de 46 cm de largo, 4 cm de ancho en los bordes y 5 cm de alto, sobre ambas caras del marco se pegaron láminas transparentes de acetato, una ubicada en la parte superior de la base y otra ubicada en la parte inferior. La parte transparente tiene medidas de 27 cm de ancho y 38 cm de largo (Figura 2).



*Figura 2: Vistas del colector de acetato con doble lámina: posee una lámina de acetato en la parte superior y otra en la parte inferior.*

También se efectuaron ensayos utilizando 5 botellas vacías y limpias de 1,5 L de PET, con superficie totalmente transparente. Las mismas se cerraron herméticamente y se ubicaron flotando sobre la superficie del agua. Este ensayo surgió a partir de la inquietud de un piscicultor que propuso esta idea y de la experiencia en EEUU con las “shade balls”.

Posteriormente y debido a los resultados insatisfactorios obtenidos con las botellas vacías, se efectuaron ensayos utilizando 5 botellas de PET de 1,5 L cargadas con arena y ferrite negro hasta aproximadamente la mitad de su capacidad (Figura 3). Esto se hizo con el objetivo de probar si se mejoraba la absorción de la radiación solar y disminuía la evaporación al aumentar la superficie de contacto entre la botella y el agua, debido a que por su mayor peso se sumergen más en el agua.



Figura 3: Vistas del ensayo con botellas recargadas con absorbente: arena y ferrite.

## BALANCE ENERGÉTICO

En un trabajo previo se desarrolló un modelo termodinámico simple que describe los cambios en la energía interna de las piletas al aire libre que simulan los estanques de acuicultura, (Gutierrez et al., 2018). Suponiendo despreciables los flujos de energía relacionados con las filtraciones de agua hacia las napas subterráneas, los originados en las lluvias, en los desbordamientos de agua, los relacionados al agua de reposición y a los intercambios con las paredes de las piletas, la conservación de la energía en estado transitorio estará dada por:

$$\left(\frac{dU}{dt}\right) = q_{rad} - q_{evap} \pm q_{fondo} \pm q_{conv} \quad (1)$$

La energía interna dentro del volumen de control está dado por:

$$U = m_w C T \quad (2)$$

En el modelo la masa de agua se considera constante; también se asume que la densidad y el calor específico se mantienen constantes con la temperatura, ya que las variaciones de estas con cambios en la temperatura son despreciables. El calor neto intercambiado incluye el calor intercambiado por radiación, por conducción a través del fondo, por convección en la superficie y el necesario aporte para la evaporación del agua.

$$Q_{neto} = q_{rad} - q_{evap} \pm q_{fondo} \pm q_{conv} \quad (3)$$

Durante las experiencias se mide el tiempo y la temperatura del agua de las piletas, por lo cual se puede calcular la derivada de la temperatura con respecto al tiempo.

$$\left(\frac{dT}{dt}\right) = \frac{Q_{neto}}{m_w C} \quad (1)$$

Conocidos la masa del agua contenida en la piletas y la derivada de la temperatura con respecto al tiempo se puede calcular el calor neto intercambiado.

$$Q_{neto} = m_w C \left( \frac{dT}{dt} \right) \quad (5)$$

Simultáneamente se mide la radiación solar incidente sobre la superficie libre del agua de la piletta. Entonces se podría obtener el flujo de calor combinando conducción, convección y evaporación.

$$Q_{neto} - q_{rad} = \pm q_{fondo} \pm q_{conv} - q_{evap} \quad (6)$$

## RESULTADOS

### Ensayo en piletas sin colectores

Durante este ensayo se ubicaron los sensores de temperatura a la misma profundidad inmersos en las piletas que contenían iguales volúmenes de agua, sin utilizar ningún tipo de colector, a los efectos de verificar a cuanto pueden ascender las divergencias entre las temperaturas medidas en cada piletta. En la figura 4 se exhiben las evoluciones de las temperaturas de las piletas ( $T_{s/col}$ ,  $T_{c/col}$ ), la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), la velocidad del viento ( $Vel.V$ ) y la humedad relativa ambiente ( $Hum. Rel$ ) a lo largo de 16 días. Los resultados evidenciaron que puede existir una diferencia entre ambas de hasta 0,2 °C, esto se debe a los errores asociados al proceso de medición en sí mismo, lo cual se tiene en cuenta para las siguientes determinaciones donde ya se colocaron los colectores flotantes para evaluar su funcionamiento. Se observa un primer periodo de 4 días de temperaturas ambientes moderadas con temperaturas medias de aproximadamente 21 °C, a continuación un descenso de la temperatura ambiente y por último un periodo de 10 días de temperaturas bajas con medias de alrededor de 12 °C. Durante todos los periodos las temperaturas de las piletas se mantienen intermedias entre la máxima y mínima del ambiente, excepto durante el periodo intermedio de descenso en el que las piletas exhiben una inercia térmica manteniéndose a una temperatura superior a la del ambiente.

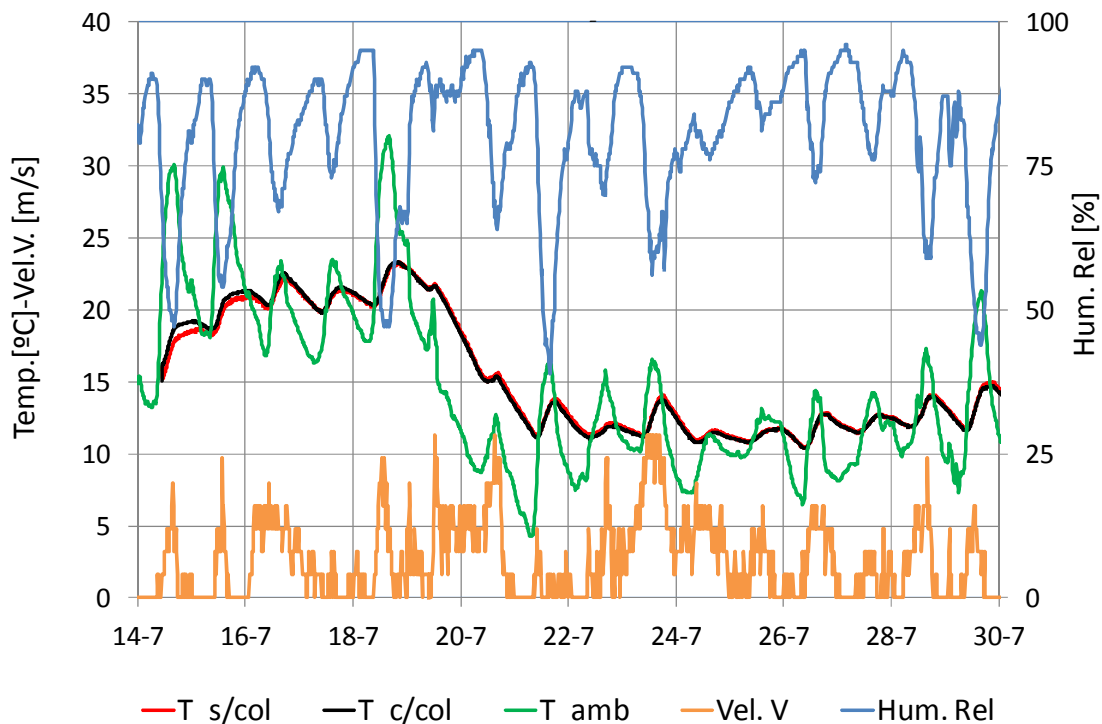


Figura 4: Temperatura del agua de las piletas, temperatura ambiente, velocidad del viento y humedad relativa para 16 días.

### Experiencias con botellas vacías

En la figura 5 se observan los resultados de un ensayo realizado desde el 23/10 a las 12:30 pm hasta el día 30/10 a las 12:00 pm. Para los días ensayados la temperatura ambiente máxima fue de 36 °C y la

mínima de 15 °C. En la pileta 1 se colocaron 5 botellas vacías de PET tipo cristal (transparente), las mismas previamente fueron lavadas, secadas y cerradas herméticamente. Se observa que en horarios de la madrugada, durante el enfriamiento, el agua de la pileta sin las botellas se enfría más rápidamente que la de la pileta con las botellas, observándose una diferencia de temperaturas máxima de hasta 0,7 °C entre las 6 y las 8 de la mañana. Es decir, las botellas limpias y secas dificultan el enfriamiento de la misma durante ese lapso de tiempo. Sin embargo, al acercarse el mediodía, el agua de la pileta que posee las botellas empieza a tener menor temperatura que la pileta sin botellas, alcanzando como valor máximo una diferencia de temperaturas superior en 0,8 °C a las 15:00hs, fenómeno que dura hasta las 19hs aproximadamente, es decir se calienta más rápidamente la pileta sin botellas. Cerca de la puesta del sol se alcanzan las temperaturas máximas y no se observa una diferencia significativa entre las temperaturas del agua de la pileta donde están las botellas y del agua de la pileta sin las botellas.

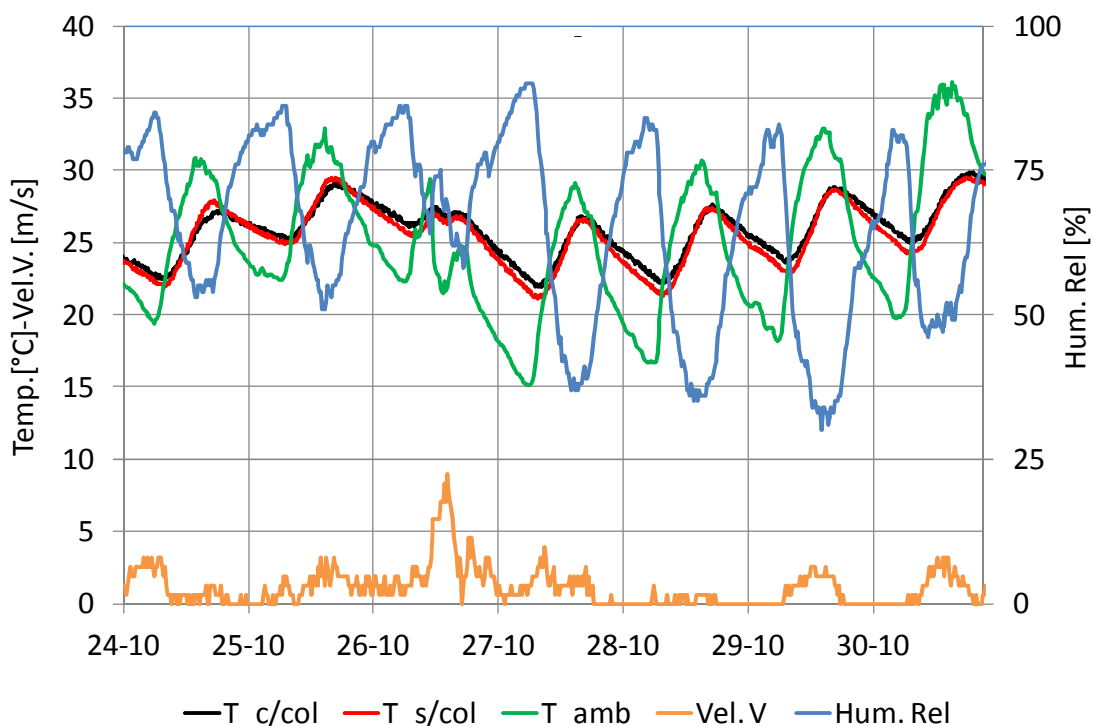


Figura 5: Temperatura del agua de las piletas, ambiente, velocidad del viento y humedad relativa para 6 días soleados.

#### Experiencias con botellas cargadas con absorbente

En la figura 6 se observan los resultados de un ensayo realizado desde el 03/08 a las 10:00 am hasta el 09/08 a las 12:00 am. Los días fueron cálidos con una temperatura máxima de 27 °C y una mínima de 7 °C. Las botellas al contener arena y ferrite funcionan como un “abrigo” por la noche y en las horas de la siesta/tarde dificultan el calentamiento del agua. Esto puede concluirse luego de que se observa que para los días de ensayo, el agua de la pileta que tiene las botellas está más fría por la siesta/tarde que el agua de la pileta con las botellas, al cual tiene mayor temperatura (promedio de los días 0,4 °C de diferencia). Por la noche y durante las horas tempranas de la mañana el comportamiento se revierte: el agua de la pileta con las botellas llega a tener una temperatura superior a 0,4 °C (valor promedio) que el agua de la pileta sin botellas. Estas diferencias de temperatura son muy inferiores a los valores buscados.

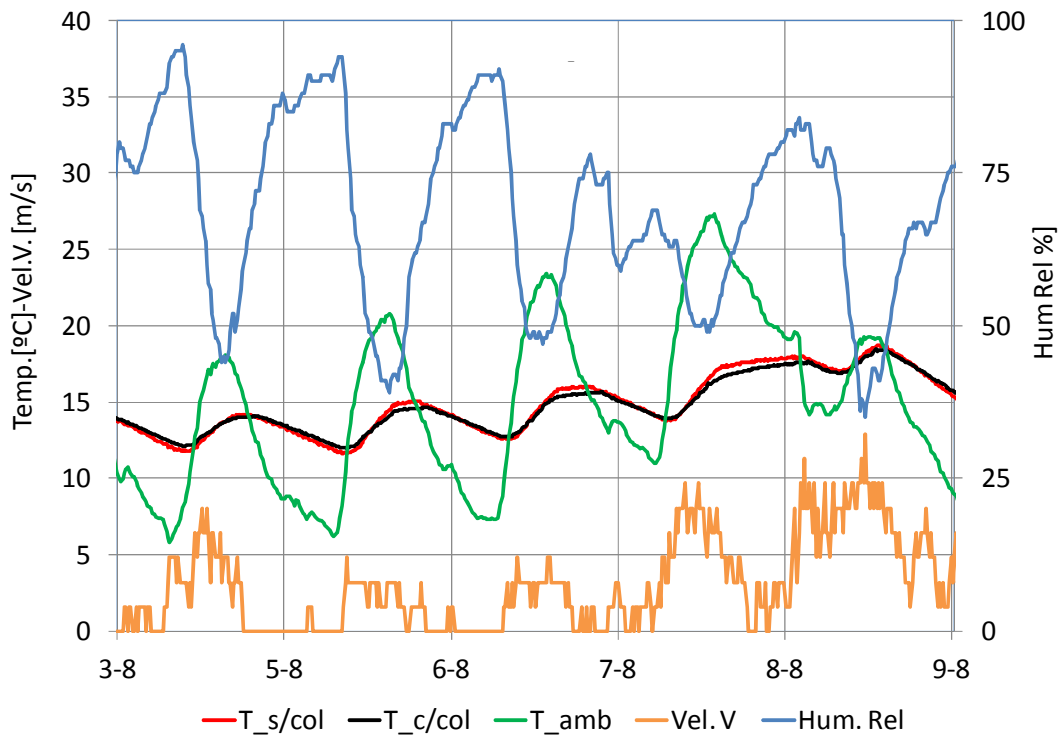


Figura 6: Temperatura del agua de las piletas, ambiente, velocidad del viento y humedad relativa para 6 días.

Experiencias con dos colectores con doble lámina de acetato en piletta 2

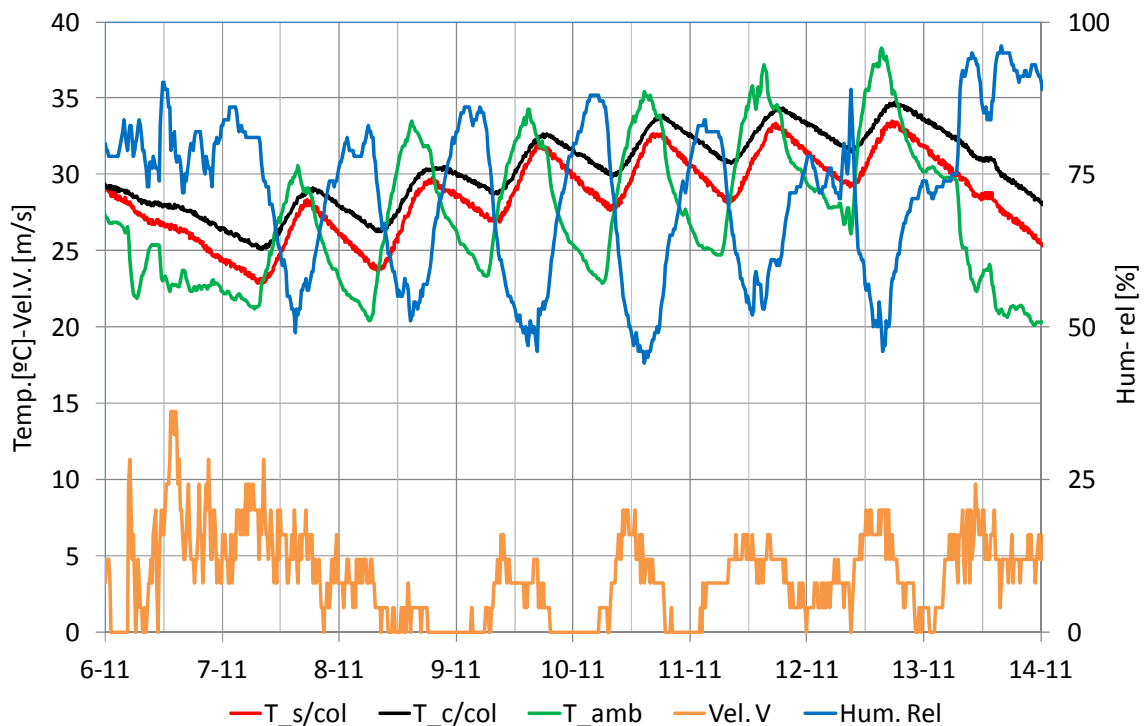


Figura 7: Temperatura del agua de las piletas, ambiente, velocidad del viento y humedad relativa para 8 días.

El ensayo fue realizado desde el 6/11 a las 8:30 am hasta el día 14/11 a las 9:00 am, con temperatura ambiente máxima de 38 °C y mínima de 20 °C, el día 13/11 se produjo una intensa lluvia entre las

7:00 am y las 11:00 am. En la piletta 2 se colocaron dos captadores flotantes. La superficie ocupada por los dos captadores en la piletta de ensayo es de 0,33 m<sup>2</sup>, lo cual representa un 57,2 % de la superficie total, (donde de ese % un 35,5 % corresponde a la parte transparente y el 21,8 % restante corresponde a la superficie de los bordes), y el % restante un 42,8 % es la superficie no cubierta en la piletta.

En la figura 7 se observa que la máxima diferencia de temperatura, en horarios de la mañana cuando la temperatura del agua de la piletta donde se colocó el colector se encuentra más caliente (2,4 °C en promedio) que el agua de la piletta sin el captador. Por la siesta-tarde el agua de la piletta con el captador también está más caliente sin embargo la diferencia es de 1 °C (valor promedio para los días del ensayo).

Para este último ensayo se expone un análisis más profundo: a partir de los datos experimentales de temperatura, se determinaron las pendientes promedio durante los periodos estables de calentamiento (entre las 12 y 16 hs) y los de enfriamiento (entre las 19 y 6 hs), dichos resultados se exponen en la tabla 1. A partir de estas pendientes se determinaron, mediante la ecuación (5), los flujos netos de calor intercambiados entre el agua de las piletas y el ambiente, considerando que la masa de agua contenida en las piletas es de 320 kg,

Piletta	Proceso	Pendientes de la evolución de las temperaturas [K/día]					Prom.	Flujo Neto de calor [W]
		08/11	09/11	10/11	11/11	12/11		
c/col	Cal.	12,7	11,7	11,7	10,3	10,9	11	172
	Enf.	-2,5	-4,6	-5,3	-4,8	-4,4	-4	-65
s/col	Cal.	19,5	15,9	16,1	16,4	16,3	17	269
	Enf.	-5,4	-7,7	-8,2	-6,9	-6,6	-7	-111

Tabla 1: Pendientes de las evoluciones de temperaturas y flujos netos de calor hacia piletas para horarios de calentamiento (12:00 a 16:00hs) y enfriamiento (19:00 hs a 6:00 am)

El flujo neto de calor determinado corresponde al indicado en la ecuación (2) y tiene en cuenta la sumatoria de los flujos que entran y salen del sistema bajo análisis. Según el cuadro se obtuvieron resultados experimentales que indican las magnitudes para dos condiciones: “cal” desde las 12:00 hasta las 16:00 hs y “enf” desde las 19:00 hs a 6:00 am. Comparando los resultados obtenidos para los dos casos, se observa que en el caso de la piletta sin captador tanto la ganancia como la pérdida de calor al exterior ocurren más rápidamente que la piletta con el captador. El Flujo Neto de calor durante las horas de enfriamiento para la piletta sin el captador es de -111 W, mientras que para la piletta con el captador es de -65 W. El Flujo Neto de calor durante las horas de calentamiento para la piletta sin el captador es de 269 W, mientras que para la piletta con el captador es de 172 W.

La radiación solar en W/m<sup>2</sup> se obtuvo mediante la estación meteorológica, sabiendo que el área de las piletas es 0,57 m<sup>2</sup> se obtiene la potencia total que ingresa a cada piletta en Watts durante el periodo de calentamiento, expuestos en la tabla 2.

Valor	08/11	09/11	10/11	11/11	12/11	Promedio
Radiación [W/m <sup>2</sup> ]	848	857	880	754	775	823
Potencia [W]	483	488	501	430	442	469

Tabla 2: Radiación promedio incidente en las piletas para horarios de calentamiento (12:00 a 16:00hs)

La potencia promedio incidente sobre las piletas para los días ensayados es de 469 W durante las horas de calentamiento. Conociendo el flujo neto de calor y el calor debido a la radiación solar se pueden

determinar los flujos de calor restantes, agrupados según la ecuación (6). La diferencia entre el Flujo Neto de calor y la radiación solar durante las horas de calentamiento para la pileta sin captador de -200 W, mientras que para la pileta con el captador es de -297 W, ambos flujos integran los fenómenos de convección, evaporación y conducción.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la tabla 3 se exponen valores medios de temperaturas relevantes. Durante las horas de calentamiento (12:00 a 16:00hs), el promedio de la temperatura de agua de la pileta S/col fue de 30,4 °C (para 5 días de ensayo), de 31,7 °C para la pileta C/col y la temperatura del aire de 34,5 °C. Durante las horas de enfriamiento (19:00 hs a 6:00 am), el promedio de la temperatura de agua de la pileta S/col fue de 30,4°C (para 5 días de ensayo), para 32,1 °C para la pileta C/col y la temperatura del aire de 27,8 °C.

Variable	08/2018	09/2018	10/2018	11/2018	12/2018	Prom.
T_s/col	27,3	30,2	31,2	31,5	31,8	30,4
T_c/col	28,7	31,1	32,3	33,0	33,3	31,7
T_amb	32,3	33,2	34,4	35,7	36,9	34,5
T_c/col - T_s/col	1,4	0,9	1,1	1,5	1,6	1,3
T_amb - T_c/col	3,5	2,1	2,1	2,7	3,5	2,8

*Tabla 3: Temperaturas promedio del agua de las piletas, del ambiente y sus diferencias, durante el proceso diario de calentamiento (12:00 a 16:00hs)*

El aumento de la temperatura del agua entre la pileta con el captador solar y sin el mismo fue de 1,3 °C en promedio (para los 5 días ensayados) durante las horas de calentamiento y de 1,8 °C para las horas de enfriamiento. Se observa que para las horas de calentamiento la temperatura del aire fue de 2,8 °C (promedio) superior que el agua de la pileta con captador, mientras que para las horas de enfriamiento la temperatura del agua fue 4,3 °C superior que la temperatura del aire, lo cual es favorable ya que para éste período es necesario mantener la temperatura del agua para que se alcancen temperaturas que rondan los 20-24 °C en los meses de invierno.

Variable	08/2018	09/2018	10/2018	11/2018	12/2018	Prom.
T_s/col	28,5	29,8	30,5	31,3	31,6	30,4
T_c/col	29,9	31,5	32,4	33,2	33,5	32,1
T_amb	26,2	25,5	26,8	29,6	30,8	27,8
T_c/col - T_s/col	1,4	1,7	2,0	1,9	1,9	1,8
T_amb - T_c/col	-3,7	-6,0	-5,7	-3,6	-2,7	-4,3

*Tabla 4: Temperaturas promedio del agua de las piletas, del ambiente y sus diferencias, durante el proceso diario de enfriamiento (19:00 a 6:00hs)*

Debido a que en la región hay días calurosos dentro de los meses de invierno donde se alcanzan temperaturas mayores que 30°C en algunos casos, esto ocasionaría una dificultad en el uso de mantas térmicas, ya que según lo estudiado por (Wisely et al., 1981), el rango térmico de trabajo para las mayoría de los materiales con los que se hacen las mantas, tiene como límite esa temperatura y superándola se produce una separación de las capas ocasionando la pérdida de la misma en periodos cortos de tiempo menores a un mes.

## CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Las botellas de PET tanto vacías como cargadas con la mezcla de arena y ferrite no dieron resultados satisfactorios; ya que se observó que en promedio el agua de la pileta con las botellas alcanzaba una



temperatura superior en 0,2 °C con respecto al agua de la pileta testigo. Estos resultados están alejados de los valores deseados.

Se obtuvieron resultados aceptables al colocar dos captadores de acetato de doble lámina, los cuales produjeron aumentos de temperatura de 2,2 °C en relación a la pileta testigo, en promedio por la madrugada y la mañana, y alrededor de 1 °C en promedio de los días ensayados en horarios de la siesta/tarde. Este diseño puede optimizarse al aumentar el área de la superficie transparente y disminuyendo el área de los bordes que impide el paso de la radiación.

El captador ensayado al tener la cubierta superior en posición horizontal acumula agua de lluvia o de rocío favoreciendo el ensuciamiento y dificultando el paso de la radiación solar. Posteriormente se desarrollaron nuevos colectores que solucionan este inconveniente y que actualmente están siendo ensayados obteniéndose en principio mejores resultados a los presentados.

## APÉNDICE: NOMENCLATURA

Magnitud	Unidad	Descripción
A	m <sup>2</sup>	Área del estanque
C	kJ/kg°C	Calor específico del agua
U	J	Energía interna del estanque
m <sub>w</sub>	Kg	Masa del agua
q <sub>conv</sub>	W	Flujo de calor por convección.
q <sub>evap</sub>	W	Flujo de energía perdida a través de la evaporación del agua.
q <sub>rad</sub>	W	Flujo de calor por radiación
q <sub>fondo</sub>	W	Flujo de calor por conducción por el fondo.
Q <sub>neto</sub>	W	Flujo Neto de calor
T	°C	Temperatura promedio del agua en el estanque.
t	seg	Tiempo

## REFERENCIAS

- De Graaf, M. How the 100 million ‘shade balls’ brought in to protect LA’s reservoir from evaporating are in fact a ‘bacterial nightmare’. Daily Mail (20 August 2015). <https://www.dailymail.co.uk/news/article-3204873/How-100-million-shade-balls-brought-protect-LA-s-reservoir-evaporating-fact-bacterial-nightmare.html>
- Dilip J., (2007). Modeling the thermal performance of an aquaculture pond heating with greenhouse. Building and environment 42, p. 557-565.
- Farías P., Figueredo G., Sánchez S. y Sandoval M., (2015). Revisión de alternativas tecnológicas para el calentamiento solar de estanques para acuicultura. Acta de la XXXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 3, pp. 02.21-02.32, 2015.
- Gutierrez Sosa, M. Y., Spotorno R., Pochettino J.J., Zurlo H. y Figueredo G. R. (2018). Modelización Termodinámica para estanques de Piscicultura. Pp. 4-6.
- Klemetson S.L., Rogers G.L., (1985). Aquaculture pond temperature modeling. Aquacult Eng; 4 p.191-208.
- Molina Martínez J.M., Martínez Álvarez V., Baille A. y González-real M.M. (2006). Estimación de la evaporación en embalses de riego mediante un modelo de balance de energía. En: Ingeniería del agua Vol. 13 pp. 3.

- Wisely B., Holliday J. E. and MacDonald R. (1981). Heating An Aquaculture pond with a solar pool blanket. Pp. 385-387.
- Zhu S., Deltour J, Wang S. (1998). Modeling the thermal characteristics of greenhouse pond systems. Aquaculture Eng18, pp. 201-17.

## **HEATING AN AQUACULTURE POND WITH PET BOTTLES AND FLOATING COLLECTORS**

### **ABSTRACT**

Fishes are affected by low temperatures of water during winter months; this makes a decrease in reproduction and the production of aquafarming. Tests were carried out in two ponds models, floating materials were placed in the first one and the second one worked as a reference sample. Looking to moderate the descent of temperature of water, PET bottles and floating solar collectors with double acetate cover were tested. The experiences were carried out under NEA climatic conditions during winter and spring. The floating solar collector had a favourable response regarding increase in temperature needed. Better results can be obtained by maximizing the area of the transparent surface which captures the radiation and decreasing the edges of the collector area. The temperature differences between the two ponds models for different collectors are presented, in addition to other climatic parameters.

**Keywords:** Aquaculture, Water temperature, Heat balance.

## UTILIZACIÓN DE BOTELLAS DE PET Y CAPTADORES FLOTANTES PARA EL CALENTAMIENTO DE ESTANQUES

Mareva Y. Gutierrez S<sup>1</sup>., Gustavo R. Figueredo<sup>1</sup>, Ruben A. Spotorno<sup>1</sup>, Juan J. Pochettino<sup>1</sup>, Hugo D. Zurlo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Investigación de Tecnologías Energéticas Apropriadas (GITEA)  
Universidad Tecnológica Nacional  
Facultad Regional Resistencia – French 414 C.P. 3500 –Resistencia, Chaco  
Tel. 0362-4426014 – Fax 0362-4432928 e-mail: grfigueredo@gmail.com

*Recibido 12/08/19, aceptado 15/10/19*

**RESUMEN:** Los peces son afectados por las temperaturas bajas del agua durante los meses invernales, lo que ocasiona disminución de la tasa de reproducción y de la producción en la acuicultura. Se efectuaron ensayos en dos modelos de estanques, en el primero se colocaron materiales flotantes y el segundo funcionó como testigo. Buscando morigerar los descensos de temperatura del agua, se ensayaron botellas de PET y captadores solares flotantes con doble cubierta de acetato. Las experiencias fueron efectuadas bajo las condiciones climáticas del NEA, durante el invierno y la primavera. El captador solar flotante tuvo una respuesta aceptable respecto al incremento de temperatura buscado. Pueden obtenerse efectos mejores maximizando el área de la superficie transparente captadora de la radiación y disminuyendo el área de los bordes del captador. Se presentan las diferencias de temperatura entre las dos piletas de ensayo para los distintos modelos de captadores, además de otros parámetros climáticos.

**Palabras clave:** Acuicultura, captadores solares flotantes, estanques piscicultura.

### INTRODUCCIÓN

La piscicultura experimenta actualmente un creciente desarrollo en el NEA, pero adolece aún de algunos problemas que dificultan un mayor crecimiento. Dentro de los problemas a resolver y que atentan contra el desarrollo de la actividad, se encuentra el estancamiento del crecimiento de los peces durante el invierno debido a las bajas temperaturas. Cuando la temperatura del agua desciende por debajo de los 20 °C, los peces dejan de alimentarse, acotando el período de cultivo a 200-250 días dependiendo de las condiciones locales. A ello debe sumarse que en situaciones de fríos extremos y prolongados, la temperatura del agua del estanque puede descender a menos de 10 °C, favoreciendo la aparición de enfermedades e inclusive ocasionando la muerte de los peces.

Existen varios parámetros críticos en la acuicultura, ellos son la temperatura, el pH, el oxígeno disuelto y el amoníaco. Estos se tienen que medir diariamente o a lo largo de todo el día en el caso de sistemas intensivos de producción continua. Estos parámetros influyen las propiedades físicas y composición química del agua y consecuentemente un correcto manejo de los mismos puede mejorar el comportamiento de los peces (salud y crecimiento). Por el contrario, si no son correctamente atendidos, las consecuencias pueden ser serias, yendo desde bajas tasas de crecimiento hasta stress y mortalidad.

El uso térmico de la energía solar para sistemas de calentamiento de agua es una de las tecnologías más difundidas a nivel mundial. Los invernaderos son los sistemas más aplicados ya que proveen incrementos significativos en la temperatura del agua, las mantas solares también presentan resultados similares. Sin embargo, hay poca información disponible sobre captadores solares probablemente debido a su elevado costo inicial. Los invernaderos constituyen la opción más difundida para

contrarrestar el enfriamiento excesivo de los estanques durante el invierno, sin embargo, exhiben algunos inconvenientes como ser su alto costo inicial y complicada operación para evitar sobrecalentamientos durante el verano. Las otras alternativas para calentar el agua, como las bombas de calor, calderas a combustibles fósiles o resistencias eléctricas implican altos costos iniciales y operacionales y además tienen un impacto negativo para el ambiente a causa de la emisión de gases con efecto invernadero. Una medida adicional, en el caso de presentarse temperaturas bajas, es cubrir los estanques con mantas térmicas como las utilizadas en las piscinas, el problema que presenta esta alternativa es que reduce el intercambio de oxígeno con el aire, dificulta la manipulación de los peces y en general habría que ponerlo y quitarlo diariamente porque de lo contrario impediría el calentamiento diurno del estanque con la radiación solar. Otra opción es considerar calentar el agua por medio de captadores solares para temperaturas cercanas al ambiente, sin cubierta de vidrio, que pueden contribuir al incremento de la temperatura del agua hasta cerca de 5 °C por sobre el ambiente. Otros inconvenientes asociados a esta tecnología son la necesidad de usar bombas para hacer circular el agua por los captadores con el consiguiente consumo de electricidad, el ensuciamiento que se podría producir debido a la elevada cantidad de sólidos disueltos que puede contener el agua del estanque y también elevados costos iniciales debido a las grandes superficies necesarias. Aparece como una alternativa a evaluar calentar “in situ” directamente el agua del estanque mediante los captadores solares flotantes y usar la gran masa del agua del estanque para almacenar energía y evitar descensos pronunciados de temperatura durante los días muy fríos, reduciendo simultáneamente la evaporación y las pérdidas por radiación nocturna hacia el cielo (Farias et al., 2015).

Hasta el presente, numerosos autores han informado sobre el modelado térmico de un estanque de invernadero de piscicultura para predecir la temperatura del estanque durante todo el año. Klemestson y Rogers (1985) probaron un estanque de refugio de invernadero o plástico que podría lograr un aumento de 2,8-4,4 °C en la temperatura del agua de cada mes del año en comparación con un estanque al aire libre.

Zhu et al., (1998) mediante modelizaciones analizaron las principales pérdidas de calor del agua para un sistema de invernadero y concluyeron que la mejor manera de reducirlas es controlando la convección entre la cubierta transparente y el aire exterior, la radiación térmica entre la cubierta transparente y el cielo y la radiación térmica entre la cubierta y la superficie del agua. Además reportaron que un sistema de estanques de invernadero puede lograr una mejora de 5,2 °C en la temperatura del agua de un estanque de 1 m de profundidad, en comparación con la temperatura del aire exterior.

Dilip (2007) presentó un modelo analítico transitorio de la eficiencia de un invernadero para calentamiento de un estanque para piscicultura. Los estudios paramétricos involucraron los efectos de longitud, ancho, profundidad e inclinación del revestimiento del estanque de peces. El rendimiento del estanque de peces se evaluó en términos de ganancia de temperatura, eficiencia térmica media y nivelación de la carga térmica. La principal restricción económica en las actividades invernales de un estanque de cultivo de peces es la necesidad de realizar operaciones en un estanque cubierto para mantener las temperaturas adecuadas del agua.

En 2015, se arrojaron 96 millones de “shade balls” de plástico que flotan en el depósito de agua de Los Ángeles. Era un plan para ahorrar agua durante la sequía evitando la evaporación. Las bolas se desplegaron en el depósito desde agosto de 2015 hasta marzo de 2017. Durante ese tiempo, evitaron que se evaporaran alrededor de 1,7 millones de metros cúbicos de agua (De Graaf, 2015). Siendo que la evaporación es el principal flujo de pérdida de calor, surgió la idea de usar botellas descartables transparentes para evitar la evaporación y permitir la entrada de radiación solar.

Se analizaron alternativas de bajo costo para el calentamiento de agua de estanques para piscicultura y se presentan las evoluciones en función del tiempo para diferentes condiciones climáticas de: i) las temperaturas, ii) los flujos de calor intercambiados; para dos estanques: a) un estanque abierto a la atmósfera, utilizado como testigo, sin utilizar ningún dispositivo adicional y b) otro estanque en el que sucesivamente se ubicaron botellas de PET recicladas o captadores flotantes para incrementar la

temperatura. Se establece cuales son las características que más influyen y cuál es el dispositivo que mejor resultado ofrece.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para ensayar los diferentes modelos de captadores solares se construyeron dos piletas, que simulan a un estanque a escala, de 0,65 m de profundidad, 0,60 m de ancho x 1,10 m de largo. Se utilizaron placas de 3 cm de espesor de poliestireno expandido como aislante en el fondo y las paredes. La impermeabilización se logró con un film de polietileno de color negro y la estructura se basó en un marco de perfiles de hierro, cerrado por chapas galvanizadas. La superficial de la interfase agua-aire es de 0,57 m<sup>2</sup> por pileta (Figura 1).

Para la determinación de la temperatura del agua en las piletas se realizaron mediciones cada 15 minutos mediante sensores de temperatura tipo Pt100 envainados en acero inoxidable, conectados mediante 3 conductores con un sistema de adquisición de datos de 6,5 dígitos de la marca Rigol. En cuanto a la medición de la temperatura ambiente, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar y otras variables meteorológicas se realizaron mediciones cada 10 minutos mediante una estación meteorológica modelo Vantage PRO2 de la marca Davis que incluye: pluviómetro, anemómetro y sensores de temperatura, humedad y radiación solar. Para mejor precisión, los sensores de humedad y temperatura estuvieron ubicados en su correspondiente abrigo meteorológico.



*Figura 1: Piletas de Ensayo: Pileta 1 (izquierda) y Pileta 2 (derecha).*

A lo largo de un proceso iterativo de ensayo, detección de inconvenientes y optimización, se diseñaron varios modelos de captadores flotantes con diferentes formas, dimensiones y materiales, de los cuales se presenta un modelo. El captador está formado por un marco rectangular de poliestireno expandido de 46 cm de largo, 4 cm de ancho en los bordes y 5 cm de alto, sobre ambas caras del marco se pegaron láminas transparentes de acetato, una ubicada en la parte superior de la base y otra ubicada en la parte inferior. La parte transparente tiene medidas de 27 cm de ancho y 38 cm de largo (Figura 2).



*Figura 2: Vistas del colector de acetato con doble lámina: posee una lámina de acetato en la parte superior y otra en la parte inferior.*

También se efectuaron ensayos utilizando 5 botellas vacías y limpias de 1,5 L de PET, con superficie totalmente transparente. Las mismas se cerraron herméticamente y se ubicaron flotando sobre la superficie del agua. Este ensayo surgió a partir de la inquietud de un piscicultor que propuso esta idea y de la experiencia en EEUU con las “shade balls”.

Posteriormente y debido a los resultados insatisfactorios obtenidos con las botellas vacías, se efectuaron ensayos utilizando 5 botellas de PET de 1,5 L cargadas con arena y ferrite negro hasta aproximadamente la mitad de su capacidad (Figura 3). Esto se hizo con el objetivo de probar si se mejoraba la absorción de la radiación solar y disminuía la evaporación al aumentar la superficie de contacto entre la botella y el agua, debido a que por su mayor peso se sumergen más en el agua.



Figura 3: Vistas del ensayo con botellas recargadas con absorbente: arena y ferrite.

## BALANCE ENERGÉTICO

En un trabajo previo se desarrolló un modelo termodinámico simple que describe los cambios en la energía interna de las piletas al aire libre que simulan los estanques de acuicultura, (Gutierrez et al., 2018). Suponiendo despreciables los flujos de energía relacionados con las filtraciones de agua hacia las napas subterráneas, los originados en las lluvias, en los desbordamientos de agua, los relacionados al agua de reposición y a los intercambios con las paredes de las piletas, la conservación de la energía en estado transitorio estará dada por:

$$\left(\frac{dU}{dt}\right) = q_{rad} - q_{evap} \pm q_{fondo} \pm q_{conv} \quad (1)$$

La energía interna dentro del volumen de control está dado por:

$$U = m_w C T \quad (2)$$

En el modelo la masa de agua se considera constante; también se asume que la densidad y el calor específico se mantienen constantes con la temperatura, ya que las variaciones de estas con cambios en la temperatura son despreciables. El calor neto intercambiado incluye el calor intercambiado por radiación, por conducción a través del fondo, por convección en la superficie y el necesario aporte para la evaporación del agua.

$$Q_{neto} = q_{rad} - q_{evap} \pm q_{fondo} \pm q_{conv} \quad (3)$$

Durante las experiencias se mide el tiempo y la temperatura del agua de las piletas, por lo cual se puede calcular la derivada de la temperatura con respecto al tiempo.

$$\left(\frac{dT}{dt}\right) = \frac{Q_{neto}}{m_w C} \quad (1)$$

Conocidos la masa del agua contenida en la piletas y la derivada de la temperatura con respecto al tiempo se puede calcular el calor neto intercambiado.

$$Q_{neto} = m_w C \left( \frac{dT}{dt} \right) \quad (5)$$

Simultáneamente se mide la radiación solar incidente sobre la superficie libre del agua de la piletta. Entonces se podría obtener el flujo de calor combinando conducción, convección y evaporación.

$$Q_{neto} - q_{rad} = \pm q_{fondo} \pm q_{conv} - q_{evap} \quad (6)$$

## RESULTADOS

### Ensayo en piletas sin colectores

Durante este ensayo se ubicaron los sensores de temperatura a la misma profundidad inmersos en las piletas que contenían iguales volúmenes de agua, sin utilizar ningún tipo de colector, a los efectos de verificar a cuanto pueden ascender las divergencias entre las temperaturas medidas en cada piletta. En la figura 4 se exhiben las evoluciones de las temperaturas de las piletas ( $T_{s/col}$ ,  $T_{c/col}$ ), la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), la velocidad del viento ( $Vel.V$ ) y la humedad relativa ambiente ( $Hum. Rel$ ) a lo largo de 16 días. Los resultados evidenciaron que puede existir una diferencia entre ambas de hasta 0,2 °C, esto se debe a los errores asociados al proceso de medición en sí mismo, lo cual se tiene en cuenta para las siguientes determinaciones donde ya se colocaron los colectores flotantes para evaluar su funcionamiento. Se observa un primer periodo de 4 días de temperaturas ambientes moderadas con temperaturas medias de aproximadamente 21 °C, a continuación un descenso de la temperatura ambiente y por último un periodo de 10 días de temperaturas bajas con medias de alrededor de 12 °C. Durante todos los periodos las temperaturas de las piletas se mantienen intermedias entre la máxima y mínima del ambiente, excepto durante el periodo intermedio de descenso en el que las piletas exhiben una inercia térmica manteniéndose a una temperatura superior a la del ambiente.

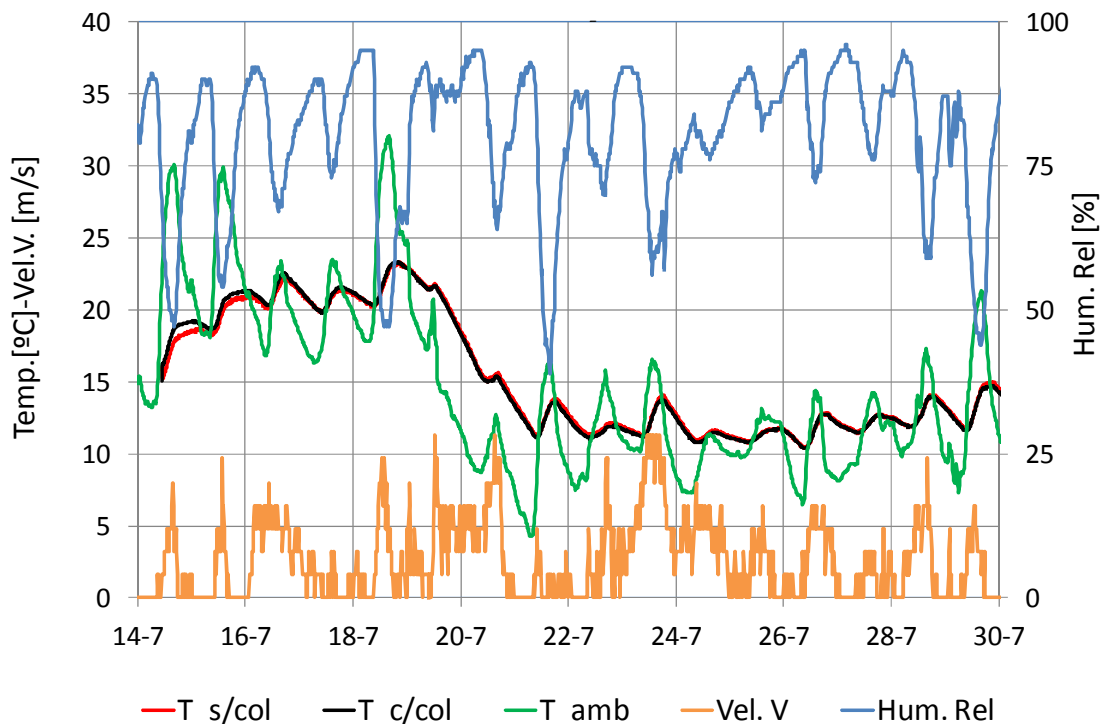


Figura 4: Temperatura del agua de las piletas, temperatura ambiente, velocidad del viento y humedad relativa para 16 días.

### Experiencias con botellas vacías

En la figura 5 se observan los resultados de un ensayo realizado desde el 23/10 a las 12:30 pm hasta el día 30/10 a las 12:00 pm. Para los días ensayados la temperatura ambiente máxima fue de 36 °C y la



mínima de 15 °C. En la pileta 1 se colocaron 5 botellas vacías de PET tipo cristal (transparente), las mismas previamente fueron lavadas, secadas y cerradas herméticamente. Se observa que en horarios de la madrugada, durante el enfriamiento, el agua de la pileta sin las botellas se enfría más rápidamente que la de la pileta con las botellas, observándose una diferencia de temperaturas máxima de hasta 0,7 °C entre las 6 y las 8 de la mañana. Es decir, las botellas limpias y secas dificultan el enfriamiento de la misma durante ese lapso de tiempo. Sin embargo, al acercarse el mediodía, el agua de la pileta que posee las botellas empieza a tener menor temperatura que la pileta sin botellas, alcanzando como valor máximo una diferencia de temperaturas superior en 0,8 °C a las 15:00hs, fenómeno que dura hasta las 19hs aproximadamente, es decir se calienta más rápidamente la pileta sin botellas. Cerca de la puesta del sol se alcanzan las temperaturas máximas y no se observa una diferencia significativa entre las temperaturas del agua de la pileta donde están las botellas y del agua de la pileta sin las botellas.

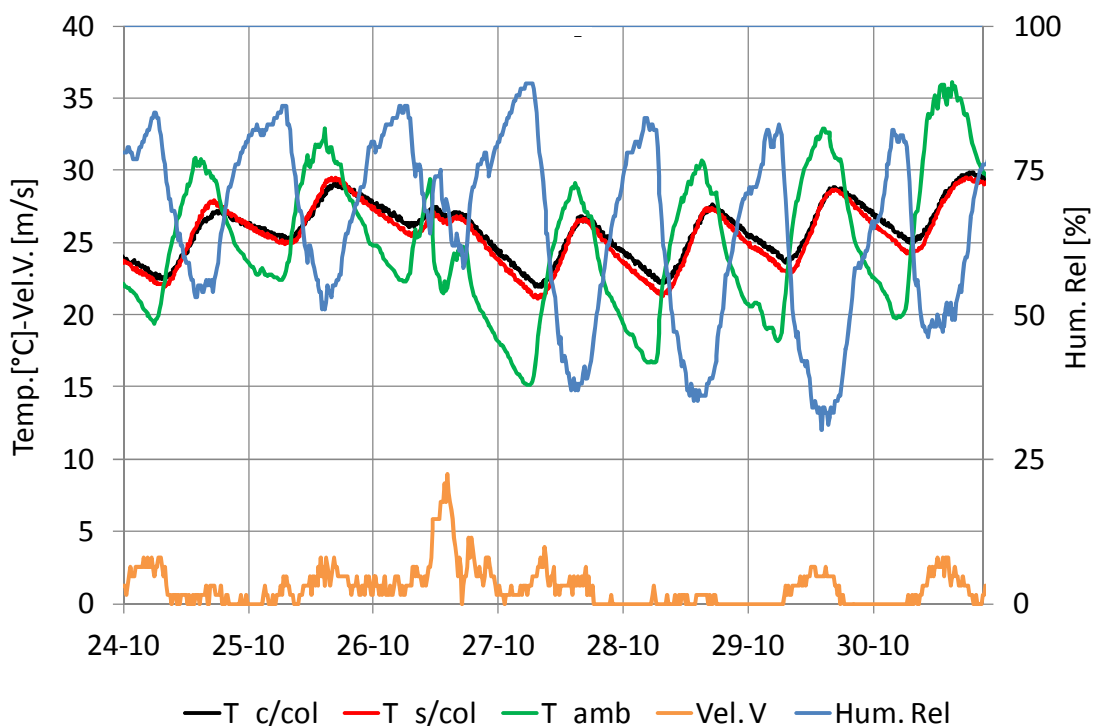


Figura 5: Temperatura del agua de las piletas, ambiente, velocidad del viento y humedad relativa para 6 días soleados.

#### Experiencias con botellas cargadas con absorbente

En la figura 6 se observan los resultados de un ensayo realizado desde el 03/08 a las 10:00 am hasta el 09/08 a las 12:00 am. Los días fueron cálidos con una temperatura máxima de 27 °C y una mínima de 7 °C. Las botellas al contener arena y ferrite funcionan como un “abrigo” por la noche y en las horas de la siesta/tarde dificultan el calentamiento del agua. Esto puede concluirse luego de que se observa que para los días de ensayo, el agua de la pileta que tiene las botellas está más fría por la siesta/tarde que el agua de la pileta con las botellas, al cual tiene mayor temperatura (promedio de los días 0,4 °C de diferencia). Por la noche y durante las horas tempranas de la mañana el comportamiento se revierte: el agua de la pileta con las botellas llega a tener una temperatura superior a 0,4 °C (valor promedio) que el agua de la pileta sin botellas. Estas diferencias de temperatura son muy inferiores a los valores buscados.

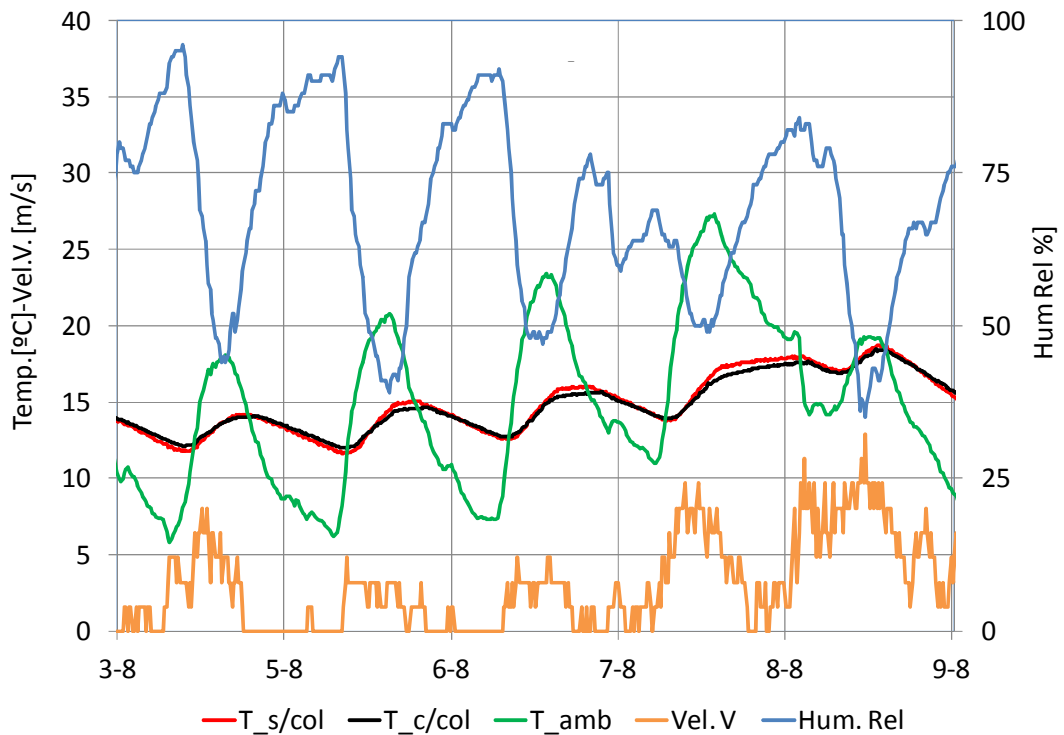


Figura 6: Temperatura del agua de las piletas, ambiente, velocidad del viento y humedad relativa para 6 días.

Experiencias con dos colectores con doble lámina de acetato en piletta 2

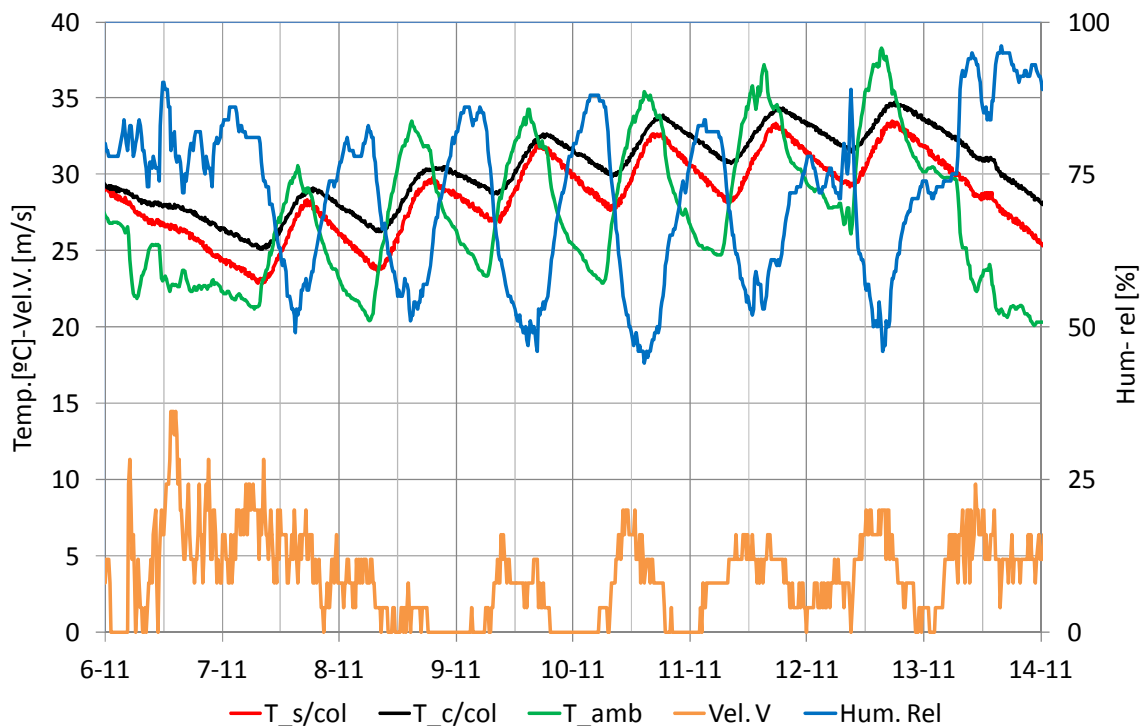


Figura 7: Temperatura del agua de las piletas, ambiente, velocidad del viento y humedad relativa para 8 días.

El ensayo fue realizado desde el 6/11 a las 8:30 am hasta el día 14/11 a las 9:00 am, con temperatura ambiente máxima de 38 °C y mínima de 20 °C, el día 13/11 se produjo una intensa lluvia entre las

7:00 am y las 11:00 am. En la piletta 2 se colocaron dos captadores flotantes. La superficie ocupada por los dos captadores en la piletta de ensayo es de 0,33 m<sup>2</sup>, lo cual representa un 57,2 % de la superficie total, (donde de ese % un 35,5 % corresponde a la parte transparente y el 21,8 % restante corresponde a la superficie de los bordes), y el % restante un 42,8 % es la superficie no cubierta en la piletta.

En la figura 7 se observa que la máxima diferencia de temperatura, en horarios de la mañana cuando la temperatura del agua de la piletta donde se colocó el colector se encuentra más caliente (2,4 °C en promedio) que el agua de la piletta sin el captador. Por la siesta-tarde el agua de la piletta con el captador también está más caliente sin embargo la diferencia es de 1 °C (valor promedio para los días del ensayo).

Para este último ensayo se expone un análisis más profundo: a partir de los datos experimentales de temperatura, se determinaron las pendientes promedio durante los periodos estables de calentamiento (entre las 12 y 16 hs) y los de enfriamiento (entre las 19 y 6 hs), dichos resultados se exponen en la tabla 1. A partir de estas pendientes se determinaron, mediante la ecuación (5), los flujos netos de calor intercambiados entre el agua de las piletas y el ambiente, considerando que la masa de agua contenida en las piletas es de 320 kg,

Piletta	Proceso	Pendientes de la evolución de las temperaturas [K/día]					Prom.	Flujo Neto de calor [W]
		08/11	09/11	10/11	11/11	12/11		
c/col	Cal.	12,7	11,7	11,7	10,3	10,9	11	172
	Enf.	-2,5	-4,6	-5,3	-4,8	-4,4	-4	-65
s/col	Cal.	19,5	15,9	16,1	16,4	16,3	17	269
	Enf.	-5,4	-7,7	-8,2	-6,9	-6,6	-7	-111

Tabla 1: Pendientes de las evoluciones de temperaturas y flujos netos de calor hacia piletas para horarios de calentamiento (12:00 a 16:00hs) y enfriamiento (19:00 hs a 6:00 am)

El flujo neto de calor determinado corresponde al indicado en la ecuación (2) y tiene en cuenta la sumatoria de los flujos que entran y salen del sistema bajo análisis. Según el cuadro se obtuvieron resultados experimentales que indican las magnitudes para dos condiciones: “cal” desde las 12:00 hasta las 16:00 hs y “enf” desde las 19:00 hs a 6:00 am. Comparando los resultados obtenidos para los dos casos, se observa que en el caso de la piletta sin captador tanto la ganancia como la pérdida de calor al exterior ocurren más rápidamente que la piletta con el captador. El Flujo Neto de calor durante las horas de enfriamiento para la piletta sin el captador es de -111 W, mientras que para la piletta con el captador es de -65 W. El Flujo Neto de calor durante las horas de calentamiento para la piletta sin el captador es de 269 W, mientras que para la piletta con el captador es de 172 W.

La radiación solar en W/m<sup>2</sup> se obtuvo mediante la estación meteorológica, sabiendo que el área de las piletas es 0,57 m<sup>2</sup> se obtiene la potencia total que ingresa a cada piletta en Watts durante el periodo de calentamiento, expuestos en la tabla 2.

Valor	08/11	09/11	10/11	11/11	12/11	Promedio
Radiación [W/m <sup>2</sup> ]	848	857	880	754	775	823
Potencia [W]	483	488	501	430	442	469

Tabla 2: Radiación promedio incidente en las piletas para horarios de calentamiento (12:00 a 16:00hs)

La potencia promedio incidente sobre las piletas para los días ensayados es de 469 W durante las horas de calentamiento. Conociendo el flujo neto de calor y el calor debido a la radiación solar se pueden

determinar los flujos de calor restantes, agrupados según la ecuación (6). La diferencia entre el Flujo Neto de calor y la radiación solar durante las horas de calentamiento para la pileta sin captador de -200 W, mientras que para la pileta con el captador es de -297 W, ambos flujos integran los fenómenos de convección, evaporación y conducción.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la tabla 3 se exponen valores medios de temperaturas relevantes. Durante las horas de calentamiento (12:00 a 16:00hs), el promedio de la temperatura de agua de la pileta S/col fue de 30,4 °C (para 5 días de ensayo), de 31,7 °C para la pileta C/col y la temperatura del aire de 34,5 °C. Durante las horas de enfriamiento (19:00 hs a 6:00 am), el promedio de la temperatura de agua de la pileta S/col fue de 30,4°C (para 5 días de ensayo), para 32,1 °C para la pileta C/col y la temperatura del aire de 27,8 °C.

Variable	08/2018	09/2018	10/2018	11/2018	12/2018	Prom.
T_s/col	27,3	30,2	31,2	31,5	31,8	30,4
T_c/col	28,7	31,1	32,3	33,0	33,3	31,7
T_amb	32,3	33,2	34,4	35,7	36,9	34,5
T_c/col - T_s/col	1,4	0,9	1,1	1,5	1,6	1,3
T_amb - T_c/col	3,5	2,1	2,1	2,7	3,5	2,8

*Tabla 3: Temperaturas promedio del agua de las piletas, del ambiente y sus diferencias, durante el proceso diario de calentamiento (12:00 a 16:00hs)*

El aumento de la temperatura del agua entre la pileta con el captador solar y sin el mismo fue de 1,3 °C en promedio (para los 5 días ensayados) durante las horas de calentamiento y de 1,8 °C para las horas de enfriamiento. Se observa que para las horas de calentamiento la temperatura del aire fue de 2,8 °C (promedio) superior que el agua de la pileta con captador, mientras que para las horas de enfriamiento la temperatura del agua fue 4,3 °C superior que la temperatura del aire, lo cual es favorable ya que para éste período es necesario mantener la temperatura del agua para que se alcancen temperaturas que rondan los 20-24 °C en los meses de invierno.

Variable	08/2018	09/2018	10/2018	11/2018	12/2018	Prom.
T_s/col	28,5	29,8	30,5	31,3	31,6	30,4
T_c/col	29,9	31,5	32,4	33,2	33,5	32,1
T_amb	26,2	25,5	26,8	29,6	30,8	27,8
T_c/col - T_s/col	1,4	1,7	2,0	1,9	1,9	1,8
T_amb - T_c/col	-3,7	-6,0	-5,7	-3,6	-2,7	-4,3

*Tabla 4: Temperaturas promedio del agua de las piletas, del ambiente y sus diferencias, durante el proceso diario de enfriamiento (19:00 a 6:00hs)*

Debido a que en la región hay días calurosos dentro de los meses de invierno donde se alcanzan temperaturas mayores que 30°C en algunos casos, esto ocasionaría una dificultad en el uso de mantas térmicas, ya que según lo estudiado por (Wisely et al., 1981), el rango térmico de trabajo para las mayoría de los materiales con los que se hacen las mantas, tiene como límite esa temperatura y superándola se produce una separación de las capas ocasionando la pérdida de la misma en periodos cortos de tiempo menores a un mes.

## CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Las botellas de PET tanto vacías como cargadas con la mezcla de arena y ferrite no dieron resultados satisfactorios; ya que se observó que en promedio el agua de la pileta con las botellas alcanzaba una

temperatura superior en 0,2 °C con respecto al agua de la pileta testigo. Estos resultados están alejados de los valores deseados.

Se obtuvieron resultados aceptables al colocar dos captadores de acetato de doble lámina, los cuales produjeron aumentos de temperatura de 2,2 °C en relación a la pileta testigo, en promedio por la madrugada y la mañana, y alrededor de 1 °C en promedio de los días ensayados en horarios de la siesta/tarde. Este diseño puede optimizarse al aumentar el área de la superficie transparente y disminuyendo el área de los bordes que impide el paso de la radiación.

El captador ensayado al tener la cubierta superior en posición horizontal acumula agua de lluvia o de rocío favoreciendo el ensuciamiento y dificultando el paso de la radiación solar. Posteriormente se desarrollaron nuevos colectores que solucionan este inconveniente y que actualmente están siendo ensayados obteniéndose en principio mejores resultados a los presentados.

## APÉNDICE: NOMENCLATURA

Magnitud	Unidad	Descripción
A	m <sup>2</sup>	Área del estanque
C	kJ/kg°C	Calor específico del agua
U	J	Energía interna del estanque
m <sub>w</sub>	Kg	Masa del agua
q <sub>conv</sub>	W	Flujo de calor por convección.
q <sub>evap</sub>	W	Flujo de energía perdida a través de la evaporación del agua.
q <sub>rad</sub>	W	Flujo de calor por radiación
q <sub>fondo</sub>	W	Flujo de calor por conducción por el fondo.
Q <sub>neto</sub>	W	Flujo Neto de calor
T	°C	Temperatura promedio del agua en el estanque.
t	seg	Tiempo

## REFERENCIAS

- De Graaf, M. How the 100 million ‘shade balls’ brought in to protect LA’s reservoir from evaporating are in fact a ‘bacterial nightmare’. Daily Mail (20 August 2015). <https://www.dailymail.co.uk/news/article-3204873/How-100-million-shade-balls-brought-protect-LA-s-reservoir-evaporating-fact-bacterial-nightmare.html>
- Dilip J., (2007). Modeling the thermal performance of an aquaculture pond heating with greenhouse. Building and environment 42, p. 557-565.
- Farías P., Figueredo G., Sánchez S. y Sandoval M., (2015). Revisión de alternativas tecnológicas para el calentamiento solar de estanques para acuicultura. Acta de la XXXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 3, pp. 02.21-02.32, 2015.
- Gutierrez Sosa, M. Y., Spotorno R., Pochettino J.J., Zurlo H. y Figueredo G. R. (2018). Modelización Termodinámica para estanques de Piscicultura. Pp. 4-6.
- Klemetson S.L., Rogers G.L., (1985). Aquaculture pond temperature modeling. Aquacult Eng; 4 p.191-208.
- Molina Martínez J.M., Martínez Álvarez V., Baille A. y González-real M.M. (2006). Estimación de la evaporación en embalses de riego mediante un modelo de balance de energía. En: Ingeniería del agua Vol. 13 pp. 3.

- Wisely B., Holliday J. E. and MacDonald R. (1981). Heating An Aquaculture pond with a solar pool blanket. Pp. 385-387.
- Zhu S., Deltour J, Wang S. (1998). Modeling the thermal characteristics of greenhouse pond systems. Aquaculture Eng18, pp. 201-17.

## **HEATING AN AQUACULTURE POND WITH PET BOTTLES AND FLOATING COLLECTORS**

### **ABSTRACT**

Fishes are affected by low temperatures of water during winter months; this makes a decrease in reproduction and the production of aquafarming. Tests were carried out in two ponds models, floating materials were placed in the first one and the second one worked as a reference sample. Looking to moderate the descent of temperature of water, PET bottles and floating solar collectors with double acetate cover were tested. The experiences were carried out under NEA climatic conditions during winter and spring. The floating solar collector had a favourable response regarding increase in temperature needed. Better results can be obtained by maximizing the area of the transparent surface which captures the radiation and decreasing the edges of the collector area. The temperature differences between the two ponds models for different collectors are presented, in addition to other climatic parameters.

**Keywords:** Aquaculture, Water temperature, Heat balance.

## **ENSAYO TÉRMICO NORMALIZADO DE UN COLECTOR SOLAR CON ACUMULACIÓN INTEGRADA PARCIALMENTE AISLADO, HECHO CON MATERIALES ACCESIBLES Y DE FABRICACIÓN SIMPLE**

**Javier H. Garnica, Juan M. Lucchini, Jorge R. Barral, Matías E. Buosi, Pablo D. Galimberti**

Grupo de Energía Solar – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Río Cuarto

Ruta Nac. 36 Km. 601, 5800 Río Cuarto

Tel./Fax: (0358) 4676246 - e-mail: [jhgarnica@yahoo.com](mailto:jhgarnica@yahoo.com)

*Recibido 12/08/19, aceptado 17/10/19*

**RESUMEN:** Este trabajo muestra el desarrollo de un colector con acumulación integrada con un particular diseño para prevenir enfriamiento nocturno, el cual fue evaluado térmicamente mediante la Norma IRAM 210004. El objetivo central fue obtener un equipo de bajo costo que ofreciera mejores prestaciones que otros modelos pensando en una aplicación domiciliaria unifamiliar. Se detallan las características esenciales de un primer prototipo explicándose las razones que justifican la disposición geométrica de las partes componentes y su correlación con los materiales utilizados. Para la evaluación térmica se utiliza una máquina también diseñada y construida por el equipo de investigación, y se recurre a la aplicación rigurosa de la norma mencionada anteriormente. Los resultados obtenidos se muestran mediante gráficos y tablas, determinándose los coeficientes de la ecuación fundamental que da cuenta de la energía que puede proveer el equipo. Al informe convencional de la norma se adiciona un cálculo mensual para ver claramente la evolución de la Fracción Solar, y se provee una información gráfica que muestra la cobertura solar total o parcial de la demanda diaria mediante energía solar. Se compara este equipo con modelos previos ensayados con una norma equivalente, pudiéndose constatar una mejora en el comportamiento térmico del nuevo prototipo.

**Palabras clave:** colector acumulador, aislación parcial, norma, ensayo térmico.

### **INTRODUCCIÓN**

Los colectores solares con acumulación integrada (CAI) para calentamiento de agua residencial presentan las ventajas de que no necesitan elementos adicionales para su funcionamiento (como bombas o controladores), ni tanque de almacenamiento por separado, siendo a la vez resistentes al congelamiento en la época invernal. Existen muchas variantes de este tipo de colectores-acumuladores (Singh et al., 2016), como también se han usado distintos materiales para la superficie absorbadora-almacenadora, cubierta transparente, carcasa y accesorios (Alghoul et al., 2005) (Zauner et al., 2011). Así, su disposición física compacta y posibilidad uso de materiales de bajo costo, hacen factible su uso en regiones de buena radiación solar y para familias de bajos recursos. Asimismo, al igual que otros sistemas de calentamiento de agua solar de baja temperatura, el análisis de ciclo de vida da cuenta de la amortización, sustentabilidad, y bajísimo impacto ambiental de estos equipos (Koroneos y Nanaki, 2012).

A pesar de todas estas ventajas, este tipo de equipos no se dispone en el mercado de la República Argentina, mientras que en otros países, incluso aquellos de sociedades con alto poder adquisitivo, estos equipos ya se comercializan (SRCC, 2019). Los relevamientos realizados en los últimos años en nuestro país dan cuenta de la fabricación de equipos basados en la tecnología tradicional de placa plana y una penetración importante en el mercado de equipos importados muy baratos de tubos evacuados (Nienborg, 2010) (Cordi et al., 2016). Surge así, como una necesidad imperante, el desarrollo de equipos que sean competitivos frente a las otras tecnologías, para lo cual sería importante poder ampliar el rango climático de aplicación de los CAI, como así también apuntar a equipos no sólo de bajo costo de materia prima, sino también que impliquen eficientes procesos de fabricación y facilidad de instalación.



El Grupo de Energía Solar de la UNRC (GES) ha trabajado experimentalmente y analíticamente con distintos modelos de CAIs: tubulares (Barral et al., 2002), monotanques con varias cubiertas de policarbonato (Fasulo et al., 2001), bitanques con superficies reflectantes (Stoll et al., 2007), de sección oval (Garnica et al., 2017). Si bien estos dispositivos han demostrado ser eficientes energéticamente y con una recuperación de inversión razonable en el mediano plazo, requieren de un manejo algo complejo de tecnología y persiste en ellos el problema típico de estos equipos, que son las altas pérdidas nocturnas ocasionadas por la exposición del absorbedor-almacenador a la baja temperatura de cielo.

Para minimizar las altas pérdidas nocturnas mencionadas en el párrafo anterior, siguiendo una idea propuesta por Kumar y Rosen (2011), se ha decidido diseñar un nuevo tipo de CAI que prevé que parte de su almacenamiento esté aislado. Adicionalmente, pensando en hacer un equipo competitivo comercialmente, se propone para la construcción del mismo el uso de materiales de bajo costo y fácil obtención en el mercado local, con un proceso de fabricación que minimice la mano de obra. Bajo estos lineamientos, se ha construido un primer prototipo experimental que se describe en este artículo.

Existen norma a nivel internacional para garantizar la calidad de los equipos, confiabilidad y condiciones de seguridad de mantenimiento. Normas para analizar el comportamiento térmico de equipos compactos, entre los cuales se encuentran los termosifónicos y también los de acumulación integrada (ISO, 1995) han sido adaptadas para crear normas nacionales (IRAM, 2016). Como el equipo que se estudiará en este trabajo podría tener eventualmente un desarrollo comercial, más allá de todos los aspectos de un minucioso estudio de investigación, se deben cumplir con las normas y reglamentos que se establezcan para su uso en nuestro país (Barral, 2018), lo cual le permitiría en un futuro calificar mejor para un posicionamiento en el mercado y su comercialización (Timilsina et al., 2012).

Los equipos se pueden someter a varios ensayos, algunos de ellos determinantes (presión interna, choque térmico, materiales defectuosos, daño por granizo, etc.), pero los ensayos de comportamiento térmico son los que primero se ven como necesarios, ante la duda central que asalta tanto a un fabricante, a un vendedor, a un instalador y a un potencial usuario: ¿cuán bien calienta el agua este equipo? Por esta razón, uno de los objetivos principales de este trabajo ha sido la realización del ensayo previsto en la norma IRAM 210004 (IRAM, 2016), que permite obtener una ecuación para caracterizar la ganancia de energía diaria de los equipos y propone un método de simulación con balances energéticos para predecir el comportamiento anual de los mismos, y así determinar qué porcentaje de la energía demandada por el usuario puede ser provista por el CAI. Es de esperar que la IRAM 210004 sea de plena aplicación en poco tiempo. La Resolución 520/18 (Ministerio de Producción, 2018) la ha postergado para instancias futuras, realizándose hoy ensayos a equipamientos solares térmicos en cuestiones secundarias frente a la importancia de saber si los equipos cumplen con su función principal que es calentar agua.

Este trabajo describe los pasos seguidos para diseñar y construir el prototipo, se explica el procedimiento de ensayo seguido, con la correspondiente instrumentación y mediciones realizadas. Se presentan luego los resultados en forma de ecuaciones y gráficos de acuerdo a lo previsto en la norma, y se analizan dichos resultados en vistas a proponer mejoras al prototipo inicial.

## **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO**

Se muestra en la Fig. 1 un esquema de la parte interna del CAI construido, de la superficie absorbidora y la porción de almacenamiento superior. El diseño se inició con un estudio analítico aproximado de las posibilidades de obtención de energía solar de una superficie plana en la ciudad de Río Cuarto para una familia tipo. Así, siguiendo la regla para mejor aprovechamiento invernal de una inclinación respecto a la horizontal de la latitud del lugar más aproximadamente 10 grados (se adoptó  $\beta = 45^\circ$ ), mirando hacia el Norte, se estudió la radiación que podía absorberse en un año. Para ello se estimaron ganancias y pérdidas, considerándose también que parte de la energía absorbida podía almacenarse con menores pérdidas que las experimentadas en un CAI convencional, donde toda la superficie absorbidora está expuesta a la atmósfera. Pensando en una familia de cuatro integrantes, con un consumo promedio de 50 litros por persona por día, se propuso un diseño original de 180 litros,

considerando que las superficies planas de los paralelepípedos que forman el conjunto, deformarían, aumentando la capacidad (Lucchini et al., 2015). La superficie absorbidora es de aproximadamente 2 m<sup>2</sup>.

Todo lo que se muestra en la Fig. 1 está realizado con una estructura de caño cuadrado de 30x30 mm, con espesor de pared de 1,6 mm, sobre la cual se soldó chapa negra calibre 18 (1,25 mm), quedando así una superficie para absorber radiación solar (sector rosa en la figura) que asemeja a un colector de placa plana, pero que en realidad funciona como una caja muy chata, que en diseño original (sin dilatación) tiene una capacidad de 63 litros. Este sector absorbidor está en comunicación directa por la parte superior con el sector que va a ser completamente aislado. Se esquematizan allí los movimientos de agua caliente hacia arriba y agua fría hacia abajo que se dan por convección natural (Fan y Furbo, 2012). Este movimiento se corta a la noche cuando se enfría la sección absorbidora. Del sector superior que trabaja puramente como almacenador, se extrae por la parte de arriba agua caliente para los usuarios.

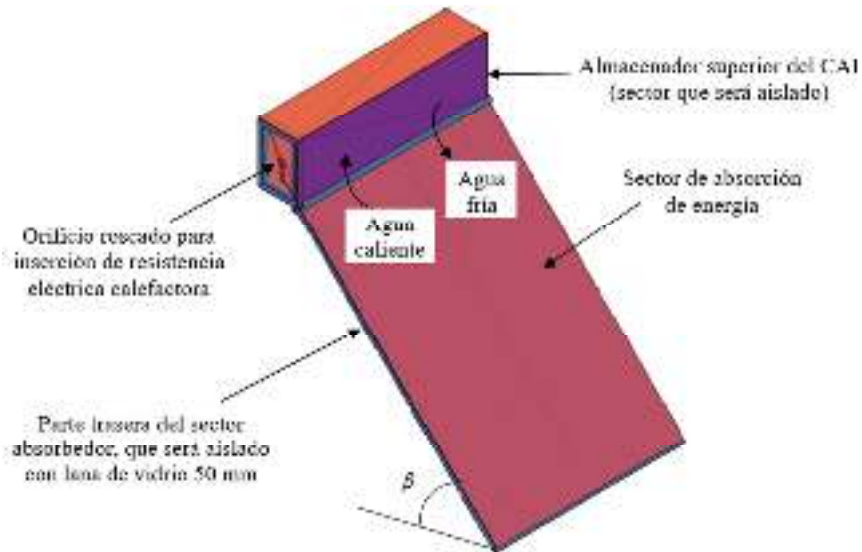


Figura 1: Esquema de conjunto absorbedor-almacenador del CAI.

En la Fig. 2 se muestra el sistema de la Fig. 1 abierto. Se ve allí la concepción simplificada del armado del absorbedor-almacenador, que consta de dos chapas en su medida original de fábrica (1,22 m por 2,44 m), que no son cortadas en absoluto y solo demandan 2 plegados cada una. La soldadura de las mismas se cierra sobre los caños cuadrados. Se ve allí, en la Fig. 2 (a) como la entrada de agua al equipo es dirigida a la parte inferior de la superficie absorbidora (caño verde más largo), para favorecer de entrada la estratificación del agua en forma mecánica. La salida del agua hacia el usuario se da mediante un caño pescador ubicado en la parte superior del equipo (caño verde más corto). En la Fig. 2 (b) se ven ambos caños ingresando al equipo por la parte posterior.

El conjunto mostrado en la Fig. 1 fue pintado por fuera y por dentro con pintura antióxido al agua, para evitar efectos de contaminación, y luego todo con pintura negro mate para favorecer la absorción de la radiación solar. Se le colocaron dos ánodos de magnesio de 50 cm cada uno para evitar la corrosión galvánica. Previendo un futuro uso tipo domiciliario, para garantizar la energía los días nublados, se previeron en el equipo dos agujeros roscados en los laterales para la eventual colocación de resistencias calefactoras. Todo fue luego aislado con lana de vidrio de 50 mm y encapsulado en una carcasa de chapa galvanizada, mientras que la parte que enfrenta al sol para captar la energía fue cubierta con un policarbonato alveolar de 6 mm.

En la Fig. 3 (a) se ve una foto de la parte frontal del prototipo ya montado sobre la plataforma de medición. El sistema cuenta con un venteo en la parte superior, que asegura el funcionamiento de la parte interior a una presión algunos centímetros de agua por encima de la atmosférica; se supone un montaje en la cercanía del tanque de almacenamiento de agua de la casa, que alimentaría al CAI. Se observan allí también una de las dos patas posteriores que dan sustento a gran parte del peso del equipo sobre la superficie horizontal. El empotramiento a la plataforma se completa con dos grampas

en forma de “L” en la parte delantera del equipo (una a cada lado). El tapón roscado inferior a la derecha solo cumple la función de drenaje del equipo.

En la Fig. 3 (b) se muestra la parte posterior externa del equipo, donde se pueden observar la entrada de agua fría por la parte baja del tanque almacenador y la salida de agua caliente por la parte superior. En esta instancia de ensayo se encuentra aislada la entrada de agua fría, ya que por requisitos de la norma de ensayo se debe garantizar una cierta temperatura constante de entrada al equipo ( $t_{main}$ ), la cual proviene de una fuente de agua a temperatura regulada. Arriba a la izquierda se observa la salida para el venteo, en esta ocasión se encuentra tapado, regulándose la presión mediante la máquina de ensayo que se describirá a posteriori. También se ve el termómetro de dos entradas que se utiliza para medir mediante termocuplas tipo K la entrada y la salida del equipo.

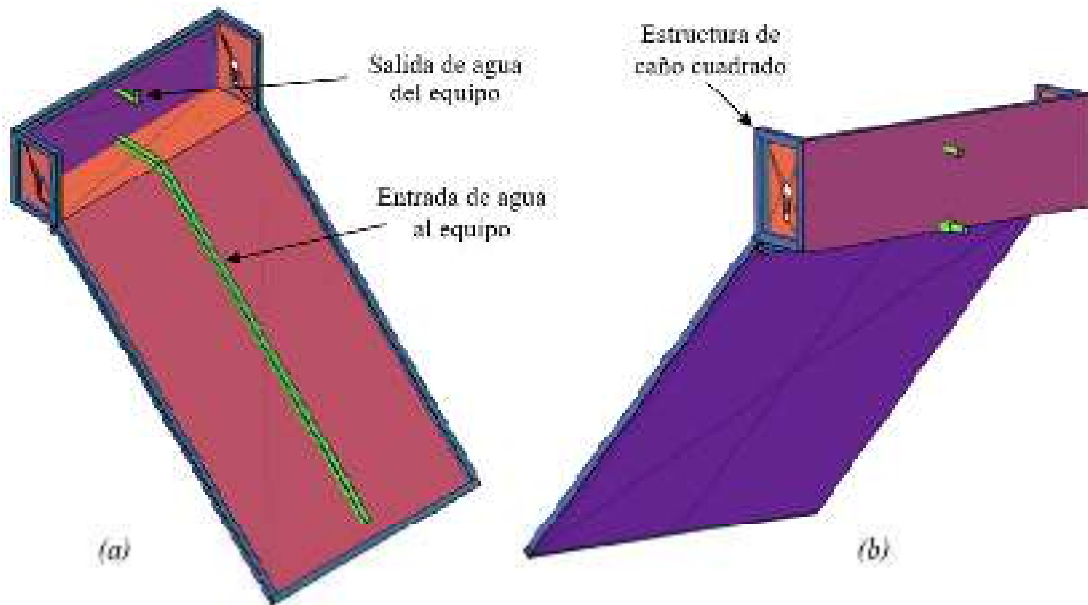


Figura 2: (a) Parte posterior del absorbedor-acumulador sin la chapa superior, vista de frente, incluyendo caños de entrada y salida; (b) parte posterior del absorbedor-acumulador sin la chapa superior vista de atrás.



(a)



(b)

Figura 3: (a) CAI montado sobre la plataforma de medición, vista frontal; (b) CAI montado sobre la plataforma de medición, vista posterior.

## EVALUACIÓN TÉRMICA DEL PROTOTIPO MEDIANTE IRAM LA NORMA IRAM 210004

Dado que no se puede analizar térmicamente este tipo de equipos solares mediante un ensayo de corto tiempo, se debe recurrir a una metodología particular. No es posible dividir los componentes (tanque y colector) y analizarlos por separado, porque no funcionan estacionariamente y su caudal va variando durante el día dependiendo mucho de la radiación solar que reciba el sistema y en menor medida de otros parámetros. Sumado a esto, por la gran masa que estos tienen (inercia térmica), funcionan permanentemente en estado transitorio, incluso con influencia de lo sucedido en días anteriores. Luego de años de estudio, la ISO ha desarrollado un método, cristalizado en su Standard ISO 9459-2, que ha sido recientemente adaptado por IRAM. Para llevar adelante el ensayo es necesario realizar una serie de mediciones durante varios días y con distintas condiciones de radiación para obtener ecuaciones que representen el funcionamiento del sistema para cualquier tipo de clima y nivel de demanda.

Para determinar las ecuaciones, que tengan validez general, se necesitan al menos 6 series de mediciones (1 por día). Para cada medición diaria, 6 horas antes del mediodía solar, se pone el equipo a una temperatura uniforme igual a la temperatura de entrada, y se deja calentar y enfriar libremente el sistema hasta 6 horas después del mediodía solar. Durante ese período se mide toda la energía de radiación por metro cuadrado sobre la superficie del absorbedor,  $H$ , y la temperatura ambiente. Después de 6 horas del mediodía solar se realiza una descarga de al menos 3 volúmenes de la capacidad del tanque, con un caudal fijo, y a una temperatura de entrada igual a la inicial, mientras se mide la temperatura de salida. De esta manera, el almacenador queda casi a la temperatura de entrada y con un cálculo calorimétrico integrado durante la descarga, se evalúa toda la energía que absorbió el equipo durante esas 12 horas.

Se establecen para los días a utilizar, distintos niveles de radiación y de temperatura de entrada a fin de que la nube de puntos obtenida tenga validez estadística. Luego, vinculando a todas las mediciones con regresiones lineales es posible representar la posibilidad de provisión de energía calórica útil del sistema mediante una única ecuación (ecuación 1), y también mediante una única ecuación el incremento de temperatura que puede experimentar el agua almacenada (ecuación 2).  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ , y  $b_3$  son los coeficientes obtenidos por las regresiones lineales.

$$Q = a_1 H + a_2 (t_{a(day)} - t_{main}) + a_3 \quad (1)$$

$$t_{d(max)} - t_{main} = b_1 H + b_2 (t_{a(day)} - t_{main}) + b_3 \quad (2)$$

Donde:

$Q$ = Calor útil diario provisto por el colector [MJ]

$H$  = irradiación media diaria por metro cuadrado [MJ/m<sup>2</sup>]

$t_{main}$ = temperatura entrada de agua fría [°C] (debe ser la misma en la carga y en la descarga)

$t_{a(day)}$ = temperatura promedio durante el proceso de 12 horas de calentamiento [°C]

$t_{d(max)}$ = temperatura de extracción de agua del equipo [°C]

A estas mediciones de calentamiento, se le deben agregar dos grupos de mediciones más, denominadas “mixing” (mezclado) y pérdidas nocturnas, para determinar un coeficiente de pérdida de calor del tanque de almacenamiento,  $U_s$ . Esto último es necesario para predecir el comportamiento del sistema a largo plazo (un año). La medición del mezclado verifica cuán bien se mantiene la estratificación en el tanque de almacenamiento cuando se le extrae agua y el ensayo de pérdidas nocturnas da una idea de cuán aislado se encuentra el dispositivo que realiza el almacenamiento de energía. Con estos resultados disponibles, más los datos típicos meteorológicos horarios del lugar de emplazamiento del CAI y un perfil de demanda dado, debe programarse un algoritmo de balances energéticos diarios, para poder predecir la entrega de calor útil del equipo. La secuencia de balances para el algoritmo está descrita en el texto de la norma. La energía anual será entonces la suma de los valores de energía diarios.

Debe remarcarse, además, que estos ensayos no dan como resultado un “rendimiento térmico”, expresión muy utilizada en distintos ámbitos de la tecnología. Para un colector plano solo, que se puede hacer funcionar en estado estacionario, es posible obtener una curva de rendimiento instantáneo que relaciona el calor útil con la radiación solar incidente sobre la superficie absorbente del colector. Pero, para equipos integrados, como el presentado en este trabajo, donde la influencia de los transitorios puede prolongarse hasta por varios días, se debe utilizar el concepto de “Fracción Solar” para su evaluación. La Fracción Solar es el porcentaje de energía provista mediante la energía del sol respecto a la demanda total de agua caliente de la casa. Dicha fracción solar tiene sentido en un análisis mensual o mejor aún, anual. En todo caso, si se quisiera encontrar un rendimiento promedio, debería integrarse todo el calor dado por la ecuación (3) para cada día durante todo un mes o un año, y dividirse por la energía radiante que llegó al plano de la superficie absorbente del equipo durante el mismo período de tiempo.

Para efectuar los ensayos se utilizó una máquina móvil de ensayos múltiples desarrollada y construida en el Laboratorio de Energía Solar de la UNRC, la que cuenta con 3 tanques de 100 litros, dos bombas de circulación, 6 resistencias calefactoras de 1500 W cada una, dos caudalímetros de distinto rango de medición y una serie entradas y salidas, válvulas y conexiones. Esta máquina permite realizar tanto ensayos de colectores solares para calentamiento de agua mediante Standard ISO 9806-1 y equivalentes como ensayos de sistemas completos mediante Standard ISO 9459-2 y equivalentes. En la Fig. 4 se muestra el panel frontal dicha máquina (panel de maniobras), donde se visualizan parte de los componentes mencionados. Las entradas y salidas se ubican en la parte posterior en dirección a los colectores y sistemas a ensayar.



*Figura 4: Máquina móvil para ensayos múltiples de colectores solares y sistemas compactos para calentamiento de agua.*

## **RESULTADOS**

Tal lo previsto en el llenado del equipo con agua para las pruebas iniciales, si bien dicho llenado se realizó a una presión moderada, cercana a la atmosférica, el incremento de volumen por deformación de los paralelepípedos fue superior a lo estimado, lo cual ocasionó que la relación volumen/área de captación fuera relativamente elevada. Dicho incremento debido a la elasticidad del material es beneficioso desde el punto de vista de resistir el congelamiento, pero es perjudicial en cuanto a los valores finales de temperatura a obtener. Si bien el equipo continuará funcionando como un buen elemento para ahorrar energía, no siempre podrá proveer el nivel de temperatura demandada por usuario. El equipo fue diseñado con un volumen original de 180 litros sin agua; luego, midiéndose la cantidad de agua que entró en el primer llenado, arrojó un volumen neto contenido de agua de 276 litros.



Se muestran a continuación, Tabla 1, los días en que se realizaron mediciones, que cumplen con los requerimientos de la norma en lo que respecta a nivel de radiación y valores de diferencia de temperaturas media del día y de entrada. Las mediciones realizadas en dichos días se utilizaron para la realización de las regresiones lineales para obtener los coeficientes de las ecuaciones (1) y (2).

Día	$T_{day}$ [°C]	$T_{main}$ [°C]	$T_{day}-T_{main}$ [°C]	Radiación [MJ]
27 de Junio	11,60	15,00	-3,40	22,67
10 de Julio	15,00	17,00	-2,00	21,30
15 de Julio	12,20	17,00	-4,80	22,90
16 de Julio	14,30	17,10	-2,80	22,10
17 de Julio	15,80	17,00	-1,20	15,50
20 de Julio	14,70	17,00	-2,30	11,20
5 de Agosto	17,12	7,30	9,82	24,97
12 de Agosto	12,35	7,00	5,35	23,64

Tabla 1: Resumen de los días en que se realizaron los ensayos y los datos climáticos y de temperatura de entrada que se registraron.

Se observa en la tabla que hay varios días en que  $T_{main}$  es del orden de 17 °C. Esto es así, porque se usó agua de una perforación a 35 m de profundidad, que mantiene constante la temperatura del agua durante todo el año y facilita la obtención de dicha  $T_{main}$  constante. Por otro lado, como la norma requiere que se cumpla con diferencias de  $T_{day}-T_{main}$  alejados en un cierto valor, fue necesario generar días de trabajo en los cuales la temperatura  $T_{main}$  fuera de un valor muy bajo (5 y 12 de agosto). Dada la baja temperatura media de los días, no era posible lograr dicho corrimiento con calentamiento, por lo cual fue necesario mezclar agua con mezclar agua y hielo para bajar la temperatura (entre 5 y 6 °C) en un tanque auxiliar de gran volumen, e ir regulando la temperatura de entrada mediante la apertura de parcial de válvulas conectadas a los tanques de la máquina de ensayo, a fin de lograr la constancia de  $T_{main}$  en el orden de los 7 °C. En la Fig. 5 (a) se muestra el caudalímetro de la máquina de ensayo mantenido en 10 litros por minuto mediante el ajuste de la canilla de bronce en la parte superior y en la Fig. 5 (b) se muestra el termómetro con sensores de termocupla tomando los datos a la entrada y la salida el CAI.



(a)



(b)

Figura 5:(a) Caudalímetro de la máquina de ensayo; regulación: 10 l/min; (b) Termómetro digital; lectura de temperatura de agua de entrada y salida del CAI.

En esta ocasión, el termómetro está midiendo la aproximación de la temperatura de salida (8,3 °C) a la temperatura de entrada ( $T_{main}= 7,0$  °C) que ocurre cuando ya se le han hecho pasar más de dos volúmenes al CAI y es como si no quedara en él casi nada de energía remanente. La “cola” de la curva de descarga que se muestra en la Fig. 6 (b).

En la Fig. 6 se muestran dos de las curvas de descarga del CAI realizadas con distinta temperatura de entrada. Se esquematiza sombreada en la Fig. 6 (a) el remanente de energía absorbida que no es extraída cuando se saca un volumen entero del equipo. Eso indica que para un consumo normal previsto para esa casa, esa energía no sería utilizada, pero para el cálculo de la energía total provista en el mes o año, esa energía no se pierde. Luego de computadas las pérdidas nocturnas y considerando un proceso de mezclado de fluido frío y caliente, lo que aún haya quedado de energía por sobre  $T_{main}$ , contribuye a que en el día siguiente el sistema inicie su calentamiento a una temperatura superior.

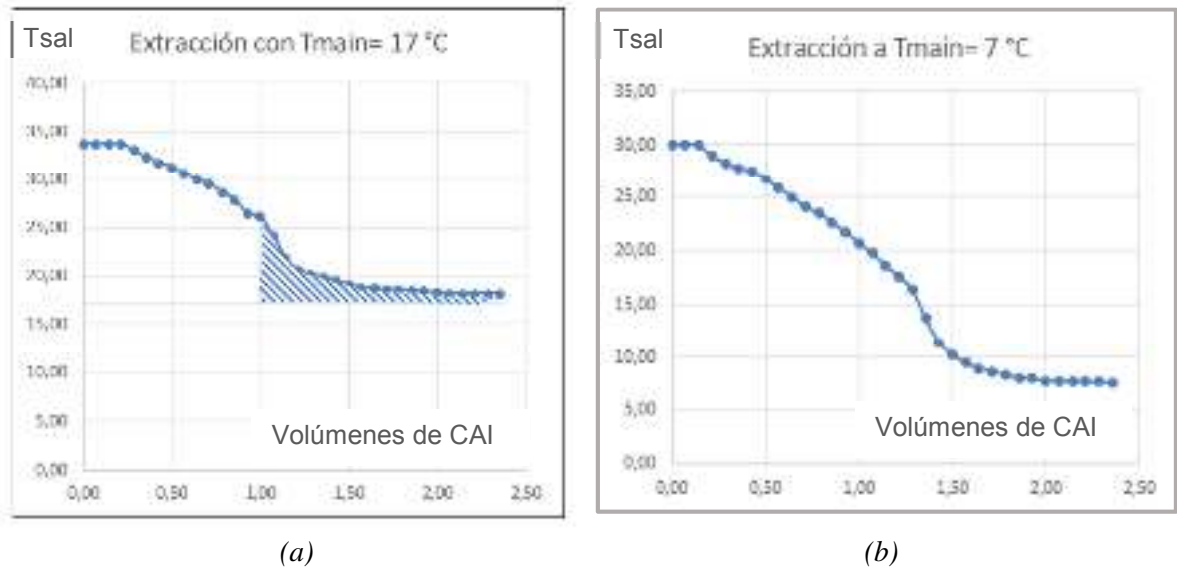


Figura 6. (a) Curva de descarga a  $T_{main}= 17$  °C, indicación de energía remanente en el CAI; (b) Curva de descarga a  $T_{main}= 7$  °C.

Con estas curvas de descarga se ha realizado la determinación de los coeficientes de la ecuación (1) mediante el método de los cuadrados mínimos, resultando los siguientes valores.

$$a_1 = 0,6169 \text{ m}^2 \quad ; \quad a_2 = 0,36885 \text{ MJ/}^\circ\text{C} \quad ; \quad a_3 = 10,54 \text{ MJ}$$

El coeficiente de pérdidas térmicas del CAI se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación prevista en la IRAM 210004

$$U_s = \frac{\rho_w c_f V_s}{\Delta t} \ln \left[ \frac{t_i - t_{as(av)}}{t_f - t_{as(av)}} \right] \quad (3)$$

Donde:

$U_s$ = Coeficiente global de pérdidas térmicas del CAI [w/K]

$\rho_w$  = Densidad del agua [kg/m<sup>3</sup>]

$c_f$ = Calor específico del fluido caloportador [J/K.kg]

$V_s$ = Capacidad del fluido en el depósito [litros]

$\Delta t$ = Intervalo de tiempo [s]

$t_i$  = Temperatura inicial del agua homogeneizada dentro del equipo [°C]

$t_f$  = Temperatura final del agua [°C]

$t_{as(av)}$  = Temperatura ambiente adyacente al CAI, promedio [°C]



Para el caso en estudio, los valores con los cuales se realizó el cálculo del coeficiente de pérdidas térmicas se muestran en la Tabla 2. Como se dijo antes, para computar las pérdidas nocturnas se ha de tener en cuenta el mezclado del líquido frío y caliente. Para ello se recurre a la realización de un experimento adicional denominado “mixing” (mezclado), mediante el cual se homogeneiza todo el equipo a una temperatura alta (mayor a 60 °C) y se le realiza un proceso similar al de descarga diaria, a una temperatura de entrada no superior a 30 °C.

Con todos estos elementos, siguiendo los lineamientos previstos en la norma se programó un algoritmo en Matlab para computar los 365 días del año, considerando el consumo de un volumen de tanque de agua diario. Para ello se tomaron los datos climáticos de la ciudad de Río Cuarto, y utilizando el generador de clima de TRNSYS, se confeccionó una base de datos de 8760 horas, que el programa codificado en Matlab interpola para estimar la energía total anual que puede proveer el equipo.

Temperatura de inicio	60,30	°C
Temperatura final	39,20	°C
Hora de inicio	18,45	Horas,minutos
Hora final	8,36	Horas,minutos
Fecha	22 y 23 de Julio	
Densidad del agua	1000,00	kg/m3
Capacidad calorífica	4186,00	J/kgK
Capacidad del fluido en el depósito	300,00	Litros
Intervalo de tiempo	50076,00	Segundos
Temperatura inicial del agua	60,30	°C
Temperatura final del agua	39,20	°C
Temperatura ambiente media	6,80	°C
<b>Coefficiente de pérdidas térmicas</b>	<b>12576,83</b>	<b>W/K</b>

Tabla 2: Datos medidos y utilizados para el cálculo del coeficiente de pérdidas térmicas.

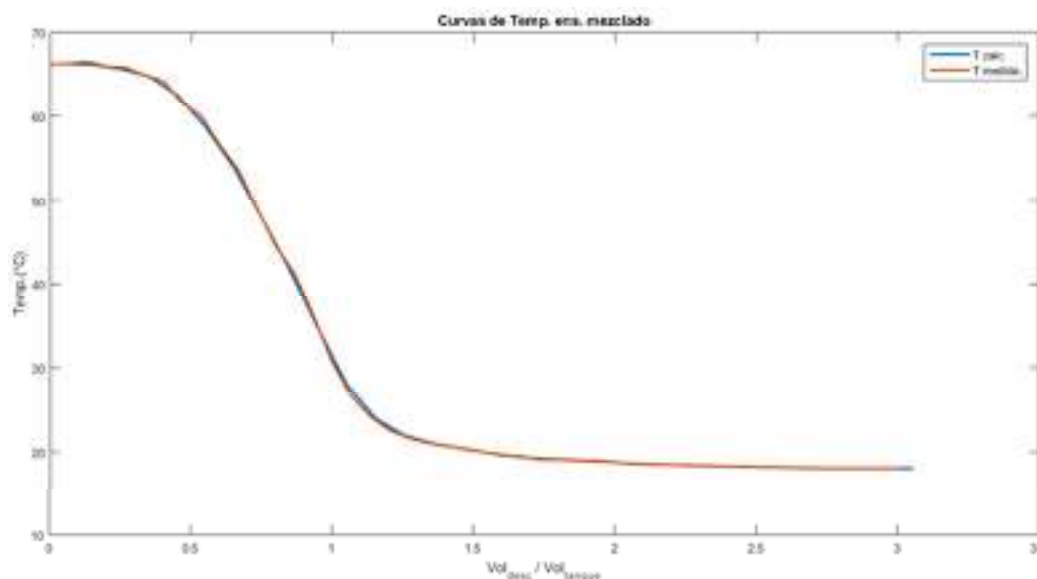


Figura 7. Curva de mezclado del CAI ensayado.

Finalmente, se puede estimar también mes a mes la provisión de energía de los equipos, teniendo en cuenta la ecuación de energía colectada y la evolución del equipo con sus pérdidas nocturnas. Esto se realiza en el mismo programa desarrollado. Así se pueden observar las fracciones solares mes a mes, y sumando los totales de energía demandada y energía provista por el sol, estimar también la Fracción Solar Anual. Se muestran los resultados en la Tabla 3, para un año típico de la ciudad de Río Cuarto. En la última fila se presentan los valores globales. Esta tabla no está prevista en la norma, como tampoco lo está el gráfico que sigue (Fig. 8), donde se representan con circulitos verdes aquellos días en que la provisión de energía para el agua caliente provino toda del sol y mediante circulitos azules

aquellos días en los cuales la energía solar fue insuficiente y debió incorporarse energía convencional para cubrir la demanda total de agua caliente.

mes	HT [MJ/m <sup>2</sup> ]	ta(day) [°C]	tmain [°C]	Q por mes [MJ]	demanda mensual	fracción solar mensual
Enero	20,26	24,03	18,03	782,9	839,7	0,93
Febrero	19,99	22,39	16,39	702,3	810,5	0,87
Marzo	18,46	21,32	15,32	748,3	934,6	0,80
Abril	17,15	17,33	11,33	700,0	1040,1	0,67
Mayo	15,07	12,43	6,43	683,5	1246,1	0,55
Junio	14,32	12,02	6,02	647,7	1219,9	0,53
Julio	13,91	10,41	4,41	661,3	1317,0	0,50
Agosto	16,38	11,51	5,51	708,7	1278,3	0,55
Septiembre	17,56	15,86	9,86	707,5	1089,9	0,65
Octubre	18,51	19,86	13,86	749,3	986,0	0,76
Noviembre	19,22	22,01	16,01	738,3	881,1	0,84
Diciembre	18,97	23,21	17,21	758,1	868,7	0,87
<b>Energías y fracción solar anuales →</b>				<b>8587,9</b>	<b>12511,9</b>	<b>0,69</b>

Tabla 3: Predicción de provisión de energía mensual y anual del CAI, de acuerdo al método de balances energéticos propuesto por la IRAM 210004.

La Tabla 3 y el gráfico de la Fig. 8 son complementarios en cierta forma. Si se observan las fracciones solares mensuales, se verá que son muy bajas en los meses invernales y solo en los meses más próximos al verano supera el 80 %, siendo el promedio anual de un poco menos del 70 %. Para un CAI es un valor bastante bueno, si se compara con el 80 % previsto para esta región para los equipos convencionales termosifónicos, de fabricación nacional o de tubos evacuados, importados que tienen almacenamiento aislado por separado.

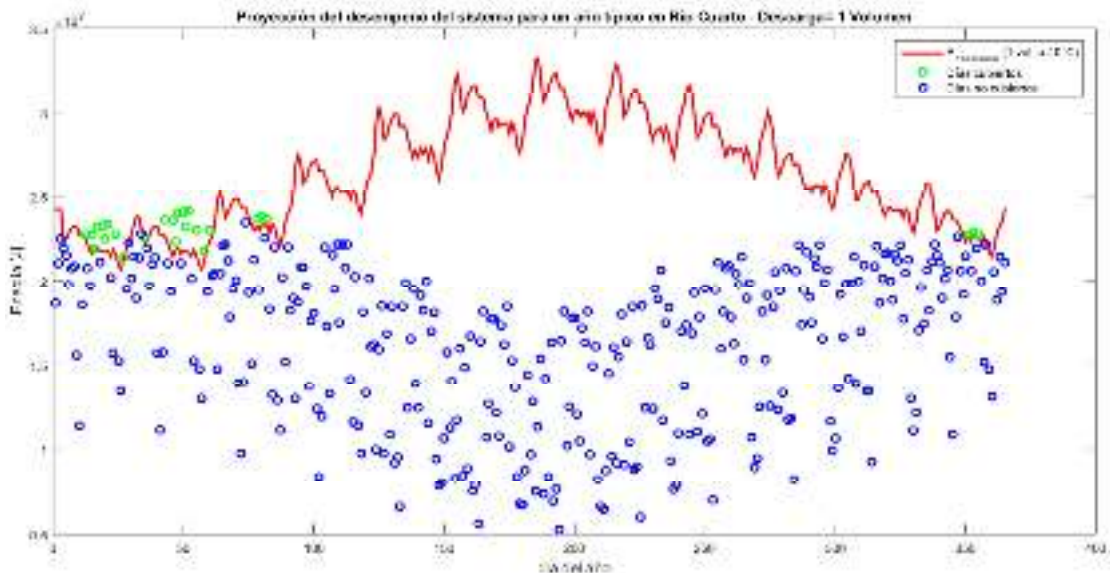


Figura 8. Representación gráfica de los días total y parcialmente cubiertos con energía solar.

Para analizar objetivamente el comportamiento del equipo, se le compara con otros CAIs monotanques, uno de sección oval y otro de perfil rectangular, ensayados bajo una norma equivalente por Lucchini et al. (2015). Tomando los datos constructivos de los tres equipos y con los mismos datos numéricos con que se confeccionan las gráficas como la de la Fig. 8 se les compara en términos de la energía promedio anual por metro cuadrado de captador (epa) y relación volumen/área (rva)s, dando los siguientes valores:

- Sección oval	epa= 8,11 MJ/m <sup>2</sup>	rva= 85,88 litros/m <sup>2</sup>
- Sección rectangular:	epa= 7,61 MJ/m <sup>2</sup>	rva= 104,6 litros/m <sup>2</sup>
- Parcialmente aislado	epa= 9,43 MJ/m <sup>2</sup>	rva= 137,5 litros/m <sup>2</sup>

Se ve entonces que el equipo desarrollado, aunque tiene una relación volumen/área mucho más grande que los anteriores, es capaz de captar más energía por metro cuadrado que los modelos anteriores, lo cual lo acerca a una prestación similar a la brindada por un equipo termosifónico tradicional.

## CONCLUSIONES

Las conclusiones de este trabajo atañen a dos aspectos: el desarrollo de un colector con acumulación integrada que es más efectivo que otros modelos para prevenir las pérdidas nocturnas y el análisis de las bondades que provee la aplicación de una norma para evaluar un equipo y permitir sacar conclusiones respecto a las posibilidades de mejora del mismo. Podemos por lo tanto decir:

- Se ha diseñado de un prototipo de colector con acumulación integrada con aislación parcial de su almacenamiento, que tiene mejores prestaciones frente a otros modelos de la misma familia.
- El proceso de fabricación es sencillo y se utilizan materiales de bajo costo, fácilmente obtenibles en el mercado local, lo cual hace pensar en una probable veta comercial del producto.
- Se han producido problemas de dilatación superiores a los previstos, que se podrían controlar fácilmente con adecuados refuerzos estructurales. Así, disminuyendo la relación Volumen-Área, sería posible mejorar los niveles de temperatura que alcanza el sistema (ecuación 2).
- Lo hecho remarca la importancia la utilización de Normas para poder realizar comparaciones objetivas de distintos equipos bajo las mismas condiciones de demanda.
- Las ecuaciones (1) y (2) son características propias del equipo que se ensaya, independientemente de las condiciones climáticas del lugar donde se les determinen.
- Esta norma no es una prueba del tipo pasa-no pasa, sino que brinda la posibilidad de estimar la cantidad de energía que puede proveer uno u otro equipo, lo cual es sumamente útil al momento de tomar una decisión de adquisición de un equipo, ya que los ahorros de energía son los que contabilizan para el cálculo de amortización del mismo.

Se plantea como investigación a futuro realizar un trabajo a campo con el equipo plenamente en uso, operando con las resistencias eléctricas como elementos de provisión de energía auxiliar, y durante un número prolongado de días seguidos, simulando el consumo de una familia. Adicionalmente, pensando en una aplicación concreta de uso residencial, también sería necesario el desarrollo de un sistema de control que permita la operación manual o automática del elemento que provee la energía auxiliar.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló en la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC). Ha sido subsidiado por la Secretaría de Ciencia y Técnica y la Facultad de Ingeniería de la UNRC. La Secretaría de Ciencia y Técnica de la UNRC también financia el trabajo de un becario de investigación, afectado a este proyecto.

## REFERENCIAS

- Alghoul M.A., Sulaiman M.Y., Azmi B.Z. y Abd. Wahab M. (2005) Review of materials for solar thermal collectors. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, Vol. 52, Nro 4, pp. 199–206.
- Barral J., Galimberti P., Lema A., Adaro J. y Fasulo A. (2002) Design, construction and simulation Analysis of a low-cost Tubular Integral Collector Storage System. *Proceedings de Euro Sun 2002 - The 4th ISES - Europe Solar Congress*. Bologna, Italia.
- Barral, J. R. Agua caliente sanitaria solar: avances legislativos, normativos y reglamentarios en la República Argentina. Seminario en la XLI Reunión de trabajo ASADES, Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente, Córdoba, Argentina, 2018.
- Cordi M., Sabre M., Bornancin M. (2016) Censo de energía solar térmica 2016. Mapa del sector en Argentina. Instituto Nacional de Tecnología Industrial - INTI.
- Fan J. y Furbo S. (2012) Buoyancy driven flow in a hot water tank due to standby heat loss. *Solar Energy*, Vol. 86, Nro 11, pp. 3438–3449.

- Fasulo A., Follari J., Barral J. Comparison between a simple solar collector accumulator and a conventional accumulator. *Solar Energy*, Vol. 71/6, pp 389-401, 2001.
- Garnica J.H, Lucchini J.M., Barral J.R. Colector solar con acumulación integrada de perfil oval, análisis teórico-experimental de su performance y estudio comparativo". *Actas del COCIM 2017, XVII Congreso Chileno de Ingeniería Mecánica*, Santiago de Chile, 2017, pp. 166-170.
- IRAM (2016) Métodos de ensayos exteriores para la caracterización y predicción del rendimiento anual de los sistemas solares, IRAM 210004. Instituto Argentino de Normalización y Certificación <<http://www.iram.org.ar/>>
- ISO (1995) Solar heating – Domestic water heating systems – Part 2: Outdoor test methods for system performance characterization and yearly performance prediction of solar-only systems, International Standard ISO 9459-2. International Organization for Standardization, Suiza.
- Kumar R y Rosen M. A. (2011) Integrated collector-storage solar water heater with extended storage unit. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, pp. 348-354.
- Koroneos C. J., Nanaki E. A. (2012) Life cycle environmental impact assessment of a solar water heater. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 37, pp. 154 - 161.
- Lucchini J. M., Garnica J. H., y Barral J. R. (2015) Comparación del comportamiento de dos colectores con acumulación integrada a partir de ensayos normalizados. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 19, pp. 03.67 – 03.78.
- Ministerio de Producción (2018) Resolución 520/18 Secretaría de Comercio, Reglamento Técnico para colectores solares y sistemas solares compactos para comercializar en Argentina.
- Nienborg B. (2010) El Mercado para Calentadores Solares en la Argentina – Estado actual, Rentabilidad, Potencial, Barreras y Posibles Soluciones. Tesis Master of Science Renewable Energy Management. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- Singh R., Lazarus I. J. y Souliotis M. (2016) Recent developments in integrated collector storage (ICS) solar water heaters: A review Article. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, pp. 270-298.
- Stoll R. G., Garnica J. H., Barral J. R., Fasulo A. J. (2007) Estudio del comportamiento de colectores con acumulación integrada de dos tanques con y sin descarga de agua caliente. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 11, pp. 3-53:3-60.
- SRCC [en línea] Solar Rating & Certification Corporation, SRCC Certification, Rating & Listing Directory. Washington, DC. Dirección URL: < <http://www.solar-rating.org/>> [consulta: 6 de febrero de 2019]
- Timilsina G. R., Kurdgelashvili L. y Narbel P. A. (2012) Solar Energy: Markets, Economics and Policies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, pp. 449-465.
- Zauner C., Lager D. y Hohenauer W. (2011) Thermophysical and spectroscopical characterization of new materials for solar thermal applications. *Actas de ISES Solar World Congress 2011*, Kassel, Alemania.

## **NORMALIZED THERMAL TEST OF AN INTEGRAL COLLECTOR STORAGE SYSTEM WITH PARTIAL INSULATION, MADE OF ACCESIBLE RAW MATERIALS AND SIMPLE MANUFACTURE**

**ABSTRACT:** This work shows the development of an integral collector storage system with a particular design for preventing nocturnal heat losses. This unit is thermally evaluated by using the IRAM 210004 standard. The main goal of the project was to obtain a low-cost solar equipment that offered better performance than similar models, thinking on covering the necessities of a domestic application. The essential characteristics of a first prototype are explained as well as the reasons that justify the geometry of its parts to match with the raw materials used. The thermal evaluation of the unit is made by a machine built by the same research team and a rigorous application of the mentioned standard is performed. The obtained results are shown by means of plots and tables, and the coefficients of the main equation are determined. This equation allows the estimation of the energy provided by the sun. An extra monthly calculation is added to the report to understand the Solar Fraction evolution, and a plot is provided to show the total or partial daily solar coverage of the demand. The prototype was compared with previous models tested by an equivalent standard, and an improvement is verified for this new unit.

**Keywords:** solar collector, integral storage, partial insulation, standard, thermal test.

## SECADO DE ZANAHORIA EN UN SECADERO SOLAR COMPACTO

García Victor<sup>1</sup>, Bistoni Silvia<sup>1</sup>, Iriarte Antonio<sup>1</sup>, Rugani Ana<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Energías Renovables Catamarca, INENCO – CONICET

<sup>2</sup>Becaria estudiantil

Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Catamarca

M. Quiroga N° 93, 4700 – Catamarca, Argentina. [victorgarcia958@gmail.com](mailto:victorgarcia958@gmail.com)

*Recibido 14/08/19, aceptado 21/10/19*

**RESUMEN:** El secadero solar compacto es un secadero indirecto en convección forzada. Está formado por dos módulos, uno sobre otro y conectados entre sí en uno de sus extremos. La parte superior contiene la placa absorbadora de la radiación solar; la parte inferior es la cámara de secado propiamente dicha, donde se ubican las bandejas con el producto a deshidratar. En el presente trabajo se muestran los resultados del secado de zanahoria en el secadero solar compacto. Se analizan las temperaturas del aire dentro del secadero, la cinética de secado y mediante ocho modelos matemáticos. Se ajustan los datos experimentales de las curvas de secado. De acuerdo a los criterios estadísticos ( $R^2$ , RMSE y  $\chi^2$ ) el modelo que mejor ajustó las curvas de secado fue el logarítmico. Se calculó la eficiencia global del sistema para el primer y segundo día obteniéndose valores de 32 % y 26 % respectivamente. El secadero compacto resultó técnicamente adecuado para el deshidratado de zanahorias.

**Palabras clave:** deshidratado, zanahoria, secadero solar forzado

### INTRODUCCIÓN

La zanahoria (*Daucus carota* L.) es conocida por su contenido de nutrientes, además de cantidades apreciables de B1, B2, B6 y B12 vitaminas y minerales. Es una hortaliza que tiene uno de los más altos niveles de carotenoides, siendo éste un precursor de la vitamina A, con gran interés por su papel como antioxidante.

La zanahoria deshidratada se utiliza como ingrediente en sopas instantáneas y en diferentes tipos de comidas, por lo que es importante que el valor nutricional se conserve durante el secado (Liu et al., 1992).

En los últimos años, Iriarte et al. (2013, 2014, 2015) ensayaron secaderos formados por tendaleros de 10 m de longitud, ancho de 1,8 m y de 16 m de longitud por el mismo ancho. Una desventaja que presenta este tipo de secadero, por ejemplo, cuando los productos a secar son aromáticas, es que provoca un cambio de color al recibir radiación solar directa. A fin de darle una solución a este inconveniente se decidió ensayar un secadero indirecto que estuviera formado básicamente por un tendalero que actuara como colector solar y la cámara de secado construirla debajo del colector, ambos con igual superficie.

En esta línea de investigación, Iriarte y Bistoni (2016) presentaron el diseño y simulación de un tendalero solar indirecto con flujo forzado. En la parte superior se ubicó el colector y debajo la cámara de secado, lo cual permite el secado de productos que se vean afectados por la radiación directa. El diseño fue analizado mediante el software Simusol. Este modelo permitió ajustar la longitud óptima del colector en 5,5 m. Siguiendo las pautas de diseño obtenidas por la simulación numérica se construyó un secadero solar compacto y se instaló en el campo experimental del INTA, Sumalao. Se realizaron ensayos sin carga de producto y se comparó los datos experimentales con los simulados por el mismo modelo de simulación que se utilizó para el diseño del equipo y se sugieren modificaciones en el ducto que une colector y secadero y en las aislaciones (Iriarte y Bistoni, 2018).

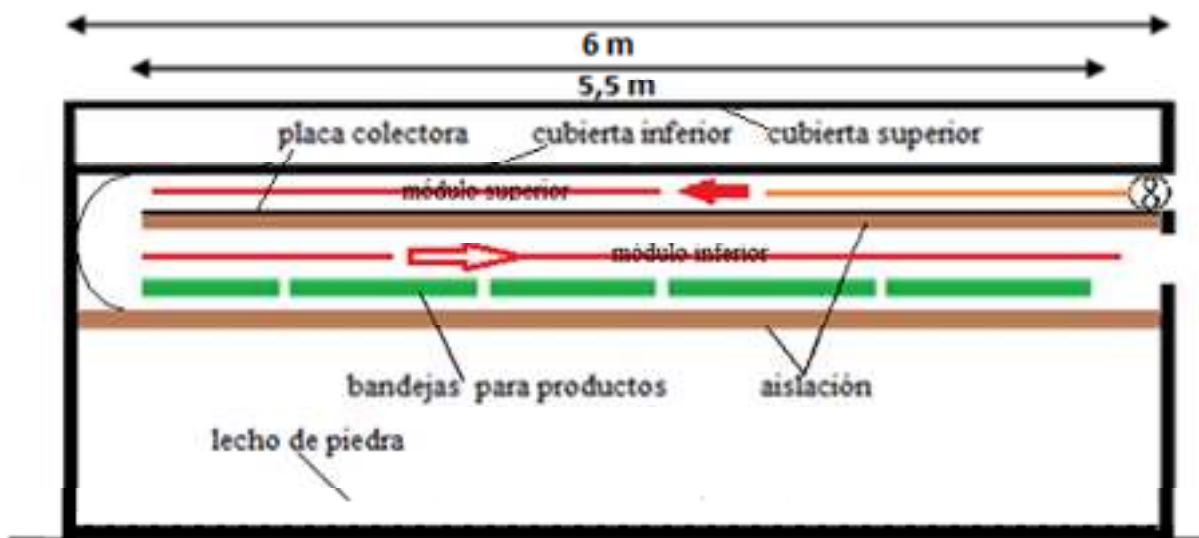
En el presente trabajo se muestran los resultados del secado de zanahoria en el secadero solar compacto, clasificado como secadero indirecto en convección forzada. Se analizan las variaciones de temperatura del aire dentro del secadero, la cinética de secado y se ajustan las curvas de secado mediante un modelo matemático.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### *Descripción del secadero solar*

El secadero está ubicado en el campo experimental del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Valle Viejo, Provincia de Catamarca (28,4732 S; 65,7307 O).

Está formado por dos módulos uno sobre otro y conectados entre sí en uno de sus extremos. El módulo superior contiene la placa absorbadora de radiación solar, ventiladores y las cubiertas que la aíslan del exterior; el módulo inferior es la cámara de secado propiamente dicha, donde se ubican las bandejas con el producto a deshidratar. En la Fig. 1 se muestra un esquema con los detalles de su diseño.



*Figura 1. Corte longitudinal del secadero solar compacto*

La placa absorbadora de 5,5 m de longitud y 1,8 m de ancho, está formada por una capa de lana de vidrio que posee una de sus caras aluminizada y está pintada de negro. Posee dos cubiertas: la inferior, plana, está a 10 cm de la placa colectora; la superior es una cubierta semicircular de altura máxima de 0,20 cm, cuyo eje es paralelo al flujo de aire y está en contacto con el exterior. La doble cubierta permite proteger al colector de los vientos de la zona y obtener mayor aislación en la parte superior. Ambas son de plástico (LDT). El aire, con un flujo promedio de 0,17 Kg/s, es impulsado por tres ventiladores de 45 W cada uno, a través del ducto que forma la placa absorbadora y la cubierta inferior.

La cámara de secado es un conducto de 1,8 m de ancho y aproximadamente 0,13 m de alto, delimitada en la parte superior por la aislación de la placa y en la inferior por la aislación de la cámara de secado ubicada debajo de las bandejas. Las 10 bandejas están a 5 cm de la parte superior de la cámara y se colocan en la cámara por ambos laterales. Estos espacios son cerrados mediante puertas rebatibles de placas cementicia de “super board” de 4 mm.

En el suelo, debajo del secadero, se colocó un plástico negro para evitar el crecimiento del pasto y sobre el mismo se puso ripio, con el propósito de acumular parte del calor que pierde el sistema en la parte inferior. Desde las puertas de acceso a las bandejas hasta la superficie de tierra se cubrió con un plástico negro para protegerlo de los vientos. En la figura 2 se muestra el secadero construido.





*Figura 2: Vista del secadero solar compacto*

*Instrumentos utilizados para las mediciones experimentales*

Las mediciones de temperatura del aire de entrada y salida del secadero se midieron con termopares de cobre-constantán y se usaron HOB0 4- canal thermocouple Logger, que permiten medir temperaturas en el rango de - 40 °C a 75 °C (precisión de  $\pm 0,5$  °C, resolución de 0,02 °C). Los sensores se ubicaron a lo largo del sistema en la dirección del flujo de aire. Los registros fueron cada 15 minutos durante el ensayo.

La radiación solar se midió con un piranómetro horizontal Kipp & Zonen ( $\pm 5$  %). Las variables meteorológicas se determinaron con la estación meteorológica instalada en el lugar de la experiencia. La velocidad del aire dentro del secadero fue medida con un anemómetro de hilo caliente TSI 8345 ( $\pm 0,05$  m s<sup>-1</sup>), en diferentes puntos en dirección transversal y a lo largo del colector y secadero.

*Determinación de curvas de secado*

Para la evaluación del secadero se utilizó zanahoria de la variedad Chantenay, fueron adquiridas en un comercio local; se cortaron manualmente en rodajas circulares de aproximadamente 5 mm de espesor y no se las sometió a ningún tratamiento.

Para determinar el contenido inicial de humedad de la zanahoria se colocaron tres muestras en estufa a 104 °C hasta obtener peso constante. Para determinar las curvas de secado se colocaron dos muestras por cada bandeja, se las pesó cada hora retirándolas del secadero y se consideró el promedio por bandeja. Para pesar las muestras se utilizó una balanza electrónica con apreciación 0,1g.

Se calculó la eficiencia global del sistema para un secadero en convección forzada mediante la ecuación 1 (Augustus Leon et al., 2002):

$$\eta = \frac{W L_v}{I A t + P_f} \quad (1)$$

Donde:

$P_f$ : es la energía consumida por los ventiladores en kWh;

$W$ : es la masa de agua evaporada (kg) en el tiempo  $t$ ,

$L_v$ : calor latente de evaporación del agua (kJ kg<sup>-1</sup>),

$I$ : radiación solar por unidad de área de colección (W m<sup>-2</sup>)

$A$ : es el área de colección (m<sup>2</sup>)

$t$ : es el tiempo de secado (s).

Para la determinación de los modelos que ajustan las curvas de secado experimentales, se utilizaron las expresiones matemáticas detalladas que se muestran en la Tabla 1 (Seiedlou et al., 2010).



Nombre Modelo	Ecuación del modelo
Newton	$MR = \exp(-k t)$
Page	$MR = \exp(-k t^n)$
Page modificado	$MR = \exp[-(kt)^n]$
Henderson – Pabis	$MR = a \exp(-k t)$
Logarítmico	$MR = a \exp(-k t)+c$
Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n)+bt$
Wang &Singh	$MR = 1+at+bt^2$
Aghbashlo	$MR = \exp[-k_1 t/(1-k_2 t)]$

Tabla 1. Modelos matemáticos empleados para describir la cinética de secado

La relación de humedad se calculó mediante la ecuación (2)

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

donde  $M_t$  es el contenido de humedad en el tiempo  $t$  en base seca (bs) y  $M_0$  contenido de humedad inicial en base seca.

El análisis de regresión se realizó con el software estadístico Infostat versión 2018. El coeficiente  $R^2$  fue uno de los criterios para la selección de la mejor ecuación. Además, para determinar el mejor ajuste se utilizaron los índices estadísticos chi-cuadrado reducido ( $\chi^2$ ), desviación media (MBE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE). El modelo más adecuado para ajustar las curvas de secado se determinó considerando el valor más alto de  $R^2$  y los valores más bajos de  $\chi^2$  y RMSE. Por otro lado, se desecharon los modelos en que las variables no difieren significativamente de cero (coeficiente de confianza 0,95) y aquellos en que la correlación de los coeficientes estimados no fue superior a 0,80. Los índices estadísticos se calcularon con las siguientes ecuaciones:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N - n} \quad (3)$$

$$MSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

## RESULTADO

El secado se realizó durante el mes de mayo. Se colocaron 46 kg de zanahoria cortadas rodajas, distribuidas en 10 bandejas, cinco del lado N (identificadas con números pares) y cinco del lado Sur (identificadas con números impares) del secadero, obteniendo 4,9 kg de zanahoria deshidratada, figura 3. Los ventiladores funcionaron durante la noche.

Durante la experiencia de secado la temperatura del aire exterior,  $T_{ext}$ , varió en el primer día entre 10,1 °C y 26,4 °C a las 15,45 h; el segundo día entre 14 °C y 24,5 °C a las 14,30 h, el tercer día entre 16 °C y 24,4 °C y entre 16 °C y 23,4 °C el cuarto día. La irradiación fue aproximadamente de 12 MJ m<sup>-2</sup> para los cuatro días de secado, valor aceptable para el mes de mayo. Como se advierte en la figura 4 el valor máximo de la temperatura del aire a la entrada del secadero,  $T_{e,S}$ , fue en promedio de 48 °C. En los dos primeros días la variación de temperatura del aire entre entrada,  $T_{e,S}$ , y salida del secadero,  $T_{s,S}$ , fue de 11,85 °C y 12,5 °C, respectivamente y en el tercero y cuarto día esta variación fue de 10,17 °C y 9,70 °C respectivamente. Si bien es de esperar que por enfriamiento evaporativo haya una disminución en la temperatura del aire cuando circula sobre el producto, se considera que es necesario disminuir la variación de la temperatura del aire entre entrada y salida del secadero.



Figura 3.- Carga de zanahoria cortada en rodajas

La humedad relativa ambiente exterior, HR,ext, estuvo en promedio a 28 % durante las horas de sol y mientras que durante la noche del primer día alcanzó un valor promedio de 80 %, durante la segunda noche 60 % y durante la tercera noche un valor promedio de 65 %.

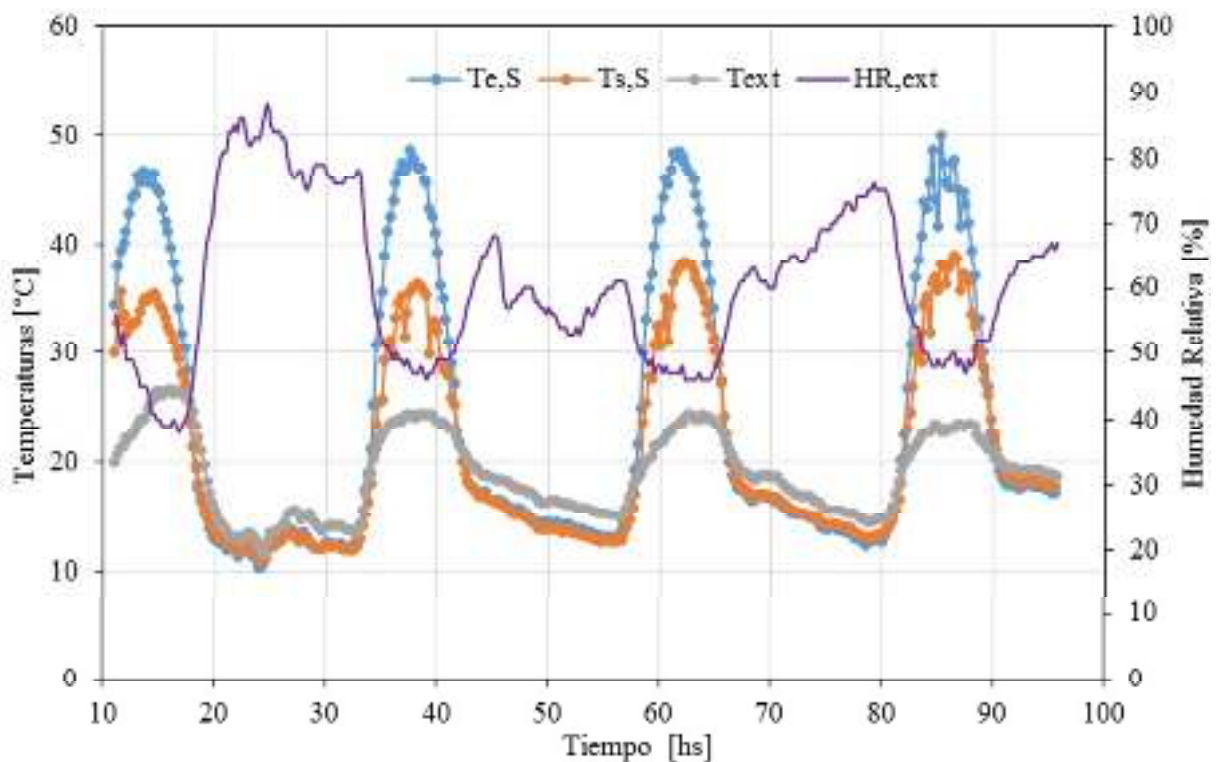


Figura 4.- Temperaturas del aire exterior, entrada y salida de secadero y humedad relativa exterior

En la figura 5 se muestran las curvas de secado, excluyendo la noche, para las muestras colocadas en las bandejas 1,2, 3, 5, 8, 9 y la curva de secado promedio.

El tiempo necesario para el secado, desde un contenido de humedad inicial de 8,47 g de agua/g materia seco a un contenido de humedad final de 6 % (bs) estuvo entre tres y cuatro días, según la ubicación de las muestras. Si se excluyen las horas de noche, el tiempo de secado para bandeja 1 fue 18 h y entre 21 y 23 h para las bandejas 8 y 9. Esta diferencia en los tiempos de secado entre las bandejas ubicadas

próximas a la entrada al secadero y a las de las salidas se debe principalmente a la diferencia de temperatura del aire entre entrada y salida del secadero, observada en la figura 4.

Para el ajuste del modelo matemático se consideró la relación de humedad (MR) para el promedio de las 10 bandejas. En la Tabla 2 se muestran los modelos que cumplieron los criterios fijados anteriormente. En todos los casos los valores de  $R^2$  variaron entre 0,976 y 0,986 y los de  $\chi^2$ , RMSE y MBE entre 0,00138 y 0,00211 y entre 0,03485 y 0,04502 respectivamente.

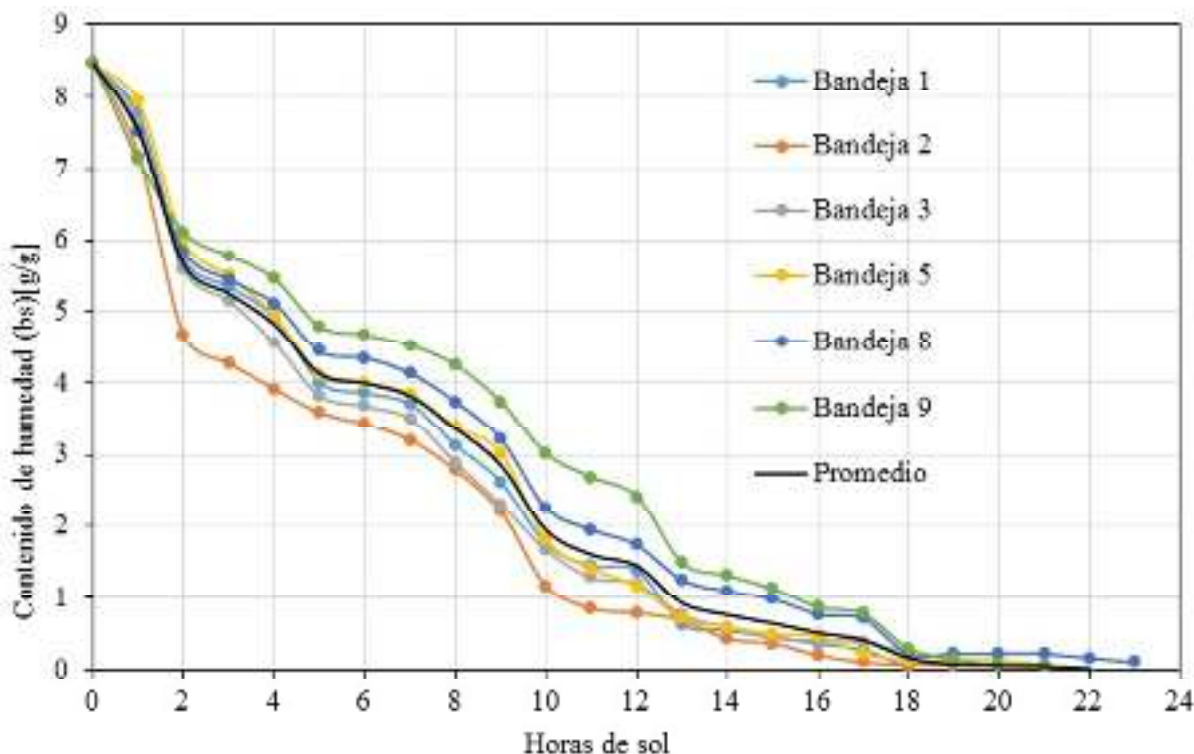


Figura 5. Curvas de secado por bandejas

Modelos	$R^2$	$\chi^2$	RMSE
Newton	0,976	0,00211	0,04505
Henderson y Pabis	0,976	0,00221	0,04502
Wang & Singh	0,977	0,00215	0,04439
<b>Logarítmico</b>	<b>0,986</b>	<b>0,00138</b>	<b>0,03485</b>

Tabla 2 Resultados del análisis estadístico

Los coeficientes obtenidos a partir del ajuste logarítmico  $MR = a.exp(-kt) + c$  fueron:

$$k = 0,113 \pm 0,010$$

$$a = 1,071 \pm 0,032$$

$$c = -0,102 \pm 0,034$$

Como la eficiencia de secado varía significativamente con el contenido de humedad del producto, se calculó la eficiencia del global del secadero para el primer día y el segundo día de secado dando los valores de 32 % y 26 % respectivamente. El producto deshidratado presentó una buena calidad sensorial.

## CONCLUSIONES

El secado de zanahoria utilizando energía solar, es una opción viable en zonas con características ambientales de elevada radiación solar, siendo un proceso de bajo costo operacional.

La temperatura y humedad del aire en un proceso de secado con energía solar, son variables dependientes de las condiciones meteorológicas, por lo cual es necesario un sistema de control durante el proceso de secado que permita encender y apagar los ventiladores.

El secadero compacto demostró ser apto para obtener productos deshidratados porque permitió reducir el tiempo de secado y mejorar la calidad del producto final.

Si bien los niveles de temperatura sobre las bandejas son aceptables, es conveniente mejorar el diseño a fin de aumentar la velocidad de circulación sobre el producto en la cámara de secado. Como el recorrido del aire desde los ventiladores del colector hasta la salida del secadero es de 12 m, conviene incorporar dos ventiladores - extractores a la salida. Además, será ventajoso considerar la incorporación de un sistema de calentamiento auxiliar para evitar el aumento de humedad dentro del secadero durante la noche.

El modelo de secado logarítmico, se consideró el mejor modelo para describir el comportamiento del secado de la zanahoria cortada en rebanadas por tener el valor más alto de  $R^2$  y los valores más bajos de RMSE y  $\chi^2$ .

## REFERENCIAS

- Augustus Leon M., Kumar S. y Bhattacharya, S.C (2002), A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food driers, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(4), 367-393.
- Iriarte A. y Bistoni S. (2016). Diseño y simulación de un secadero solar doble paso para productos especiales. Acta de la XXXIX Reunión de Trabajo de la Asociación, Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 4, pp. 08.01-08.11.
- Iriarte A., Bistoni S., García V. y V. Luque, (2018) Ensayo y simulación de un secadero solar compacto, Acta de la XLI Reunión de Trabajo de la Asociación, Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 4.
- Iriarte A., Bistoni S., García V., Luque V. (2013). Evaluación de un secadero solar tendalero túnel: estudio de secado de manzanas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 17, pp. 21-28.
- Iriarte A., García V. y Bistoni S. (2015). Ensayos y simulación de un nuevo tendalero solar activo tipo túnel. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 19, pp.02.29-02.38.
- Iriarte A., Rodríguez C., Bistoni S., Hall M. (2014). Simulación de un secadero solar tendalero túnel: Caracterización y optimización. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 2014 Vol.18 pp. 825 – 834.
- Liu, J. R., Jeon, J. H., Yang, S. G., Lee, H. S., Song, N. H., & Jeong, W. J. (1992). Dry type of carrot (*daucus carota* L.) artificial seeds. *Scientia Horticulturae*, 51(1-2), 1-11.
- Seiiedlou S., GhasemzadehH., Hamdami N., Talati F.y Moghaddam M., 2010, Convective Drying of Apple : Mathematical Modelling and Determination of some Quality Parameters, *International Journal of Agriculture & Biology*, 12, 171-172. Recuperado de [http:// www. Fspublishers .org](http://www.Fspublishers.org).

## CARROT DRYING IN A COMPACT SOLAR DRIER

**ABSTRACT:** Compact solar dryer is an indirect forced convection dryer. It consists of two modules connected to each other at one end. The upper part contains the solar radiation absorber plate; the lower part is the drying chamber itself, where the trays with the product to be dehydrated are located. This work shows the results of carrot drying in the compact solar dryer. Air temperature within the dryer and drying kinetics are analyzed. In order to select the appropriate drying model, eight mathematical drying models were fitted to the experimental data. According to the statistical criteria ( $R^2$ , RMSE y  $\chi^2$ ) the Logarithmic model was found to be the best model to describe the drying curves. The overall efficiency of the system for the first and second day were calculated, obtaining values of 32 % y 26 % respectively. The compact dryer was found to be technically suitable for drying of carrots.

**Keywords:** drying, carrot, forced solar dryer

## CONSTRUCCIÓN Y ENSAYOS DE UN HELIÓSTATO DE FOCO LINEAL PARA UN HORNO SOLAR #

**C. Placco, M. Gea, R. Casimiro, M. Hongn, C. Fernández, H. Suligoy, D. Lacuadra**

Instituto de Investigación en Energías No Convencionales (INENCO)

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – Universidad Nacional de Salta

e-mail: [cplacco@gmail.com](mailto:cplacco@gmail.com)

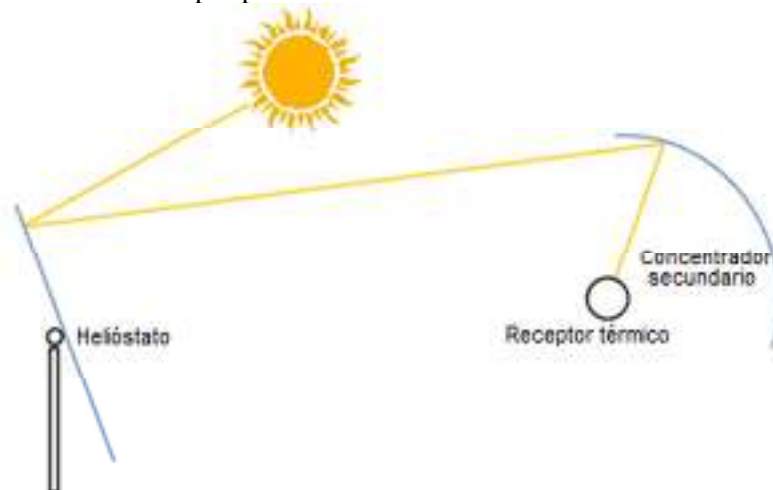
*Recibido 16/08/19, aceptado 23/10/19*

**RESUMEN:** Se construyó un heliostato para un horno solar destinado a procesamiento de minerales a altas temperaturas utilizando un diseño que tiene la particularidad de lograr la concentración de la radiación solar en un foco lineal. Se realizó un sistema de canteo de las facetas y se desarrolló una técnica de flexión para lograr el enfoque lineal. Se montó un sistema electromecánico para el movimiento en dos ejes con innovaciones en el circuito de seguimiento automático. Se elaboró un método indirecto para la determinación del flujo solar incidente sobre una pantalla, con el uso de termografía infrarroja. Se realizaron ensayos de concentración de la radiación y se determinó la eficiencia óptica del heliostato a través de la medición del flujo concentrado.

**Palabras clave:** energía solar térmica, concentración solar, horno solar, heliostato, medición de flujo solar concentrado.

### INTRODUCCIÓN

Los hornos solares pertenecen a la rama de los sistemas termosolares de concentración. Estos hacen posible la obtención de altas relaciones de concentración mediante el empleo de varias etapas. Así se logran temperaturas muy elevadas en el receptor, que se sitúa en el foco o en las proximidades de éste. Normalmente estos sistemas están compuestos por uno o varios heliostatos, un concentrador secundario y un receptor térmico (Figura 1). Para la regulación de la radiación sobre el receptor suele emplearse un atenuador constituido por pantallas rebatibles.



*Figura 1: Esquema de un Horno Solar de alta temperatura*

# Trabajo parcialmente financiado por el Consejo de Investigaciones de la UNSa y por la Secretaría de Políticas Universitarias a través de un programa de la Convocatoria Agregando Valor en las Universidades 2017.

El trabajo presentado en este artículo se encuentra enmarcado en un proyecto que consiste en el desarrollo de la tecnología de horno solar para procesamiento de minerales a altas temperaturas a través de la construcción y optimización de un prototipo de concentrador solar térmico. La particularidad del diseño de horno solar propuesto es que tanto los helióstatos como el concentrador secundario se diseñaron con un foco lineal. Esto se debe a que en los ensayos preliminares los minerales se procesaron en recintos cilíndricos rotativos que permiten la circulación y el tamizado de los mismos. Con el objeto de ampliar las aplicaciones del sistema, se plantea utilizar el horno para calentar fluidos térmicos, como aceites o sales fundidas para desarrollar equipos con acumulación térmica.

Durante el año anterior se obtuvieron los primeros resultados, tanto en aspectos conceptuales como experimentales (Placco et al., 2018). Se diseñó un helióstato compuesto por 8 facetas cuyo esquema se muestra en la figura 2. Se probaron los mecanismos de canteo y flexión de los espejos. Mediante un análisis con traza de rayos y la realización de estudios experimentales con una faceta se pudo comprobar el buen funcionamiento del sistema de concentración del flujo solar para distintas posiciones del helióstato respecto al absorbedor.

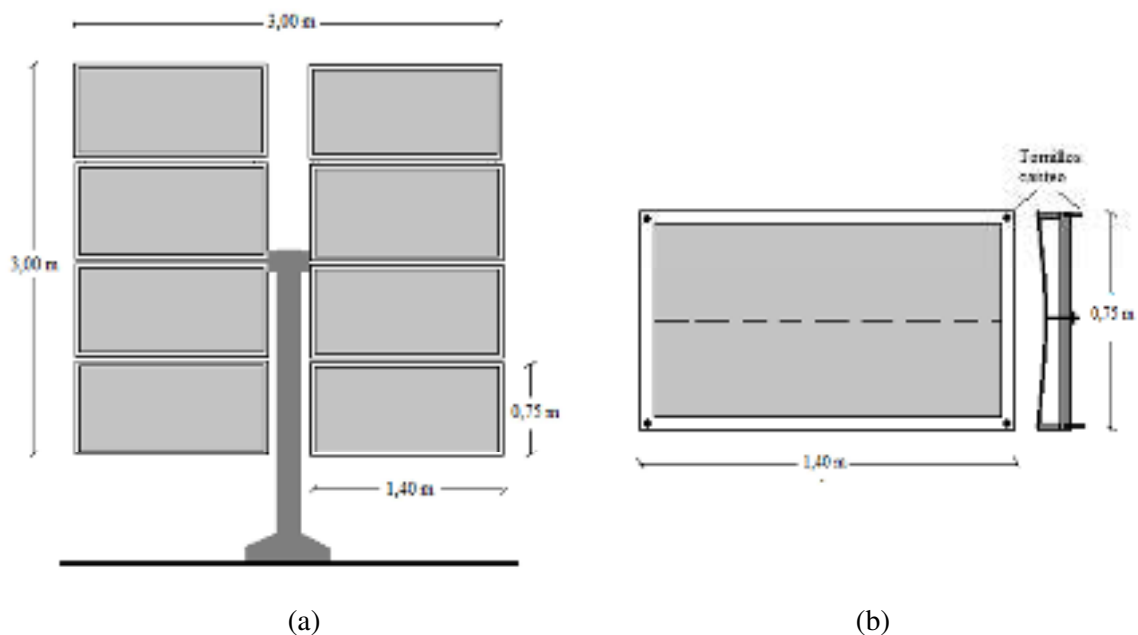


Figura 2: a) Esquema del helióstato de 8 facetas. b) Sistema de canteo de facetas y flexión de espejos

En el mencionado trabajo también se presentaron las ecuaciones que permiten determinar los ángulos de inclinación  $\beta$  y azimutal  $\gamma_p$  de cada helióstato. Con el conocimiento de estos ángulos fue posible calcular el ángulo de incidencia de la radiación sobre cada plano en cada instante y el valor de la radiación incidente sobre el helióstato.

Con estas ecuaciones se desarrolló una rutina de cálculo para controlar el movimiento de motores paso a paso. Se diseñó y construyó un sistema electrónico para el control numérico de los pasos de los motores para el seguimiento solar en dos ejes y para rebatimiento del helióstato ante alarmas de ráfagas de viento intensas. Se ensayó el sistema a través de un prototipo de pequeña escala.

Para la evaluación de la energía que puede coleccionar un campo de helióstatos y la estimación de su eficiencia óptica se desarrolló un programa computacional que permite evaluar distintas geometrías del campo de reflectores, dimensionar un horno solar y encontrar la configuración que minimice las pérdidas ópticas.

En el presente trabajo se muestran los avances logrados en el último período que consisten en la construcción del helióstato con 8 facetas, los ensayos de concentración de la radiación y la determinación de la eficiencia óptica del sistema. Se describen en este artículo los componentes y los



pasos constructivos del heliostato y el desarrollo de un método de medición indirecta del flujo solar concentrado mediante el empleo de termografía infrarroja.

### *Termografía*

La termografía infrarroja es una metodología no invasiva para la determinación de perfiles y/o mapas térmicos a través del uso de cámaras termográficas. Dichas cámaras cuentan con una matriz de sensores que detectan la energía radiante emitida por el objeto de interés, generalmente en un rango restringido de longitudes de onda. Con la radiación medida, mediante la aplicación de la ley de Planck se calculan indirectamente los valores de temperaturas.

Actualmente en las cámaras termográficas más utilizadas son las de array de microbolómetros no refrigerados. Esta tecnología se basa en el uso de materiales policristalinos o amorfos, como el óxido de vanadio (VOx) o silicio amorfo (a-Si) (Rogalski, 2011). Estos sensores producen una señal eléctrica medible  $S_{med}$  (voltajes, corrientes, número de cuentas, etc.) que es proporcional a la radiación recibida por el sensor.

Para objetos opacos, la señal eléctrica  $S_{med}$  incluye el aporte proveniente de tres fuentes: la radiación emitida por la muestra, la radiación del entorno que es reflejada por la muestra, y la radiación emitida por el mismo aire ambiente. Este balance se escribe en la ecuación 1 (Gaussorges, 1981).

$$S_{med} = \tau_a \varepsilon_m S_0(T_m) + \tau_a (1 - \varepsilon_m) S_0(T_{al}) + (1 - \tau_a) S_0(T_a) \quad (1)$$

donde  $S_0(T)$  es la señal de tensión producida por el sensor cuando incide radiación proveniente exclusivamente de un cuerpo negro a temperatura  $T$ ,  $\tau_a$  es la transmitancia efectiva de la atmósfera en el rango del detector,  $\varepsilon_m$  es la emisividad efectiva de la muestra en dicho rango,  $T_{al}$  es la temperatura media radiante del entorno (K),  $T_a$  la temperatura del aire (K) y  $T_m$  la temperatura de la muestra (K).

La cámara almacena la imagen termográfica como un archivo de datos radiométricos que se traducen a datos de temperatura cuando el usuario ingresa los valores de  $\varepsilon_m$ ,  $T_a$  y  $\tau_a$  en el software proporcionado por el fabricante.

## **CONSTRUCCIÓN DEL HELIÓSTATO**

### *Facetas*

A fin de comenzar a desarrollar un prototipo industrial para la transferencia de tecnología, se completó la construcción del heliostato cuadrado de 3 m de lado, constituido por 8 facetas. Tanto para los marcos externos como para los bastidores de las facetas se utilizó caño estructural. Las facetas están vinculadas al marco del heliostato mediante cuatro tornillos regulables que permiten dar una orientación distinta a cada una de ellas para lograr un grado de concentración inicial (canteo).

Las facetas se completaron con el pegado de espejos de 3 mm de espesor y la construcción del sistema de deformación por flexión de cada uno. Esto permite la concentración de rayos, *non image*, en un foco lineal. El dorso de cada faceta está cubierto por chapa galvanizada ondulada para proteger el espejo del granizo en la posición horizontal de reposo. El área de cada espejo es de 1,01 m<sup>2</sup> y el área total de reflexión es de 8,1 m<sup>2</sup>. Los detalles constructivos se pueden observar en la Figura 3.



Figura 3: Foto del heliostato donde se observan las 8 facetas.

*Sistema electromecánico:*

El sistema electromecánico del heliostato está constituido por dos conjuntos de motor-reductor-transmisión del movimiento. Uno corresponde al movimiento alrededor del eje vertical, para controlar el azimut, y otro al movimiento alrededor del eje horizontal, para controlar la inclinación. Ambos sistemas están montados sobre un pie vertical de 2 m de altura que se empotra en el piso. Las características de los motores paso a paso se detallan en la tabla 1.

Marca: MotionKing	Brida: Standard Nema 24
Cuerpo: cuboide	Longitud de cuerpo: 90 mm
Eje diámetro: 8 mm cilíndrico	Eje largo: 19 mm
Peso: 1300 g	Número de cables: 8
Conexión Bipolar Serie	Resolución mecánica: 1.8° por paso
Corriente de fase bipolar: 2.2 A	Resistencia de fase bipolar: 2.8 $\Omega$
Inductancia de fase bipolar: 12.8 mH	Cupla de mantenimiento bipolar: 3 Nm

Tabla 1: Características de los motores paso a paso

Los motores están acoplados a reductores tipo NRV040 con armazón de aleación de aluminio fundido, tornillo sinfín en acero cementado y corona de bronce con relación de transmisión 1:100 con par de salida máximo de 444 Nm, ejes a 90° e irreversibilidad estática en el eje lento.

El movimiento alrededor del eje vertical es transmitido desde el reductor a través de un piñón que engrana en una corona de arranque de auto. Sobre ésta se fija una plataforma donde apoya el conjunto que controla el movimiento alrededor del eje horizontal. En este caso, se utiliza como transmisión un sistema de coronas y cadena, como se muestra en la figura 4.



*Figura 4: Mecanismo para movimiento en dos ejes*

#### *Seguimiento automático*

El helióstato cuenta con un seguidor electrónico de dos ejes, azimut - elevación, de programación astronómica. Este desarrollo, que fue descrito en una publicación anterior (Casimiro et al., 2018), está compuesto por un microcontrolador que realiza el control del sistema, una placa *CNC shield* encargada de dar soporte físico a los dos drivers de motores paso a paso tipo A4988, un reloj de tiempo real DS3231 y dos sensores ópticos tipo horquilla FZ0888 encargados de señalar la posición inicial para cada eje (*homing*).

Sobre el sistema mencionado se realizaron algunas modificaciones con el objetivo de lograr fiabilidad y robustez en su funcionamiento. Se ensayó en laboratorio un prototipo para el movimiento de dos motores Nema 17 y un espejo pequeño (Figura 5). Se reemplazó la placa Arduino por un microcontrolador STM32F103C8T6 de 32 bits, que posee una velocidad superior (72Mhz) y contiene un CPU ARM Cortex M3 y un Reloj en Tiempo Real (RTC) embebido. Este circuito integrado posee además un Sistema Operativo en Tiempo Real (RTOS) que en general es utilizado para circunstancias críticas en las cuales se debe minimizar la existencia de fallas. En este caso, el RTOS, fue programado para el rebatimiento de los helióstatos frente a fuertes ráfagas de viento con el objeto de evitar daños en las estructuras y en los espejos.

Con la incorporación de un módulo ESP8266 con protocolo TCP/IP integrado, se pudo establecer un sistema de conexión inalámbrica. La comunicación en tiempo real entre el controlador, los sensores de condiciones meteorológicas y los helióstatos permite monitorear el correcto funcionamiento del tracking de los reflectores, además de actuar sobre su posición frente a condiciones meteorológicas adversas.



*Figura 5: Prototipo en pequeña escala para ensayos del nuevo sistema de seguimiento solar*

## MEDICION DEL FLUJO SOLAR CONCENTRADO

Durante los últimos años las mediciones de flujo solar concentrado, tanto en prototipos como en gran escala, han sido realizadas principalmente por dos tipos de métodos: los directos y los indirectos (Röger et al., 2014). Los métodos directos consisten en el uso de sensores de radiación, los cuales pueden estar montados en una barra móvil que recorre el área del receptor, o estar fijos y distribuidos en dicha área. El método indirecto consiste en el uso de una cámara CCD que toma imágenes de una pantalla refrigerada, con superficie de reflexión difusa, móvil o estacionaria. Luego éstas se procesan aplicando un factor de escala y vinculando los tonos de grises con una medición realizada con radiómetro.

Los métodos directos son lentos, costosos y proveen un mapa del flujo con baja resolución espacial. Sin embargo, mediante su aplicación se obtiene un valor absoluto del flujo de calor incidente y no requiere escala externa. Los métodos indirectos son más rápidos, económicos y generan mapas de flujo de alta resolución pero dependen de un buen uso del factor de escala y de la refrigeración de la pantalla.

Tomando como base la técnica desarrollada por Pozzobon y Salvador en 2015, en este trabajo se propone un método rápido y sencillo para determinar in situ el mapa de distribución del flujo de calor concentrado. El mismo se basa en la utilización de los valores de temperatura de una pantalla, obtenidos a partir de imágenes termográficas.

La determinación de la distribución de flujo de calor en una superficie absorbadora es un problema generalizado que se presenta en la industria. Entre los diversos métodos que se han desarrollado para su determinación, el llamado *problema inverso de la conducción de calor* resulta de interés para ser aplicado en nuestro caso.

El problema clásico de transferencia de calor consiste en la determinación de un campo de temperaturas a partir de datos conocidos como condiciones de contorno, fuente de calor y propiedades del material. Este se denomina problema directo. Por el contrario, el problema inverso consiste en la determinación de las condiciones de contorno, flujo de calor, coeficientes de transferencia y/o propiedades del material a partir de mediciones de temperatura.

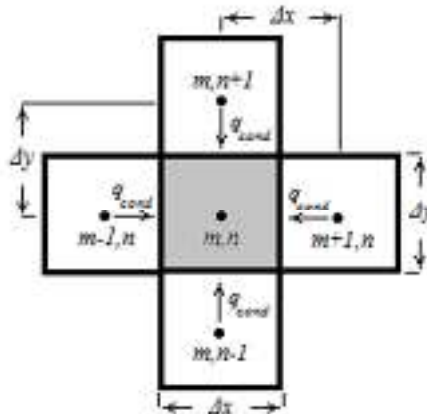


Figura 6: Transferencia conductiva en un volumen de control

Se plantea una discretización de la pantalla en elementos  $(m, n)$  de dimensiones  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  y espesor  $e$ . Como la dirección de los flujos de calor conductivos  $q_{cond}$  son en principio desconocidos, se realiza la suposición de que éstos entran en el nodo (figura 6). El elemento recibe el flujo solar concentrado e intercambia calor con sus alrededores por convección y radiación.

Considerando el principio de conservación de la energía en un volumen de control diferencial isotérmico se obtiene:

$$(1 - \rho) q_{sol} + \Sigma q_{cond} + q_{conv} + q_{rad} + m c_p dT_{m,n}/dt = 0 \quad (2)$$

$q_{sol}$  es la radiación solar concentrado que incide sobre el elemento ( $W$ ).

$\rho$  es la reflectancia solar de la superficie.

$q_{cond}$  es el calor conductivo intercambiado con los elementos vecinos ( $W$ ).

$q_{conv}$  es el calor intercambiado por convección por el elemento con el aire ambiente ( $W$ ).

$q_{rad}$  es el calor intercambiado por radiación por el elemento con los alrededores ( $W$ ).

$m$  es la masa del elemento ( $kg$ ).

$c_p$  es el calor específico del material de la pantalla ( $J / (kg K)$ ).

$dT_{m,n}/dt$  variación de la temperatura del elemento en el tiempo ( $K / s$ ).

Aplicando el método de diferencias finitas, los términos de las potencias térmicas conductivas pueden expresarse de la siguiente manera:

$$q_{cond} (m-1,n) \rightarrow (m,n) = k (\Delta y e) \frac{T_{m-1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad (3)$$

$$q_{cond} (m+1,n) \rightarrow (m,n) = k (\Delta y e) \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad (4)$$

$$q_{cond} (m,n+1) \rightarrow (m,n) = k (\Delta x e) \frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta y} \quad (5)$$

$$q_{cond} (m,n-1) \rightarrow (m,n) = k (\Delta x e) \frac{T_{m,n-1} - T_{m,n}}{\Delta y} \quad (6)$$

donde  $k$  es la conductividad del material de la pantalla ( $W/(m K)$ ) y  $e$  su espesor ( $m$ ). Los elementos discretizados y las dimensiones  $\Delta x$  y  $\Delta y$  están descriptos en la figura 6.

$$q_{conv} = 2 h \Delta x \Delta y (T_{amb} - T_{m,n}) \quad (7)$$

donde  $T_{amb}$  es la temperatura ambiente,  $h$  es el coeficiente de transferencia convectivo y el número 2 considera que la transferencia convectiva ocurre hacia ambas caras de la pantalla.

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma 2 \Delta x \Delta y (T_{alr}^4 - T_{m,n}^4) \quad (8)$$

donde  $\varepsilon$  es la emisividad de la superficie de la pantalla y  $\sigma$  es la constante de Stefan Boltzmann ( $W/(m^2 K^4)$ ) y  $T_{alr}$  es la temperatura ( $K$ ) de las superficies que se encuentran alrededor de la pantalla.

Debido a que la pantalla está construida con una placa metálica delgada, el modelo clásico de la ecuación de calor puede ser simplificado suponiendo que la temperatura en el espesor es uniforme. Esta simplificación se basa en el cálculo del número de Biot (ecuación 9) que resulta igual a  $1,7 \cdot 10^{-4}$ , lo que justifica la aplicabilidad del método de capacidad concentrada (Incropera & De Witt, 1996).

$$Bi = h e / k \quad (9)$$

La medición del flujo solar concentrado se realiza durante un período de tiempo relativamente corto en un horario próximo al mediodía solar de manera que la radiación resulte aproximadamente constante. Así se generan condiciones de transferencia de calor estacionarias, como se comprobó experimentalmente. Por lo tanto, la ecuación de balance de calor en el elemento discreto que permite la determinación del flujo solar incidente  $q_{sol}$  y su distribución en el plano puede expresarse de la siguiente manera:

$$(1 - \rho) q_{sol} + \sum q_{cond} + q_{conv} + q_{rad} = 0 \quad (10)$$

#### *Características físicas de la pantalla*

La pantalla está constituida por una placa de acero de 2,00 m x 1,00 m y 1,4 mm. Con el objetivo de optimizar las condiciones para obtener mayor precisión en las temperaturas de las imágenes termográficas se pintó la placa de color negro mate para reducir los efectos de los reflejos que pueden generar los cuerpos vecinos.

Para la medición de las temperaturas superficiales se utilizó una cámara termográfica marca Fluke modelo Ti55, la cual posee una resolución IR de 320x240 (tamaño de la matriz de sensores) para la detección de potencia térmica en el rango de 8 – 14  $\mu\text{m}$ . La cámara puede configurarse para medir en tres rangos de temperatura: de -20 a 100 °C, de -20 a 350 °C y de 250 a 600 °C, con una precisión de 2%, (FLUKE, 2019). Las imágenes termográficas son analizadas mediante el software SmartView provisto por el fabricante.

Para la determinación de la emisividad se registraron termogramas de la cara posterior de la pantalla durante la etapa de enfoque (concentración de los rayos solares), ya que se requieren temperaturas superiores a la del entorno para aplicar la metodología. Para obtener valores de referencia se empleó una termocupla (tipo K) para medir la temperatura y una cinta negra con emisividad 0,95, lo que permitió realizar el ajuste de la emisividad de la pantalla mediante la utilización del software. Esta metodología es de frecuente uso en aplicaciones de termografía (AETIR, 2011).

En las imágenes térmicas obtenidas con la cámara se observa una notoria difusión de calor proveniente de la concentración solar cuasi lineal del lado frontal de la pantalla (figura 7a). La termocupla midió una temperatura de 54 °C. En la figura 7b puede observarse que la misma se encuentra en la isoterma de rango 55-56 °C, coloreada en blanco. La medición de la temperatura ambiente arrojó un valor de 20,6 °C.

Se colocó un trozo de papel aluminio arrugado, para determinar la temperatura aparente del fondo debido a los reflejos que inciden en la pantalla (cuerpo gris). Configurando la emisividad en 1,0 se midió la temperatura aparente sobre este reflector difuso y posteriormente se estableció este valor como temperatura de fondo o de alrededores (AETIR, 2011). En la imagen térmica, la cinta presenta la misma distribución de temperaturas que la muestra por lo que ambas emisividades son muy similares, siendo ajustada finalmente en 0,96.

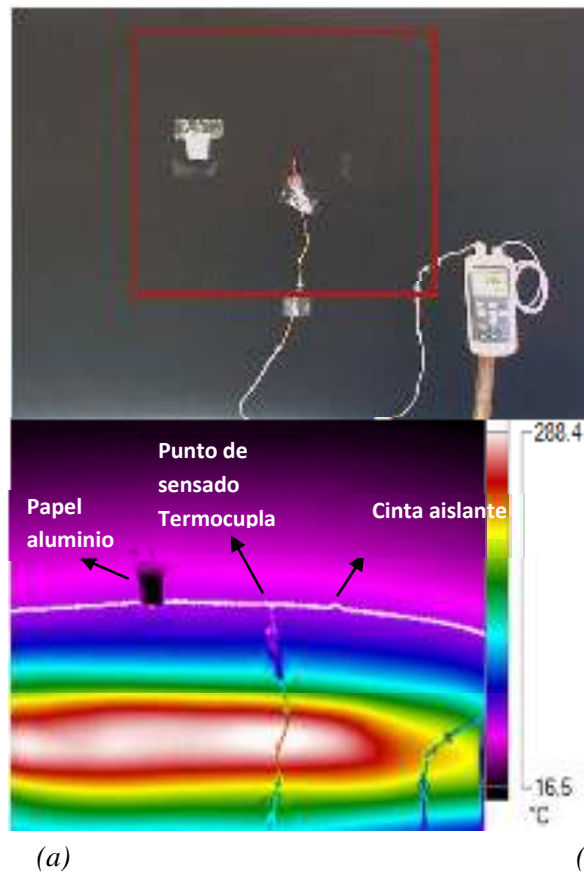


Figura 7. (a) Imagen visible. (b) termograma de la cara posterior de la pantalla.

La reflectancia solar  $\rho$  fue determinada a partir de la relación entre la radiación solar reflejada por la superficie y la radiación solar incidente medidas con un solarímetro LI-COR 250 A. La conductividad  $k$  y la densidad  $d$  fueron obtenidas de tablas para acero laminado en frío de bajo contenido de carbono.

El coeficiente de transferencia convectivo  $h$  se determinó experimentalmente aplicando el método inverso para la transferencia de calor en condiciones de enfriamiento de la pantalla, sin radiación solar incidente, bajo la acción de pérdidas de calor convectivas y radiativas. En estas condiciones, la ecuación de balance de calor en un elemento de la placa se expresa de la siguiente manera:

$$\Sigma q_{cond} + q_{conv} + q_{rad} + m c_p dT_{m,n}/dt = 0 \quad (11)$$

Aplicando diferencias finitas en esta ecuación es posible despejar la matriz de coeficientes  $h$  ya que todas las otras características de la pantalla son conocidas. Para ello se midieron las temperaturas en la situación inicial, cuando está incidiendo el flujo concentrado de radiación, y las temperaturas de los instantes siguientes, luego de retirar el flujo incidente, mientras se produce el enfriamiento.

## ESTUDIO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTO DE DATOS

El estudio experimental se realizó in situ a fin de medir el flujo concentrado generado por el heliostato sobre una pantalla de acero cuyas características se presentan en la Tabla 2. Ésta fue ubicada, en posición vertical, a una distancia de 8 m del eje del heliostato.

Se realizaron dos tipos de experiencias, una de baja concentración, utilizando sólo dos facetas del heliostato con los espejos planos (sin flexión), con imágenes uniformes superpuestas mediante canteo. La otra, utilizando el enfoque del heliostato completo sobre la pantalla. Para la aplicación del método se capturó una serie de termogramas de la cara posterior de la pantalla, ubicada en la sombra a fin de



reducir los efectos de los reflejos en la imagen (figura 8). Las medidas se realizaron mientras incidía radiación solar concentrada y también en momentos posteriores al desenfoque, bajo condiciones de enfriamiento de la pantalla.

La primera experiencia permitió tener valores de radiación, en un rango tal, que fue posible la medición de la irradiancia con el solarímetro ubicado sobre el plano de la pantalla. Estas medidas fueron utilizadas para contrastar con los resultados obtenidos aplicando el método indirecto, obteniéndose valores aceptables con una incertidumbre aproximada del 10%.

Símbolo	Nombre	Valor	Unidades
$e$	Espesor	0,0014	m
$d$	Densidad	7850	kg / m <sup>3</sup>
$k$	Conductividad térmica	52	W/(m K)
$\varepsilon$	Emisividad infrarroja	0,95	-
$\rho$	Reflectancia solar	0,05	-
$c_p$	Calor específico	460	J / (kg K)

*Tabla 2: Propiedades físicas de la pantalla.*



*Figura 8. Ensayo in situ: la pantalla es iluminada por el helióstato en una cara, y las imágenes termográficas son tomadas sobre la otra*

Los termogramas fueron editados con el software Smart View de Fluke, donde se ajustaron los valores de emisividad y temperatura de fondo como se describió anteriormente. Esta información fue exportada en archivos de texto plano que contienen la temperatura de cada pixel de la imagen con una resolución de 320x240. Para realizar el procesamiento de los datos utilizando el método inverso descripto, se utilizó el software Scilab, que posee un lenguaje de programación propio, orientado al uso de matrices y vectores.

El programa recibe como datos archivos de texto correspondientes a dos imágenes termográficas de la pantalla, una con el helióstato enfocado y otra capturada en la fase de enfriamiento. Conociendo las características físicas de la pantalla y el tiempo transcurrido entre la toma de cada una de las imágenes, a partir del balance de calor en cada elemento de la placa (ecuación 11), se obtiene una matriz de coeficientes convectivos  $h$ . Posteriormente estos valores son utilizados en la determinación del flujo

solar concentrado  $q_{sol}$  (ecuación 10). La salida del programa es una matriz de 240x320 que contiene la información del flujo solar ( $q_{sol}$ ) sobre cada elemento discretizado. Esta información se grafica de manera tridimensional y con curvas de nivel. Además, realizando la sumatoria del flujo solar concentrado sobre cada pixel se obtiene el flujo total incidente sobre la pantalla. También es factible obtener las matrices correspondientes a los aportes de cada término de la ecuación 10 debido a las diferentes formas de transferencia de calor.

Los ensayos fueron realizados durante el mes de julio en la ciudad de Salta. En la figura 9 se presentan, como ejemplo, imágenes capturadas el día 16 de julio a las 12:45 hora local. La imagen visible de la figura 9a fue obtenida desde la cara de la pantalla que recibe la radiación concentrada por el heliostato. La imagen infrarroja de la figura 9b corresponde a la cara posterior de la pantalla.

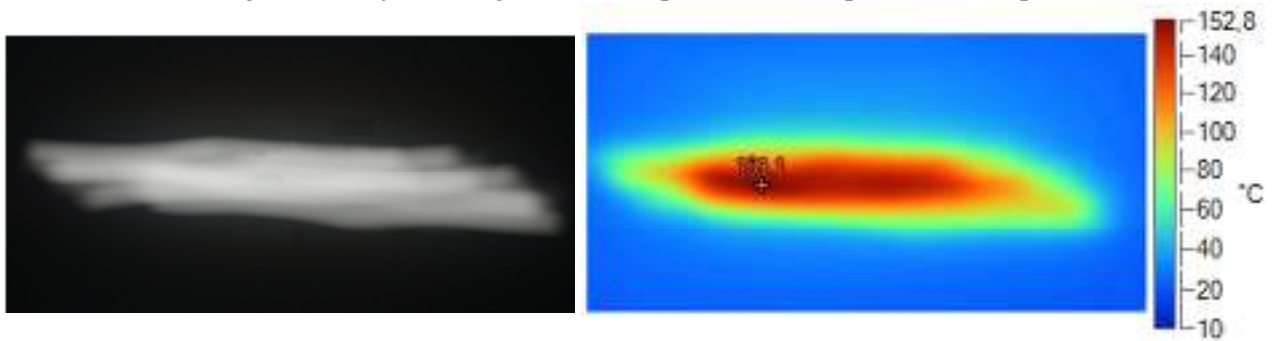


Figura 9: (a) Imagen visible cara de la pantalla iluminada. (b) Imagen infrarroja cara posterior de la pantalla.

Los resultados para el ejemplo de la figura 9 se presentan en la figura 10 y corresponden a un valor de radiación calculado con el método de 1688 W. La radiación directa normal en el momento de la medición fue de 264 W/m<sup>2</sup>, teniendo en cuenta que la superficie reflectiva del heliostato es de aproximadamente 8,1 m<sup>2</sup> resulta un valor de eficiencia óptica de 0,79.

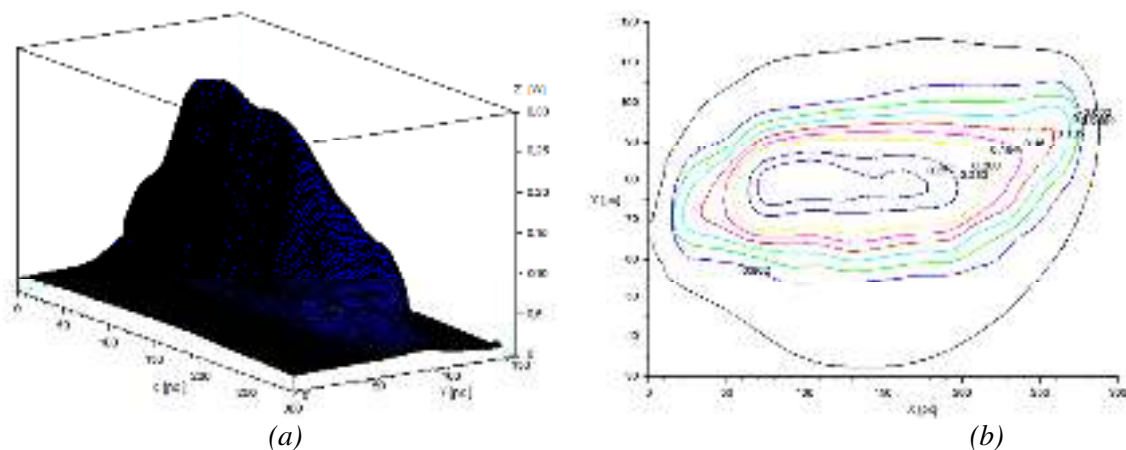


Figura 10: Mapa del flujo solar concentrado en W, obtenido con el método. (a) vista tridimensional, flujo solar sobre cada píxel de la imagen. (b) curvas de nivel.

## CONCLUSIONES

Se construyó un prototipo de heliostato en escala industrial. Se probó el sistema de concentración por flexión y canteo de las facetas que permite configurar con sencillez los espejos para obtener un flujo concentrado lineal.

Se implementó el sistema de movimiento en dos ejes, para el seguimiento solar del heliostato con motores, mecanismos de transmisión y componentes de adquisición local. Se obtuvo gran precisión en el tracking controlado por el sistema electrónico.

Se desarrolló un método para la obtención, in situ, de flujo solar para sistemas de concentración térmica a partir de medidas indirectas. El mismo permite obtener mapas de flujo de alta resolución sin necesidad del uso de factor de escala y refrigeración de la pantalla requeridos en las técnicas que utilizan fluxómetros y cámaras CCD.

Se obtuvieron valores de eficiencia óptica del sistema a través de la medición del flujo solar concentrado. Las inexactitudes encontradas en el método están originadas en el hecho que la experiencia se realiza in situ, sin las condiciones controladas que se pueden obtener en un laboratorio. Los resultados pueden ser mejorados a través de un análisis más detallado de las temperaturas de los alrededores con las que se calculan las pérdidas radiativas.

Como trabajo futuro se plantea continuar con las etapas de desarrollo del Horno Solar, incluyendo la construcción del concentrador secundario y el recinto térmico, además de la realización de los ensayos de calcinación de mineral.

## REFERENCIAS

- Asociación Española de Termografía Infrarroja (2011). Guía de la Termografía Infrarroja, Aplicaciones en ahorro y eficiencia energética. [www.fenercom.com](http://www.fenercom.com).
- Casimiro R., Gea M., Hoyos D., Placco C. (2018). Estudio geométrico de un horno solar para procesamiento de minerales a altas temperaturas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 22, pp 06.95-06.105.
- FLUKE (2019). Fluke TI55FT and TI50FT FlexCam, Infrared Cameras - Technical Data. [https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/2674273\\_6251\\_ENG\\_F\\_W.PDF](https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/2674273_6251_ENG_F_W.PDF).
- Gaussorgues G., (1989). *La thermographie infrarouge*. Troisième édition. Technique et Documentation.
- Incropera F., De Witt D. (1996). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*.
- Placco C., Gea M., Bonini M., Gutiérrez E., Fernández C., Suligoy H. (2018). Estudio geométrico de un horno solar para procesamiento de minerales a altas temperaturas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 22, pp 02.25-02.36.
- Pozzobon V., Salvador S. (2015). High heat flux mapping using infrared images processed by inverse methods: An application to solar concentrating systems. *Solar Energy* 117 29–35.
- Rogalski A. (2011). Recent progress in infrared detector technologies, *Infrared Physics & Technology* 54, pp. 136–154.
- Röger M., Herrmann P., Ulmer S., Ebert M., Prah C., Göhring F. (2014). Techniques to Measure Solar Flux Density Distribution on Large-Scale Receivers. *Journal of Solar Energy Engineering*. Vol. 136.

**ABSTRACT:** A solar furnace's heliostat for mineral's processing at high temperatures was built. The design has the particularity that concentrates solar radiation in a linear focus. Techniques of facet canting and mirrors bending to achieve the linear approach were developed. An electromechanical system for two-axis movement was mounted with innovations in the automatic tracking circuit. An indirect method was developed for the determination of the incident solar flux on a screen, with the use of infrared thermography. Radiation concentration tests were performed and the optical efficiency of the heliostat was determined through the measurement of the concentrated flow.

**Keywords:** solar thermal energy, solar concentration, solar furnace, heliostat, concentrated solar flow measurement.

## **CARACTERIZACIÓN DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS BASADO EN UN CONVERTIDOR SEPIC**

M. Alvarez, M. Maldonado, S. Lovera, F. Magnago

Facultad de Ingeniería

Universidad Nacional de Río Cuarto – UNRC C.P. 5800 – Río Cuarto

Tel. 0358-4676246 – Fax 0358-4676246 – e-mail: slovera@ing.unrc.edu.ar

*Recibido 13/08/19, aceptado 21/10/19*

**ABSTRACT:** El objetivo de este trabajo es el de desarrollar un sistema electrónico para caracterizar módulos fotovoltaicos mediante la determinación de la curva I-V y P-V estándar.

El barrido de la curva I-V del módulo ensayado, se realiza utilizando un convertidor SEPIC, que permite la variación de la impedancia conectada al módulo fotovoltaico, permitiendo realizar el barrido de manera rápida y eficiente.

Los resultados experimentales son contrastados con los parámetros y curvas provistos por los fabricantes de los módulos ensayados, verificando un buen comportamiento del sistema implementado.

**Palabras clave:** SEPIC, coeficientes de temperatura, ensayos fotovoltaicos.

### **INTRODUCCIÓN**

Los fabricantes de módulos fotovoltaicos (FV) proporcionan las características I-V, P-V y los principales parámetros bajo las condiciones de ensayo Estándar (STC: 1000 W/m<sup>2</sup> de irradiación, temperatura de celda de 25 ° C).

Sin embargo, los procesos de fabricación de los módulos, y más específicamente de las celdas fotovoltaicas, no permiten la obtención de elementos idénticos, por lo que algunos parámetros pueden diferir de manera significativa, aún para módulos provenientes del mismo fabricante. Por lo tanto, solo las mediciones experimentales de las curvas I-V permiten conocer con precisión los parámetros eléctricos de los módulos fotovoltaicos. A pesar de lo expuesto, el avance tecnológico actual en los procesos de fabricación de las celdas y módulos FV, sumado a las estrictas normas de calidad de los productos comerciales, minimizaron las desviaciones de los principales parámetros que describen a los productos finales respecto a los valores de referencia de catálogo (De Blas et al., 2002; King et al., 1997).

La característica I-V de un módulo fotovoltaico es provista por los fabricantes a partir de condiciones ambientales de irradiación y temperatura estrictamente controladas en ambientes de laboratorio. Las variaciones rápidas y aleatorias de las condiciones ambientales exteriores, dificultan la tarea de reproducir dichas características de manera eficiente y precisa. Una manera de minimizar los problemas mencionados, es a partir de la variación de la carga aplicada, en un rango que permita realizar un barrido completo de la curva en el menor tiempo posible.

Varios métodos se mencionan en la bibliografía aplicados a la caracterización de las curvas I-V, algunos de los cuales se describen brevemente en este trabajo, mencionando ventajas y desventajas de cada uno de ellos [Kuay y Yuvarajan, 2006; Muñoz y Lorenzo, 2006; Van Dyk et al., 2002; Durán et al, 2008; Álvarez et al, 2017; Sarikh et al, 2017].

El objetivo de este trabajo es el de diseñar e implementar un dispositivo portátil capaz de caracterizar módulos fotovoltaicos, mediante la medición de las curvas I-V y P-V de los módulos y de los

coeficientes asociados al mismo, que caracterizan el comportamiento del panel para diferentes condiciones ambientales. La implementación del equipo está basada en un convertidor SEPIC, el cual es ampliamente utilizado en técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) en sistemas fotovoltaicos [Marcial et al, 2015; Renduchintala et al, 2016].

Para ello, se organiza este trabajo del siguiente modo: Se realiza una breve descripción de las características eléctricas de los módulos FV en función de las condiciones ambientales; se describen algunos de los métodos más usuales para la obtención de las curvas  $V-I$  y  $V-P$ ; se realiza el diseño de un conversor SEPIC; descripción del algoritmo para control del conversor y adquisición de datos; por último, se presentan los resultados experimentales obtenidos y se extraen las conclusiones finales.

## CARACTERÍSTICAS $I-V$ Y $P-V$ DE LOS PANELES SOLARES

Los fabricantes de módulos FV proporcionan información de las características de los mismos en condiciones estándar. La tabla 1 muestra las características estándar del panel disponible para ensayo proporcionadas por el fabricante.

<b>Tensión a circuito abierto (<math>V_{ocn}</math>)</b>	22,2 V
<b>Tensión de operación óptima (<math>V_{mpn}</math>)</b>	17,8 V
<b>Corriente de cortocircuito (<math>I_{scn}</math>)</b>	5,11 A
<b>Corriente de operación óptima (<math>I_{mpn}</math>)</b>	4,78 A
<b>Potencia máxima</b>	85 W
<b><math>\alpha</math></b>	0,037 %/°C
<b><math>\beta</math></b>	-0.34 %/°C

Tabla 1: Parámetros del panel fotovoltaico para una irradiación de  $1000 \text{ W/m}^2$  y  $T_{an} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

La corriente de cortocircuito  $I_{sc}$  y la tensión de vacío  $V_{oc}$  de un módulo FV dependen de las variaciones de irradiación y temperatura. Por otro lado, los módulos fotovoltaicos en condiciones de campo pueden, con el paso del tiempo y en condiciones climáticas extremas, sufrir una significativa degradación de su rendimiento. Una forma de detectar este fenómeno es a partir de la obtención de la curva  $I-V$  estándar actual y compararla con la que provee el fabricante [Sarikh et al, 2017].

Para la realización del ensayo se toma como base las recomendaciones provistas en la norma IEC60891, que describe diferentes procedimientos para la obtención de la característica  $I-V$  estándar de un panel fotovoltaico, a partir de ensayos del panel a diferentes condiciones de irradiación y temperatura. [Priya et al, 2015; Da Costa Po, 2011].

Las ecuaciones (1) y (2) propuestas por la norma, permiten, a partir de la realización del ensayo del módulo, la obtención de los parámetros estándar de corriente y tensión:

$$I_{s1} = I_{sn} * \left(\frac{H_1}{H_n}\right) * (1 + \alpha(T_1 - T_{an})) \quad (1)$$

$$V_{oc1} = V_{ocn} * (1 + \beta(T_1 - T_{an})) - R_s * (I_{sc1} - I_{scn}) + V_T * \ln\left(\frac{H_n}{H_1}\right) \quad (2)$$

Donde:

$V_{ocn}/I_{scn}$ : Tensión y corriente del Módulo en condiciones estándar [V]

$V_{oc1}/I_{sc1}$ : Tensión y corriente del Módulo en condiciones de ensayo [V]

$\alpha/\beta$ : Coeficientes de temperatura para la corriente [A/°C] y tensión [V/°C]

$T_{an}/T_{a1}$ : Temperatura estándar y de ensayo [°C]

$R_s$ : Resistencia serie del Módulo [ $\Omega$ ]

$V_T$ : Tensión térmica del Módulo [V]

$H_n/H_1$ : Irradiación en condiciones estándar y de ensayo [ $\text{W/m}^2$ ]

$V_T$  para una celda voltaica, es posible calcularla a partir de la ecuación (3):

$$V_T = \frac{n * k * T}{q} \quad (3)$$

En donde:

$n$ : varía entre 1 y 2, dependiendo del proceso de fabricación y de los materiales empleados.

$k$ : constante de Boltzmann ( $1,3 * 10^{-23}$  J/K)

$T$ : Temperatura ambiente [ $^{\circ}$ K]

$q$ : carga del electrón [ $1,6 * 10^{-19}$  C]

A temperatura ambiente de 25  $^{\circ}$ C,  $V_T$  para una celda solar es de aproximadamente 25 mV. El módulo ensayado consta de 36 celdas, por lo que  $V_T \cong 0,9$  V. Por otro lado, si el nivel de irradiación medido durante el ensayo, difiere de la irradiación estándar en valores inferiores al 20 %, es posible despreciar el último término de la ecuación (5), con un error inferior al 1,5 % respecto del valor estándar de la tensión de circuito abierto del módulo.

Más aún, si en la ecuación (5), en vez de comparar con los valores estándar, se realizan dos ensayos a temperaturas diferentes del módulo, y las condiciones atmosféricas referidas a la radiación, no varían de manera considerable, el término referido es prácticamente nulo. Del mismo modo, el término que involucra a  $R_s$ , también adquiere valores poco significativos y su valor se corresponde con la pendiente de la porción de la curva  $I$ - $V$  del módulo fotovoltaico comprendida entre  $V_{mp}$  y  $V_{oc}$ , estando acotado entre un máximo y un mínimo descripto por la ecuación (4) [Siddique et al, 2013].

$$\frac{V_{oc} - V_{mp}}{I_{mp}} > R_s > 0 \quad (4)$$

La estrategia de realización de dos ensayos a diferentes condiciones de temperatura, permite la caracterización completa del panel ensayado, ya que es posible la obtención de los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  sin necesidad de recurrir a los datos proporcionados por el fabricante. Esto se describe en las ecuaciones (5) y (6) [Alvarez et al, 2017].

$$\alpha = \frac{\left(\frac{I_{sc2}}{I_{sc1}}\right) * \left(\frac{Rad_1}{Rad_2}\right) - 1}{T_2 - T_1} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\left(\frac{V_{oc2}}{V_{oc1}}\right) - 1}{T_2 - T_1} \quad (6)$$

Con estos coeficientes, y las curvas  $I$ - $V$  obtenidas del ensayo, es posible, además, la obtención de la curva  $I$ - $V$  estándar ( $1000$  W/m<sup>2</sup>, 25  $^{\circ}$ C).

## MÉTODOS PARA OBTENCIÓN DE CARACTERÍSTICAS I-V Y P-V

### *Resistor variable.*

La figura 1 muestra el procedimiento por el cual es posible realizar un barrido completo de la curva  $i$ - $v$  de un módulo FV a partir de una resistencia variable. Una operación manual para la variación de  $R$  implica un procedimiento lento del ensayo en donde, en especial, la temperatura del ensayo no permanecerá constante.

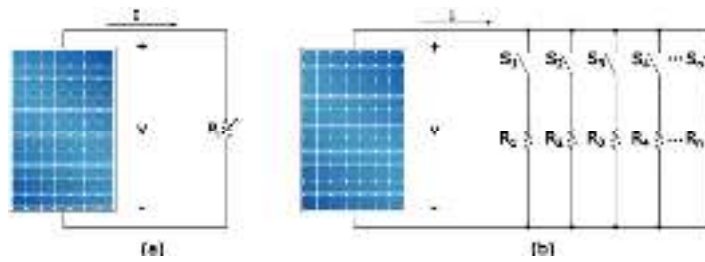


Figura 1: Ensayo con carga resistiva a) Resistor variable, b) Resistores en paralelo.

Con llaves electrónicas, combinación de resistencias en paralelo (figura 1(b)) y un adecuado sistema de adquisición de datos, es posible optimizar el ensayo [Van Dyk et al, 2005].

La necesidad de una mayor densidad de puntos en la región del codo de la curva  $I-V$  del módulo FV, requiere de una cuidadosa selección de los valores de cada una de las resistencias para cada módulo a ensayar.

*Carga Capacitiva.*

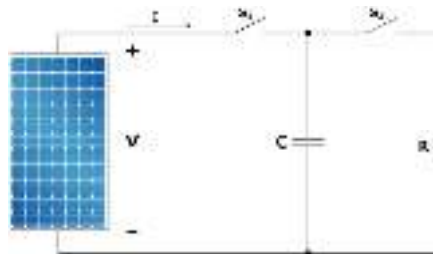


Figura 2: Ensayo con carga capacitiva.

La figura 2 muestra el método de carga capacitiva. El ensayo comienza con  $S_1$  abierto y  $S_2$  cerrado, de modo de asegurar la descarga total de  $C$ . Posteriormente se abre  $S_2$  y se cierra  $S_1$ , de manera que en el instante inicial la corriente es  $I_{sc}$ , y al final del ensayo la corriente se anula y la tensión sobre  $C$  es  $V_{oc}$ .

Es necesario un diseño con un banco de capacitores de baja resistencia serie. Por otro lado, el tiempo de duración del ensayo para un mismo banco de capacitores, es dependiente de las características del módulo FV a ensayar, y de la irradiación presente al momento del ensayo. Esto dificulta la implementación del algoritmo a implementar para cada caso [Brito et al, 2014].

*Carga Electrónica.*

El método de carga electrónica mostrado en la figura 3, utiliza un transistor (generalmente un MOSFET) como carga; la resistencia entre el drenaje y la fuente (y por consiguiente el flujo de corriente suministrado por el módulo FV) se controlan a través de la tensión de la compuerta-fuente aplicada [Sahbela et al., 2013; Sarikh et al, 2017].

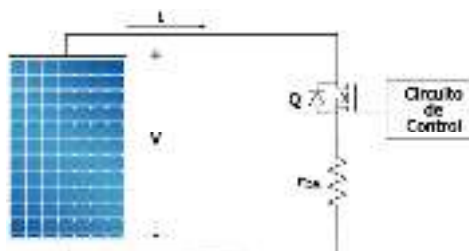


Figura 3: Ensayo con carga electrónica.



Cuando se utiliza este método para trazar la curva  $I-V$  del módulo, el MOSFET debe operar en sus tres modos de funcionamiento (corte, región activa y óhmica). Como resultado, la mayor parte de la potencia entregada por el módulo tendrá que ser disipada por este dispositivo.

#### Conversor DC-DC.

La carga variable aplicada durante el ensayo, puede ser obtenida a partir de convertidores  $DC-DC$ , tal como se muestra en la figura 4. El convertidor es conectado al módulo FV actuando como un adaptador de impedancia. Modificando el valor del ciclo de trabajo  $D$  del convertidor, podemos ajustar la impedancia reflejada sobre el panel desde condición de cortocircuito a circuito abierto, y de esa manera barrer toda la curva  $I-V$  del módulo (Moham et al., 2009).

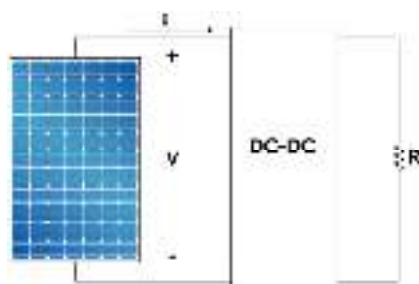


Figura 4: Ensayo con convertidor DC-DC.

De las tres topologías básicas de convertidores, solo la Step-Down/Step-Up es capaz de emular una impedancia de entrada  $R_{in}$  variable desde cero a infinito a partir de un barrido del ciclo de trabajo  $D$  desde uno a cero (Falin, 2008; Erickson, 2007; Soedibyo et al., 2015). La ecuación (7) describe la variación de  $R_{in}$  en función de la impedancia de salida  $R_{out}$  para el convertidor mencionado.

$$R_{in} = R_{out} * \frac{(1 - D)^2}{D^2} \quad (7)$$

El método de medición a partir de conversores  $DC-DC$  permite: 1) Realizar el barrido de la curva en ambas direcciones, de  $I_{sc}$  a  $V_{oc}$  o de  $V_{oc}$  a  $I_{sc}$ ; y 2) Reproducir parcialmente la curva  $I-V$ . El rendimiento de estos conversores conmutados oscila alrededor de un 90 %, por lo que la disipación de potencia es reducida y, por consiguiente, es posible el ensayo de módulos fotovoltaicos de gran potencia con mínimos costos.

#### DISEÑO DEL CONVERTOR SEPIC

Se propone en este trabajo, la implementación de un convertidor Step-Down/Step-Up en configuración SEPIC (Soedibyo et al., 2015) con una potencia de 500 W y tensión máxima de entrada de 70 V. Estas consignas permitirán ensayar una extensa variedad de módulos fotovoltaicos comerciales. Entre las ventajas de este tipo de convertidor, pueden mencionarse la ausencia de inversión de polaridad de la salida y el bajo rizado de la corriente de entrada.

El diseño se realizó considerando al convertidor en modo de conducción continua (MCC), esto es, que en todo momento la corriente instantánea sobre las inductancias  $L_1$  y  $L_2$  de la figura 5 sea mayor a cero. La llave  $S_1$  permite registrar la corriente de cortocircuito del panel a ensayar, previo a la realización del barrido.

En base a los sensores de corriente utilizados, se establece como la mínima corriente media del módulo fotovoltaico  $I_{Lmin}$ , a partir de la cual es posible realizar una correcta medición, en 300 mA.

Una relación de compromiso entre un bajo *ripple* de corriente en los inductores y un moderado transitorio, es tomar un  $\Delta I_L$  entre un 20 y 40 % de la corriente [Falin, 2008]. En nuestro caso:

$$\Delta I_L = \frac{0,3 I_{Lmin}}{\eta} = 100 \text{ mA}$$

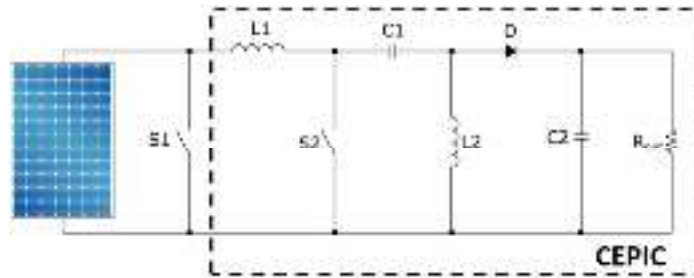


Figura 5: Conversor DC-DC SEPIC.

En donde  $\eta = 0,9$  tiene en cuenta la desviación cometida en la obtención de las expresiones matemáticas para el diseño del conversor (inductancias, capacitores y llaves semiconductoras ideales).

La ecuación (8) nos permite hallar los valores mínimos para ambas inductancias.

$$L_{1min} = L_{2min} = \frac{V_{in} \cdot D}{\Delta I_L \cdot f} = 4,67 \text{ mHy} \quad (8)$$

En donde  $V_{in}=70 \text{ V}$ ,  $D=0,2$  y frecuencia de conmutación  $f$ , limitada a  $30 \text{ kHz}$  de modo de lograr una inmunidad de ruido aceptable para los sensores de corriente utilizados.

Se establece un resistencia de carga  $R_{out}$  de  $5 \text{ Ohm}$  y una variación del ciclo de trabajo comprendido entre  $D_{min}$  y  $D_{max}$ . Los valores límites de  $D$  variarán en cada caso de acuerdo a las características de los módulos fotovoltaicos y de las condiciones ambientales al momento del ensayo, de modo de respetar las corrientes mínimas establecidas en las inductancias (MCC). Para ello, se colocan sensores de corriente tanto a la entrada como a la salida del conversor.

Se fija un *ripple* para la tensión de entrada del 1% de la máxima tensión de diseño. Por consiguiente, los valores de  $C_1$  y  $C_2$  seleccionados son de  $470 \mu\text{F}$ .

En la tabla 2 se muestra un listado de los componentes utilizados para el conversor en base a las consignas y resultados presentados anteriormente.

$C_1; C_2$	470 $\mu\text{F}$ ; 450 V
$L_1; L_2$	5 mHy
$S_1; S_2$	IRFS4227PbF (200 V; 130 A; 22 m $\Omega$ )
$D$	RHRP30120 (30 A; 1200 V; Hyperfast)

Tabla 2: Componentes del Conversor.

## IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DE CONTROL

La figura 6 muestra un esquema general del banco de ensayo. La tabla 3 describe los sensores de tensión, corriente, irradiación y temperatura, como así también el procesador para implementación del algoritmo.

El equipo consta de sensores de corriente y tensión de salida que permite la realimentación de las señales para su control. El algoritmo de control implementado es genérico (PID), de forma de asegurar la estabilidad del trazador ante perturbaciones tales como variación de tensión de entrada, o carga del regulador.

Los valores de tensión, corriente, irradiación y temperatura medidos durante el ensayo, son almacenados en el procesador y posteriormente enviados y procesados en PC. La comunicación entre el procesador y la interfaz gráfica en PC, se realiza a partir del protocolo Modbus RTU. El entorno

gráfico para la realización del ensayo y del reporte del mismo, se implementó con lenguaje de programación Python.

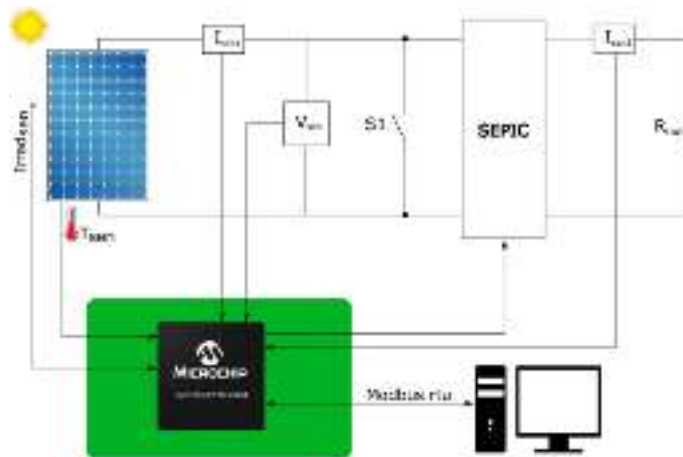


Figura 6: Esquema general del equipo de ensayo.

$I_{sen_1}$ ;	ACS723LLCTR (10A AC/DC)
$I_{sen_2}$	
$Irrad_{sen}$	LI-COR, modelo LI-200
$T_{sen}$	LM35 (10 mV/°C)
$V_{sen}$	Divisor Resistivo
$S_1$ ; $S_2$	IRFS4227PbF (200 V; 130 A; 22 mΩ)
<b>Procesador</b>	dsPIC 33EP128GS804

Tabla 3: Descripción de sensores y procesador empleados.

El ensayo comienza con el convertidor inactivo y con  $S_1$  cerrado, con lo que el módulo se encuentra en cortocircuito y se almacenan los valores de corriente y tensión ( $I_{sc}; 0$ ); luego se abre  $S_1$  y, con el módulo en vacío, se almacenan el segundo par de datos  $I-V$  ( $0; V_{oc}$ ). Simultáneamente, se almacenan los valores de irradiación y temperatura del módulo FV. A partir de este momento se pone en marcha el convertidor variando el ciclo de trabajo  $D$ , desde un mínimo valor al máximo posible, respetando la condición de MCC. Se toman cuarenta pares de valores de  $I-V$  en todo el barrido, almacenándolos en una tabla.

Concluida la primera etapa del ensayo, el sistema queda en espera hasta que la temperatura del módulo haya variado 10°C respecto de la registrada durante el primer barrido. Alcanzada esta temperatura, el proceso de ensayo de la segunda etapa es idéntico a lo descrito previamente.

El tiempo de duración de cada una de las etapas, tiene una restricción importante; a cada variación del ciclo de trabajo, le corresponde un transitorio en las señales de tensión y corriente, que deben ser evitados al momento de tomar las mediciones de corriente y tensión. Es por ello que la duración de cada una de las etapas, se estableció en 10 segundos.

Una variación del ciclo de trabajo ( $D$ ) a paso constante desde  $D_{min}$  a  $D_{max}$  no asegura una adecuada distribución de puntos a lo largo de la curva  $P-V$ . De modo de asegurar una cantidad suficiente de pares de puntos  $I-V$  en la región de  $P_{max}$ , se procede de la siguiente manera:

1. Se realiza un primer barrido a paso constante de modo de determinar en forma aproximada el valor de  $P_{max}$ , y a qué valor de  $D$  corresponde. Se establecen tres intervalos para el trazado de la curva, comprendidos entre  $D_{min}-D_1$ ,  $D_1-D_2$  y  $D_2-D_{max}$ . El intervalo  $D_1-D_2$  estará centrado en el valor de  $D$  correspondiente a  $P_{max}$ , y su  $\Delta D$  se establece en 0,2. Luego, se asigna para cada intervalo el paso adecuado para el incremento de  $D$ , de modo que para el primer y tercer intervalo le corresponden cinco pares de puntos a cada uno; los treinta pares de puntos restantes son asignados al intervalo  $D_1-D_2$ .
2. Se comienza con el ensayo del módulo según lo descrito anteriormente.

3. Los resultados se muestran en PC de modo de obtener una información completa de las características de panel fotovoltaico. La figura 7 muestra una foto del equipo desarrollado.

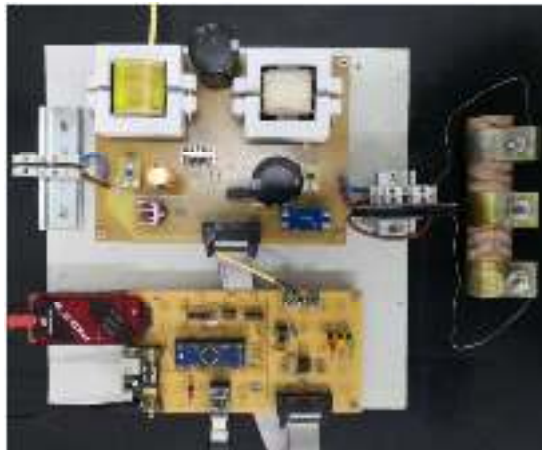


Figura 7: Equipo para realización del ensayo.

### RESULTADOS EXPERIMENTALES

Es posible realizar dos tipos de procedimientos para verificar los valores estándar del módulo FV a ensayar.

En el primer procedimiento, se toman los resultados de cualquiera de los dos barridos realizados, y a partir de los datos de  $\alpha$  y  $\beta$  provistos por el fabricante, con las ecuaciones (1) y (2) se procede al cálculo de las características eléctricas estándar del módulo.

Si se elige el segundo procedimiento, con los datos registrados en los dos barridos, y a partir de las ecuaciones (5) y (6), se obtienen los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  del módulo FV. Posteriormente se calculan las características eléctricas estándar.

En la figura 8, haciendo uso de Matlab, se grafican las curvas I-V y P-V de ambos barridos. Las condiciones ambientales del ensayo se muestran en la tabla 4.

La figura 9 muestra las capturas de pantalla de los reportes obtenidos para cada uno de los procedimientos descritos. En la pestaña “Configuración” es posible seleccionar el procedimiento aplicado. Si se quiere utilizar los coeficientes de temperatura  $\alpha$  y  $\beta$  provistos por el fabricante del módulo FV, éstos deberán ser cargados en forma manual previo a la realización del ensayo.

La figura 10 muestra las curvas estándar V-I y V-P obtenidas en el reporte del ensayo, según se utilice el primer o segundo procedimiento respectivamente.

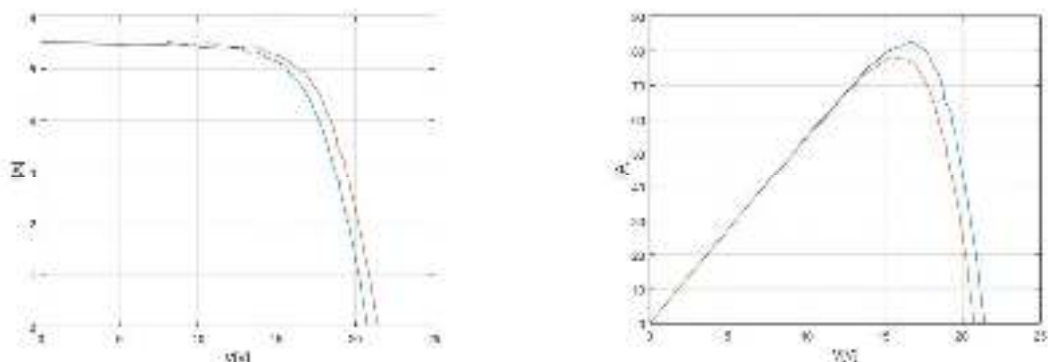


Figura 8: Curvas V-I y V-P obtenidas del ensayo.

	Temperatura de ensayo [°C]	Irradiación [W/m <sup>2</sup> ]
Primer barrido	28,1	1004
Segundo barrido	38,1	1013

Tabla 4: Condiciones ambientales del ensayo.

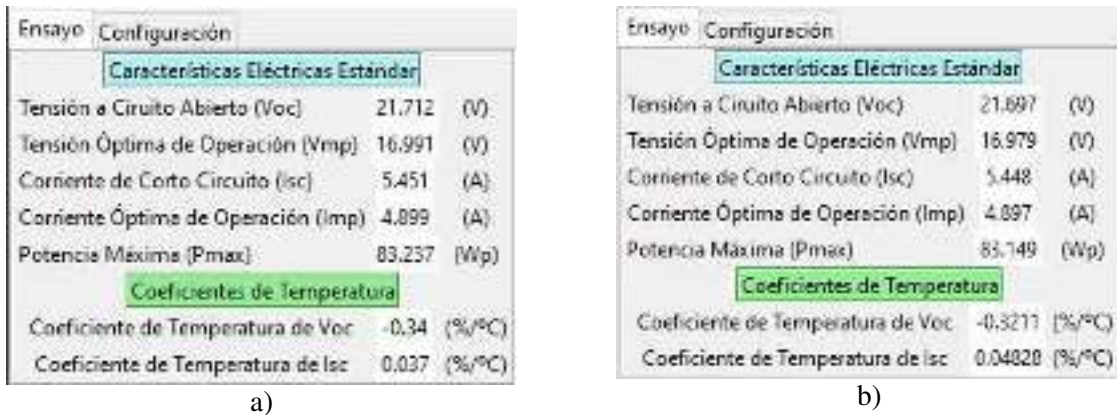


Figura 9: Reportes del ensayo: a)  $\alpha$  y  $\beta$  provistos por el fabricante. b)  $\alpha$  y  $\beta$  obtenidos de ensayo.

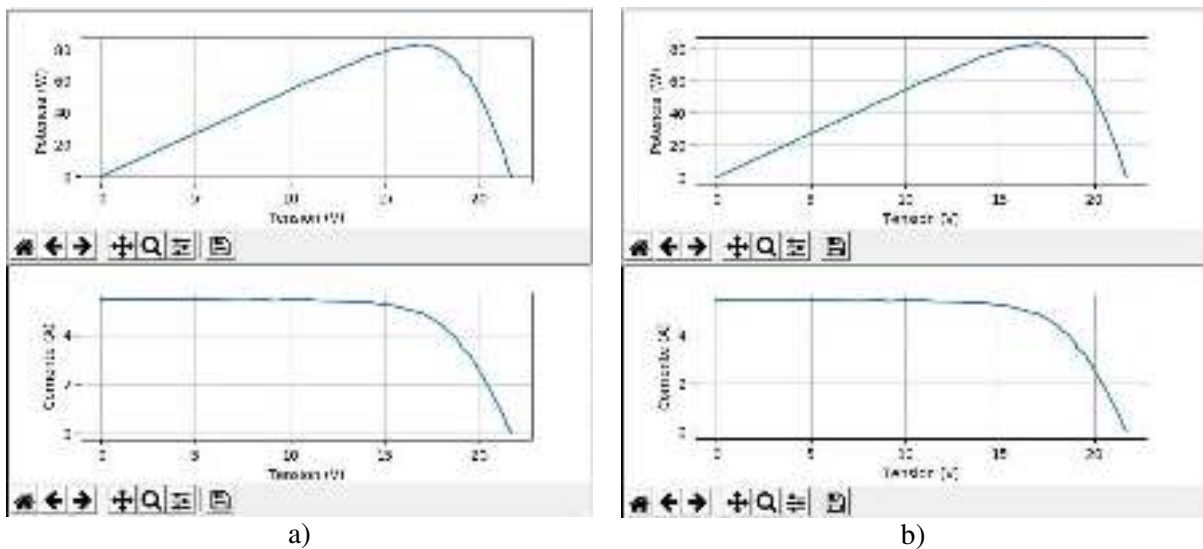


Figura 10: Curvas V-I y V-P estándar: a)  $\alpha$  y  $\beta$  provistos por el fabricante. b)  $\alpha$  y  $\beta$  obtenidos de ensayo.

## CONCLUSIONES

Se ha propuesto en este trabajo la caracterización de módulos FV a partir de un convertidor SEPIC. Las conclusiones más relevantes de los ensayos realizados, pueden ser extraídas a partir del análisis de las figuras 9 y 10.

Se utilizaron dos procedimientos para la obtención de las características estándar de los módulos FV; el primero hace uso de los coeficientes de temperatura provistos por el fabricante (método más usualmente utilizado), y el segundo procedimiento propone determinar previamente dichos coeficientes.

De la observación de la figura 9, se observan diferencias sustanciales entre los coeficientes calculados y los especificados por el fabricante. El error cometido respecto a los valores provistos, es de un 5,5 % para  $\beta$  y de un 29 % para  $\alpha$ . La determinación de este último coeficiente requiere de sensores de medición de corriente con una alta precisión. Los sensores de efecto Hall utilizados, si bien proveen aislamiento galvánico, requieren de un esfuerzo adicional en la corrección del offset, por lo que un sensor

shunt es la solución más conveniente, a la vez que permite aumentar la frecuencia de conmutación del conversor, reduciendo considerablemente el tamaño de sus componentes (inductancias y capacitores).

A pesar de lo expuesto, se observa una desviación insignificante en el cálculo del resto de los parámetros eléctricos estándar. Para  $P_{max}$  el error es del 0,1 %, para  $I_{mp}$  del 0,04 % y para  $V_{mp}$  del 0,07 %, por lo que el resultado de las curvas estándar obtenidas en las figuras 10 a) y 10 b), son prácticamente idénticos.

Analizando la figura 8, se puede concluir que un aumento en la cantidad de muestras adquiridas mejoraría la precisión en la determinación de los parámetros eléctricos asociados a  $P_{max}$ . Sin embargo, esto implica una mayor duración del ensayo, y por consiguiente un riesgo en la modificación de las condiciones ambientales.

Existen en el mercado equipamiento importado que permiten realizar análisis similares al propuesto. El desarrollo propuesto posibilita, primero sustituir la importación de los mismos, segundo, al utilizarse en un instituto de validación de curvas, validar en forma independiente los cálculos realizados, y tercero su flexibilidad posibilita modificar los algoritmos de acuerdo con los avances de los requerimientos y la tecnología. En síntesis, el desarrollo propuesto representa el estado del arte en el área, de trazadores de curvas I-V y verificación de performance de PV, sustituyendo productos importados a muy bajo costo comparativo.

## REFERENCIAS

- Alvarez M., Maldonado M., Lovera S. y Magnago F. (2017). Plataforma de ensayo para caracterización de módulos fotovoltaicos comerciales. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente AVERMA*, 21, 59-70.
- Brito E., Antonio A., Cupertino A. y Pereira H. (2014). Characterization of solar panel using capacitive load. 11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications INDUSCON 2014, 1-7.
- Da Costa Po J. (2011). Assessment of the IEC 60891 norm conversion methods under outdoor test conditions. Tesis de maestría en Ingeniería Energética y Ambiental. Universidad de Lisboa, Facultad de Ciencias, 1-53.
- De Blas M., Torres J., Prieto E. y García A. (2002), Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices. *Renewable Energy* 25, 3, 371–380.
- Durán E, Piliouguine M., Sidrach de Cardona M., Galán J. y Andújar J. (2008). Different Methods to Obtain the I-V Curve of PV Modules: Review. 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1-6.
- Erickson R. (2007). DC-DC Power Converters, Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering.
- Falin J. (2008). Designing DC/DC converters based on SEPIC topology. Texas Instruments Incorporated, Analog Applications Journal, 18-23.
- IEC60891 International Standard, Photovoltaic devices – Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics. International Electrotechnical Commission (IEC) 2009.
- King D., Kratochvil J., y Boyson W. (1997). Temperature coefficients for PV modules and arrays: measurement methods, difficulties and results. Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists, 1183-1186.
- Kuay Y. y Yuvarajan S. (2006), An electronic load for testing photovoltaic panels. *Journals of Power Source (IJSR)*, 154, 308-313.
- Marcial F., Alvarez M., Maldonado M., Lovera S. y Magnago F. (2015). Diseño y Construcción de un Regulador de Tensión para Sistemas Solares con Seguimiento de Máxima Potencia. XXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente ASADES, 1-12.
- Moham N., Undeland T. y Robbins W. (2009). Power Electronics. Converters, Applications and Design, 3ª edición, pp 142–173. John Wiley & Sons, Inc.
- Muñoz J. y Lorenzo E. (2006), Capacitive load based on IGBTs for on-site characterization of PV arrays. *Solar Energy*, 80, 1489-1497.

- Priya S., Sastry O., Bora B. y Kumar A. (2015). Comparison of curve correction procedure of current and voltage as per IEC 60891 for thin film technology. 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 1-4.
- Renduchintala U., Pang C., Pavan S. y Tatikonda K. (2016). Comparison of MPPT Techniques for SEPIC Converter Based Photovoltaic System. 2016 Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET), 1-5.
- Sahbela A., Hassanb N., Abdelhameedb M. y Zekryb A. (2013). Experimental Performance Characterization of Photovoltaic Modules Using DAQ. Energy Procedia, 36, 323-336
- Sarikh S., Raoufi M., Bennouna A., Benlarabi A. y Ikken B. (2017). Design of an I-V Characteristic Tracer for Photovoltaic Systems. 2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference, 1-5.
- Siddique H., Ping Xu P. y De Doncker R. (2013). Parameter Extraction Algorithm for One-Diode Model of PV Panels based on Datasheet Values. 2013 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), 7-13.
- Soedibyo, Amri B. y Ashari M. (2015). The Comparative Study of Buck-Boost, Cuk, Sepic and Zeta Converters for Maximum Power Point Tracking Photovoltaic Using P&O Method, 2nd Int. Conference on Information Technology, Computer and Electrical Engineering (ICITACEE), Indonesia. 327-332.
- Van Dyk E., Gxasheka A. y Meyer E. (2002). Monitoring current-voltage characteristics of photovoltaic modules. Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1516-1519.
- Van Dyk E., Gxasheka A. y Meyer E. (2005). Monitoring current-voltage characteristics and energy output of silicon photovoltaic modules. Renewable Energy, 30, 399-411.

## **PHOTOVOLTAIC MODULES CHARACTERIZATION BASED ON A SEPIC CONVERTER**

### **ABSTRACT**

This work aims to develop an electronic system to characterize photovoltaic modules by determining the standard I-V and P-V curves.

The scanning of the tested module's I-V curve is performed using a SEPIC converter, which allows the variation of the impedance connected to the photovoltaic module, allowing an efficient scanning.

The experimental results are contrasted against the parameters and curves provided by the manufacturers of the tested modules. Results demonstrate the excellent behavior of the implemented system.

**keywords:** SEPIC converters, temperature coefficients, photovoltaic tests systems.



## **CARACTERIZACION DE UNA PERGOLA SOLAR FOTOVOLTAICA INSTALADA EN LA CIUDAD DE CORRIENTES**

**A.R. González Mayans<sup>1</sup>, Manuel Cáceres<sup>1</sup>, Andrés Firman<sup>1</sup>, Luis H. Vera<sup>1</sup>, Carlos Cadena<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Grupo en Energías Renovables -Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura-  
Universidad Nacional del Nordeste

<sup>2</sup>Instituto de Investigaciones en Energías NO Convencionales (INENCO)- Consejo Nacional de  
Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Tel/Fax: (0379) 4473931 e-mail: raulgonzalezmayans@gmail.com

*Recibido 15/08/19, aceptado 21/10/19*

**RESUMEN:** En el año 2013 el Grupo en Energías Renovables diseñó e instaló un sistema fotovoltaico experimental conectado a red de 6,72 kWp, con fines de investigación y promoción de esta tecnología de generación de energía eléctrica. Este sistema está emplazado en el acceso al edificio del Departamento de Ingeniería de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura de la Universidad Nacional del Nordeste. Complementariamente a la instalación y a efectos de evaluar el desempeño anual del sistema en nuestra región, se presenta en este trabajo el cálculo de los parámetros característicos, y las pérdidas de energía del sistema fotovoltaico conectado a red para el año 2018. La evaluación del sistema fotovoltaico se realizó en base a la determinación de los índices establecidos en la norma IEC 61724 empleando las metodologías establecidas en esta. Los resultados obtenidos muestran que este tipo de sistemas integrados arquitectónicamente se pueden utilizar para implementar generación distribuida en la región norte de Argentina, y se tendrán mejores resultados siempre y cuando las redes de baja tensión presenten mayor confiabilidad y estabilidad en sus parámetros.

**Palabras clave:** Sistemas fotovoltaicos, Integración arquitectónica, Generación distribuida.

### **INTRODUCCIÓN**

En la actualidad, las energías renovables ocupan un lugar importante dentro de la matriz energética mundial; aproximadamente un cuarto de la capacidad de generación de energía es de origen renovable y presentan un crecimiento sostenido, impulsado por la implementación de políticas de incentivos o de promoción para la generación de energía alternativa, donde cualquier fuente de energía de origen renovable que se incorpore, además de ayudar a diversificar la matriz energética, tiene como consecuencia aportes positivos en la lucha contra el calentamiento global.

En relación a los sistemas de generación fotovoltaica (FV), principalmente los conectados a red, China, Estados Unidos, Japón, India y Australia representan los mercados más grandes (IEA PVPS, 2018). Respecto a países de Latinoamérica, principalmente Brasil, México, Perú, Chile y Argentina son considerados como los principales actores en los próximos años dentro del mercado fotovoltaico. Este contexto permite reafirmar a la tecnología fotovoltaica como una opción competitiva para la generación de energía eléctrica tanto desde el aspecto económico, como técnico y ambiental, para países desarrollados y en vías de desarrollo, transformando a algunas regiones de estos últimos en el nuevo horizonte del mercado fotovoltaico.

Entre los países que son el nuevo blanco del mercado FV se encuentra Argentina, que viene implementando políticas de diversificación de la matriz energética e inclusión de fuentes de energías renovables. En octubre de 2015, se sancionó la Ley Nacional N° 27.191 “Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la Producción de Energía Eléctrica” (Ley Nacional N° 27.191, 2015). Un estudio desarrollado por Garrido et ál., (2016) describe los principales cambios introducidos al régimen por esta ley cuya reglamentación tuvo lugar en marzo de 2016. Ese mismo año el Ministerio de Energía y Minería de la Nación lanzó el programa RenovAr

(CAMMESA, 2016), que consiste en la compra de una cierta cuota energética producida a partir de energías renovables sobre la modalidad de llamado a licitación, convirtiéndose en un escenario favorable para la implementación de grandes centrales fotovoltaicas.

Estas políticas y marco apropiado para generación renovable a gran escala no fue extensivo a la Generación Distribuida (GD) a base de fuentes renovables. En 2016 el estado argentino tuvo que acudir a la incorporación de pequeñas centrales térmicas que utilizan gasoil, en su gran mayoría importado del exterior, como forma de implementar GD para evitar cortes de energía (Ministerio de Energía y Minería de la Nación, 2016). Este hecho con consecuencias económicas motivó a diferentes actores (empresarios, académicos, políticos), a cambiar el paradigma de la GD. Algunas provincias avanzaron en impulsar legislación orientada a promover y regular la instalación de sistemas de generación distribuida con conexión a red (Santa Fe, Salta y Mendoza), y otras decidieron esperar a tener mayor información acerca del impacto de la conexión en los sistemas de distribución. En este contexto, en septiembre de 2017 la Cámara de Diputados de la Nación aprobó un proyecto de ley para autorizar la inyección de energía alternativa a la red, denotando el primer paso del estado nacional en la promoción de la GD y con el objeto de evaluar este tipo de generación se vienen llevando a cabo numerosos proyectos públicos-privados desde hace más de 7 años.

En el año 2012 se formó el consorcio público-privado “Interconexión de Sistemas Fotovoltaicos a la Red Eléctrica en Ambientes Urbanos (IRESUD)”, entre la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), la Universidad de San Martín (UNSAM) y 5 empresas privadas, con el objetivo de impulsar y promover el uso de sistemas de generación fotovoltaica en el país (Cervellini et ál, 2017). En el marco de este proyecto, en el año 2013 el Grupo en Energías Renovables (GER) diseñó e instaló un sistema fotovoltaico conectado a red (SFCR) experimental de 6,72 kWp (Cossoli et ál, 2014), con fines de investigación y promoción de la tecnología. Este sistema está emplazado en el acceso al edificio del Departamento de Ingeniería de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura de la Universidad Nacional del Nordeste (latitud sur  $27^{\circ}27'$ ; longitud oeste  $58^{\circ}49'$ ).

Complementariamente a la instalación y a efectos de caracterizar el desempeño anual del sistema en la región del Nordeste Argentino, se presenta en este trabajo el cálculo de los parámetros característicos, y las pérdidas de energía del SFCR para el año 2018 de acuerdo a la norma IEC 61724 (IEC standard 61724, 1998).

## METODOLOGIA

La evaluación energética se realizó en base a la norma IEC 61724 (IEC standard 61724, 1998), la cual define una serie de índices adoptados por la comunidad científica internacional.

*Índices definidos por la Norma IEC 61724:*

Productividad del generador fotovoltaico ( $Y_A$ ): expresa la energía producida por el generador ( $E_{DC}$ ), por unidad de potencia instalada (potencia nominal del generador referida a las condiciones estándar de medida,  $P_{nomG}$ ).

$$Y_A = \frac{E_{DC}}{P_{nomG}} \quad (1)$$

Productividad final del sistema ( $Y_F$ ): expresa la energía inyectada a la red eléctrica generada por el sistema fotovoltaico ( $E_{AC}$ ) por unidad de potencia instalada del generador ( $P_{nomG}$ ).

$$Y_F = \frac{E_{AC}}{P_{nomG}} \quad (2)$$

Productividad de referencia ( $Y_R$ ): caracteriza el emplazamiento del generador en términos de “horas de sol equivalentes”, se calcula como el cociente entre la irradiación solar incidente medida por el sensor utilizado ( $H_s$ ), y la irradiancia en condiciones estándar de medida ( $H= 1 \text{ kW/m}^2$ ).

$$Y_R = \frac{H_s}{H} \quad (3)$$

Rendimiento característico del sistema o *Performance Ratio* (PR): relaciona la energía inyectada a la red eléctrica con la que se habría obtenido en condiciones ideales, esto es, con el generador sin sombras ni pérdidas de ningún tipo (térmicas, caídas de tensión, conversión continua/alterna, seguimiento del punto de máxima potencia, desconexiones, etc.).

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} \quad (4)$$

Pérdidas de captura ( $L_C$ ): son las pérdidas asociadas a las características eléctricas del generador (dispersión de parámetros en los módulos, desviaciones de su polarización en el punto de máxima potencia, caídas de tensión en el cableado, incidencia de sombras, pérdidas térmicas, etc.).

$$L_C = Y_R - Y_A \quad (5)$$

Pérdidas de conversión ( $L_S$ ): son las pérdidas que tienen lugar en el inversor y en toda la etapa de corriente alterna.

$$L_S = Y_A - Y_F \quad (6)$$

*Descripción del sistema fotovoltaico objeto de estudio:*

El sistema fotovoltaico conectado a red está emplazado en el acceso al edificio del Departamento de Ingeniería de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura de la Universidad Nacional del Nordeste (latitud sur  $27^\circ 27'$ ; longitud oeste  $58^\circ 49'$ ), cuenta con una capacidad de generación de 6720 Wp, divididos en dos generadores fotovoltaicos, uno de 4800 Wp y otro de 1920 Wp. Los generadores FV se encuentran integrados arquitectónicamente mediante una estructura tipo pérgola, con una orientación Noreste y una inclinación de  $12^\circ$ , que no representan las condiciones de máxima captación energética anual para el lugar de emplazamiento (Cossoli et ál, 2014; Gallegos et ál, 2013). La Figura 1 muestra la estructura de soporte junto con los módulos FV instalados.



Figura 1: Pérgola solar instalado en el acceso al edificio de Ingeniería.

Además de la influencia de la orientación e inclinación de los módulos se presenta otro inconveniente. Debido a la cercanía del edificio con la pérgola solar (Figura 1), el mismo produce un sombreado de los módulos a lo largo de las horas de la tarde. Por tal motivo, la disposición de los diferentes arreglos ha sido tal que la desconexión por efecto de sombras se produce de manera escalonada. El arreglo 1, que se encuentra más próximo al edificio, es el primero en desconectarse de la red ya que es el primero que empieza a ser sombreado. Luego, se desconecta el arreglo 2 y por último el arreglo 3, los cuales corresponden al sistema de mayor potencia.

La Figura 2 presenta el diagrama unifilar del SFCR conectado al edificio de Ingeniería. Los módulos FV son de silicio policristalino de 240 Wp y los inversores son el AEG 4600W y el AROS 1500W.

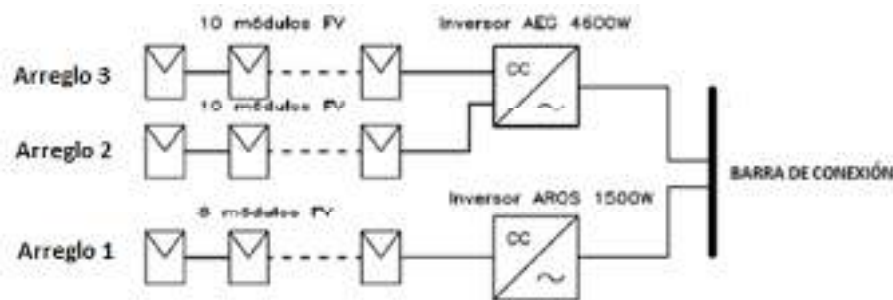


Figura 2: Diagrama unifilar del SFCR conectado al edificio de Ingeniería.

#### Metodología de medición:

Para la caracterización experimental de la energía que entrega el generador FV ( $E_{DC}$ ) y la que finalmente se inyecta a la red ( $E_{AC}$ ) se utilizaron los datos provistos por los inversores, ya que los mismos cuentan con un sistema interno de monitoreo de variables eléctricas y un software que permite su almacenamiento.

Por otra parte, se midió la irradiancia solar que incide sobre el plano del generador fotovoltaico con un piranómetro FV marca Hobo S-LIB-M003 con una resolución de  $1,25 \text{ W.m}^{-2}$  e incerteza del  $\pm 5\%$ , el cual se encuentra instalado en el extremo más alejado al edificio, y la temperatura ambiente con una estación meteorológica marca DAVIS Vantage pro2. Ambos instrumentos fueron conectados al momento de puesta en servicio del SFCR y mantienen adquisición de datos a la fecha.

Con la intención de programar el inicio simultáneo del proceso de medición, se sincronizaron los relojes internos de todos los instrumentos y se configuraron para almacenar el promedio de las mediciones cada 10 minutos.

De la información adquirida durante todo el año 2018 se calcularon los índices definidos en la norma IEC 61724.

## RESULTADOS

La Figura 3 presenta los resultados de la caracterización energética del sistema fotovoltaico para el período 2018. Los valores presentados corresponden a los promedios diarios mensuales.

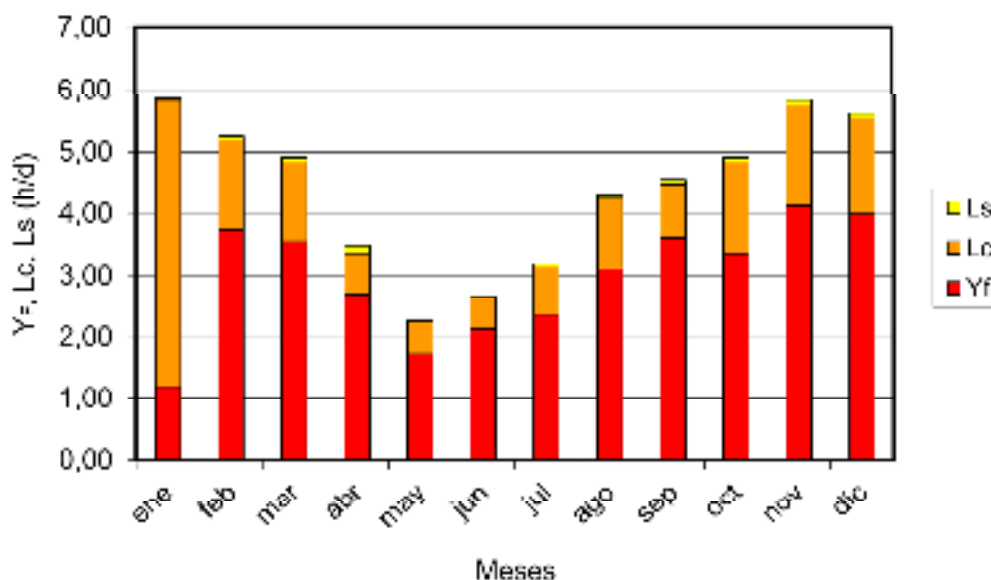


Figura 3: Promedios diarios mensuales de los parámetros característicos y las pérdidas del SFCR.

Del análisis de la Figura 3, puede observarse que la productividad de referencia varía entre un valor máximo de 5,86 h/día, para el mes de enero y un valor mínimo de 2,28 h/día para el mes de mayo.

Los bajos valores de YR para los meses entre mayo y julio se deben a que la radiación solar es de menor intensidad. Además, la inclinación del generador FV es de 12°, lo que disminuye la captación energética en los meses citados, dado que un ángulo de inclinación cercano a la normal (0 °) captará mayor radiación en verano, mientras que una inclinación pronunciada favorecerá la captación en invierno (Bilbao, 2009). Por otra parte, los arreglos FV se van sombreando durante las horas de la tarde y este evento inicia más temprano justamente en los meses de mayo, junio y julio, debido a que el sol presenta una menor altura con referencia al horizonte.

Respecto a la productividad final, el valor máximo obtenido se corresponde con el mes de noviembre (4,12 h/día) y el valor mínimo con el mes de enero (1,19 h/día). Este mínimo obtenido para el mes de enero se debe en gran parte a la desconexión prolongada del SFCR de la red de baja tensión, hecho que se refleja en mayores pérdidas de captura (Cáceres et ál. , 2014), sin embargo, es importante aclarar que no es un caso representativo de la operación normal del sistema, la falla se debió a un fenómeno externo y la barra de conexión del SFCR quedó sin tensión de red por casi 20 días.

De todos los parámetros establecidos en la norma IEC 61724, el más representativo para comparar el funcionamiento de diferentes sistemas fotovoltaicos es el rendimiento característico (PR), puesto que independiza la caracterización de la influencia de las condiciones climatológicas de operación. La Figura 4 presenta la variación del rendimiento característico mensual para el año 2018.

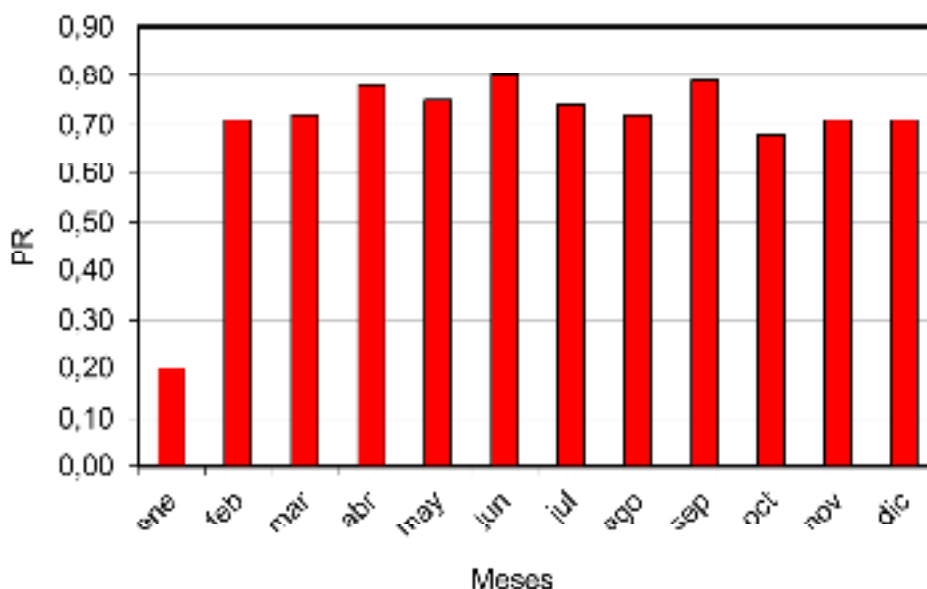


Figura 4: Variación del rendimiento característico mensual para el año 2018.

Cuando la productividad final disminuye, las pérdidas de captura aumentan, este fenómeno de disminución de YF se traduce en una disminución del PR del sistema (Figura 4). Los valores promedios diarios de PR del sistema para los meses entre febrero y diciembre estuvieron en un rango de 0,68 y 0,80, que constituyen un buen resultado de acuerdo con los valores reportados en otros estudios (Boughamrane et ál. , 2016; Cáceres et ál. , 2014; V. Luque et ál. , 2018). Sin embargo, la confiabilidad y estabilidad de la red eléctrica de baja tensión tiene gran importancia en este tipo de sistemas, para evitar grandes períodos de desconexión que aumentan las pérdidas de captura. En el mes de enero se puede observar este efecto de largas desconexiones presentando grandes pérdidas de captura (Figura 3) y un PR muy bajo de 0,2 (Figura 4), lo que refleja la aparición de problemas en el funcionamiento del sistema para ese mes en particular.

La Tabla 1 muestra un resumen de los índices de producción de referencia, índices de producción del generador fotovoltaico, índices de producción final, rendimiento característico y la temperatura ambiente promedio diario para los meses del año 2018.

Meses	Ya (h/d)	Yf (h/d)	Yr (h/d)	Lc (h/d)	Ls (h/d)	PR	T amb (°C)
<b>ene</b>	1,22	1,19	5,86	4,64	0,03	0,20	29,1
<b>feb</b>	3,81	3,74	5,25	1,44	0,07	0,71	27,8
<b>mar</b>	3,61	3,54	4,91	1,30	0,07	0,72	24,9
<b>abr</b>	2,83	2,70	3,48	0,65	0,13	0,78	22,3
<b>may</b>	1,74	1,72	2,28	0,54	0,02	0,75	18,7
<b>jun</b>	2,16	2,13	2,67	0,51	0,03	0,80	15,9
<b>jul</b>	2,39	2,35	3,19	0,80	0,04	0,74	15,8
<b>ago</b>	3,16	3,10	4,30	1,14	0,06	0,72	16,5
<b>sep</b>	3,67	3,60	4,55	0,88	0,07	0,79	21,0
<b>oct</b>	3,41	3,35	4,90	1,49	0,06	0,68	21,9
<b>nov</b>	4,20	4,12	5,83	1,63	0,08	0,71	25,7
<b>dic</b>	4,05	3,98	5,61	1,56	0,07	0,71	27,9

Tabla 1: Resumen de la caracterización del SFCR del año 2018

### Valores anuales:

La tabla 2 presenta los valores anuales de los índices definidos en la norma IEC 61724 y los porcentajes respecto a la productividad de referencia.

Índices	Horas anuales (h)	% Respecto a YR
Productividad de referencia	1607	100,0
Productividad del generador	1103	68,6
Productividad final	1080	67,2
Pérdidas de captura	504	31,4
Pérdidas de conversión	22	1,4

Tabla 2: Valores anuales de los índices definidos por la norma IEC 61724.

Los valores anuales de productividad de referencia y productividad final fueron de 1607 h y 1080 h respectivamente, siendo estos valores superiores a las 1000 h, valor que se considera mínimo para instalaciones situadas en lugares de buena irradiación (Caamaño, 2009). Esta situación se da a pesar de que los generadores FV se encuentran con una orientación Noreste y una inclinación de 12°, que no representan las condiciones de máxima captación energética anual para el lugar de emplazamiento. Por otra parte, el elevado porcentaje de pérdidas de captura (31,4%) se debe principalmente a dos motivos, por un lado, al largo período de desconexión del SFGR y, por otro lado, al sombreado de los módulos, dado que, por su ubicación, el piranómetro FV es el último en detectar las sombras (el dispositivo de medición de irradiancia se encuentra en el extremo más alejado al edificio). La desconexión escalonada de los arreglos por efecto de la proyección de sombras para un día claro y en temporada de invierno se presentan en (Cossoli et ál, 2014). Respecto a las pérdidas de conversión, estas tienen poco peso en la productividad final, solamente del 1,4%.

## CONCLUSIONES

Se caracterizó un sistema fotovoltaico conectado a la red de distribución de baja tensión de la ciudad de Corrientes - Argentina. La caracterización se realizó en base a la evaluación de índices de mérito (norma IEC 61724), que permiten la comparación de sistemas independientemente de su tamaño y de las condiciones climatológicas de operación.

Los resultados durante un año de operación muestran una productividad final de 1080 h, esto a pesar de largos períodos de desconexión y de que los generadores FV se encuentran con una orientación Noreste y una inclinación de 12°, que no representan las condiciones de máxima captación energética anual para el lugar de emplazamiento. Por lo tanto, este tipo de sistemas integrados arquitectónicamente se pueden utilizar para implementar generación distribuida en la región norte de Argentina, y se tendrán mejores resultados, siempre y cuando las redes de baja tensión presenten mayor confiabilidad y estabilidad en sus parámetros.

Finalmente, se considera que el PR de 0,2 para el mes de enero se encuentra sesgado por un largo período de desconexión, el cual no es un caso representativo de la operación normal del sistema.

## REFERENCIAS

- Bilbao J. Serie Ponencias, CIEMAT, (2009). Capítulo 13.
- Boughamrane L., Boulaid M., Tihane A., Sdaq A., Bouabid K. and Ihlal A., Comparative analysis of measured and simulated performance of the Moroccan first MV grid connected photovoltaic power plant of Assa, southern Morocco, J. Mater. Environ. Sci. 7 (12) (2016) 4682-4691  
Boughamrane et ál. ISSN : 2028-2508



- Cáceres, M., Vera, L. H., Busso, A. J., & De la Casa, J. (2014). ANALYSIS AND EVALUATION OF THE FIRST GRID CONNECTED PV SYSTEM IN NORTHERN ARGENTINA. In 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (pp. 3957-3960).
- Caamaño Martín E. Serie Ponencias, CIEMAT, (2009). Capítulo 19.
- CAMMESA (Compañía Administradora del Mercado Eléctrico Mayorista) (2016) “Programa RenovAr. Abastecimiento de energía eléctrica a partir de fuentes renovables. Pliego de bases y condiciones”
- Cervellini, P., Kuzman, M., Strack, J., & Donato, P. Resultados preliminares de un relevamiento de instalaciones fotovoltaicas en Argentina. Año 2017
- Cossoli, P., Ibarra, A., Poletto, G., Blanco, M., & Cáceres, M. (2014). Primeros resultados de operación de una pérgola solar fotovoltaica instalada en la Facena-UNNE. *Extensionismo, Innovación y Transferencia Tecnológica*, 1, 184-193.
- Fuentes, M., Nofuentes, G., Aguilera, J., Talavera, D. L., & Castro, M. (2007). Application and validation of algebraic methods to predict the behaviour of crystalline silicon PV modules in Mediterranean climates. *Solar Energy*, 81(11), 1396-1408.
- Gallegos, H. G., & Righini, R. (2013). Ángulo Óptimo para planos colectores de Energía Solar integrados a Edificios. *Energías Renovables y Medio Ambiente (ERMA)*, 31.
- Garrido, S., Belmonte, S., Franco, J., Díscoli, C., Viegas, G., Martini, I., ... & Schmukler (2016), M. POLÍTICAS PÚBLICAS Y ESTRATEGIAS INSTITUCIONALES PARA EL DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES EN ARGENTINA (2006-2016). *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 20*, pp 12.33-12.42
- IEC standard 61724. Photovoltaic system performance monitoring- guidelines for measurement, data exchange and analysis. Technical report, IEC Geneva, Switzerland; 1998
- IEA - PVPS ANNUAL REPORT 2018
- Ley Nacional N° 27.191 “Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la Producción de Energía Eléctrica”
- Luque, V., Rodríguez, C., Iriarte, A., & García, V. RENDIMIENTO CARACTERISTICO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A LA RED EN LA CIUDAD DE CATAMARCA. Matlab R2010a (2010). <http://www.mathworks.com/>.
- MINEM (Ministerio de Energía y Minería) (2016). Informe Estadístico Anual 2016 del sector energético. pp. 26
- Vera, L.H. (2004). Programa para Dimensionamento e Simulação de Sistemas Fotovoltaicos Autônomos. Disertación de Maestría, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
- Vinson, E., Jurado, A., & Gigli, P (2014). Estudio de un sistema de distribución con alta penetración de generación de energía solar. CIDEL ARGENTINA

## **CHARACTERIZATION OF A PHOTOVOLTAIC SOLAR PERGOLA INSTALLED IN THE CITY OF CORRIENTES**

**ABSTRACT.** In 2013 the Group in Renewable Energies designed and installed a photovoltaic system of 6.72 KWp, for the purpose of research and promotion of this electric power generation technology. This system is located in the access to the building of the Engineering Department of the Faculty of Exact Sciences and Natural and Agrimensure of the National University of the Northeast. In addition to the installation and for the purpose of evaluating the annual performance of the system in our region, the calculation of the characteristic parameters and the energy losses of the photovoltaic system for the year 2018 are presented in this work. The evaluation of the photovoltaic system connected to the network is made based on the determination of the indices established in the IEC 61724 standard using the methodologies established in it. The results obtained show that this type of architecturally integrated systems can be used to implement distributed generation in the northern region of Argentina, and there will be better results, as long as the low voltage networks have greater reliability and stability in their parameters

**Keywords:** Photovoltaic systems, Architectural integration, Distributed generation.

## **PREVISÃO DA TEMPERATURA E DO DESEMPENHO DO GERADOR FOTVOLTAICO FLUTUANTE A PARTIR DE SUAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS MEDIDAS EM REAIS CONDIÇÕES AMBIENTAIS**

**Olga de C. Vilela<sup>1</sup>, Tarsicio S. Bacelar<sup>2</sup>, Naum Fraidenraich<sup>1</sup>, Elielza Moura de S. Barbosa<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pernambuco- Departamento de Energia Nuclear UFPE/DEN

<sup>2</sup>Curso de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares – PROTEN/UFPE/DEN

*Recibido 16/08/19, aceptado 22/10/19*

**RESUMO:** Este trabalho apresenta uma metodologia para a estimativa da temperatura de módulos fotovoltaicos quando em condições ambientais reais de operação e os resultados obtidos no caso da Usina Fotovoltaica Flutuante da Hidroelétrica de Sobradinho-BR (-9°35'; -40°50'). Utiliza dados experimentais locais medidos, em tempo real, por oito meses, das características elétricas e as temperaturas do módulo e seu flutuador, simultaneamente, com parâmetros climatológicos. Os resultados comprovam a forte dependência da temperatura de operação, portanto, da potência gerada com as condições climáticas locais, determinantes nas perdas térmicas do módulo. Para os sistemas flutuantes destaca-se a troca de calor módulo - flutuador por convecção, as quais representam o maior percentual, 67% da perda total e podem ser fortemente impactadas pela possibilidade ou não de aeração na região entre o módulos e seu flutuador. A escolha do tipo de flutuador é, portanto, de grande relevância no projeto de sistemas FV flutuantes.

**Palavras chaves:** Temperatura e eficiência de operação do módulo fotovoltaico, Usina fotovoltaica flutuante, Geração fotovoltaica

### **INTRODUÇÃO**

O tema temperatura de operação de módulos fotovoltaicos foi bastante estudado para aplicações de produção de energia solar em terra como pode visto a seguir. Entretanto, trabalhos que tratam da análise desse aspecto em meio aquático são ainda escassos. O aprofundamento do conhecimento sobre esse tema vem ao encontro da necessidade de estimar a produção de energia elétrica de módulos fotovoltaicos instalados em lagos de hidroelétricas, no caso particular, da Usina Fotovoltaica Flutuante (UFF) em instalação no reservatório da Usina Hidroelétrica de Sobradinho (UHE-Sobradinho), localizada no Nordeste do Brasil, onde as características de operação de geradores fotovoltaico-flutuantes ainda não foram medidas.

A eficiência de operação do módulo fotovoltaico, assim como da potência elétrica gerada varia em função da irradiância solar incidente em seu plano e da sua temperatura de operação. A temperatura de operação do módulo, por sua vez, se estabelece em função das características do módulo, das condições meteorológicas ambientais: temperatura e umidade ambiente, irradiância incidente, velocidade e direção do vento e das características do ambiente no entorno.

Modelos de estimativa da temperatura de operação de módulos fotovoltaicos são apresentados em um vasto acervo na literatura (Skoplaki e Palyvos, 2009; Kurnik *et al.*, 2011; Dubey *et al.*, 2013). Desde modelos estacionários simplificados até modelos computacionais sofisticados que consideram o comportamento transiente do módulo sob os efeitos das variações das condições meteorológicas,

(Olukan e Emziane, 2014). Normalmente, os modelos baseados em balanços de energia, permitem estimar a temperatura do módulo, em condições ambientais específicas, partindo do pressuposto de que as grandezas ambientais são conhecidas. São também consideradas as características do material de fabricação do módulo FV como transmitância e absorvância do vidro e demais materiais de cobertura.

Os modelos de regime estacionário assumem, por simplificação, que em um período curto (menor que uma hora) as variações nas grandezas como radiação solar, temperatura ambiente, velocidade do vento, entre outras, não impactam o desempenho dos módulos. Assume-se ainda que a transferência de calor dos módulos fotovoltaicos para o meio ambiente ocorre de maneira constante em cada intervalo de tempo e que a temperatura em cada ponto do módulo é uniforme nesse período. Alguns modelos propostos determinam a temperatura do módulo de maneira implícita, envolvendo variáveis que dependem da diferença de temperatura entre o módulo e o meio ambiente (Jakhvani *et al.*, 2011). A expressão mais comum para se determinar a temperatura do módulo a partir da condição normal de operação (NOCT) foi proposta por Ross (1976).

Um modelo bastante utilizado, inclusive pelo software PVSYS, foi proposto por Faiman (2008). Na proposta, a condição normal de operação que é fornecida pelo fabricante do módulo não é utilizada. Em lugar dessa informação, se utiliza um fator de absorção fixo e um modelo linear de transferência de calor por convecção.

Skoplaki e Palyvos (2009) destacam a importância de considerar a velocidade do vento para a determinação da temperatura do módulo fotovoltaico. Os autores apresentam um modelo detalhado de balanço térmico para o módulo, considerando as trocas de energia em cada uma de suas camadas, e os comportamentos diferenciados das faces superior e inferior. No artigo, o modelo proposto é comparado com modelos utilizados em programas comerciais como PVFORMS e PVWATTS do NREL que estimam a produção fotovoltaica média mensal e anual considerando a influência da temperatura do módulo.

Um modelo apresentado por Olukan e Emziane (2014) usa método de elementos finitos (Saadon *et al.*, 2016; Lupu *et al.*, 2018). A proposta desse método é diferente dos demais, pois considera as variações dinâmicas da radiação solar. Esse método calcula a resposta térmica em regime não estacionário e pode levar em consideração diversos tipos de montagens dos módulos (Hasan *et al.*, 2012). Ele também considera diferentes perdas térmicas em função das velocidades e direção do vento e ainda considera os dois lados (frente e trás) dos módulos.

Jakhvani *et al.* (2011) compararam 16 modelos para determinação da temperatura de operação de módulos, testando entre eles, inclusive, modelos mais simplificados como o de Ross (1976). Os resultados mostraram que os modelos apresentaram tendências similares com relação à variação da temperatura do módulo. Entretanto, os valores resultantes dos modelos foram distintos quando comparados entre eles. Os autores ressaltam que as diferenças entre os resultados dos modelos foram devidas ao uso de diferentes variáveis, diferentes condições climáticas e diferentes características e configurações de geradores.

Todas as pesquisas até então citadas são endereçadas ao estudo da influência da temperatura do módulo no desempenho ou eficiência da produção de energia elétrica em terra. Em relação a sistemas flutuantes, Choi *et al.* (2013) apresentaram uma pesquisa empírica realizada em um sistema fotovoltaico flutuante de 100 kWp instalado no reservatório em Hapcheon, Coreia e outro sistema FV de 1 MWp em terra instalado em Haman-gun a 60 km a sudeste da Hapcheon. Como resultado destacaram que a eficiência de geração do sistema fotovoltaico flutuante foi superior ao de terra em 11%. O valor médio da temperatura anual da UFF (Usina Fotovoltaica Flutuante) reportado foi de 21 °C, abaixo do valor em terra em 4 °C.

Kamuyu *et al.* (2018) compararam dois modelos propostos para a determinação da temperatura de operação de módulos FV flutuantes. Os autores mostraram que um modelo mais simples, que considera a temperatura ambiente, radiação solar e velocidade do vento apresentou resultados

melhores, em comparação com os dados experimentais (desvio de 2%). O modelo que inclui, além das variáveis mencionadas, a temperatura da água, apresentou desvios maiores, da ordem de 4%. Os desvios são apresentados em base anual.

Liu *et al.* (2018) apresentaram uma pesquisa contemplando 8 sistemas aquáticos, com diferentes configurações de módulos, inversores e estruturas flutuadoras. Nessa pesquisa os sistemas foram comparados experimentalmente com uma referência em terra. O desempenho e confiabilidade desses sistemas foram analisados. Os autores destacam, entretanto, a necessidade de um acompanhamento de longo prazo para a observação da degradação dos módulos fotovoltaicos e demais componentes do sistema. Algumas constatações importantes merecem reflexão, tais como: a temperatura do módulo depende do tipo e arranjo dos flutuadores; foram usados dois tipos de flutuadores onde o primeiro se comportou semelhante ao sistema terra e o segundo trabalhou com temperatura média de 5 °C abaixo. Como resultado, são apresentados valores de desempenho (PR) entre 5% a 10% superiores para os sistemas flutuantes, o que os autores julgam coerente com a redução da temperatura observada.

Uma pesquisa realizada por Bist e Saaqib (2019) buscou determinar a diferença entre os desempenhos de sistemas fotovoltaicos flutuante e instalado em terra, investigando os seguintes parâmetros: diferença de temperatura; quantidade de água economizada pela redução na evaporação e produção de energia. A localidade de estudo foi no lago Bhimtal, no estado Indiano de Uttarakhand, situado a uma altitude de 1.370 metros acima do nível do mar. Foi observada uma variação de temperatura dos módulos no lago de 5 °C abaixo dos operandos em terra (temperatura média de 34,35 °C na terra e 29,35 °C na água). A radiação solar anual no local é de 5,61 kWh/m<sup>2</sup>/dia. O sistema UFF de Bhimtal possui 8,3 kWp, ocupando uma área de cerca de 50 m<sup>2</sup> onde foi estimada uma economia de água anual de cerca de 1.000 galões/m<sup>2</sup>.ano de água devido à redução na evaporação. Simulações com respeito à produção de energia mostraram que o sistema flutuante apresenta um incremento de 2,25% na energia anual com um decréscimo de 14,29% na temperatura do módulo.

Um método bastante usual utilizado para calcular a temperatura de um módulo FV consiste em relacionar a diferença de temperatura entre módulo e ambiente com a irradiância solar incidente. Segundo Ross (1976) essa diferença de temperatura é linearmente proporcional à irradiância incidente, conforme Eq. 1:

$$T_{FV} - T_{amb} = k \cdot I_{col} \quad (1)$$

Onde  $T_{FV}$  é a temperatura do módulo fotovoltaico,  $T_{amb}$  é a temperatura ambiente e  $I_{col}$  a irradiância incidente no plano do módulo. O parâmetro  $k$ , conhecido como coeficiente Ross, é uma constante que depende das características do módulo (coeficientes de reflexão e absorção de radiação), da eficiência das células e das perdas globais do módulo (perdas térmicas por convecção e radiação nas partes frontal e traseira, e por condução na parte traseira no caso de contato do módulo com uma superfície). De acordo com Skoplaki e Palyvos (2009) o valor de  $k$  varia aproximadamente entre 0,02 K.m<sup>2</sup>/W, para módulos instalados em condições favoráveis de resfriamento, a 0,0563 K.m<sup>2</sup>/W para módulos instalados em condições desfavoráveis de resfriamento.

Uma forma mais acurada para se estimar a temperatura do módulo em função da temperatura ambiente, irradiância incidente e velocidade do vento, consiste em realizar o balanço de energia, considerando-se as condições específicas de operação às quais o módulo está submetido ao longo do tempo.

Este trabalho apresenta a estimativa da temperatura de um módulo fotovoltaico instalado no lago de Sobradinho. A estimativa da temperatura do módulo em operação é feita a partir de medições experimentais realizadas em condições reais com o gerador flutuante, na situação de circuito aberto. Os resultados se referem, particularmente, ao estudo de caso na região da Usina Fotovoltaica Flutuante (UFF) no Reservatório da Usina Hidroelétrica de Sobradinho (UHE), Nordeste do Brasil.

## **METODOLOGIA**

A metodologia desenvolvida se baseia em um balanço de energia, inicialmente proposto por Jones e Underwood (2001) e adaptado por Kurnik *et al.* (2011), utilizando resultados experimentais de medições simultâneas das condições ambientais locais, das características elétricas específicas e das temperaturas do módulo e seu flutuador, Bacelar (2019).

#### *Medições experimentais- reservatório da UHE-Sobradinho*

Os dados ambientais e característicos do gerador fotovoltaico aqui reportados são provenientes de uma campanha de medição realizada durante 8 meses no reservatório da UHE-Sobradinho onde a UFF-1MW está sendo instalada. As medições ocorreram em tempo real com aquisição de dados numa taxa de minuto a minuto em uma bancada de testes flutuante. Configurada com as mesmas características estruturais e técnicas (módulo-flutuador) e capacitada com sensores apropriados às medições, a bancada que foi situada justaposta à UFF-1MW como mostra a figura.1. Os seguintes variáveis foram medidas, Bacelar (2019).

- Irradiância nos planos horizontal e inclinado,  $I_h$  e  $I_{col}$  ( $W/m^2$ );
- Irradiância refletida pela superfície da água-Albedo, ( $W/m^2$ );
- Temperatura e umidade relativa do ar,  $T_{amb}$  e UR ( $^{\circ}C$ ; %);
- Velocidade e direção do vento,  $v$  (m/s; graus);
- Corrente de curto-circuito,  $I_{CC}$  (A);
- Tensão de circuito aberto,  $V_{OC}$  (V);
- Temperatura do módulo fotovoltaico,  $T_{FV}$  ( $^{\circ}C$ );
- Temperatura do flutuador,  $T_{FL}$  ( $^{\circ}C$ ).



*Figura 1: Bancada de testes utilizada nas medições justaposta à UFF- 1MWp Reservatório UHE de Sobradinho-Chesf*

#### *Modelo de previsão da temperatura*

A definição do modelo de previsão da temperatura do módulo fotovoltaico instalado no reservatório da UHE-Sobradinho foi baseado no balanço de energia, inicialmente proposto por Jones e Underwood (2001) e adaptado por Kurnik *et al.* (2011).

O modelo considera o sistema em regime estacionário, ou seja, com variações lentas nos intervalos de observação. Nessas condições o balanço de energia é nulo: toda energia que entra é transformada em

eletricidade ou calor. São computadas no balanço a taxa de energia (potência) que ingressa no módulo FV ( $P_{sol}$ ), a potência elétrica produzida, a taxa de energia trocada em forma de calor por processos radiativos e por processos convectivos). A troca de calor por condução não foi considerada devido ao pequeno contato entre módulo e estrutura no caso em estudo (módulo sobre o flutuador sem contato direto). Nestas condições, o balanço energético pode ser representado pela Eq.2.

$$0 = P_{sol} - (P_{el} + P_{irrf} + P_{irrb} + P_{covf} + P_{covb}) \quad (2)$$

A potência elétrica produzida pelo módulo fotovoltaico pode ser obtida de forma convencional, deslocando-se a potência fornecida pelo fabricante, na condição padrão (1.000 W/m<sup>2</sup>), para a condição de operação. Para tal, são realizadas as devidas correções resultantes das variações da irradiância e da temperatura, conforme apresentado na Eq. 3.

$$P_{el} = - P_{FV\_STC} \cdot \frac{I_{col}}{1000} (1 + \gamma(T_{FV} - 25^\circ\text{C})) \quad (3)$$

Onde,  $P_{FV\_STC}$  é a potência do módulo na condição padrão (STC) e  $\gamma$  é o coeficiente de variação da potência com a variação da temperatura do módulo em relação à temperatura nas condições STC de 25 °C.

A potência térmica irradiada pelo módulo ( $P_{irr}$ ) nas superfícies frontal e traseira é calculada considerando-se as emissividades do céu e dos materiais (módulo, parte frontal e traseira e flutuador). A potência térmica transferida por convecção ( $P_{conv}$ ) pelas superfícies frontal e traseira do módulo é calculada considerando-se a convecção natural e forçada, essa última, calculada com um coeficiente de 2,3 vezes a velocidade do vento local ( $K_{fc}$ ) (Ws/ m<sup>3</sup> K).

O modelo descrito foi aplicado às condições específicas do sistema fotovoltaico flutuante instalado no reservatório da hidrelétrica de Sobradinho-BA, utilizando os dados experimentais obtidos com um módulo em circuito aberto (tensão igual à tensão de circuito aberto, Voc), portanto, sem geração de energia ( $P_{el} = 0$ ). Os valores de temperatura do módulo fotovoltaico ( $T_{FV}$ ), temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), irradiância no plano do módulo ( $I_{col}$ ) e velocidade do vento ( $v$ ) foram utilizados de forma a obter o coeficiente de Ross para a condição de instalação no lago, sem geração (Eq. 2). Para simular a condição com geração, foram considerados os dados de catálogo do módulo ensaiado (Potência pico (PFV\_STC), e coeficiente de variação da potência com a temperatura ( $\gamma$ ).

*Estimativa da Temperatura do módulo com geração a partir de medições do módulo em  $V_{oc}$*

Um coeficiente global de perdas foi obtido a partir do balanço de energia do módulo na condição real de instalação, em circuito aberto. Assume-se que o coeficiente global de perdas é o mesmo em ambas condições de operação do módulo: em vazio (circuito aberto) ou em carga (no ponto de máxima potencia MPPT). Embora as perdas e as diferenças de temperaturas ( $T_{FV} - T_{amb}$ ) sejam diferentes para cada situação de operação, o coeficiente de perdas global mantém-se constante.

O coeficiente global de perdas  $h$  pode ser calculado, com base nos dados experimentais por meio da representação das perdas totais ( $P_{perdas\_tot}$ ) em função de ( $T_{FV} - T_{amb}$ ) (Eq. 4).

$$h = \frac{P_{perdas\_tot}}{(T_{FV} - T_{amb})} \quad (4)$$

Dessa forma, o balanço de energia é realizado considerando o módulo com geração de potência, e a temperatura do módulo FV na condição de geração de energia é calculada como (Eq. 5).

$$T_{FV} = \frac{P_{sol} + h \cdot T_{amb} - P_{FVi} (1 - \gamma \cdot T_{FV\_STC})}{h + \gamma \cdot P_{FVi}} \quad (5)$$

Onde,  $P_{FVi}$  é a potência fotovoltaica dependente apenas da irradiância, ou seja, é a potência FV padrão corrigida para a irradiância que efetivamente incide sobre o módulo a cada instante ( $P_{FVi} = P_{FV\_STC} \cdot \frac{I_{col}}{1000}$ ).

## RESULTADOS

De posse da massa de dados disponibilizada durante a campanha de medição, foram calculados os valores de perdas totais em cada intervalo de um minuto, ao longo de vários dias durante o período de 8 meses. As perdas totais são mostradas na Fig. 2 em função da diferença de temperatura ( $T_{FV} - T_{amb}$ ). Observa-se uma relação linear entre as grandezas. O coeficiente global de perdas é obtido pela inclinação da linha de tendência da curva de regressão. O valor de h estimado é da ordem de -67,86 W/K, com um coeficiente de determinação de 93,4%, o que indica uma alta correlação, da ordem de 96,6%.

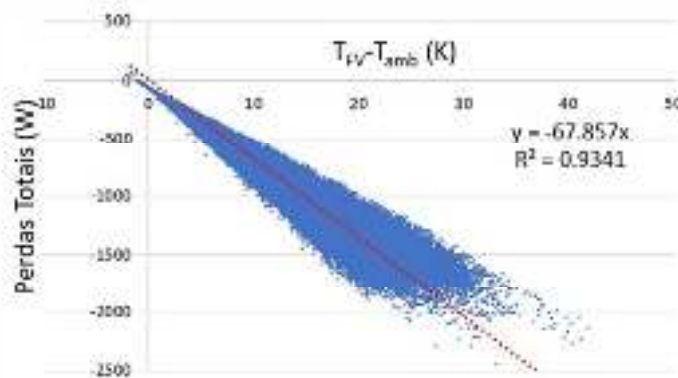


Figura 2: Perdas térmicas totais calculadas com base nos dados experimentais para o módulo instalado no reservatório da UHE de Sobradinho-Chesf.

Conhecendo-se o coeficiente de perdas global (h), pode-se determinar os valores da temperatura do módulo  $T_{FV}$  na condição de operação  $P_{el} \neq 0$  de acordo com a Eq. 5. Finalmente, pode-se determinar a potência elétrica do módulo como apresentado na Eq 3. A figura 3 mostra a potência elétrica calculada em função da irradiância incidente ( $I_{col}$ ).

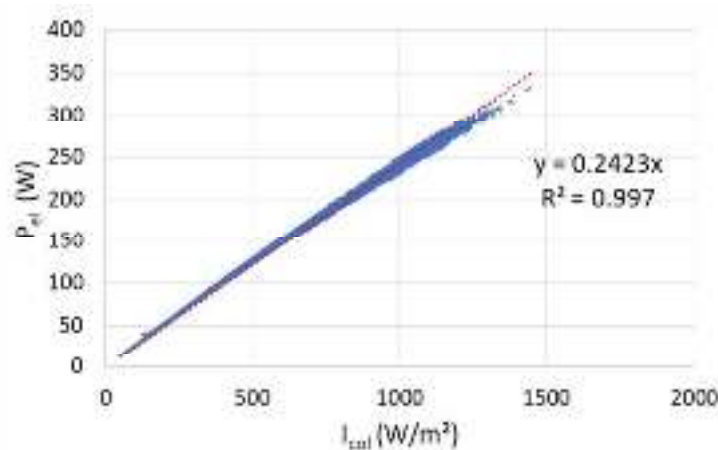


Figura 3: Potência elétrica calculada em função da irradiância incidente medida

Na figura 3 a linha de tendência apresenta um coeficiente angular da ordem de 0,2423. Esse valor pode ser utilizado para estimar a eficiência média de operação do módulo no reservatório da UHE-Sobradinho, sujeito às condições ambientais locais (vento, irradiância e temperatura ambiente), para o período estudado. Considerando-se a área do módulo igual a 1,608 m<sup>2</sup>, a eficiência média estimada é



da ordem de 15%. Esse valor pode ser considerado razoável dado que a eficiência do módulo nas condições padrão (STC) é da ordem de 16,47%.

## CONCLUSÃO

Um modelo para estimação da temperatura do módulo FV flutuante, instalado no lago de Sobradinho, em circuito aberto, possibilitou determinar, além da temperatura do módulo em condições operacionais (com seguimento da máxima potência), a potência e a eficiência média. Essas estimativas foram realizadas com base nos experimentos desenvolvidos na bancada de testes com as mesmas características da usina flutuante onde foi coletada uma massa de dados bastante representativa, pois, além da alta frequência das medições (1 minuto), abarca meses de alta radiação solar e temperatura ambiente e meses de baixa radiação e temperatura no período de novembro de 2018 a junho de 2019.

Com base no modelo de balanço de energia foi estimada a potência máxima gerada pelo módulo nas condições ambientais do lago. Verificou-se que a potência elétrica, em função da irradiância incidente no plano do módulo FV, pode ser expressa por uma reta, com coeficiente angular de 0,2423 e uma correlação superior a 99%. Essa representação permite estimar de forma simples, e com boa acurácia, o valor da potência gerada para diferentes valores de irradiância incidente, nas condições de temperatura e vento do lago. Ainda, dividindo-se o coeficiente encontrado pela área do módulo, foi possível estimar a eficiência média de operação do módulo no lago, da ordem de 15%.

Ressalta-se que a temperatura de operação dos módulos e conseqüentemente, a potência gerada, apresentam forte dependência com as condições climáticas locais, determinantes das perdas térmicas do módulo. Para os sistemas flutuantes instalados em lagos, destaca-se o papel das trocas de calor entre a parte posterior do módulo e os flutuadores. Particularmente, as perdas térmicas por convecção, que representam o maior percentual entre as perdas totais (67%), podem ser fortemente impactadas pela possibilidade ou não de aeração na região entre os módulos e os flutuadores. A escolha do tipo de flutuador é, portanto, uma das etapas de grande relevância no projeto de sistemas FV flutuantes.

O valor do parâmetro  $k$  de Ross obtido das especificações do fabricante (NOCT) é da ordem de 0,031 K/W/m<sup>2</sup>. Quando se considera o módulo em circuito aberto, nas condições ambientais do lago de Sobradinho, os valores calculados para esse parâmetro são bem menores.

O valor obtido diretamente da reta de regressão entre  $(T_{FV} - T_{amb})$  e  $(I_{col})$  foi de 0,022 K/W/m<sup>2</sup>. Uma análise estatística dos dados de  $k$  de Ross calculados ponto a ponto (para cada minuto), pela relação entre  $(T_{FV} - T_{amb})$  e  $(I_{col})$  resultou em um valor médio de 0,023 K/W/m<sup>2</sup>. Considerando-se o módulo operando em máxima potência, nas mesmas condições ambientais do lago, o valor estimado com o modelo proposto, para o parâmetro  $k$  de Ross é ainda menor, da ordem de 0,018 K/W/m<sup>2</sup>.

## AGRADECIMENTOS

Esse trabalho foi desenvolvido no âmbito do P&D “Exploração de Energia Solar em Lagos de Usinas Hidrelétricas”, Chamada Pública Eletronorte / Chesf - 003/2015.

Os autores agradecem o apoio recebido das equipes técnicas da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco - Chesf e da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE.

## REFERÊNCIAS

- Bacelar, T. S. (2019.) Características das condições ambientais no reservatório da UHE Sobradinho no contexto da geração fotovoltaica flutuante. Dissertação de mestrado. Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco PROTEN/UFPE. Orientadores: Vilela, O de C., Barbosa, E M.de S.
- Bist, R. R.; Saaqib, M. (2019) Comparison between Floating Solar PV Plant. International Journal of Research in Engineering, Science and Management, v. 2, n. 1, p. 453-456, . ISSN 2581-5792.
- Choi, Y.-K.; Lee, N.-H.; Kim, K.-J. (2013) Empirical Research on the efficiency of Floating PV. CES-CUBE 2013, ASTL v. Vol. 25, p. 284 - 289.

- Dubey, S.; Sarvaiya, J. N.; Seshadri, B. (2013) Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World – A Review. *Energy Procedia*, v. 33, p. 311-321, 2013. ISSN 18766102.
- Faiman, D. (2008) Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 16, n. 4, p. 307-315, ISSN 10627995.
- Hasan, O.; Arif, A. F. M.; Siddiqui, M. U. (2012) Finite Element Modeling and Analysis of Photovoltaic Modules. *International Mechanical Engineering Congress and Exposition: American Society of Mechanical Engineers*: 495-505 p.
- Jakhrani, A. Q. (2011) Comparison of solar photovoltaic module temperature models. *World Applied Sciences Journal* v. 14, n. 3, p. 1-8. ISSN 1818-4952
- Jones, A. D.; Underwood, C. P. (2001) A thermal model for photovoltaic systems, *Sol. Energy. Solar Energy*, v. 70 n. (2) p. 349–359.
- Kamuyu, L.; Ahn, H. K.; Won, W. C. J. R. L. C. S. (2018) Prediction Model of Photovoltaic Module Temperature for Power Performance of Floating PVs. *Energies*, v. 11, n. 2, . ISSN 1996-1073.
- Kurnik, J. (2011) Outdoor testing of PV module temperature and performance under different mounting and operational conditions. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, v. 95, p. 273-376.
- Liu, H. (2018) Field experience and performance analysis of floating PV. *Article in Progress in Photovoltaics Research and Applications* v. 26, n. 12, p. 957-967.
- Lupu, A. G. (2018) A review of solar photovoltaic systems cooling technologies. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 444, ISSN 1757-899X.
- Olukan, T. A.; Emziane, M. A (2014) Comparative Analysis of PV Module Temperature Models. *Energy Procedia*, v. 62, p. 694-703, ISSN 18766102.
- Ross, R. G. (1976) Interface Design Considerations for Terrestrial Solar Cell Modules. *Proceedings of the 12 th IEEE photovoltaic specialist's conference*, v. Baton Rouge, LA, p. 801-806.
- Saadon, S. (2016) Simulation study of a naturally-ventilated building integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) envelope. *Renewable Energy*, v. 87, p. 517-531, ISSN 09601481.
- Skoplaki, E.; Palyvos, J. A. (2009) Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. *Renewable Energy*, v. 34, n. 1, p. 23-29, ISSN 09601481.
- Souza, A. D. (2016) Modelagem da temperatura do módulo de células fotovoltaicas em função da temperatura ambiente, velocidade dos ventos e irradiância. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 5, n. 4, 2016. ISSN 2237-9711.

## **FORECAST OF TEMPERATURE AND PERFORMANCE OF FLOATING PHOTOVOLTAIC GENERATOR FROM ITS ELECTRICAL CHARACTERISTICS MEASURED IN REAL ENVIRONMENTAL CONDITIONS**

**ABSTRACT:** This paper presents the development of a methodology for the prediction of the temperature of photovoltaic modules when under real environmental conditions of operation and the results obtained in the case of the Sobradinho Hydroelectric Power Plant Floating-BR (-9 ° 35 ' ; -40 ° 50'). It uses local experimental data measured in real-time for eight months of the electrical characteristics and the temperatures of the module and its float, simultaneously with climatological parameters. The results prove the strong dependence of the operating temperature, therefore, of the power generated with the local climatic conditions, determining in the thermal losses of the module. For floating systems, the module - float heat exchange stands out. Particularly, convection losses represent the highest percentage, 67% of the total loss, and the aeration impacts the region between the modules and their float. The choice of a float type is, therefore of high relevance in the design of floating PV systems.

**Keywords:** Temperature and operating efficiency of the photovoltaic module, Floating photovoltaic plant, Photovoltaic generation

## **CÁLCULO DE LA RELACIÓN DE RENDIMIENTO DE UNA PLANTA FOTOVOLTAICA MEDIANTE DISTINTAS METODOLOGÍAS. CASO DE ESTUDIO EN LA CIUDAD DE MAR DEL PLATA**

**S.A. González<sup>1</sup>, G.J. Murcia<sup>2</sup>, E. Garin<sup>3</sup>, J.C. Branda<sup>4</sup>, A. Lanson<sup>5</sup>, R. Aristegui<sup>6</sup>**  
<sup>2,3,4,5</sup> LEyDE (Laboratorio de Ensayos y Desarrollos Energéticos, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata)

<sup>1</sup> CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas)

<sup>5,6</sup> INEDES (Instituto de Ecología y Desarrollo Sustentable, Universidad Nacional de Luján)

<sup>1</sup> ICYTE (Instituto de Investigaciones Científicas y Tecnológicas en Electrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata), e-mail: sagonzal@fi.mdp.edu.ar

*Recibido 19/08/19, aceptado 23/10/19*

**RESUMEN:** Este trabajo describe cuatro metodologías para el cálculo de la relación de rendimiento (PR) de un sistema fotovoltaico (FV) y las aplica en una planta ubicada en la costa sudoeste de la provincia de Buenos Aires. La ubicación geográfica de esta planta experimental permite evaluar la influencia de un clima costero irregular y de alta humedad en los resultados del PR definidos en las cuatro metodologías analizadas. El objetivo de este trabajo es cuantificar la influencia del clima local en el cálculo del PR. Se concluye qué metodología se ve menos afectada por estas variables climáticas, se identifica la temperatura como el factor preponderante en el resultado del PR y se cuantifica esta dependencia. Este trabajo permite seleccionar una metodología que sirve de base de comparación para el análisis del rendimiento de las instalaciones desahogado de la influencia del clima.

**Palabras clave:** Rendimiento, Eficiencia, Instalaciones FV conectadas a red.

### **INTRODUCCIÓN**

Argentina ha sancionado en diciembre de 2017 la Ley Nacional N° 27.424, “Régimen de fomento a la generación distribuida de energía renovable integrada a la red eléctrica pública” recientemente reglamentada. Esta norma habilita a los usuarios residenciales y PyMEs a generar energía eléctrica para autoconsumo a partir de fuentes renovables con paneles fotovoltaicos, biodigestores, turbinas hidroeléctricas o aerogeneradores de baja potencia en todo el territorio nacional e inyectar y vender el excedente producido en la red de distribución. El objetivo principal de la ley es fijar las políticas y establecer las condiciones jurídicas y contractuales para la generación de energía eléctrica de origen renovable por parte de usuarios de la red de distribución, y establecer la obligación de los prestadores del servicio público de distribución de facilitar dicha inyección, asegurando el libre acceso a dicha red.

En este nuevo marco legal, la generación distribuida solar a baja escala tiene aquí un nicho importante, entre otras razones, porque compite con el precio final de la energía, facilitando su amortización y una rápida implantación. La complementariedad entre ambos modelos (generación distribuida y generación concentrada en centrales) será la base para el desarrollo de los futuros sistemas eléctricos descentralizados.

La relación de rendimiento (PR por sus siglas en inglés de Performance Ratio) se define en IEC 61724 y es una medida comúnmente utilizada mundialmente para evaluar el rendimiento de una planta FV (Khalid et al., 2016). El índice PR mide la eficiencia con que la instalación convierte la luz solar incidente en energía eléctrica, en relación con lo que se esperaría obtener basándose, solamente, en la potencia nominal de los paneles utilizados (valor estimado en las condiciones estándar (STC) especificada a 25°C con 1000W/m<sup>2</sup> de irradiancia con una masa de aire espectral de 1,5 (AM 1,5)). No debe confundirse el PR con la eficiencia del módulo FV, que en el caso de los paneles empleados en este estudio es de aproximadamente 15 % (ver Tabla 1).

El PR cuantifica el efecto general de las pérdidas que pueda sufrir la planta FV debidas, por ejemplo, a la ineficiencia del inversor, al cableado, a defectos de panel, a una temperatura elevada del módulo, al reflejo de la superficie frontal del módulo, a suciedad, al tiempo de inactividad del sistema, al sombreado, la pérdida de transparencia, o los fallos de los componentes. Ya que muchos de estos factores son indicadores de calidad de construcción y/o operación, el PR se ha convertido en un indicador valioso para las instituciones técnicas y financieras al momento de realizar evaluaciones técnico económicas. Determinar el PR de una instalación FV es importante para la evaluación de proyectos porque ayuda a comprender qué ubicaciones proporcionarán las plantas más productivas, o bien, permite determinar si las condiciones en las que opera una planta existente son satisfactorias o requieren de acciones correctivas para aumentar su rendimiento.

Desafortunadamente, algunos de los factores que afectan al PR definido por la IEC 61724 también dependen del clima (Dierauf et al., 2013). Por ejemplo, un sitio más frío hará funcionar los paneles FV a una temperatura menor que la definida en las condiciones STC, lo que implica mayor generación de electricidad que otro emplazamiento más cálido con el mismo nivel de irradiancia. De esta forma, resulta inexacta la estimación de la energía que se esperaría obtener de los paneles FV basándose en su potencia nominal que determinaría un PR sobrestimado para dicho clima frío.

Los valores de PR para plantas con convertidores de la actual generación tecnológica, suelen oscilar entre 0,6 y 0,9 según un estudio de Huang (Huang et al., 2011) donde se analizan 202 plantas fotovoltaicas en un período de 3 años. Por otro lado, el rendimiento de aproximadamente 100 sistemas fotovoltaicos alemanes en climas fríos se acerca, o incluso exceden un PR de 0,9 (Decker y Jahn, 1997; De Graaf y Van Der Weiden, 1994; Taylor et al., 2015). La fuerte dependencia de PR con la temperatura da como resultado una gran variación estacional en PR, que puede ser tan grande como  $\pm 10\%$  (Ishii et al., 2011).

Esta dependencia del PR con el clima introduce un error inaceptable en la evaluación de proyectos FV si se utiliza al PR como índice de comparación de rendimiento de plantas FV en ubicaciones geográficas diferentes. Por esta razón, el PR es a menudo corregido a una temperatura normalizada de 25°C usando la metodología que el NREL (National Renewable Energy Laboratory de EE. UU.) propone a través del trabajo de Dierauf et al. (2013). En este trabajo se denomina a este un PR *corregido por temperatura*. Si bien sería útil corregir el PR para cada aspecto del clima, NREL propone corregir solo las variaciones climáticas que afectan la temperatura del módulo (temperatura ambiente, viento e irradiancia) por ser éstas las de mayor influencia en la producción de energía.

El propósito de este trabajo es calcular el PR de una planta FV instalada en la terraza de uno de los edificios de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata utilizando distintas metodologías: la propuesta por la IEC 61724, por el NREL en el documento CP-520-37358, por el NREL corregido por temperatura propuesta en el documento TP-5200-57991 y finalmente una estimación del PR basado en el modelo PVUSA (documento NREL/CP-550-45376) con el objetivo encontrar el PR exigible a una instalación local que elimine el sesgo estacional asociado a las variaciones de temperatura típicas del clima, (Myers, 2009), y sirva como base de referencia para la evaluación de proyectos FV en el sudeste bonaerense.



Figura 1: (a) Planta FV experimental instalada en la terraza del edificio principal de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata. (b) Inversores utilizados en la planta FV experimental instalada en la terraza del edificio principal de la Facultad de Ingeniería.

## ARREGLO EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA DE TRABAJO

### *Planta FV Experimental*

La planta fotovoltaica experimental, ya presentada por Jacob (Jacob et al., 2015), será utilizada para el cálculo del PR en la ciudad de Mar del Plata (S38°0 0 43.35 00 W57°34 0 54.11 00). La misma está compuesta por 18 módulos fotovoltaicos, cada uno de 290W dispuestos en tres hileras orientadas al Norte, con una inclinación fija de 30° (como se ve en la Fig. 1a), que totalizan 5,22 kWp de potencia instalada, con una superficie de paneles de 35 m<sup>2</sup> aproximadamente.

Los paneles utilizados son del fabricante nbSolar y son de silicio policristalino. Las características principales extraídas de la hoja de datos del fabricante se pueden ver en la Tabla 1.

<b>Características Eléctricas</b>	<b>STC</b>
Potencia Máxima, $P_{(max)}$	290W
Tensión a $P_{(max)}$ $V_{(max)}$	35.20V
Corriente a $P_{(max)}$ $I_{(max)}$	8.24A
Tensión a circuito abierto $V_{(oc)}$	44.20V
Corriente de cortocircuito $I_{(sc)}$	8.59A
Eficiencia del módulo $\eta$	14.9 %
Coefficiente térmico a $P_{(max)}$ $\delta$	-0.45 %/°C

Tabla 1: Especificaciones técnicas de los módulos de nbSolar utilizados.

Cada hilera de paneles inyecta energía a la red interna de la Facultad mediante tres inversores marca AROS modelo SIRIO de 1,5 kW de potencia nominal que se muestran en la Fig. 1b.

### *Monitoreo y Registro de Datos*

Dos radiómetros fotovoltaicos fueron ubicados en la planta FV experimental, uno en el plano horizontal y otro con la misma inclinación y orientación de los paneles FV. El sensor en el plano horizontal forma parte de una estación meteorológica Davis Vantage Pro II, situada a 5m de las hileras de paneles. Dicho sensor tiene una resolución de 1W/m<sup>2</sup> con una exactitud de 5 % sobre fondo de escala de 1800W/m<sup>2</sup>.

El radiómetro en el plano inclinado tiene una salida  $V_r = 13,9\mu V/W$  que se calibró frente a un piranómetro de laboratorio Eppley, Modelo PSP, S/N 10566 F4. Dos diferentes dispositivos de registro de datos fueron configurados para almacenar los valores de irradiancia. Para la irradiancia en el plano horizontal y demás parámetros meteorológicos se utilizó el software Weatherlink propio de la estación Davis Vantage Pro II, configurado para almacenar registros cada 1 minuto. Un registrador de datos personalizado fue construido para registrar la irradiancia inclinada y la temperatura ambiente cada 1 segundo, basado en un sistema de adquisición de datos que utiliza una computadora personal y el software M ATLAB.

Finalmente, se utilizó un dispositivo PQube para registrar las variables eléctricas, tanto en continua (corriente y tensión a la salida de los paneles FV) como en alterna (corriente a la salida de los inversores y la tensión de red) configurado para capturar mediciones cada 1 segundo y almacenar promedios en una SD-Card cada 1 minuto. Todos los sistemas de almacenamiento fueron sincronizados a través de un servidor mediante un protocolo de tiempo (NTP) con la zona horaria de Argentina (ART), almacenando dichas mediciones en el intervalo de 7 a 19 hs.

## METODOLOGÍA

### *Planteo Teórico: Definiciones de la Relación de Rendimiento a utilizar.*

Para calcular el desempeño de una planta FV se aplican ecuaciones y metodologías distintas existiendo muchos métodos. En el reciente trabajo de Khalid (Khalid et al., 2016) lista no menos de 11 alternativas para cálculo del desempeño, lo que da una idea de la importancia que la medición en sí ha tenido en los últimos años. En este trabajo se abordarán 4 enfoques distintivos.

### *Definiciones Según IEC61724.*

El estándar europeo EN 61724 fue introducido en 1998 luego de varias re-definiciones surgió el actual estándar IEC 61724 de 2016: “Monitoreo del rendimiento del sistema fotovoltaico – Pautas para la medición, intercambio y análisis de datos” (Blaesser y Munro, 1995). Hoy en día, se utiliza como referencia principal a nivel mundial para establecer el rendimiento de un sistema fotovoltaico. Los diferentes parámetros que se deben medir según este estándar en un sistema FV completo se muestran en Fig. 2.

Las cantidades de energía derivadas se definen mediante las siguientes ecuaciones:

$$E_{i,\tau} = \tau_r \sum_{\tau} P_i \quad (1)$$

Donde:

- $i$  es el subíndice que expresa cuál es la energía calcula según la Fig. 2,
- $E$  es la cantidad de energía expresada en kWh,
- $P$  es la potencia medida en kW,
- $\tau_r$  es el intervalo de registro en horas,
- $\tau$  es el período de tiempo reportado en horas.

Usando (1) se pueden calcular todas las energías intercambiadas entre los distintos componentes de la Fig. 2, tales como aquellas que fluyen entre los paneles FV y el eventual sistema de acondicionamiento (EA), entre el sistema de acondicionamiento y la carga (EL), entre el sistema de acondicionamiento y la red (ETU) y viceversa (EFU), entre el sistema de acondicionamiento y un eventual sistema almacenamiento (ETS) y viceversa (EFS), o entre una eventual fuente de respaldo y el sistema de acondicionamiento (EBU). De esta forma, la energía neta enviada al sistema de almacenamiento (ETSN) en el período  $\tau$  reportado es:

$$E_{TSN,\tau} = E_{TS,\tau} - E_{FS,\tau} \quad (2)$$

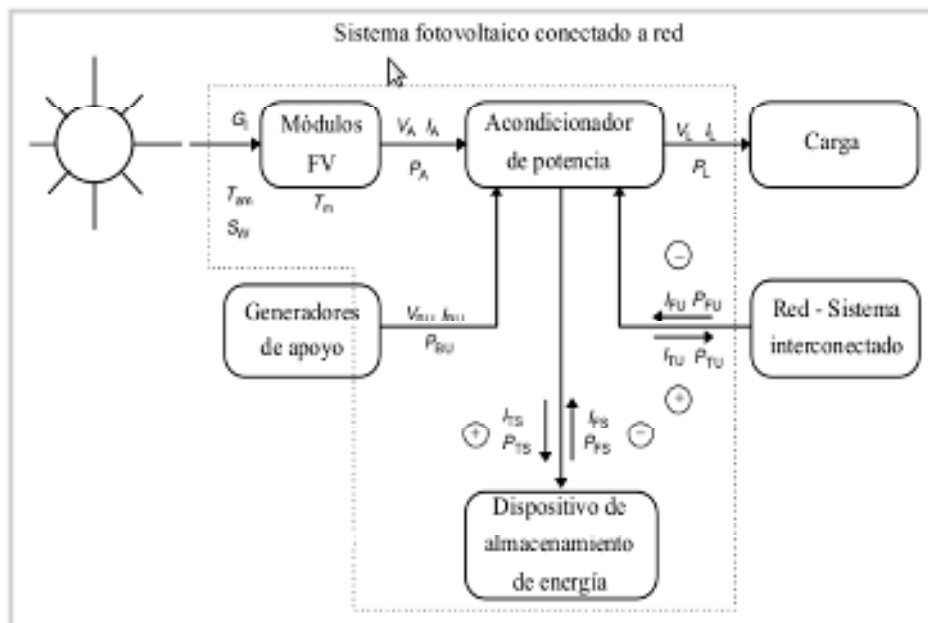


Figura 2: Diagrama de la norma IEC-61724 en español donde se muestran los parámetros a medir en tiempo real.

Del mismo modo, la energía neta recibida del sistema de almacenamiento (EFSN) en el período  $\tau$  reportado es:

$$E_{FSN,\tau} = E_{FS,\tau} - E_{TS,\tau} \quad (3)$$

La energía neta enviada a la red (ETUN) en el período  $\tau$  reportado es:

$$E_{TUN,\tau} = E_{TU,\tau} - E_{FU,\tau} \quad (4)$$

Análogamente, la energía neta recibida de la red (EFUN) en el período  $\tau$  reportado es:

$$E_{FUN,\tau} = E_{FU,\tau} - E_{TU,\tau} \quad (5)$$

Por lo anterior, la energía total entrante al sistema (EIN) en el período  $\tau$  reportado es:

$$E_{IN,\tau} = E_{A,\tau} + E_{BU,\tau} + E_{FUN,\tau} + E_{FSN,\tau} \quad (6)$$

y la saliente del sistema (EUSE) en el período  $\tau$  reportado es:

$$E_{USE,\tau} = E_{L,\tau} + E_{TUN,\tau} + E_{TSN,\tau} \quad (7)$$

Una vez obtenidas estas energías es posible calcular la eficiencia con la que la energía de todas las fuentes es transmitida a las cargas ( $\eta_{LOAD}$ ) en el período  $\tau$  reportado como:

$$\eta_{LOAD,\tau} = \frac{E_{USE,\tau}}{E_{IN,\tau}} \quad (8)$$

El rendimiento del arreglo FV ( $Y_A$ ) se calcula como el cociente entre la energía de salida diaria total del arreglo (EAD) y la potencia instalada del arreglo ( $P_0$ ), según:

$$Y_A = \frac{E_{AD}}{P_0} = \frac{\tau_r \sum_{dia} P_A}{P_0} \quad (9)$$

El rendimiento final de la planta FV,  $Y_f$ , se calcula como el rendimiento del arreglo FV por la eficiencia en la transmisión de energía a las cargas, es decir:

$$Y_f = \eta_{LOAD} \cdot Y_A \quad (10)$$

Según el documento IEC 61724, el rendimiento final ( $Y_f$ ) representa el número de horas por día que el arreglo FV necesitaría operar a su potencia de salida nominal ( $P_0$ ) para igualar su contribución energética diaria neta a la carga conectada.

Por otra parte, el rendimiento de referencia ( $Y_r$ ) puede evaluarse calculando el cociente de la irradiancia diaria en el plano de los paneles FV ( $G_I$ ) a la de referencia  $G_{Iref}$  también denominada  $G_{STC}$ . El rendimiento de referencia también se denomina Horas de Sol Pico (HSP) ya que representa el tiempo durante el cual un nivel de irradiancia de referencia ( $G_{Iref} = 1\text{kW/m}^2$ ) presenta la misma energía incidente que la monitoreada. Es decir:

$$Y_r = \frac{\tau_r \sum_{dia} G_I}{G_{Iref}} \quad (11)$$

Finalmente, la relación de rendimiento (PR) será:

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \quad (12)$$

*Definiciones Según NREL CP-520-37358*

El documento NREL/CP-520-37358 (Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems) define el rendimiento final de la planta FV,  $Y_f$ , como:

$$Y_f = \frac{\sum_i EN_{ACi}}{P_0} \quad (13)$$

Donde:

- $i$  es el subíndice que expresa el período de tiempo reportado,
- $EN_{AC}$  es la energía generada,



- $P_0$  es la potencia del sistema FV en kW, también denominada ( $P_{STC}$ ).

El rendimiento final de la planta FV ( $Y_f$ ) normaliza la energía producida respecto del tamaño de la planta FV, de esta manera, pueden ser comparadas distintas plantas independientemente de su tamaño.

El rendimiento de referencia ( $Y_r$ ) se calcula como el cociente entre la irradiancia global por área en el plano de los paneles FV y la irradiancia de referencia,  $G_{STC}$ .

$$Y_f = \frac{H}{G} = \frac{\tau_r \sum_i G_{POAi}}{G_{STC}} \quad (14)$$

Donde:

- $i$  es el subíndice que expresa el período de tiempo reportado,
- $\tau_r$  es el intervalo de registro en horas,
- $G_{POAi}$  es la irradiancia en el plano,
- $G_{STC}$  es la irradiancia bajo condiciones de referencia.

La relación de rendimiento queda entonces definida como:

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} = \frac{\sum_i EN_{ACi}}{\sum_i (P_{STC} \frac{G_{POAi}}{G_{STC}})} \quad (15)$$

#### *Definiciones Según NREL TP-5200-57991*

El informe NREL/TP-5200-57991 presenta el método de cálculo del PR corregido por temperatura, ya que es ésta la variable meteorológica de mayor influencia en dicho índice. La estrategia de corrección de temperatura se basa en el hecho que los módulos normalmente operan a una temperatura mayor de 25°C (condiciones NTC) lo que conlleva a una sobre-estimación del PR si no se efectúa tal corrección. La corrección propuesta por NREL se limita a considerar los factores que afectan la temperatura del módulo (temperatura ambiente, viento e irradiancia), no considerando los efectos relacionadas con la suciedad, la cobertura de nieve o las variaciones de irradiancia que afectan la eficiencia del módulo fotovoltaico. Los autores coinciden en que estas correcciones proporcionarían resultados más precisos y consistentes.

El cálculo de PR corregido según la metodología NREL / TP-5200-57991 es:

$$PR_{corr} = \frac{\sum_i EN_{ACi}}{\sum_i ((P_{STC} \frac{G_{POAi}}{G_{STC}}) \cdot (1 - \frac{\delta}{100} (T_{celltypavg} - T_{cell_i})))} \quad (15)$$

Donde:

- $i$  es el subíndice que expresa período de tiempo reportado.
- $EN_{AC}$  es la potencia generada en corriente alterna expresada en kW.
- $P_{STC}$  es la sumatoria de la potencia nominal de los módulos instalados en las condiciones de referencia
- $G_{POA}$  es la irradiancia global medida en el plano del arreglo  $W/m^2$ .
- $G_{STC}$  es la irradiancia a STC ( $1000 W/m^2$ ).
- $\delta$  es el coeficiente variación de la potencia con la temperatura ( $\%/^{\circ}C$ ) de los módulos instalados.
- $T_{celltypavg}$  es la temperatura de la celda promedio calculada a partir de un año de datos meteorológicos, [ $^{\circ}C$ ].
- $T_{cell}$  es la temperatura de la celda calculada a partir de datos meteorológicos medidos, [ $^{\circ}C$ ].

La temperatura de la celda  $T_{celli}$  puede estimarse con las siguientes ecuaciones:

$$T_{m_i} = G_{POAi} e^{(a+bW_{s_i})} + T_{a_i} \quad (17)$$

$$T_{cell_i} = T_{m_i} + (\frac{G_{POAi}}{G_{STC}}) \Delta T_{cnd} \quad (18)$$

Donde:

- $T_m$  es la temperatura de la superficie posterior del módulo para el periodo  $i$ , ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- $T_a$  es la temperatura ambiente para el periodo  $i$ , ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- $W_{si}$  es la velocidad del viento medida corregida a una altura de medición de 10 metros para el  $i$ -ésimo periodo, (m/s)
- $a$  es una constante empírica que refleja el aumento de la temperatura del módulo con la luz solar.
- $b$  es una constante empírica que refleja el efecto de la velocidad del viento en la temperatura del módulo.
- $e$  es la constante de Euler y la base para el logaritmo natural.
- $\Delta T_{cnd}$  es la caída de temperatura por conducción según modelo de King (King et al., 2004).

El término  $a + bW_{si}$  en (17) es un modelo de transferencia de calor por conducción/convección determinado empíricamente (en  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{kW}$ ). En este trabajo fueron los utilizados los coeficientes empíricos presentados por King (King et al., 2004).

Para el cálculo de  $T_{celltypavg}$  se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$T_{celltypavg} = \frac{\sum G_{POAtypj} \cdot T_{celltypj}}{\sum G_{POAtypj}} \quad (19)$$

Donde:

- $T_{celltypavg}$  es la temperatura promedio de la celda sopesada por la irradiancia para un año determinado desde los registros meteorológicos ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- $T_{celltypj}$  es la temperatura de operación de la celda para cada hora ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- $G_{POAtypj}$  es la irradiancia para cada hora en el plano de los paneles FV determinada desde los registros meteorológicos  $\text{W}/\text{m}^2$ .
- $j$  es cada hora del año (8760 horas totales).

#### *Definiciones Según PVUSA y NREL/CP-550-45376*

Como se dijo, la medición del rendimiento según IEC 61724 descripta es sensible a las condiciones ambientales del sitio y por lo tanto varía en función de la estación del año y condiciones meteorológicas.

Otro enfoque para corregir esta variación que puede ser usado es la utilización de modelos lineales para estimar la potencia instalada FV, al extrapolar la generación de potencia a las condiciones de referencia, lo que suministra una medida del rendimiento real corregido por variaciones en el clima. Estos modelos típicamente incluyen coeficientes de correlación para cada factor ambiental que deberían ser estimados por regresión. El modelo PVUSA (Photovoltaic for Utility Scale Application) se usa rutinariamente para evaluar instalaciones y fue inicialmente desarrollado para zonas climáticas de Norteamérica (Dows y Gough, 1995).

El método PVUSA está basado en la recolección de datos solares, meteorológicos y de potencia del sistema para un periodo de tiempo, y una regresión de la salida del sistema (P) contra una combinación de irradiancia (I), velocidad de viento (W) y temperatura ambiente (T), según la siguiente ecuación:

$$P = I \cdot (a + b \cdot I + c \cdot W + d \cdot T) \quad (20)$$

El trabajo de Myers (2009) plantea las siguientes recomendaciones para determinar los coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  de (20):

- Utilizar solo datos medidos en días despejados.
- Remover de la base de datos utilizada cualquier conjunto de datos con algún parámetro faltante.
- No considerar mediciones con irradiancia menor a  $500 \text{ W}/\text{m}^2$ .
- Remover de la base de datos utilizada aquellas mediciones donde la potencia generada no se corresponda con el funcionamiento normal de la planta FV (ejemplo: paradas por mantenimiento,

fallas, desconexiones, etc.), estableciendo para ello que las mediciones se descartan si la potencia eléctrica de salida de la planta no cumple alguna relación mínima con la irradiancia incidente.

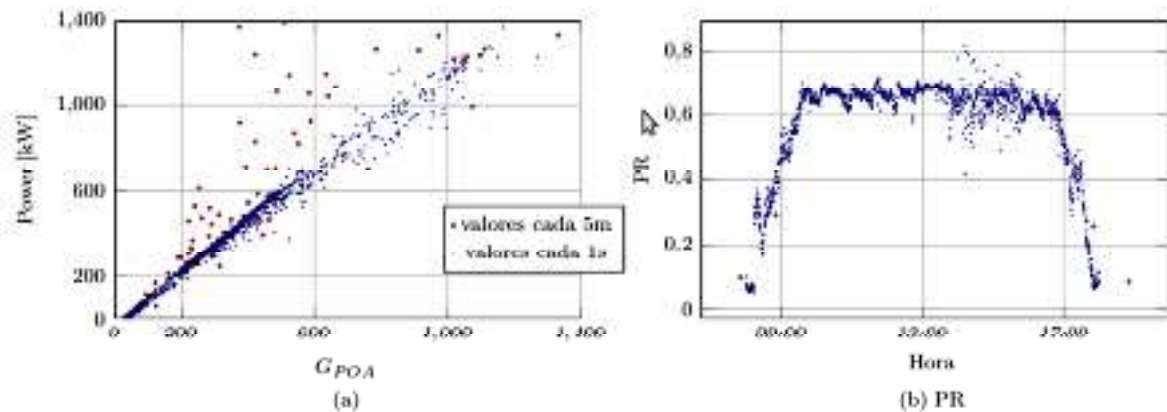


Figura 3: Análisis del efecto del intervalo de registro en el cálculo del PR, mediante los valores irradiancia y potencia para el 8-5-19. (a) Potencia instantánea como función de la irradiancia. (b) Resultado del cálculo del PR horario según ecuación (12) para intervalos de registro de 1 segundo y 5 minutos.

#### Influencia del Intervalo de Registro en el Cálculo del PR

Siendo la irradiancia solar un recurso fuertemente dependiente de la nubosidad se plantea como primer aspecto analizar la influencia que podría tener en el valor del PR el intervalo de registro  $\tau_r$  de la ecuación (1). Esto puede percibirse al analizar los días nublados, como por ejemplo el día de la Fig. 3 donde el comportamiento de la irradiancia resulta muy variable. Este comportamiento variable de la irradiancia con la nubosidad produce que los inversores no trabajen en el punto de máxima potencia lo que repercute en la potencia de salida.

Las alternativas evaluadas fueron utilizar mediciones cada 1 segundo (cuasi instantáneas), utilizar valores promediados cada 1 minuto (obtenidos promediando 60 valores cuasi instantáneos), o utilizar valores promediados cada 5 minutos (obtenidos promediando 300 valores cuasi instantáneos). Para este análisis se toma una muestra de 10 días con distintas condiciones de nubosidad y se calcula para cada uno de ellos el PR (de 1h) y el PR (de 1 día) según (12), para intervalos de registro de 1 segundo, 1 minuto y 5 minutos. La Figura 3 muestra, a modo de ejemplo, los valores de potencia eléctrica generada por uno de los 3 arreglos monofásicos y la irradiancia medida para un día nublado cada 1 segundo y los promedios de 5 minutos (8 de mayo de 2019), y en la Tabla 2 se resume el resultado de este análisis al mostrar el PR de un día calculado con mediciones cada 1 segundo y promedio de mediciones cada 5 minutos.

Como se observa en la Tabla 2 la diferencia en el cálculo del PR diario para los 10 días tomados fue en promedio de 1,273 %, con una desviación estándar del promedio de 0,114 % (calculada aplicando el factor t de la distribución de Student para 9 grados de libertad y probabilidad 68,27 %). Estos resultados muestran que el cálculo del PR se ve mínimamente afectado por la incidencia del intervalo de registro  $\tau_r$  de las ecuaciones de PR, por lo que a partir de esto, la metodología elegida en lo siguiente se basa en mediciones promedio de 5 minutos, de variables tanto eléctricas como meteorológicas, atendiendo al menor esfuerzo computacional y volumen de información a gestionar.

## RESULTADOS

El rendimiento final de la planta FV ( $Y_f$ ) promedio mensual aplicando las definiciones según IEC 61724 durante los años 2015 a 2018 con datos promedio de 5 minutos se presenta en la Figura 4. El valor máximo del  $Y_f$  promedio mensual en los 48 meses reportados fue de 5,57 KWh/kW<sub>p</sub> en enero de 2016, el mínimo valor se obtuvo en abril de 2017 con 1,67 KWh/kW<sub>p</sub> y el valor medio a lo largo de los 48 meses fue de 3,80 KWh/kW<sub>p</sub>. Las mediciones indican que el año 2017 fue el menos propicio para la generación solar de los cuatro analizados.

Fecha	PR diario		diferencia %
	mediciones	promedios	$x_i$
	1 segundo	5 minutos	
08-5-19	0,6269	0,6149	1,91
09-5-19	0,6000	0,5943	0,95
10-5-19	0,5409	0,5374	0,64
11-5-19	0,6126	0,6043	1,35
12-5-19	0,6078	0,6000	1,28
13-5-19	0,6030	0,5952	1,29
14-5-19	0,5876	0,5781	1,61
15-5-19	0,5732	0,5658	1,29
16-5-19	0,6080	0,6003	1,25
17-5-19	0,6089	0,6018	1,16
Promedio, $\bar{x}_i$ :			1,273 %
Desv. estándar del promedio, $\sigma_{x_i} = 1,045/\sqrt{10}$ :			0,114 %

Tabla 2: PR diario calculado en distintos intervalos de registro (muestra: 10 días con datos de 7a 19 h)

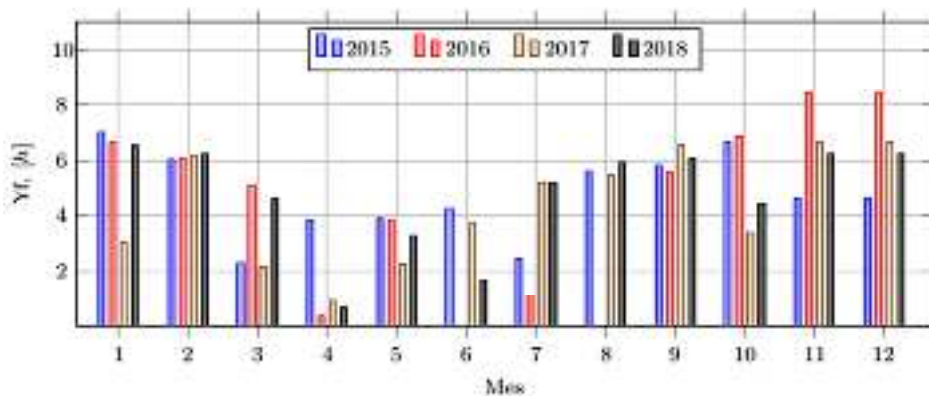


Figura 4: Rendimiento final ( $Y_f$ ) de la planta experimental del período enero 2015 - diciembre 2018

Por lo expresado anteriormente, se presenta en la Fig. 5a un PR diario, calculado según la ecuación (15) (trazo rojo), para cada día del periodo de medición (1080 días diurnos en total, de 7 a 19h) utilizándose los años 2016 a 2018 por encontrarse completos con datos meteorológicos. Se analizó la temperatura promedio desde 7 a 19h durante el 2016 y resultó ser mayor que durante 2017 y 2018, lo que podría explicar la tendencia del PR de la Fig. 5a (a temperaturas medias más elevadas el PR tiende a bajar y viceversa). La Fig. 5b refuerza este concepto al mostrar este PR diario como función de la temperatura diaria promedio junto a una interpolación de primero orden. A medida que la temperatura es mas baja, el PR aumenta y esto podría ser debido a que la eficiencia del sistema es mayor.

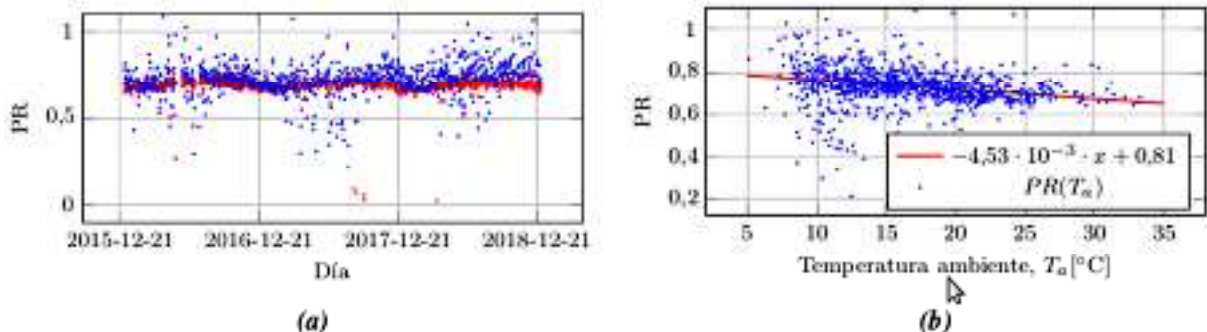


Figura 5: (a) PR diario calculado según IEC 61724 (ó NREL) sin corregir (azul) y corregido por temperatura (rojo) de la celda según ecuación (16), (b) PR diario en función de la temperatura ambiente promedio.

Calcular el PR corregido por temperatura aplicando la ecuación (16) implica medir o estimar la temperatura de la celda y la temperatura promedio anual de la misma. Puesto que no hay mediciones de estas temperaturas para la planta experimental se aplicaron las ecuaciones (17), (18) y (19), basándose en los coeficientes empíricos del trabajo de King et al. (2004) y mediciones de irradiancia y de velocidad de viento.

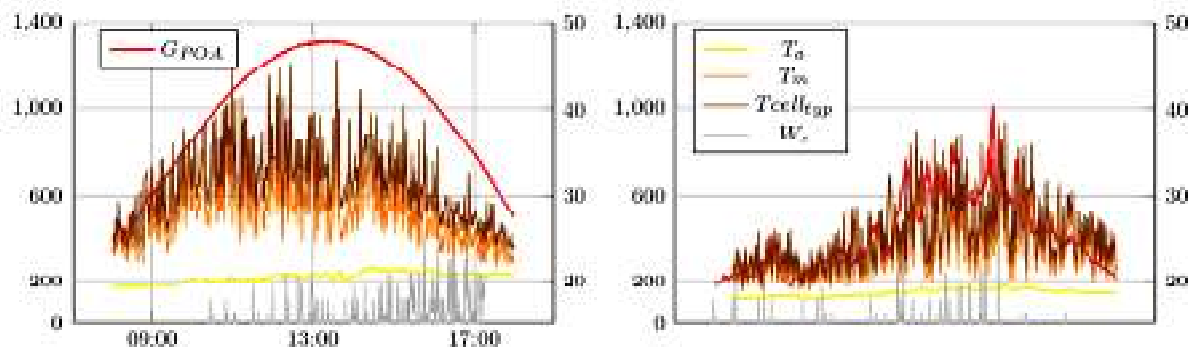


Figura 6: Temperatura estimada de la celda,  $T_{cell_{typ}}$  y del módulo,  $T_m$ , para un día despejado y uno nublado a modo de ejemplo y demás parámetros meteorológicos requeridos para su estimación como: irradiancia,  $G_{POA}$ , temperatura ambiente,  $T_a$  y velocidad del viento,  $w_s$ . Escala de irradiancia a la izquierda y temperaturas y velocidad de viento a la izquierda.

Para la planta experimental instalada en la Facultad de Ingeniería se utilizó como coeficiente de variación de la potencia con la temperatura ( $\delta$ ) en la ecuación (16) el valor indicado en la Tabla 1 ya que se obtuvo directamente del fabricante, y los valores de  $-3,58$  para  $a$  y  $-0,113$  para  $b$  del trabajo de King et al. (2004). A partir de esto se obtuvieron estimaciones de la temperatura de la celda promedio anual y las estimaciones de la temperatura de la celda para cada día del período analizado como la mostrada en la Figura 6.

Con estas estimaciones pudo calcularse el PR horario corregido por temperatura de celda para cada hora de funcionamiento, desde enero de 2016 a diciembre de 2018. Los resultados se muestran en las Figura 5 a (trazo rojo). Como puede verse el PR corregido pasa a ser casi constante con la temperatura mostrando un comportamiento más estable con respecto a las variaciones estacionales del PR, como indica la revisión bibliográfica presentada en la introducción. Como se ve en la figura, cuando la temperatura promedio es alta el PR no corregido disminuye y cuando la temperatura media es baja aumenta. Se aprecia como el PR corregido compensa esta variación.

Otra alternativa para encontrar el PR de la instalación según lo mencionado en la introducción es estimar la potencia de salida de la planta FV a partir de mediciones meteorológicas y la ecuación (20). Esto implica encontrar por regresión lineal los coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  de dicha ecuación, es decir, sintonizar el modelo utilizando un juego de datos seleccionados según (Myers, 2009).

Para nuestro caso, se seleccionaron de la base de datos de 1080 días aquellos días despejados o de mínima nubosidad en los cuales la planta funcionó normalmente. A los fines de este trabajo un día despejado es aquel en el cual se cumple que la variación en la irradiancia medida entre dos intervalos de medición consecutivos no excede los  $35 \text{ W/m}^2$ .

Basándose en este criterio de selección de días despejados se obtuvieron 75 días que cumplen este requisito sobre un total de 1080 días (lo que conforma un conjunto de 19.250 mediciones). Con estos días despejados se aplicó la ecuación (20) y se calcularon por regresión los coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  de dicha expresión. La Fig. 8b muestra los coeficientes resultantes. Como puede verse en la Tabla y en la Fig. 7, hay una fuerte influencia del término  $a \cdot I$  de (20) en la potencia de salida, resulta menos influyente el término  $b \cdot I^2$  y poco influyentes los términos  $c \cdot I \cdot W_s$  y  $d \cdot I \cdot T_a$ . Al ser el factor  $c$  positivo indica que un aumento en la velocidad de viento implica un aumento en la potencia de salida y mientras que un valor negativo de  $d$  implica una disminución de la potencia con el aumento de la temperatura.

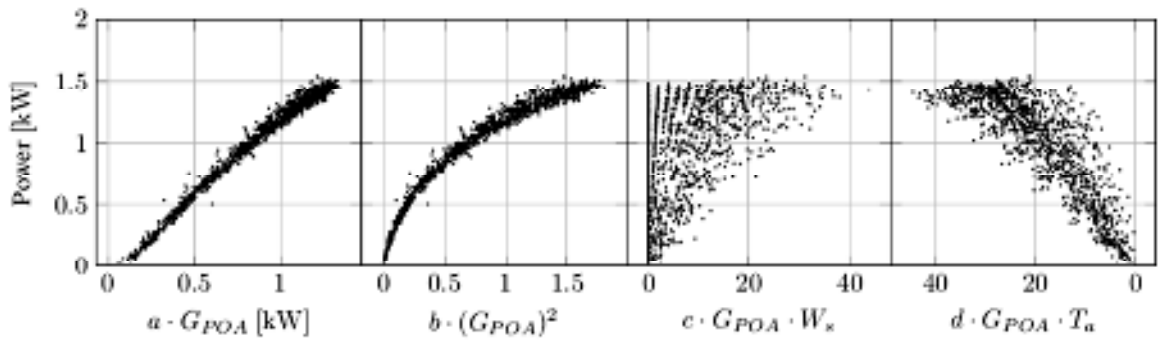


Figura 7: Correlación de cada término de la ecuación (20) con la potencia de salida

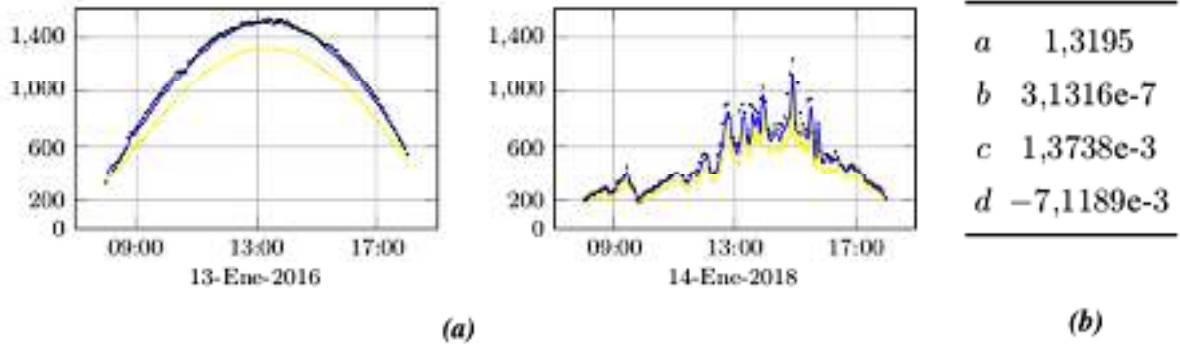


Figura 8: (a) Irradiancia (amarillo), potencia eléctrica medida en la planta FV (azul), potencia eléctrica estimada por el modelo PVUSA (negro) en función de la hora; para un día despejado (izq.) y para un día nublado (der.) (b) Coeficientes de la ecuación (20) obtenidos por regresión.

En la Fig. 8a (parte a) se muestra un día despejado (que cumple el criterio de variación menor a  $35 \text{ W/m}^2$  entre dos mediciones consecutivas) y en (parte b) un día nublado (detectado porque no se cumple este criterio de  $35 \text{ W/m}^2$  entre dos mediciones consecutivas). Como puede verse, el modelo PVUSA estima satisfactoriamente la potencia de salida tanto para días despejados como para días nublados cuando se usan los coeficientes encontrados.

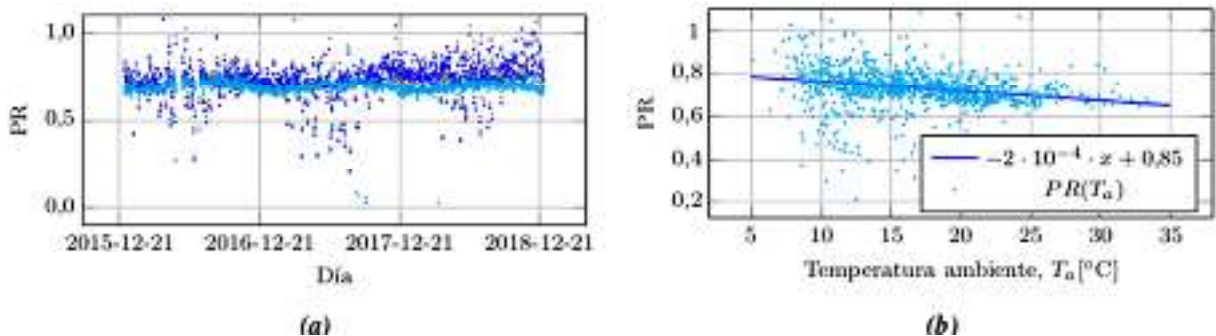


Figura 9: (a) Contraste entre los distintos PR diarios: (celeste) calculado a partir del modelo PVUSA, (azul) obtenido según IEC 61724 (ó NREL) y (gris) aplicando corrección por temperatura. (b) PR diario (modelo PVUSA) en función de la temperatura ambiente promedio.

	PR (NREL)	PR (NREL corr)	PR (PVUSA)
promedio anual	0,6250	0,6225	0,650
desviación	0,070	0,0760	0,017
dependencia con la temperatura media diaria (%/°C)	-0,4	-0,02	$8,67e - 3$

Tabla 3: Valores promedios del PR diario sin corregir, corregido y estimado.

Una vez sintonizado el modelo PVUSA se calculó el PR estimado para la planta FV dando como resultado la Fig. 9a. Como se puede observar el PR estimado usando el modelo PVUSA resulta más estable que el PR de NREL y que el PR de NREL corregido por temperatura de panel, dando un valor medio de 0,65 como se aprecia en la Tabla 3 que resume los resultados de las tres metodologías presentadas. Si se comparan las Figs. 5b y 9b se aprecia que la pendiente de la interpolación es apreciablemente menor con el modelo PVUSA incluso ante el PR calculado con el NREL corregido. Éste, provee una disminución de casi 4,5 veces con respecto a los demás métodos.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó un análisis de varias técnicas para el cálculo de la relación de rendimiento (PR) definido por la norma IEC 61724 y documentos de NREL. Se puede observar que los valores de PR horario obtenidos para la planta experimental basándose en la definición de IEC-61724 y del documento NREL CP-520-37358 resultan similares, lo que se explica en el hecho que dicha instalación montada en la terraza del edificio de la Facultad de Ingeniería no cuenta con sistema de almacenamiento ni fuente de respaldo, por lo que las ecuaciones (12) y (15) resultan numéricamente equivalentes.

Se analizó la influencia del intervalo de grabación en el cálculo del PR, concluyéndose que utilizar los valores promedio cada 5 minutos requiere menos esfuerzo computacional y volumen de datos a gestionar, originando una diferencia en la estimación del PR poco significativa y del orden del 2 %.

Una vez sintonizado el modelo PVUSA se calculó el PR estimado para la planta FV resultando más estable que el PR de NREL y que el PR de NREL corregido por temperatura de panel, dando un valor medio de 0,65 en el periodo de medición. Se evaluó la desviación estándar de los métodos evaluados y se concluyó que la misma es menor con el PR PVUSA, resultando una disminución de casi 4,5 veces con respecto a los demás métodos, lo que muestra que el modelo PVUSA es menos sensible a la variabilidad meteorológica que las demás alternativas analizadas.

Se observa que el aumento de temperatura ambiente tiene un efecto negativo en el PR, del orden de  $-0,4$  % por cada grado de incremento de la temperatura ambiente. La corrección por temperatura propuesta por NREL compensa esta disminución haciendo un PR más estable a lo largo del año obteniéndose un coeficiente de variación térmica de  $-0,02$  %.

Para poder aplicar el modelo PVUSA se introdujo un criterio para determinar a partir de la medición de irradiancia la cobertura nubosa, consistente en analizar la variación entre dos mediciones consecutivas de irradiancia menor a  $35\text{W}/\text{m}^2$  y un algoritmo recursivo para realizar la regresión para esos días. Este criterio demostró ser eficiente para obtener los coeficientes de regresión que esta metodología requiere.

Basándose en estos resultados se concluye que la metodología PVUSA con datos resultantes del promedio cada 5 minutos resultaría la metodología más indicada de las evaluadas para estimar el PR de una instalación FV desafectando la influencia del clima.

La metodología PVUSA podría ser útil no solo para la comparación de instalaciones FV ubicadas en climas diferentes sino que también es útil para evaluar el desempeño de la instalación a lo largo del tiempo. De esta manera pueden ser comparados años más cálidos o más fríos y encontrar problemas no atribuibles a las variaciones climáticas temporales como pueden ser disminución debida a efectos de sombreado y fallas esporádicas en los convertidores de potencia.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Universidad Nacional de Mar del Plata, el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) de Argentina. Se agradece especialmente a la Metalúrgica Keep de la ciudad de Mar del Plata por su contribución en la construcción de los soportes de fijación.



## REFERENCIAS

- Ahmad Mohd Khalid, Indradip Mitra, Werner Warmuth y Volker Schacht (2016). Performance ratio—crucial parameter for grid connected PV plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65:pp.1139–1158
- Timothy Dierauf, Aaron Growitz, Sarah Kurtz, Jose Luis Becerra Cruz, Evan Riley y Clifford Hansen. (2013). Weather-corrected performance ratio. Techreport NREL/TP-5200-57991, National Renewable Energy Lab (NREL), Golden, CO (United States)
- H.S. Huang, J.C. Jao, K.L. Yen y C.T. Tsai (2011). Performance and availability analyses of PV generation systems in Taiwan. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Electronics and Communication Engineering*, 5(6):36–40
- B. Decker y U. Jahn (1997). Performance of 170 grid connected PV plants in northern Germany—analysis of yields and optimization potentials. *Solar Energy*, 59(4-6):127–133.
- LE De Graaf y TCJ Van Der Weiden (1994). Characteristics and performance of a PV-system consisting of 20 ac-modules. In *Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion-WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC)*, volume 1, pp. 921–924. IEEE.
- Jamie Taylor, Jonathan Leloux, Lisa Hall, Aldous M. Everard, Julian Briggs y Alastair Buckley (2015). Performance of distributed PV in the UK: a statistical analysis of over 7000 systems. In *31<sup>st</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Hamburg, September 2015. Ies.
- Tetsuyuki Ishii, Takumi Takashima y Kenji Otani (2011). Long-term performance degradation of various kinds of photovoltaic modules under moderate climatic conditions. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 19(2):pp.170–179.
- DR Myers (2009). Evaluation of the performance of the PVUSA rating methodology applied to dual junction PV technology. Technical report, National Renewable Energy Lab (NREL), Golden, CO (United States)
- S.B. Jacob, G.J. Murcia, J.C.Branda, E.Garín, N.I. Echeverría, S.S. Tedoldi, y C.N. de Souza (2015). Producción Energética de una instalación fotovoltaica conectada a la red de baja tensión en la ciudad de Mar del Plata-Argentina. In *11th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission, CLAGTEE 2015*, Sao Jose dos Campos, Brazil.
- G. Blaesser y D. Munro (1995). Guidelines for the assessment of photovoltaic plants Document B - Analysis and presentation of monitoring data. Commission of the European Communities, Joint Research Centre, Ispra, Italy, EUR, 16339.
- David L. King, William Earl Boyson y Jay A. Kratochvil (2004). Photovoltaic array performance model. techreport SAND2004-3535, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California (United States), December 2004.
- R. N. Dows y E. J. Gough (1995). PVUSA procurement, acceptance, and rating practices for photovoltaic power plants. techreport DOE/AL/82993-21, Department of Energy's (DOE), CA (Unites Stated).

### PERFORMANCE RATIO CALCULATION IN A PV PLANT BY DIFFERENT METHODOLOGIES: A CASE STUDY IN THE CITY OF MAR DEL PLATA

**ABSTRACT:** This work compares 4 different techniques for calculating the Performance Ratio (PR) of a photovoltaic roof-top plant (PV). The plant located on the coast of the southwest province of Buenos Aires presents an irregular coastal climate with high humidity. The calculation of the PR as defined by IEC 61724 is highly dependent on factors associated with the weather which make it difficult to apply for evaluation of projects in different geographies. This work presents the problem and then it evaluates several correction techniques for the calculation of the PR.

**Keywords:** solar energy, performance ratio, performance evaluation, grid-connected PV facilities

## MODELADO DE LA EFICIENCIA DE INVERSORES PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A LA RED

<sup>1</sup>R. F. Farfán, <sup>2</sup>C. W. M. Prieb, <sup>2</sup>A. Krenzinger, <sup>3</sup>C. A. Cadena

<sup>1</sup>INENCO, Facultad de Ingeniería, U.N.Sa. Avda. Bolivia 5150 – Salta, Argentina.

<sup>2</sup>LABSOL, Escola de Engenharia, U.F.R.G.S., Av. Bento Gonçalves 9500 – Porto Alegre, Brasil.

<sup>3</sup>INENCO, Facultad de Ciencias Exactas, U.N.Sa. Avda. Bolivia 5150 – Salta, Argentina.

[farfan.roberto.f@gmail.com](mailto:farfan.roberto.f@gmail.com), [cprieb@ufrgs.br](mailto:cprieb@ufrgs.br)

Recibido 19/08/19, aceptado 23/10/19

**RESUMEN:** El objetivo de este trabajo es modelar la eficiencia total de un inversor para conexasión a la red con el fin de utilizar el modelo en simulaciones y estudiar su comportamiento. El modelo utiliza veinte curvas de eficiencia de conversión correspondientes a veinte tensiones diferentes de entrada, estimando la eficiencia estática del seguimiento del punto de máxima potencia para cada punto de las diferentes curvas. Las eficiencias se calcularon en base a los ensayos realizados a un inversor SMA 3800U en LABSOL, en la Universidad Federal de Rio Grande del Sur, Brasil. Con esta información se desarrolló la función eficiencia la cual depende de la tensión y la potencia de entrada, utilizando un sistema de aprendizaje supervisado basado en Lógica Difusa. En el trabajo se realizaron ensayos mediante una fuentes programables que simula la variación de la curvas I-V en la entrada del inversor a lo largo de un día, para estudiar y validar el modelo de la eficiencia total desarrollado.

**Palabras clave:** Energía Solar, Fotovoltaico, Inversores.

### INTRODUCCIÓN

En un contexto a nivel mundial en donde existe preocupación por el calentamiento global, por la reducción de los recursos de combustibles fósiles y por el aumento del precio del petróleo, cobra importancia el concepto de generación distribuida, sobre todo si estos utilizan energías renovables (Mikati et al., 2012; Trejos et al. 2012). Entre los sistemas de energías renovables más desarrollados se encuentran los sistemas fotovoltaicos (FV). Estos sistemas convierten la energía de la radiación solar en energía eléctrica por medio de celdas fotovoltaicas (Duffie and Beckman, 1991). Estas celdas se montan en una placa y se conectan entre sí formando una matriz denominado módulo FV. El aprovechamiento óptimo de la energía que produce un conjunto de módulos fotovoltaicos, depende de parámetros internos relacionados con sus características constructivas y calidad de las celdas fotovoltaicas que lo conforman, como así también de parámetros externos como la irradiancia y la temperatura (De Soto et al., 2006). La energía en forma de corriente continua (CC) generada por un conjunto de módulos FV, se puede convertir a corriente alterna (AC) por medio de un inversor y este último, puede volcarla a la red de energía convencional. Un sistema FV con estas características se denomina sistema fotovoltaico conectado a la red (SFCR).

La energía que puede generar un SFCR depende de la potencia nominal de los módulos y del inversor, así como también de parámetros meteorológicos del lugar. En un SFCR los inversores pueden trabajar con diferentes configuraciones, entre las que podemos nombrar: inversor central, inversor *string*, módulo AC (inversores integrados al módulos) o inversor *multi-string* (Joydip et al., 2017). La tecnología de los inversores mejoró mucho con el paso del tiempo. Los primeros desarrollos en los años ochenta trabajaban con tiristores y en la actualidad la electrónica de potencia mejoró con la tecnología MOSFET e IGBT. Este desarrollo trajo como consecuencia grandes mejoras en los inversores, volviéndolos dispositivos más eficientes y confiables.

Estudiar las características de los inversores permite realizar estimaciones acerca del comportamiento de los SFCR, como la inyección de la energía a la red, la eficiencia de los sistemas, su degradación, entre otros. Desde un punto de vista más general, los inversores pueden modelarse teniendo en cuenta la eficiencia de seguimiento del punto de máxima potencia ( $\eta_{MPPT}$ ) y la eficiencia de conversión ( $\eta_{CON}$ ). La  $\eta_{MPPT}$  suele ser elevada, mientras que la  $\eta_{CON}$  es más significativa para su análisis. Si se tiene en cuenta solamente la potencia de entrada ( $P_{DC}$ ) y salida ( $P_{AC}$ ) del inversor, se puede realizar un análisis de la  $\eta_{CON}$ . La  $\eta_{CON}$  tiene dependencia con la tensión de entrada ( $V_{DC}$ ) y la potencia de entrada del inversor y, en menor medida, con la temperatura del inversor. De acuerdo a lo expuesto, en este trabajo se aborda el modelo de un inversor planteando una función matemática denominada eficiencia total del inversor, en base a datos obtenidos de diferentes ensayos y a la herramienta matemática basada en lógica difusa. Esta función permitirá modelar el comportamiento de la eficiencia total de un inversor, calcular su potencia de salida en base a la tensión y potencia de entrada y analizar el comportamiento real del inversor.

### INVERSORES DENTRO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO

Los inversores utilizados en los sistemas de conexionado a la red son el puente para la inyección de energía a la red proveniente de los módulos FVs. En la actualidad diferentes empresas desarrollan estos dispositivos y se observa que su potencia nominal puede variar desde unos cientos de vatios (micro inversores) hasta inversores para usinas eléctricas de más de 1 MW (inversores centrales). La función más importante del inversor desde el punto de vista de su modelado es: la búsqueda del punto de máxima potencia y la conversión de corriente continua ( $I_{DC}$ ) proveniente de los módulos a corriente alterna ( $I_{AC}$ ). Estas funciones son importantes y se encuentran relacionadas con la pérdida de energía que provienen de los módulos, ya que el inversor puede trabajar en un punto de la curva  $P$ - $V$  diferente al de máxima potencia y su  $\eta_{CON}$  no es ideal, dependiendo esta última de la  $V_{DC}$  y la  $P_{DC}$  como se muestra en la figura 1.

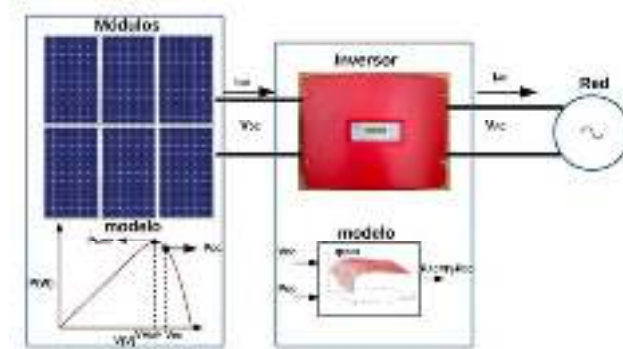


Figura 1- Esquema de un SFCR.

La norma EN50530 tiene en cuenta estas características en los inversores y para cada una de las funciones mencionadas describe una eficiencia, descritas en las ecuaciones 1 y 2.

$$\eta_{MPPT} = \frac{\int_0^{T_M} P_{DC}(t) dt}{\int_0^{T_M} P_{MMP}(t) dt} \quad (1)$$

$$\eta_{CON} = \frac{\int_0^{T_M} P_{AC}(t) dt}{\int_0^{T_M} P_{DC}(t) dt} \quad (2)$$

Donde  $p_{DC}(t)$  es el valor instantáneo de potencia en la entrada del inversor,  $p_{MMP}(t)$  es el valor instantáneo de potencia máxima del generador fotovoltaico y  $p_{AC}$  la potencia instantánea a la salida del inversor.

### Modelado de inversor

Existen diferentes expresiones para modelar el comportamiento de un inversor de conexionado a la red, entre las más utilizadas se encuentra la expresión presentada por Jantsch (Jantsch et al., 1992). Esta relaciona la  $\eta_{CON}$  con la  $P_{NOM}$  y la  $P_{AC}$ , como se observa en la ecuación (3)

$$\eta_{CON} = \frac{P_{CA}}{P_{DC}} = \frac{\frac{P_{CA}}{P_{NOM}}}{\frac{P_{CA}}{P_{NOM}} + K_0 + K_1 \frac{P_{CA}}{P_{NOM}} + K_2 \left( \frac{P_{CA}}{P_{NOM}} \right)^2} \quad (3)$$

En esta última se observan tres parámetros que caracterizan la curva de un inversor,  $K_0$ ,  $K_1$  y  $K_2$ , las cuales se relacionan con características físicas del inversor. El consumo del inversor debido a los dispositivos de control, regulación, medidores e indicadores que operan permanentemente están relacionado con  $K_0$ . Por otro lado, los parámetros  $K_1$  y  $K_2$  están relacionados con las pérdidas de potencia debido al punto de operación, como ser: las pérdidas por los diodos y dispositivos de conmutación, resistencias, inductancias y cables. Es importante mencionar que los parámetros de las curvas se obtienen para una  $V_{DC}$  definida, esto significa que la curva de eficiencia para otras tensiones de entrada puede ser diferente. Como la tensión de entrada del inversor generalmente es la tensión de máxima potencia del conjunto de módulos, la cual varía con la irradiancia y la temperatura, es necesario tener una gran cantidad de curvas para determinar de forma precisa la  $P_{AC}$  en función de la  $\eta_{CON}$  y la  $\eta_{MPPT}$ .

### FLC (FUZZY LOGIC CONTROLLERS)

Los FLC necesitan ordenar su estructura lógica en el Núcleo de Inferencia Difusa, compuesto por tres bloques. El bloques denominado “Fuzzyficador”, encargado de transformar la información que ingresa del sistema que se desea controlar en un valor difuso. El bloque *Evaluación de Reglas*, encargado de relacionar los conjuntos difuso de entrada con un conjunto difuso de salida. El bloque “Defuzzyficador”, encargado de transformar la salida difusa en un valor no difuso. En la figura 2 se observa un esquema que describe la estructura de un sistema FLC.

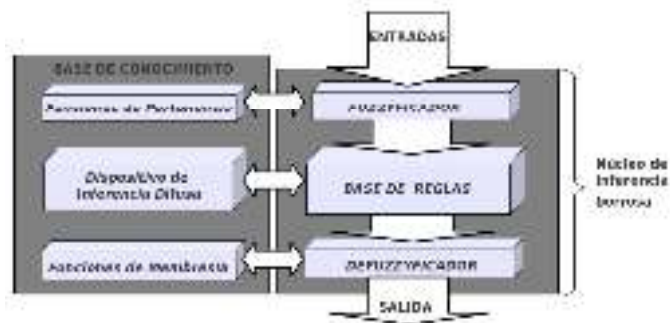


Figura 2 - Esquema de un sistema FLC.

Los FLC pueden incorporar herramientas que permiten modificar su base de conocimiento, con la intención de optimizar su funcionamiento. Estas herramientas se denominan algoritmos de aprendizaje y su idea general es la de realizar un procesamiento para aprender o extraer información de un conjunto de patrones. Las redes neuronales artificiales y los FLC son aproximadores funcionales genéricos, desde el punto de vista matemático, ambos pueden realizar un mapeo no-lineal entre entradas y salidas (Del Brío y Sanz, 1997). Los FLC pueden aproximar cualquier función con un error menor al fijado en el aprendizaje (Del Brío y Sanz, 1997). Los FLC se componen de funciones internas que pueden modificarse por medio del aprendizaje a partir de información externa, perteneciente al sistema que se desea controlar o modelar. En este trabajo se busca utilizar un FLC para crear una función que relacione la tensión y potencia de entrada de un inversor con su eficiencia de total, obtenida a partir del producto entre la  $\eta_{MPPT}$  y la  $\eta_{CON}$ . Estos datos se obtienen de veinte curvas de eficiencia obtenidas de los ensayos de inversores.

### CÁLCULO DE LA $P_{AC}$ UTILIZANDO UN FLC

El modelo implementando un FLC se plantea para el cálculo de la  $P_{AC}$ . Para ello se busca desarrollar una superficie que representa el productor entre la  $\eta_{MPPT}$  y la  $\eta_{CON}$  del inversor en función de  $V_{DC}$  y  $P_{DC}$ . Este modelo otorga una buena aproximación al comportamiento real de un inversor, ya que una de las variables de entrada es  $V_{DC}$  y por lo tanto se puede definir en el modelo el rango de tensión de entrada en donde el inversor se conecta para inyectar energía a la red. Aquí puede observarse que el modelo necesita definir una tensión mínima ( $V_{MIN}$ ) y una tensión máxima ( $V_{MAX}$ ) de entrada de máxima potencia. Esto implica que si la tensión de entrada es menor a  $V_{MIN}$ , el inversor no se conecta. Por otro lado, si el inversor se conecta, la  $P_{AC}$  puede calcularse por medio del sistema FLC, salvo que la  $P_{DC}$  supere una potencia máxima de entrada ( $P_{DCmax}$ ). En esta situación, la  $P_{AC}$  del inversor permanece constante e igual a la potencia nominal. Si la  $V_{DC}$  es mayor a la tensión  $V_{MAX}$ , situación que no debería presentarse con frecuencia y que depende del diseño original del SFCR, el cálculo de la potencia se realiza con el FLC utilizando la curva de eficiencia total perteneciente a  $V_{MAX}$ . Las ecuaciones 19 a 23 describen el funcionamiento del modelo.

$$\begin{cases} V_{DC} < V_{MIN} & \text{entonces } P_{AC} = 0 & (4) \\ V_{MIN} \leq V_{DC} \leq V_{MAX} & \text{y } P_{DC} < P_{DCmax} & \text{entonces } P_{AC} = FLC(V_{DC}, P_{DC}) & (5) \\ V_{MIN} \leq V_{DC} \leq V_{MAX} & \text{y } P_{DC} \geq P_{DCmax} & \text{entonces } P_{AC} = P_{NOM} & (6) \\ V_{DC} > V_{MAX} & \text{y } P_{DC} < P_{DCmax} & \text{entonces } V_{DC} = V_{MAX} & \text{y } P_{AC} = FLC(V_{DC}, P_{DC}) & (7) \\ V > V_{MAX} & \text{y } P_{DC} \geq P_{DCmax} & \text{entonces } P_{AC} = P_{NOM} & (8) \end{cases}$$

### DESARROLLO DE LA FUNCION EFICIENCIA TOTAL DE INVERSORES

Para desarrollar un FLC es necesario tener información para realizar el ajuste. Es por ello que se implementaron diferentes ensayos para obtener diferentes curvas de eficiencia del inversor SMA 3800U. La caracterización del inversor se llevó a cabo en el Laboratorio de Energía Solar de la Universidad Federal do Rio Grande do Sul (LABSOL), utilizando un simulador de módulos fotovoltaicos y un analizador de energía.

### ENSAYOS DEL INVERSOR SMA 3800U

El simulador de módulos fotovoltaicos es de la marca Regatron TopCon Quadro, TC.P.16.600.400.S, de fabricación Suiza. Esta fuente programable de 16 kW, 600 V<sub>DC</sub> y 32 A de entrada, necesita del software SAScontrol para poder operar. En la figura 3 se observan las fuentes, el inversor y el analizador de energía utilizados en los ensayos.



Figura 3 – Simulador de módulos Fotovoltaicos, analizador de energía e inversor.

Mediante este *software* se puede manipular la fuente, programando los cargamentos del inversor o simular la variación de la curva *I-V* mediante datos de irradiancia y temperatura de módulo.

El inversor ensayado en este trabajo es el SunnyBoy 3800U, cuyas características se especifican en la Tabla 1.

Tabla 1 – Especificaciones del inversor SMA 3800U.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Máxima Potencia (DC)	4040 W
Voltaje Máximo (DC)	500 V
Rango de Voltaje (DC)	200 V-400 V
Máxima Corriente (DC)	20 A
Potencia Nominal (AC)	3800
Rango de voltaje nominal (AC)	180-265V
Corriente máxima (AC)	18 A

Para este inversor se desarrollaron diferentes ensayos con diferentes cargas hasta su potencia nominal. Si bien el fabricante indica que el inversor puede trabajar entre 200 V-400 V, se observó que la tensión más baja para conectarse es 215 V. Por lo tanto se ensayó el inversor entre el rango de 215-400 V. Después de los ensayos, se realizó el procesamiento de la información, determinándose las curvas de  $\eta_{MPPT}$  y las curvas de  $\eta_{CON}$  para cada tensión de trabajo. Se obtuvieron alrededor de 20 curvas para cada eficiencia con 20 puntos cada una. En la Fig. 5 se observa las curvas obtenidas.

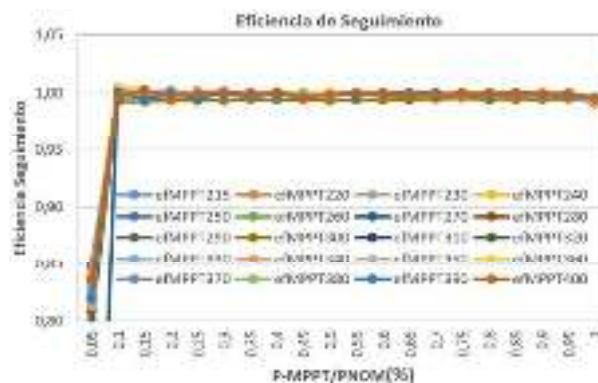


Figura 4 – Curvas de Eficiencia de Seguimiento.

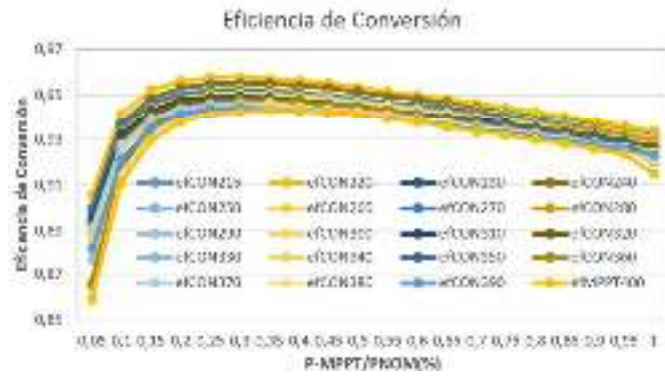


Figura 5 – Curvas de Eficiencia de Conversión.

En la figura 5 se observa que a medida que la  $V_{DC}$  es más baja, la  $\eta_{CON}$  del inversor es más alta. Por otro lado, la  $\eta_{MPPT}$  y la  $\eta_{CON}$  dependen de la tensión y potencia de entrada del inversor, por lo que no es sencillo estudiar su comportamiento. La información obtenida de los ensayos permite graficar las curvas de nivel de las eficiencias y se observan de forma más clara la variación de la  $\eta_{MPPT}$  y la  $\eta_{CON}$  en función de la tensión de máxima potencia (V-MPPT) y el porcentaje de la potencia nominal (P-MPPT/PNOM).

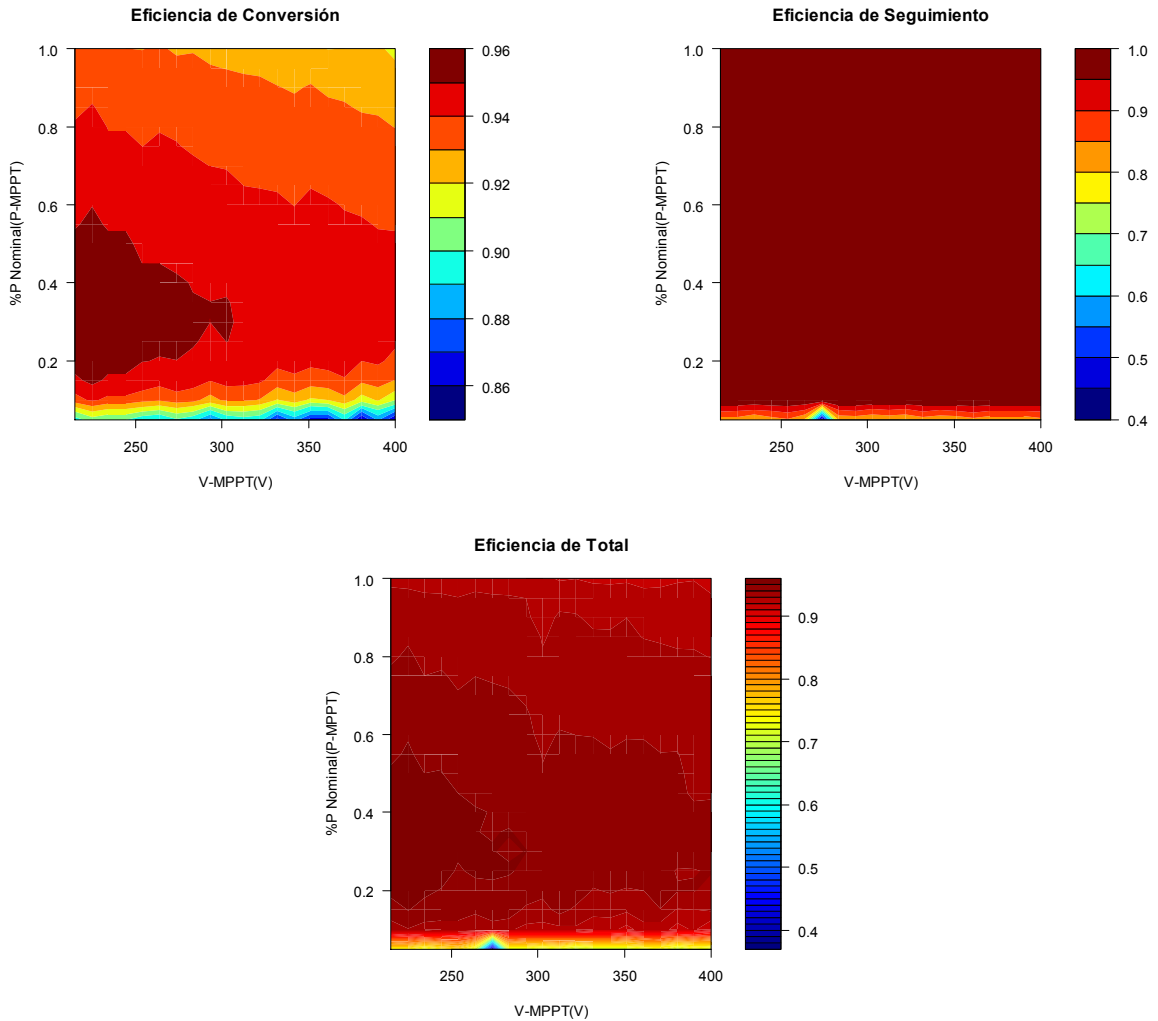


Figura 6 – Curvas de nivel de Eficiencia.



En las gráficas se observa que un 10% por encima de la potencia nominal, la  $\eta_{MPPT}$  es consistentemente elevada, alrededor del 99 por ciento. Por otro lado, la máxima  $\eta_{CON}$  se encuentra entre 0,95 a 0,96 y se consigue cuando el inversor trabaja en tensiones inferiores a los 300V y entre un 10 a un 60 % de la potencia nominal.

## APRENDIZAJE

Para el desarrollo del FLC se implementó el software Xfuzzy 3.0, el cual permite realizar ajustes de la base de conocimiento de un sistema FLC sin información, utilizando la herramienta aprendizaje supervisado. De los diferentes métodos que pueden implementarse para el aprendizaje, en el trabajo se utilizó Quasi-Newton. Los FLC desarrollados tienen dos variables de entrada, la tensión de máxima potencia de los módulos de entrada ( $V_{MPPT}$ ) y el cociente entre la potencia de máxima de los módulos dividida con la potencia nominal ( $P_{MPPT}/P_{NOM}$ ). Esta información obtenida de los ensayos se busca relacionar por medio de un FLC con la eficiencia total del inversor, obtenida del producto entre  $\eta_{CON}$  y la  $\eta_{MPPT}$ . Las variables de entrada se componen de siete funciones gaussianas cada una y el sistema se forma con 49 reglas. Los datos utilizados en el aprendizaje se observan en las figuras 4 y 5. En la figura 7 se observa la ventana en donde Xfuzzy proyecta la variación del error a medida que se realiza el aprendizaje.

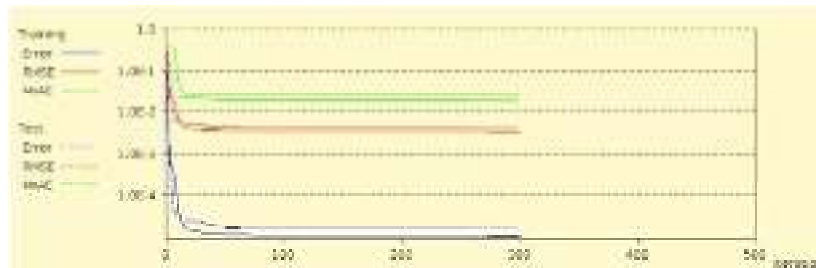


Figura 7 – Variación del error en el aprendizaje.

Una vez realizado el aprendizaje se obtiene el plano de control final, que puede interpretarse como la función eficiencia total del inversor SMA 3800U ensayado. En la figura 7 se observa las características de la función obtenida.

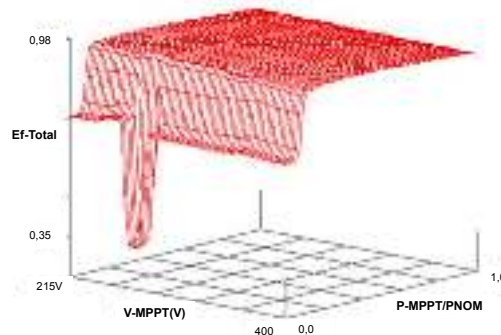


Figura 8 - Plano de eficiencia total obtenida.

## SIMULACIÓN

Para evaluar la función eficiencia total se realizaron ensayos simulando mediante las fuente Regatron, la variación de la curva  $I-V$  de un conjunto de módulos fotovoltaicos conectados al inversor SMA 3800U. El ensayo consistió en reproducir la variación de las curvas  $I-V$  a lo largo de varias horas, en función de datos de irradiancia y temperatura de módulo medidos en LABSOL. Estas magnitudes muestreadas cada 1 segundo permiten variar la potencia en la entrada del inversor y medir la potencia en la salida ( $P_{AC\_medida}$ ). Esta se compara con la potencia de salida simulada ( $P_{AC\_estimada}$ ) calculada a partir de la función eficiencia total, la cual se estima utilizando el FLC.

En la figura 9 se observa la variación de la  $P_{AC\_medida}$  y la  $P_{AC\_estimada}$ . La  $P_{AC\_estimada}$  se calcula con el producto entre la potencia máxima del arreglo de módulos ( $P_{MPPT}$ ), la cual se obtiene de la curva generada por la fuente programable Regatron, y la eficiencia total calculada en base a la tensión de máxima potencia ( $V_{MPPT}$ ) y la potencia máxima en la curva ( $P_{MPPT}/P_{NOM}$ ).



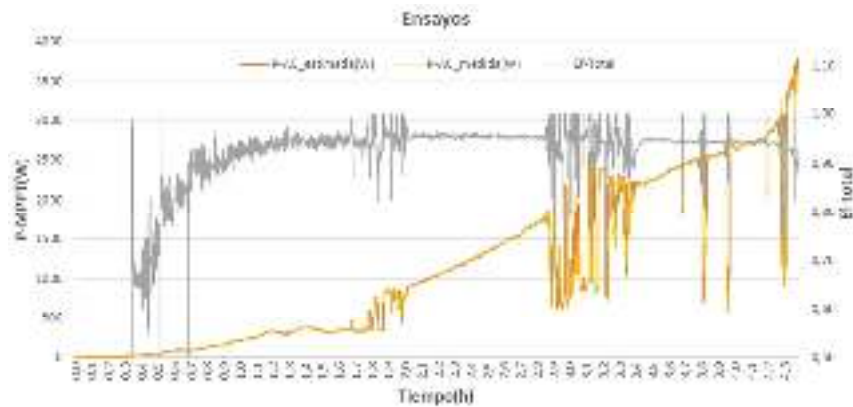


Figura 9 – Ensayos realizados para el estudio del comportamiento del FLC.

Se observa en la figura 9 que las potencias estimadas tiene una buena correlación con la potencia medida, esto significa que el cálculo de la eficiencia total realizada por el FLC se realizó de forma adecuada. Por otro lado, en el gráfico se incluyó la simulación de la eficiencia total, durante las horas de ensayo.

En la figura 10 se observa la región en el plano V-MPPT vs %P Nominal donde trabajó el inversor en el ensayo. Se observa en las curvas de nivel para la eficiencia de conversión y la eficiencia de seguimiento que la potencia de entrada en el inversor se incrementa desde cero hasta alcanzar la potencia nominal del inversor. Las variaciones de eficiencia total no solo se deben al crecimiento de la potencia en base principalmente a la irradiancia, sino también por la variación de la tensión de entrada del inversor. En la zona alrededor de la potencia nominal se observa que la eficiencia total comienza a bajar. Por otro lado se manifiesta que la tensión de entrada no superó los 300V.

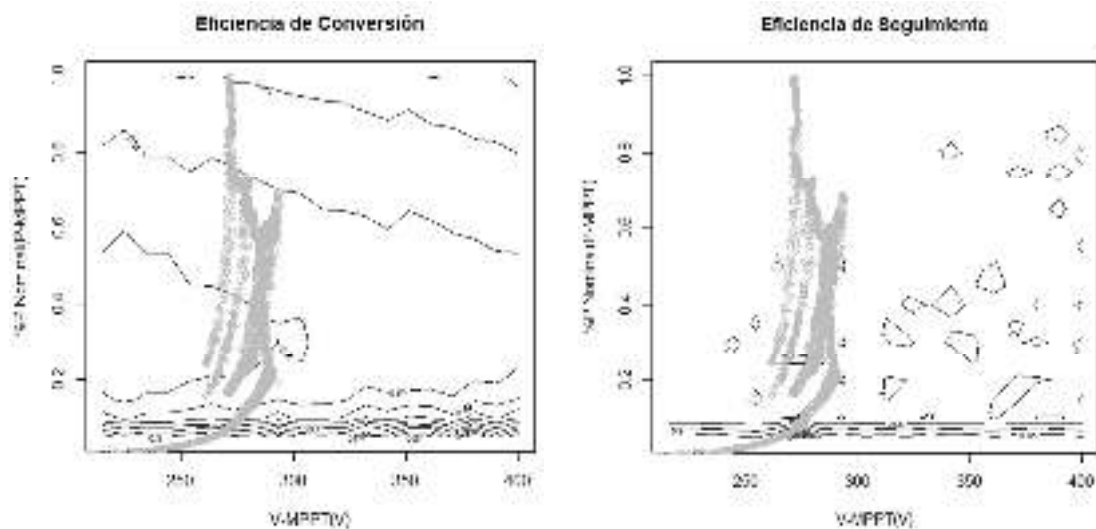


Figura 10 – Curvas de nivel de eficiencia del inversor y datos del ensayo.

## CONCLUSIÓN

El objetivo del trabajo fue desarrollar una función que represente el comportamiento de la eficiencia total de un inversor para sistemas fotovoltaicos conectados a la red. En el trabajo se realizaron diferentes ensayos a un inversor SMA 3800U, del cual se obtuvieron veinte curvas de eficiencia para desarrollar el modelo. Se utilizó un FLC para determinar por medio del aprendizaje supervisado, la superficie de eficiencia total en función de V-MPPT y P-MPPT/PNOM. Esta función permite simular el comportamiento de la eficiencia total de un inversor utilizado en los sistemas fotovoltaicos conectados a la red. En el trabajo se comprobó que el FLC estima de forma correcta la eficiencia total, ya que por medio de esta función y la potencia de entrada, se realizó de forma adecuada la estimación de la potencia inyectada a la red ( $P_{AC\_medida}$ ) medida en los ensayos. La información obtenida de los ensayos también se utilizó para observar en el plano V-MPPT vs %P Nominal como trabaja

el inversor, de acuerdo a la eficiencia de conversión y la eficiencia de seguimiento de máxima potencia. Estos últimos gráficos permiten analizar el comportamiento del inversor de una forma más detallada y clara en base a las variables de entrada.

## REFERENCIAS

- Del Brío B. M., Sanz Molina A., 1997. *Redes Neuronales y Sistemas Borrosos*, primera edición, Ra-Ma, Madrid, España.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A., 1991. *Solar Engineering of Thermal Processes*, second ed. John Wiley & Sons Inc., New York.
- De Soto W., Klein S.A., Beckman W.A., 2006. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar Energy* 80 (2006) 78–88.
- Jantsch M, Schimidt H, Schmid J., 1992. Results of the concerted action on power conditioning and control. *Proceedings of the 11th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Montreux, Suiza; p. 1589–93.
- Mikati M., Santos M., Armenta C., 2012. Modelado y Simulación de un Sistema conjunto de Energía Solar y Eólica para Analizar su Dependencia de la Red Eléctrica. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 9, 267-281.
- Trejos A., Gonzalez D., Ramos-Paja C., 2012. Modeling of Step-up Grid-Connected Photovoltaic Systems for Control Purposes. *Energies* 5, 1900-1926.
- Joydip Jana, Hiranmay Saha, Konika Das Bhattacharya, 2017. A review of inverter topologies for single-phase grid-connected photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 72 (2017) 1256–1270.

## MODELING INVERTER EFFICIENCY FOR GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

**ABSTRACT:** The objective of this work is to model the total efficiency of an inverter for network connection in order to use the model in simulations and study its behavior. The model uses twenty conversion efficiency curves corresponding to twenty different input voltages, estimating the static efficiency of the maximum power point tracking for each of the different curves. The efficiencies were calculated based on tests performed on an SMA 3800U inverter in LABSOL, at the Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil. With this information the efficiency function was developed. This function depends on the voltage and the input power and uses a supervised learning system based on Fuzzy Logic. Tests were carried out in order to validate the developed total efficiency model. These tests were performed using a programmable source that simulates the variation of the I-V curves at the input of the inverter in the course of a day.

## **DISEÑO Y DESARROLLO DE UN EMULADOR SOLAR BASADO EN CELDAS SOLARES DE LABORATORIO**

**Mauricio Troviano**

Departamento de Electrotecnia (FAIN-UNCo), Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina.  
Instituto de Investigación y Desarrollo en Ingeniería de Procesos, Biotecnología y Energías Alternativas (PROBIEN, CONICET-UNCo), Neuquén, 8300, Argentina.  
Tel/Fax. 0299-4488305 e-mail: mauricio.troviano@fain.uncoma.edu.ar

*Recibido 20/08/19, aceptado 25/10/19*

**RESUMEN:** La investigación y desarrollo de sistemas de electrónica de potencia (SEP) aplicados a energía fotovoltaica requieren de curvas de tensión – corriente (IV) estables y repetibles. Para este fin, se dificulta la utilización de paneles solares por su variabilidad ante cambios de iluminación y temperatura como así también por el tamaño y costo de los mismos. Por ello, se desarrollan sistemas electrónicos llamados emuladores solares que reproducen las curvas IV de un panel solar. No hay a la fecha emuladores solares que permitan optimizar los SEP a tecnologías de celdas solares de laboratorio de las cuales no existen paneles solares comerciales.

En este trabajo se diseña, implementa y caracteriza un emulador solar que escala independientemente las tensiones y corrientes de una celda solar de laboratorio, a valores aptos para los sistemas de electrónica de potencia aplicados a energía fotovoltaica. El sistema propuesto se caracteriza midiendo curvas IV de una celda solar de laboratorio de  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  de  $0,5 \text{ cm}^2$  de área para distintos niveles de iluminación. El circuito propuesto amplifica adecuadamente las curvas IV de la celda solar y tiene una tensión máxima de salida de 25 V y corriente máxima de salida de 16 A.

**Palabras clave:** emulador solar, celdas solares de laboratorio, curva de tensión – corriente.

### **INTRODUCCIÓN**

El desarrollo de la energía fotovoltaica viene incrementándose en los últimos años a nivel mundial. Una parte importante de este crecimiento se debe a la reducción de los costos y a la optimización de los sistemas de electrónica de potencia (SEP) que permiten utilizar la energía generada tanto en sistemas aislados como en sistemas conectados a la red. Estos SEP son necesarios para adaptar los valores de tensión y corriente generados por el panel solar a los valores requeridos por la carga. Adicionalmente, dado que los paneles solares presentan una curva de tensión – corriente (IV) no lineal y una curva de potencia que tiene un punto máximo que varía con la irradiancia solar y la temperatura, se implementan, en los SEP, algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia MPPT (Esrám y Chapman, 2007) para maximizar la energía generada por el panel solar.

La investigación y desarrollo de SEP requiere una fuente de energía que tenga las mismas características y comportamiento que el panel solar para el cual se quiere optimizar el SEP. La utilización de dicho panel muchas veces resulta dificultosa, ya sea por su costo, tamaño, variabilidad de características eléctricas con las condiciones climáticas, necesidad de que haya sol o una fuente de luz que lo sustituya.

Para realizar ensayos en las etapas de investigación y desarrollo de los SEP, es necesario que la curva IV utilizada a la entrada del SEP sea estable y repetible. Para lograr este objetivo, se han creado sistemas electrónicos que reproducen las curvas IV del panel llamados emuladores solares. Es deseable que el emulador solar reproduzca la curva IV del panel solar real para la condición climática que se quiera estudiar. Debe ser capaz además de modificar esas condiciones para ensayar los SEP en

un amplio rango de operación. Otra característica que puede tener el emulador solar, es la capacidad de reproducir situaciones de sombras parciales, las cuales pueden producir máximos de potencia locales que pueden generar errores en los algoritmos de MPPT (Ramli y Salam, 2019).

Existen varios tipos de emuladores solares, en general se basan en la utilización de procesadores electrónicos que almacenan las curvas IV para distintas características o reproducen la curva IV del panel solar basándose en modelos físicos – matemáticos del panel solar que, deben ajustarse a curvas experimentales para obtener los valores de los parámetros del modelo a utilizar. Estas estrategias se ejecutan muchas veces utilizando sistemas de electrónica de potencia como convertidores Buck-boost (Midtgard, 2007), SEPIC (Veerachary, 2006), LCC (Chang et al., 2013), entre otros. La implementación y puesta a punto de estos emuladores solares es compleja. Otra aproximación es implementar el emulador solar utilizando electrónica analógica (Marenholtz, 1966), (Schofield et al., 2011), (Votzi et al., 2009). Estos circuitos suelen ser de sencilla implementación y de bajo costo.

Una implementación de un emulador solar que utiliza electrónica analógica fue desarrollado por Nagayoshi et al. (Nagayoshi et al., 2002), (Nagayoshi, 2003a), (Nagayoshi, 2003b). Éste es un circuito que magnifica la curva IV de un fotodetector multijuntura con tensión de vacío  $V_{OC} = 9,5$  V. La ganancia de tensión y corriente se pueden modificar independientemente. Además se pueden incorporar pérdidas resistivas agregando resistencias en serie y en paralelo al fotodetector. Más tarde, mostró que es posible utilizar varios de estos circuitos conectados en serie para reproducir el efecto de sombras parciales en paneles solares (Nagayoshi y Atesh, 2005). En este sistema, el preciso ajuste a una curva IV de un panel solar monojuntura es relativo, debido a que se utiliza como referencia un fotodetector multijuntura que no se comporta igual al panel solar ante las variaciones de iluminación y temperatura debido a que está compuesto por otros materiales semiconductores.

Todos los emuladores mencionados anteriormente requieren mediciones o modelos de la curva IV que se desea reproducir. Esta información suele estar disponible en paneles solares comerciales y producidos con materiales semiconductores como silicio Si, telururo de cadmio CdTe o diseleniuro de cobre-indio-galio  $Cu(In,Ga)Se_2$  entre otros. Sin embargo, esta estrategia no es aplicable cuando no existen paneles solares de la tecnología que se quiere investigar.

La investigación de mejoras en las distintas tecnologías de celdas solares se realiza inicialmente en celdas solares de laboratorio de áreas menores a  $1\text{ cm}^2$  (NREL, 2019), (Green et al., 2019) para luego escalar las áreas y producir comercialmente paneles solares. Actualmente existen tecnologías emergentes de celdas solares que aún están en desarrollo como las celdas solares orgánicas (Xue et al., 2018) y de perovskitas (Jena et al., 2019), que tienen gran potencial pero que aún no alcanzan la etapa de comercialización e incluso se conocen sólo algunos minimódulos desarrollados con algunas de estas tecnologías. Este tipo de celdas solares se pueden fabricar con una gran variedad de materiales y métodos de fabricación y producen curvas IV con distintos comportamientos. Algunas celdas de perovskitas presentan curvas IV con histéresis (Kang y Park, 2019). Es decir que la curva IV varía si se la mide en directa, aumentando la tensión de la celda solar, o reversa, disminuyendo la tensión de la celda. Este comportamiento arroja dudas sobre la correcta definición y obtención de la eficiencia y se han propuesto nuevos protocolos de medición para caracterizarlas (Zimmermann et al., 2016).

Adicionalmente, algunas celdas de perovskitas que presentan histéresis en su curva IV, no permiten alcanzar y mantener su punto de máxima potencia utilizando algunas de las tradicionales estrategias MPPT, como el algoritmo de perturbar y observar (Pellet et al., 2017). En este trabajo, el análisis se aplicó a escala de celda solar. La ausencia de paneles solares de esta tecnología o sistemas que produzcan curvas IV con el mismo comportamiento, no ha permitido avanzar en el estudio de la aplicabilidad de topologías SEP y algoritmos existentes, que manejan potencias mayores, a tecnologías de celdas de laboratorio.

A la fecha no se encuentra en la bibliografía emuladores solares que produzcan curvas IV de celdas solares de laboratorio. Por ello resulta relevante desarrollar un emulador solar que produzca una curva con niveles de tensión y corrientes adecuados para ser utilizada como entrada de un SEP, y que responda de igual manera ante las variaciones de iluminación, temperatura y métodos de medición que

una celda de laboratorio de la cual no sea necesario un conocimiento detallado de la física de la misma.

En este trabajo se diseña e implementa un prototipo de emulador solar basado en el concepto del magnificador de curva IV de Nagayoshi (Nagayoshi et al., 2002) y se utiliza para amplificar curvas IV de celdas de laboratorio. El circuito desarrollado se caracteriza utilizando una celda solar de  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  de  $0,5 \text{ cm}^2$  de área y una carga electrónica.

## DISEÑO DEL PROTOTIPO

Para llevar a cabo el emulador se propone el circuito de la fig. 1 que funciona como un amplificador de curvas IV de celdas solares. Éste multiplica independientemente la tensión de la celda solar por una ganancia de tensión  $G_V$  y la corriente por una ganancia de corriente  $G_I$ . A la entrada se encuentra la celda solar de laboratorio ubicada sobre una base termostatzada con elemento peltier que permite una temperatura de celda controlada y ajustable. La celda solar se ilumina con una fuente de luz de intensidad ajustable. A la salida del circuito emulador se puede conectar un SEP o una carga a la que se le entrega una tensión de salida  $V_O$  y una corriente de salida  $I_O$ . El prototipo propuesto puede entregar tensiones y corrientes positivas o negativas a la carga.

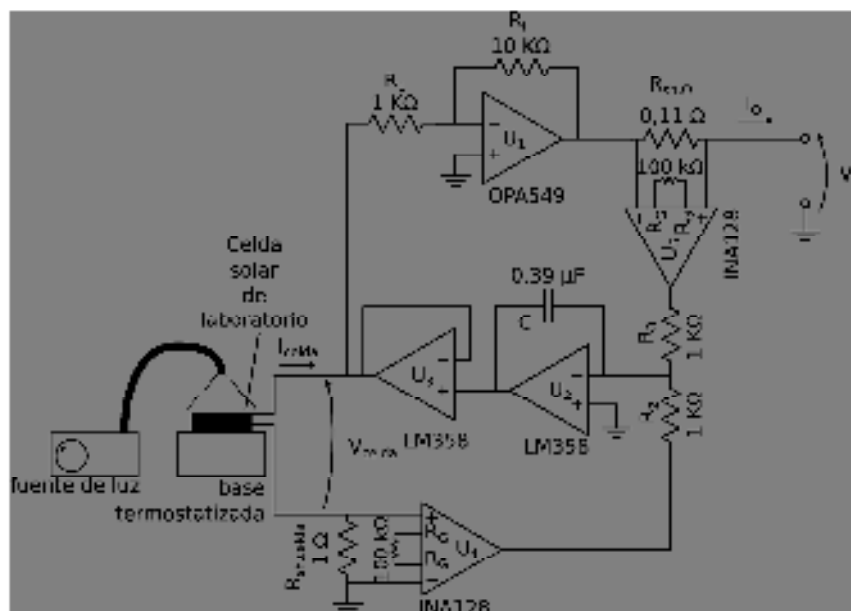


Figura 1: Esquema del circuito emulador fotovoltaico implementado. Los valores de los componentes expresados son los utilizados para la caracterización del sistema.

### Ganancia de tensión $G_V$

La ganancia de tensión  $G_V$  del emulador viene dada por el amplificador inversor implementado con el amplificador operacional AO  $U_1$ , para el cual se utilizan dos OPA549 (OPA549, 2005) con las salidas en paralelo. Si se consideran despreciables las caídas de tensión en las resistencias shunt  $R_{sh,celda}$  y  $R_{sh,O}$ , la ganancia de tensión  $G_V$  viene dada por

$$G_V = \frac{V_O}{V_{celda}} = -\frac{R_f}{R_1} \quad (1)$$

donde se ha elegido  $R_f = 10K\Omega \pm 5\%$  y  $R_1 = 1K\Omega \pm 5\%$ . De esta manera  $G_V$  puede tomar valores entre 9,05 y 11,05.

El  $U_1$  es el que entrega la potencia de salida a la carga. Por ello, se adopta el OPA549 que puede manejar una corriente de salida máxima 8 A y se puede alimentar con una tensión dual máxima de

$\pm 30$  V, siendo  $\pm 25$  V la máxima tensión disponible a la salida del operacional, logrando así una potencia de salida posible de 200 W. Este AO tiene implementadas protecciones internas para sobretemperaturas y sobrecorrientes.

Para aumentar la corriente de salida disponible en el emulador y reducir las exigencias de disipación de potencia del OPA549, en la implementación de  $U_1$  se utilizaron dos OPA549 con las salidas en paralelo como se muestra en la fig. 2 basada en la fig. 14 de la ref. (OPA549, 2005). En este circuito,  $U_1'$  es el amplificador inversor y  $U_1''$  funciona como buffer de ganancia de tensión unitaria. De esta forma la corriente total se divide entre los dos AO. Así se obtiene una corriente máxima de salida de 16 A.

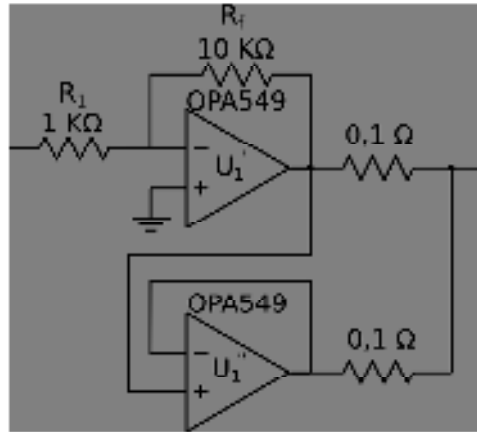


Figura 2: Implementación de operacionales con salida en paralelo para aumentar la corriente de salida.

#### Ganancia de corriente $G_I$

Para obtener la ganancia de corriente  $G_I = I_O / I_{celda}$  es necesario observar que el AO  $U_3$  de la fig. 1 actúa como buffer con ganancia de tensión unitaria y por ello la tensión de la celda  $V_{celda}$  se ve reflejada en la salida del AO  $U_2$ .

Considerando que la entrada no inversora de  $U_2$  está conectada a tierra, entonces se puede considerar a este nodo, en primera aproximación, como una tierra virtual con impedancia infinita y por ello no circula corriente a través de esta entrada del AO. Analizando las corrientes del nodo de la entrada no inversora de  $U_2$  en la fig. 1, se tiene que

$$I_{R_3} = -I_{R_2} \Rightarrow \frac{V_{O,U_5}}{R_3} = -\frac{V_{O,U_4}}{R_2}, \quad (2)$$

donde  $V_{O,U_5} = (1 + 50K \Omega / R_{G,U_3}) R_{sh,o} I_O$  y  $V_{O,U_4} = (1 + 50K \Omega / R_{G,U_4}) R_{sh,celda} I_{celda}$  para el AO INA128 (INA128, 2019) utilizado en la implementación de  $U_4$  y  $U_5$ . Cabe notar que estos AO operan como sensores de las corrientes de la celda solar  $I_{celda}$  y de  $I_O$  respectivamente. Así la ganancia de corriente  $G_I$  viene dada por

$$G_I = \frac{I_O}{I_{celda}} = -\frac{(1 + 50K \Omega / R_{G,U_4}) R_{sh,celda} R_3}{(1 + 50K \Omega / R_{G,U_3}) R_{sh,o} R_2}, \quad (3)$$

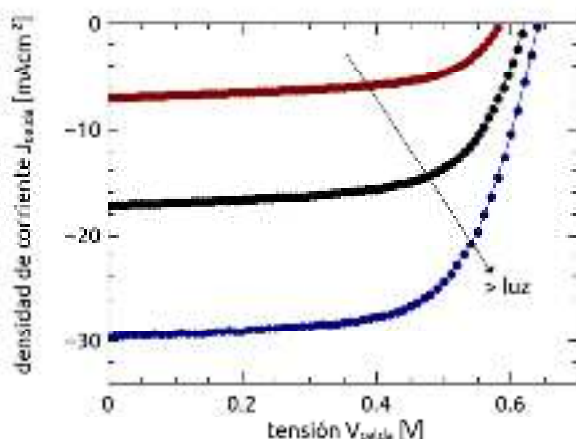
donde se eligen  $R_{G,U_3} = R_{G,U_4} = 100K\Omega \pm 5\%$ ,  $R_{sh,celda} = 1\Omega \pm 5\%$ ,  $R_{sh,o} = 0,11\Omega \pm 5\%$  y  $R_3 = R_2 = 1K\Omega \pm 5\%$  por lo que  $G_I$  puede tomar valores entre 7,63 y 11,14 considerando las caídas de tensión en  $R_{sh,celda}$  y  $R_{sh,o}$  despreciables.

Es importante notar que  $U_2$  opera como circuito sumador–integrador. Por lo tanto si las corrientes  $I_{R_2}$  e  $I_{R_3}$  son iguales, la tensión de salida de  $U_2$  permanece constante. Cuando  $I_{R_2}$  difiere de  $I_{R_3}$ , debido a una variación en la carga o en el punto de operación de la celda solar, se modifica la tensión de salida de  $U_2$  es igual a  $V_{celda}$  hasta que se llega a igualar nuevamente las corrientes logrando así un error de estado estacionario cero.

## CARACTERIZACIÓN DEL EMULADOR PROTOTIPO

### *Celda solar utilizada para la caracterización*

Para caracterizar el prototipo de baja potencia se utiliza una celda solar de laboratorio de  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  de  $0,5 \text{ cm}^2$  de área (Jackson et al., 2007). La fig. 3 muestra las curvas de densidad de corriente  $J_{celda}$  en función de la tensión de la celda solar  $V_{celda}$  para tres intensidades de luz. Estas curvas se realizan utilizando una fuente de luz de intensidad ajustable Zeiss Schott KL1500 electronic la cual cuenta con una lámpara halógena de 150 W y fibra óptica a la salida. Las curvas IV se obtienen con un electrómetro Keithley 2400 que se utiliza como carga electrónica (Keithley 2400, 2019). Este electrómetro puede manejar una tensión máxima de 21 V y una corriente máxima de 1 A. El ensayo se realiza a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . La curva IV se mide en directa con una velocidad de cambio de  $50 \text{ mVs}^{-1}$ . Se observa que para la curva azul, obtenida con la mayor intensidad de luz, la celda solar tiene una densidad de corriente de cortocircuito  $J_{SC}$  de  $30 \text{ mAcm}^{-2}$  y una tensión de vacío  $V_{OC}$  poco mayor que 0,6 V. Con menores intensidades de luz, como es esperable, disminuye tanto  $J_{SC}$  como  $V_{OC}$  como se observa en las curvas negra y roja respectivamente.



*Figura 3: Curvas de la densidad de corriente de  $J_{celda}$  en función de la tensión  $V_{celda}$  para tres intensidades de luz incidentes distintas de la celda solar de laboratorio de  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  utilizada para caracterizar el emulador.*

### *Caracterización del prototipo de baja potencia.*

Para caracterizar el emulador solar implementado, se alimenta todo el circuito con tensiones duales de  $\pm 15 \text{ V}$  utilizando 2 fuentes de tensión de laboratorio UNI-T UTP3515TFL (UTP3315, 2019) que pueden entregar una corriente máxima de 5 A. A la entrada del emulador se conecta la celda solar de  $\text{Cu(Ga,In)Se}_2$ . A la salida de mismo, se conecta el electrómetro que se utiliza como carga electrónica. Luego se obtienen las curvas de tensión – corriente a la salida del emulador iluminando la celda solar con las tres intensidades de luz seleccionadas previamente para caracterizarla. Las curvas IV a la salida del emulador se miden en directa con una velocidad de cambio de  $50 \text{ mVs}^{-1}$  y la celda se mantiene a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . La fig. 4 muestra en círculos vacíos las curvas de tensión – corriente obtenidas a la salida del emulador para tres intensidades de luz seleccionadas.



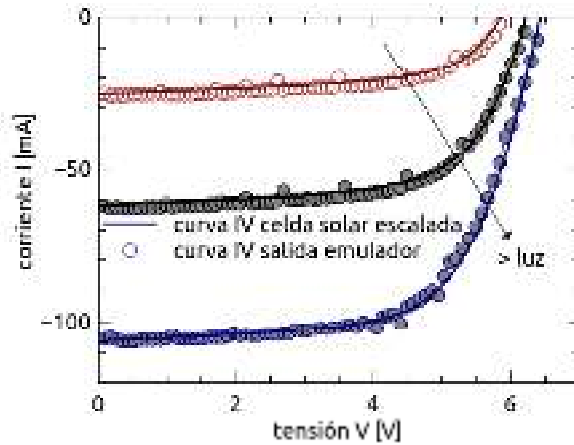


Figura 4: Curvas IV de una celda solar de  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  escalada con la ganancia de tensión  $G_V$  y corriente  $G_I$  (líneas) y curvas IV medidas a la salida del emulador (círculos vacíos) para tres intensidades de luz crecientes (rojo, negro y azul).

Para analizar la capacidad del emulador solar para reproducir las curvas IV de la celda solar, éstas se escalan multiplicando cada punto medido por la ganancia de tensión  $G_V$  y la de corriente  $G_I$ . En la fig. 4 se muestran, en líneas, las curvas IV de la celda solar escaladas con  $G_V = 10,05$  y  $G_I = 7,2$ . Estos valores surgen del ajuste de las curvas IV escaladas respecto a las del emulador. Se observa que el emulador reproduce fielmente las curvas IV de la celda solar para el rango de operación ensayado.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se diseñó, implementó y validó un emulador solar basado en celdas solares de laboratorio el cual permite amplificar de forma independiente la tensión y la corriente de la celda solar y llevarlas a valores adecuados para ensayar topologías de electrónica de potencia aplicadas a energía fotovoltaica.

Se validó el diseño, ensayando la variación de la curva IV de una celda de laboratorio de  $\text{Cu(in,Ga)Se}_2$ , en función de la iluminación y se obtuvieron curvas a la salida del emulador que reproducen a las de la celda solar con una ganancia de tensión de 10,05 y una ganancia de corriente de 7,2. El valor de la ganancia de tensión obtenida experimentalmente de 10,05 se encuentra dentro del rango de ganancias de tensión obtenido analíticamente considerando las tolerancias de los valores de resistencias utilizados en la implementación. La ganancia de corriente experimental de 7,2 es un 5,63% menor al mínimo obtenido analíticamente de 7,63. Esta desviación puede deberse al error introducido en el análisis, al considerar despreciables las caídas de tensión producidas en las resistencias shunt  $R_{sh,celda}$  y  $R_{sh,O}$ .

El emulador desarrollado tiene la capacidad de producir tensiones de salida de hasta 25 V y corrientes de salida de hasta 16 A y ensayar celdas con un rango de temperatura desde 3°C a 85 °C.

Si bien el emulador respondió adecuadamente antes cambios de la entrada de  $50 \text{ mVs}^{-1}$ , se propone como trabajo futuro realizar ensayos específicos para establecer la velocidad máxima de respuesta del emulador. Además, se debe caracterizar el emulador a máxima potencia, para lo cual es necesario instrumental que actualmente no se dispone en el laboratorio.

## AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a K. Taretto los valiosos aportes realizados al escrito de este trabajo.

Este trabajo se financió con recursos del proyecto de investigación PIP 04/240 de la Universidad Nacional del Comahue.

## REFERENCIAS

- Chang, C., Chang, E., y Cheng, H. (2013). A High-Efficiency Solar Array Simulator Implemented by an LLC Resonant DC–DC Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics* 28, 3039-3046.
- Esram, T., y Chapman, P.L. (2007). Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 22, 439-449.
- Green, M.A., Dunlop, E.D., Levi, D.H., et al. (2019). Solar cell efficiency tables (version 54). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 27, 565-575.
- INA128 (2019). INA128 Precision, 130-dB CMRR, 700- $\mu$ A, Low-Power, Instrumentation Amplifier | TI.com Disponible en: <http://www.ti.com/product/INA128> [Accedido 15 de agosto de 2019].
- Jackson, P., Würz, R., Rau, U., et al. (2007). High quality baseline for high efficiency CuIn<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>Se<sub>2</sub> Solar Cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 15, 507-519.
- Jena, A.K., Kulkarni, A., y Miyasaka, T. (2019). Halide Perovskite Photovoltaics: Background, Status, and Future Prospects. *Chem. Rev.* 119, 3036-3103.
- Kang, D.-H., y Park, N.-G. (2019). On the Current-Voltage Hysteresis in Perovskite Solar Cells: Dependence on Perovskite Composition and Methods to Remove Hysteresis. *Adv. Mater.* 1805214.
- Keithley 2400 (2019). Series 2400 SourceMeter SMU Instruments - Series 2400 Source Measure Unit Datasheet | Tektronix Disponible en: <https://www.tek.com/datasheet/series-2400-sourcemeter-instruments> [Accedido 15 de agosto de 2019].
- Marenholtz, P.E. (1966). Programmable Solar Array Simulator. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* AES-2, 104-107.
- Midtgard, O. (2007). A simple photovoltaic simulator for testing of power electronics. In 2007 European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1-10.
- Nagayoshi, H. (2003a). Characterization of the module/array simulator using I-V magnifier circuit of a pn photo-sensor. In *Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, 2003, pp. 2023-2026 Vol.2.
- Nagayoshi, H. (2003b). A Dynamic Response of a Module/Array Simulator Using I-V Magnifier Circuit of a PN Photo-Sensor. (American Society of Mechanical Engineers), pp. 419-424.
- Nagayoshi, H., y Atesh, M. (2005). Partial shading effect emulation using multi small scale module simulator units. In *Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2005., pp. 1710-1713.
- Nagayoshi, H., Orio, S., Kono, Y., et al. (2002). Novel PV array/module I-V curve simulator circuit. In *Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2002., pp. 1535-1538.
- NREL (2019). Best Research-Cell Efficiency Chart | Photovoltaic Research | NREL Disponible en: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> [Accedido 15 de agosto de 2019].
- OPA549 (2005). OPA549 High-Voltage, High-Current Op Amp, Excellent Output Swing | TI.com Disponible en: <http://www.ti.com/product/OPA549> [Accedido 15 de agosto de 2019].
- Pellet, N., Giordano, F., Dar, M.I., et al. (2017). Hill climbing hysteresis of perovskite-based solar cells: a maximum power point tracking investigation. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 25, 942-950.
- Ramli, M.Z., y Salam, Z. (2019). Performance evaluation of dc power optimizer (DCPO) for photovoltaic (PV) system during partial shading. *Renewable Energy* 139, 1336-1354.
- Schofield, D.M.K., Foster, M.P., y Stone, D.A. (2011). Low-cost solar emulator for evaluation of maximum power point tracking methods. *Electronics Letters* 47, 208-209.
- UTP3315 (2019). UNI-Trend technology Disponible en: [https://www.uni-trend.com/html/product/gongye/thi/UTP3300TFL\\_Series/UTP3315TFL.html](https://www.uni-trend.com/html/product/gongye/thi/UTP3300TFL_Series/UTP3315TFL.html) [Accedido 16 de agosto de 2019].
- Veerachary, M. (2006). PSIM circuit-oriented simulator model for the nonlinear photovoltaic sources. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 42, 735-740.
- Votzi, H., Himmelstoss, F.A., y Ertl, H. (2009). Basic linear-mode solar-cell simulators. In 2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, pp. 261-265.

- Xue, R., Zhang, J., Li, Y., et al. (2018). Organic Solar Cell Materials toward Commercialization. *Small* 14, 1801793.
- Zimmermann, E., Wong, K.K., Müller, M., et al. (2016). Characterization of perovskite solar cells: Towards a reliable measurement protocol. *APL Materials* 4, 091901.

## **ABSTRACT**

The research and development of power electronics systems SEP applied to photovoltaic energy requires stable and replicable voltage – current IV curves. For this purpose, the use of solar panels is difficult due to their sensibility to light and temperature changes, as well as their size and cost. Therefore, electronic systems called solar emulators, are developed to reproduce the IV curves of a solar panel. There are currently no solar emulators that allow the SEP optimization to research solar cell technologies of which there are no commercial solar panels.

In this work, a solar emulator is designed, implemented and characterized. This emulator, can independently scales the voltages and currents of a research solar cell, yielding suitable output levels for power electronic systems applied to photovoltaic energy. The IV curves of a research Cu(in,Ga)Se<sub>2</sub> solar cell of 0.5 cm<sup>2</sup> of area are measured using different light levels to characterize the emulator. The proposed circuit adequately amplifies the IV curves of the solar cell and it has a capability to produce a maximum output voltage of 25 V and a maximum output current of 16 A.

**Keywords:** solar emulator, research solar cells, current – voltage curve.

## **METODOLOGÍA PARA OBTENCIÓN DE MÓDULOS DE POTENCIA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA GESTIONABLE EN REDES DE MEDIA TENSIÓN**

**Ulises Manassero<sup>1,2</sup>, Federico Missio<sup>1</sup>, Germán Lorenzón<sup>1</sup>, Sebastián Tkaczyk<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Empresa Provincial de la Energía de Santa Fe (EPE-SF), CP 3000, Miguens 260, Santa Fe

<sup>2</sup>Centro de Investigación en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos (CIESE), Universidad Tecnológica Nacional (UTN), Facultad Regional Santa Fe  
Tel. 0342-4505832 e-mail: [umanassero@epe.satafe.gov.ar](mailto:umanassero@epe.satafe.gov.ar)

*Recibido 12/08/19, aceptado 15/10/19*

**RESUMEN:** La generación de energía eléctrica mediante biogás posee notables ventajas frente al resto de las energías renovables, principalmente por sus atributos de flexibilidad y control, que permite garantizar una potencia firme, con un alto factor de utilización. La provincia de Santa Fe posee un amplio potencial para el desarrollo de centrales de biogás debido a su matriz productiva de tipo agroindustrial. En el presente trabajo se estudia la inserción de centrales de biogás en redes de media tensión de la provincia de Santa Fe. Se proponen los criterios de admisión de los módulos de potencia de las centrales para operación individual y conjunta. En función a simulaciones de flujo de carga en régimen estático, se obtienen los módulos de potencia de cada central. Los resultados demuestran que la conexión de centrales en nodos de media tensión presenta valores de potencia admisible por nodo que oscilan entre 0,5 y 5 MW y resultan dependientes de la distancia del nodo de conexión a la estación transformadora. La potencia total de integración de centrales de biogás por Estación Transformadora resulta en el rango de 5-45 MW, de acuerdo a la extensión y desarrollo de las redes de media tensión abastecidas por cada estación.

**Palabras clave:** central de biogás, potencia nominal, fluctuación de tensión, red de distribución

### **INTRODUCCIÓN**

En los últimos años, a nivel mundial la generación renovable viene desempeñando un rol protagónico en las políticas energéticas tanto de países industrializados como también en aquellos en vías de desarrollo. Los datos estadísticos macro muestran una participación de aporte de energía de fuentes renovables del 20% con respecto al consumo mundial, con un crecimiento sostenido y significativo de la potencia instalada de aproximadamente 150 GW por año, y niveles de inversión cercanos a los 160 billones de dólares (United Nations, 2018).

Entre las tecnologías de fuentes de generación distribuida renovable (GDR), las centrales térmicas a base de biogás (CTB) poseen notables ventajas, principalmente por la posibilidad de generación de energía de manera flexible y controlada, que permite garantizar una potencia firme -similar a una central térmica convencional-, con un alto factor de utilización (Lauer y Thrän, 2017). Este tipo de centrales emergen como una de las opciones de GDR más prometedoras para su instalación en el territorio de la Provincia de Santa Fe. Pues, su matriz productiva de carácter agroindustrial presenta grandes volúmenes de efluentes agrícolas, ganaderos y de industrias alimenticias que pueden utilizarse como materia prima orgánica para obtención de biogás (gas metano) en la CTB, con el valor agregado de mitigar la contaminación ambiental de estos efluentes (Banco Interamericano de Desarrollo, 2017). Por otro lado, la construcción y operación de una CTB promueve la creación de nuevos puestos de trabajo y mejora las condiciones socioeconómicas de poblaciones rurales. Según la Organisation for Economic Cooperation and Development “el impacto de las GDR en la creación de empleo es mayor cuando la energía para el proceso depende de un material más crudo, como es el caso de la biomasa” (Organisation for Economic Cooperation and Development, 2012).

Las adjudicaciones de las rondas Renovar 1.0 y 2.0, correspondientes a la inserción en el Sistema Argentino de Interconexión (SADI) de centrales de generación renovable (Ministerio de Energía y Minería de la Nación, 2016; Ministerio de Energía y Minería de la Nación, 2017), demuestran el alto potencial de la provincia de Santa Fe, pues de los 35 proyectos adjudicados de CTB, 10 se ubican en la provincia, con una potencia nominal contratada de 21,6 MW, que representa el 33% de la total adjudicada (65 MW).

Respecto a los estudios eléctricos de acceso a la red de las CTB, en la práctica, debido a que los módulos de potencia técnica y económicamente factibles se presentan en un rango de 1-10 MW, los proyectos de CTB se vinculan generalmente en nodos de media tensión, para lo cual resulta importante analizar los niveles porcentuales de inserción admitidos -según su impacto en los indicadores de calidad de energía- priorizar el acceso de tales proyectos en la red.

En este trabajo se propone una metodología para determinar los módulos de potencia de CTB factible de instalar en redes de distribución de 33 kV y 13,2 kV, de acuerdo a la realización y análisis posterior de estudios eléctricos en régimen estático, de modo de cumplir con los criterios de planificación y operación de los sistemas de distribución y transmisión provincial. El objetivo final del estudio consiste en definir estrategias de promoción de generación a partir de fuentes renovables en la Provincia de Santa Fe. Como red de estudio, se adoptan redes de subtransmisión de 33 kV y distribución de 13,2 kV de la Empresa Provincial de la Energía de Santa Fe (EPESF).

## METODOLOGÍA

Los estudios de inserción de CTB se realizaron sobre las redes de subtransmisión en 33 kV y distribución en 13,2 kV pertenecientes a la EPE-SF.

A partir de las simulaciones realizadas en régimen estacionario sobre la red de media tensión (MT) de la EPE-SF, se evalúa el impacto de la CTB sobre diferentes nodos de la red con el objeto de determinar la potencia máxima que es factible integrar para cumplir con los criterios técnicos de planificación y operación.

Adicionalmente, se analizan los niveles porcentuales de variaciones de tensión súbitas en nodos de MT y alta tensión (AT) por maniobras de conexión y/o desconexión de las CTB.

En ambos estudios eléctricos se verifica, en primer lugar, el ingreso individual de cada CTB por nodo de MT y la obtención de su módulo de potencia. Luego, con el conjunto de módulos de CTB obtenidos por cada alimentador de 33 kV y distribuidor de 13,2 kV (uno por cada nodo de demanda que abastece el circuito), se verifica su impacto conjunto en las condiciones de operación de las redes de MT asociadas a las ETs del corredor radial de AT analizado en cada caso.

### *Subsistemas eléctricos analizados para inserción de las CTBs.*

Los criterios adoptados para priorizar las zonas de inserción de los recursos de generación en función a CTB consideraron en primer lugar los subsistemas de 132 kV con topología radial operados por la EPE-SF, que requieren una mayor regulación de potencia reactiva para mantener los niveles de tensión dentro del rango admisible y generalmente suponen la realización de obras de expansión de corto a mediano plazo (de acuerdo a las proyecciones de crecimiento de la demanda de la zona). Con ello, la energía eléctrica obtenida a partir de biogás y biomasa, constituye una central de generación de tipo gestionable, que puede contribuir a la mejora permanente de las condiciones de operación de tales subsistemas, logrando un retraso en la ejecución de las obras requeridas para la red.

En otro aspecto, las CTB definen generalmente su ubicación en función a la cercanía geográfica a la materia prima requerida para realizar los procesos de digestión anaerobia, combustión o pirolisis (según se trate de una central de biogás o biomasa). Por tal motivo, los subsistemas eléctricos analizados, también presentan una correlación con las matrices de producción agroindustrial de cada región y su potencial de materias primas para producción de energía eléctrica (recursos forestales, desechos agropecuarios y efluentes industriales).

En síntesis, los subsistemas evaluados para inserción de CTB, ordenados en función a su nivel de prioridad, son los siguientes (ver figura 1):

- Corredor Esperanza-Tostado (ESP-TOS)
- Corredor San Carlos-San Jorge (SCA-SJO)
- Corredor Chabás-Rufino (CHA-RUF)

- Corredor Reconquista-Villa Ocampo (REC-VOC)
- Corredor Nelson-San Justo (NEL-SJU)
- Corredor Calchaquí-San Javier (CAQ-SJA)
- Corredor Casilda-Las Rosas (CAS-LRO)

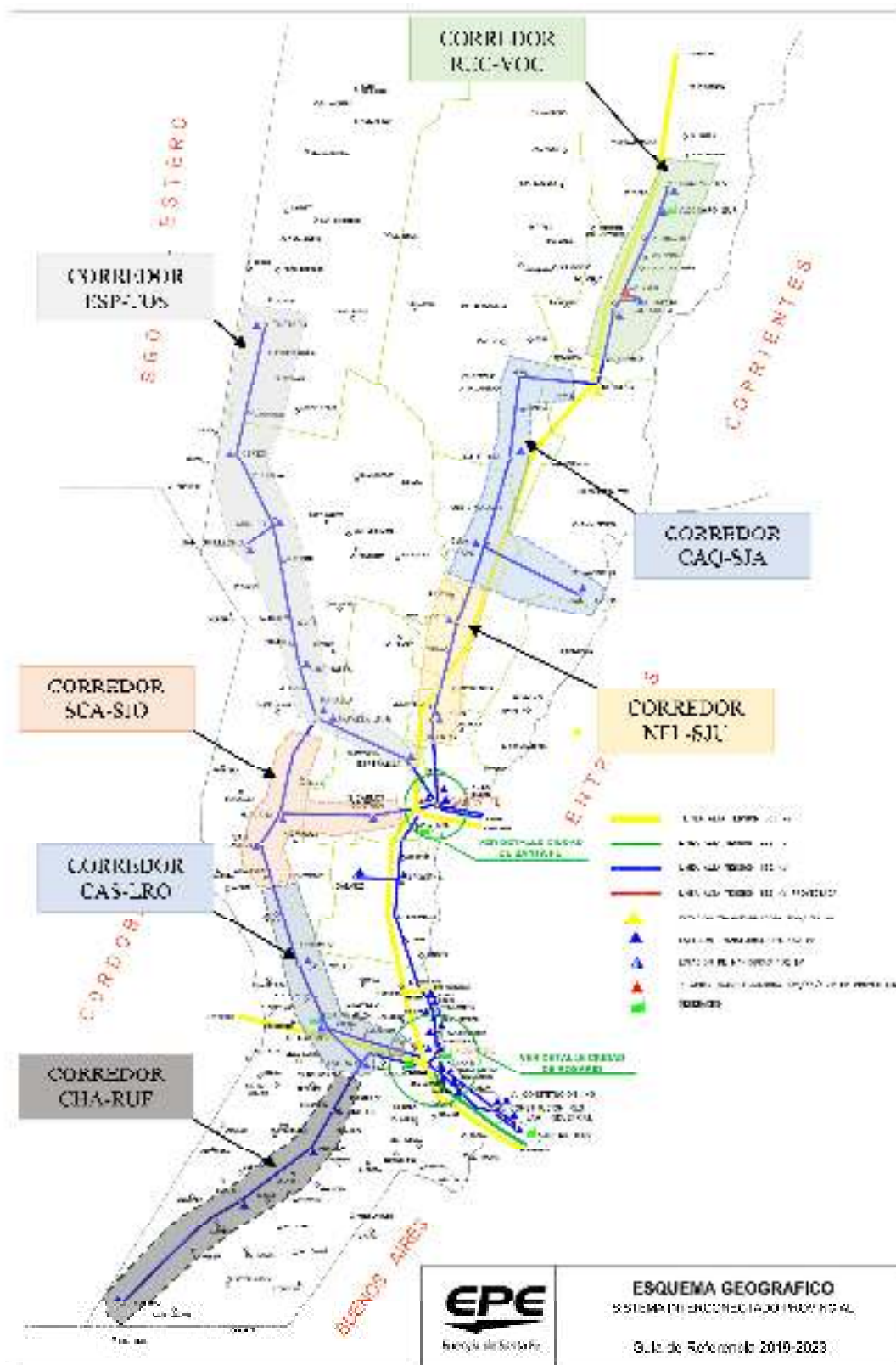


Figura 1: Identificación geográfica de los corredores de 132 kV del sistema interconectado provincial de EPE-SF, en evaluación para inserción de CTB

### *Hipótesis generales adoptadas en las simulaciones*

El estudio se realizó en base a los datos e hipótesis que se detallan a continuación:

- Para el cálculo de flujo de carga se utilizó un software específico de simulaciones de flujos de potencia. Los escenarios de demanda utilizados en el modelado eléctrico de los subsistemas corresponden a Valle de verano 2019/2020 y Pico diurno de verano 2019/2020, publicados en la Guía de Referencia 2019-2023 de EPE-SF.
- Como limitante de la capacidad de transmisión de las líneas se considera el límite térmico de los conductores.
- Se consideraron aceptables los valores de tensión que se encuentren dentro del rango 0,90-1,05 en barras de 132 kV y 0,92-1,08 en barras de 33 y 13,2 kV.
- En todos los casos se considera que la tensión en barras de 33 y 13,2 kV de las Estaciones Transformadoras (ET) de 132/33/13,2 kV es de 1,05 pu.
- Factor de potencia de las demandas igual a 0,85 inductivo.
- Las CTB con potencias mayores a 2 MW poseen, a través de los reguladores de tensión de sus alternadores, capacidad para controlar tensión (reactivo) dentro de una curva de capacidad, con límite de factor de potencia en el rango de 0,80 inductivo a 0,92 capacitivo. Por otra parte, las CTB con potencias menores a 2 MW operan en modo factor de potencia constante y no poseen sistemas de control de tensión.
- Los eventos de conexión y/o desconexión súbita de la CTB no deben ocasionar variaciones de tensión superiores al 4% en nodos de 13,2 y 33 kV y 3% en nodos de 132 kV (GENERFE, 2019).
- Las simulaciones para obtención de las fluctuaciones de tensión en nodos de MT y AT de las redes, debidas a condiciones de conexión/desconexión súbita de la generación, se realizan operando la CTB en modo factor de potencia constante e igual a 1, con el propósito de establecer un escenario conservador.
- Los módulos de potencia de inyección admisible a la red por parte de las CTB se obtienen según el análisis de las siguientes restricciones de operación:
  - Niveles de tensión fuera del rango admisible en nodos de MT y AT para condiciones estáticas.
  - Fluctuaciones de tensión debidas a conexión/desconexión súbita de la generación por encima de los límites admitidos en nodos de MT y AT.
  - Sobrecargas en líneas de MT y/o AT de la red.
  - Sobrecargas en transformadores de potencia 132/33/13,2 kV de las ETs.
  - Estado de carga por encima del 80% de su capacidad nominal en transformadores de Estaciones de Rebaje (ER) 33/13,2 kV.

## **RESULTADOS**

Es dable destacar que los módulos de potencia admisibles de CTB deducidos a partir de los resultados de los estudios eléctricos de sensibilidad constituyen valores de referencia y permiten establecer un conocimiento preliminar del potencial de las redes de 33 kV y 13,2 kV de EPE-SF para la conexión de generación de tipo gestionable. No obstante, en el caso puntual de la factibilidad de acceso de un proyecto de CTB en un nodo en particular, deberán realizarse los estudios eléctricos específicos tal que permitan verificar su acceso a la red, sin ocasionar inconvenientes en la operación de la misma.

### *Conexión de CTB en el nivel de 33 kV*

#### *I) Potencias admisibles por nodo de 33 kV*

Los resultados de los análisis de sensibilidad de inyección de potencia de CTBs en nodos de 33 kV, efectuados en cada uno de los subsistemas de 132 kV en estudio demuestran que las relaciones entre la



potencia de cortocircuito ( $S_{cc}$ ) y la potencia admisible de la CTB ( $P_{adm}$ ) para nodos de 33 kV se ubican en un rango de 10 a 22, con un valor promedio que ronda los 15.

Luego, las potencias admitidas por nodo quedan generalmente restringidas por las fluctuaciones de tensión en barras de MT de los alimentadores ocasionadas por la conexión/desconexión intempestiva de la generación.

A los fines de adoptar módulos de CTB admisibles en función a la impedancia del nodo de vinculación, se caracterizan tres rangos de distancias del alimentador con sus  $S_{cc}$ . Para nodos de muy alta impedancia, ubicados a distancias mayores a 50 km de la ET de vinculación, la demanda mínima del nodo también constituye una variable de restricción, dado que, para el nodo de MT en evaluación, ante relaciones muy altas entre la  $P_{adm}$  de la CTB y la demanda mínima del nodo (con valores superiores a 10), el aporte de potencia de la CTB tiene mayores posibilidades de ocasionar sobretensiones en los nodos del alimentador debido a la escasa absorción de potencia en el propio nodo.

En las Figura 2 y 3 se muestran los resultados obtenidos de los estudios de sensibilidad entre la potencia admisible de la CTB, la distancia del nodo de conexión a la ET y la  $S_{cc}$  en dicho nodo. Luego, en función a estos resultados, en la Tabla 1 se resumen los módulos de potencia de CTB admisibles para cada nodo, los cuales se ubican en un rango de 0,5 a 5 MW.

Tramo del Alimentador	$S_{cc}$ [MVA]	Demanda Valle del Nodo [MVA]	$P_{adm}$ CTB en nodo [MW]	Control de Tensión
En barra de ET	No Aplica	No Aplica	<b>5,0</b>	Si
1-25 km	Mayor a 60	No Aplica	<b>4,5</b>	Si
	Menor o igual a 60	No Aplica	<b>3,0</b>	Si
25-50 km	No Aplica	No Aplica	<b>3,0</b>	Si
	Mayor a 30	No Aplica	<b>1,5</b>	No
50-150 km	Menor o igual a 30	Mayor a 0,15	<b>1,5</b>	No
	Menor o igual a 30	Menor o igual a	<b>0,5</b>	No

Tabla 1: Resumen de Módulos de  $P_{adm}$  de CTB en alimentadores de 33 kV

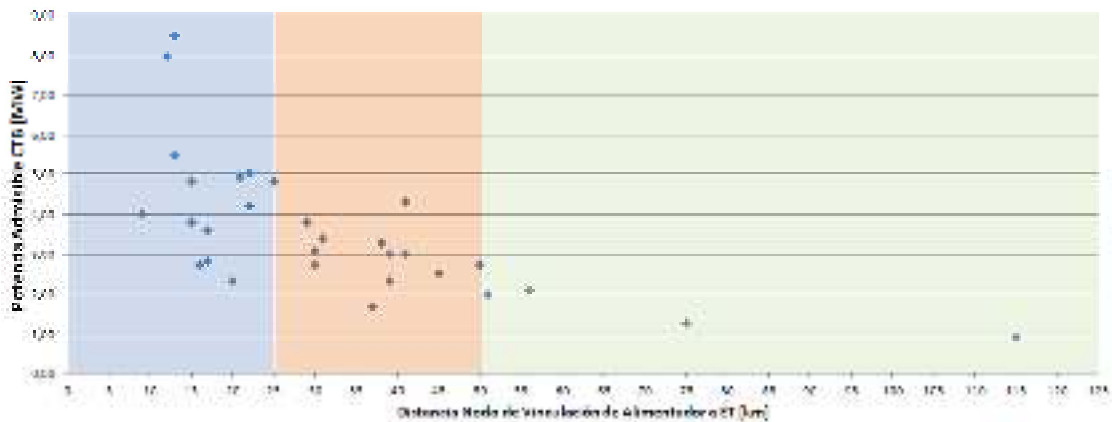


Figura 2. Sensibilidad entre la  $P_{adm}$  en la CTB y la distancia del nodo de conexión a la ET

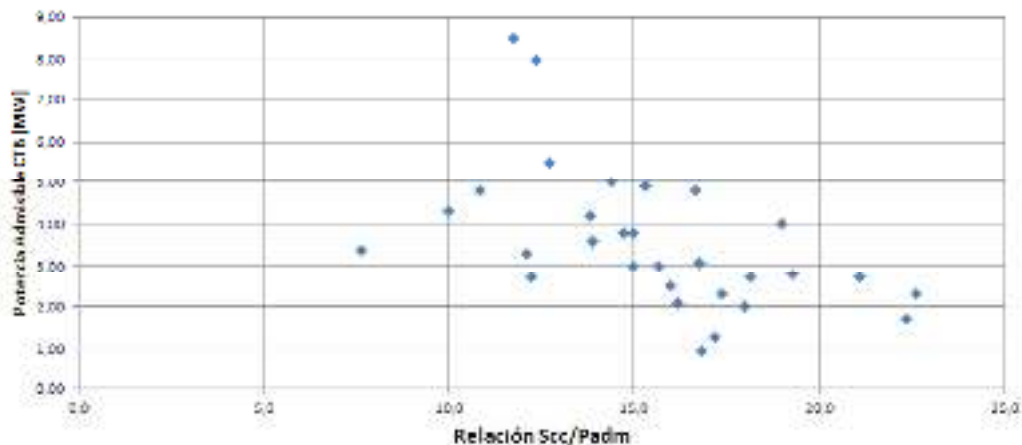


Figura 3. Sensibilidad entre la  $P_{adm}$  en la CTB y la relación  $S_{cc}/P_{adm}$

## II) Potencia admisible de CTB por alimentador

Los alimentadores de 33 kV que poseen instalados, al menos un juego de reguladores automáticos de tensión (RAT), atenúan los posibles problemas de regulación de tensión en condiciones estáticas que podrían ocasionar el despacho simultáneo de un conjunto de CTB vinculadas a diferentes nodos del alimentador. Pero en aquellos alimentadores que no poseen RAT, con longitudes superiores a los 50 km y niveles de  $S_{cc}$  mínimos por debajo de los 35 MVA, las elevadas impedancias de la red provocan sobretensiones, reduciendo la potencia global de inyección de generación en el alimentador a un valor de aproximadamente el 50% del total obtenido según las restricciones individuales por nodo (generalmente fluctuaciones de tensión por desconexión intempestiva de la generación).

## III) Potencia admisible por ET

Las potencias globales de CTB admisibles por ET presentan un rango amplio de 5 a 45 MW, con niveles promedio de 22 MW (ver Figura 4). Esta dispersión se debe a las diferentes configuraciones y topologías de las redes de MT que abastecen cada una de las ETs, presentándose un mayor potencial de inserción de potencia en aquellas ETs con varios alimentadores de 33 kV y con longitudes de desarrollo de las troncales de las redes de MT inferiores a los 50 km.

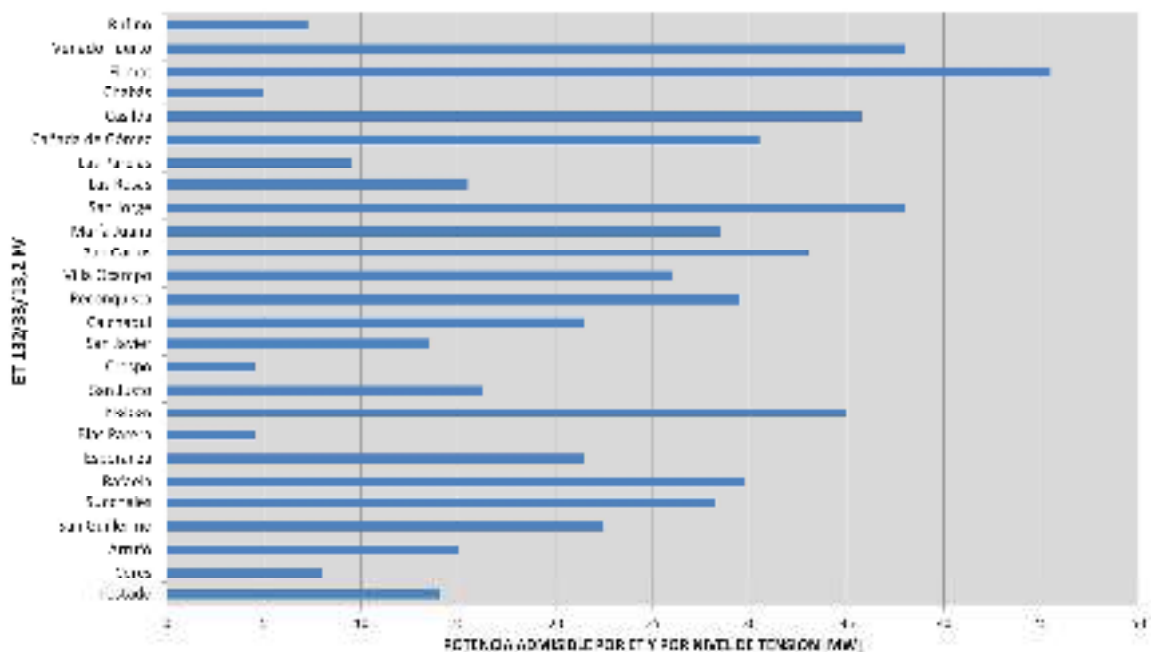


Figura 4. Resumen de los módulos de potencia de CTBs globales admitidos en las redes de 33 kV abastecidas por cada ET

## Conexión de CTB en el nivel de 13,2 KV

Para todos los casos, en barras de 13,2 kV de la ET y/o de la ER 33/13,2 kV, las relaciones de  $S_{cc}/P_{adm}$  oscilan entre 2-13, con módulos de inyección de potencia admisible restringidos por las variaciones súbitas de tensión en nodos de la red originadas por la conexión/desconexión de la CTB.

En cambio, la inyección de potencia de CTB en líneas de 13,2 kV (considerando líneas rurales estándar de 35 Al de sección y longitudes máximas de 50 km) presenta una relación  $S_{cc}/P_{adm}$  que oscila entre 18-20 y la restricción del módulo de la  $P_{adm}$  se debe a la potencia de transformación instalada en el nodo.

## D) Potencia admisible de CTB por conexión en barras de 13,2 kV

En el nivel de 13,2 kV, las evaluaciones de potencia de conexión de generación solo se realizaron en aquellos nodos de 33 kV que poseen ER.



sobrecargas en tramos del alimentador para los escenarios de demanda más desfavorables, que corresponden a aquellos de mínima demanda. En caso de no verificar el ingreso conjunto de CTBs por problemas de sobretensión, se aplican despachos en modo control de tensión de aquellas CTBs con módulos de potencia superiores a 2 MW. Si aun así persisten los problemas de sobretensiones y/o sobrecargas, se reducen los módulos admisibles de las CTBs hasta lograr condiciones admisibles de operación.

- Aporte global al corredor de 132 kV en estudio de los módulos de CTB vinculados en nodos de MT: Se verifican posibles sobretensiones en nodos de MT y AT y sobrecargas en los transformadores de potencia 132/33/13,2 kV.

En la Figura 6 se muestran las potencias globales admitidas de CTB por corredor y por nivel de tensión. Debe destacarse, que las capacidades de potencias admitidas en 13,2 y 33 kV por corredor de 132 kV son sustitutivas entre sí y no complementarias.

Por otra parte, a modo de ejemplo, en las figuras 7, 8 y 9 se presentan el mapa de la provincia de Santa Fe, desglosado en zona norte, centro y sur, con la ubicación de los potenciales puntos de acceso de proyectos de CTB en 33 kV, detallando los módulos de potencia admisible en cada nodo.

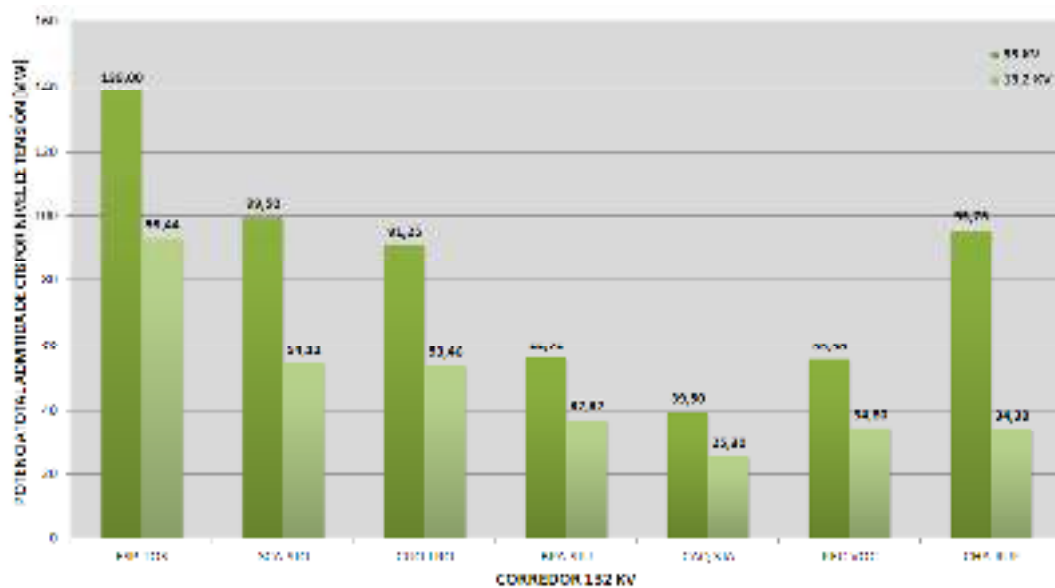


Figura 6. Resumen de capacidad de potencia de CTB admitida en corredores de 132 kV de EPE-SF, según su conexión en redes de 33 y 13,2 kV



Figura 7. Mapa de la zona norte de la provincia de Santa Fe con localización de los módulos de CTB admitidos para conexión en 33 kV



Figura 8. Mapa de la zona centro de la provincia de Santa Fe con localización de los módulos de CTB admitidos para conexión en 33 kV



Figura 9. Mapa de la zona sur de la provincia de Santa Fe con localización de los módulos de CTB admitidos para conexión en 33 kV

## CONCLUSIONES.

En este trabajo se ha propuesto una metodología práctica para determinar las variables eléctricas que permiten obtener patrones comunes de comportamiento de las redes de MT ante la inserción de generación gestionable, tal que garanticen su funcionamiento normal, tanto en su operación individual, como así también en su integración y operación conjunta.

Los módulos de potencia admitidos presentan diferentes razones de restricción que se deben a los niveles de tensión, cargabilidad de líneas y transformadores, y a las fluctuaciones de tensión ocasionadas por las maniobras de conexión y/o desconexión intempestiva de la CTB.

Del conjunto de nodos de 13,2 y 33 kV analizados en las redes de MT de EPE-SF para el desarrollo de proyectos de generación a partir de recursos de biomasa, los resultados obtenidos de las simulaciones permiten inferir que:

- Las potencias admitidas se encuentran en el rango de 0,5 a 5 MW por nodo de MT.
- Para todos los casos, en barras de 13,2 kV de la ET y/o de la ER 33/13,2 kV, las relaciones de  $S_{cc}/P_{adm}$  oscilan entre 2-13, con módulos de inyección de potencia admisible restringidos por las variaciones súbitas de tensión en nodos de la red originadas por la conexión/desconexión de la CTB.
- En el nivel de 33 kV, las potencias admitidas por nodo quedan generalmente restringidas por las fluctuaciones de tensión en nodos de los alimentadores ocasionadas por la

conexión/desconexión intempestiva de la generación, siendo los módulos de potencia admisibles inversamente proporcionales a la distancia desde el nodo de conexión a la ET. Luego, en función a los resultados de la inserción conjunta de los módulos de CTB admitidos por nodo, la potencia total de integración de CTB por ET resultan en el rango de 5-45 MW para vinculación en redes de 33 kV y de 4-30 MW para conexión en redes 13,2 kV, de acuerdo a la extensión y desarrollo de las redes de MT abastecidas por cada ET,

## REFERENCIAS

- Banco Interamericano de Desarrollo. (2017). Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos: Un análisis teórico-práctico.
- Lauer, M. & Thrän, D. (2017). Biogas plants and surplus generation: Cost driver or reducer in the future German electricity system? Editorial: Energy Policy.
- GENERFE. (2019). Abastecimiento de energía eléctrica a partir de fuentes renovables a través de EPESF. Anexo II: Requerimientos Técnicos
- Organisation for Economic Cooperation and Development. (2012). Linking Renewable Energy to Rural Development.
- United Nations. (2018). Global Trends in Renewable Energy Investment. Pp1-86
- Ministerio de Energía y Minería de la Nación. (2016). Resolución N° 71-2016: Convocatoria Programa RenovAr Ronda 1.
- Ministerio de Energía y Minería de la Nación. (2017). Resolución N° 275-2017: Convocatoria Programa RenovAr Ronda 2.

## METHODOLOGY FOR OBTAINING POWER GENERATOR MODULES DISTRIBUTED MANAGABLE IN HIGH VOLTAGE NETWORKS

**ABSTRACT:** The generation of electrical energy through biogas has significant advantages over the rest of the renewable energies, mainly due to its flexibility and control attributes, which guarantees a firm power, with a high utilization factor. The province of Santa Fe has a wide potential for the development of biogas plants due to its productive matrix of agroindustrial type. In this paper we study the insertion of biogas plants in medium voltage networks in the province of Santa Fe. The admission criteria of the power modules of the plants for individual and joint operation are proposed. Depending on the simulations of the load flow in static mode, the power modules of each exchange are obtained. The results show that the connection of centrals in medium voltage nodes has admissible power values per node ranging between 0.5 and 5 MW and are dependent on the distance of the connection node to the transformer station. The total integration power of biogas plants per Transformer Station results in the range of 5-45 MW, according to the extension and development of the medium voltage networks supplied by each station.

**Keywords:** biogas plant, nominal power, voltage fluctuation, distribution network



## **ESTUDIO DE INSERCIÓN DE PARQUES FOTOVOLTAICOS Y CENTRALES DE BIOMASA EN LA RED DE 132 KV DE ENTRE RÍOS**

**Ulises Manassero<sup>1,2</sup>, Juan P. Fernández<sup>2</sup>, Irene Steinmann<sup>2</sup>, Mariano Nicolau<sup>2</sup>, Raúl Regalini<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Empresa Provincial de la Energía de Santa Fe (EPE-SF), CP 3000, Miguens 260, Santa Fe

<sup>2</sup>Centro de Investigación en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos (CIESE), Universidad Tecnológica Nacional (UTN), Facultad Regional Santa Fe  
Tel. 0342-4505832 e-mail: [umanassero@epe.satafe.gov.ar](mailto:umanassero@epe.satafe.gov.ar)

*Recibido 14/08/19, aceptado 18/10/19*

**RESUMEN:** Los sistemas eléctricos de potencia de todo el mundo presentan una tendencia a aumentar su matriz energética con fuentes de energía renovables, reemplazando las centrales térmicas convencionales. En el presente trabajo se estudia la inserción de parques fotovoltaicos y centrales térmicas a base de biomasa en el sistema de transmisión de 132 kV la provincia de Entre Ríos. Se realizan simulaciones de flujo de carga a fines de evaluar los requerimientos de energéticos de la generación distribuida gestionable actual en el sistema, estimando los niveles de energía no suministrada por condiciones no admisibles de operación. Se evalúa la reducción de despacho forzado de la generación térmica convencional, producto del impacto de parques fotovoltaicos y centrales térmicas a base de biomasa en el sistema. Los resultados obtenidos implican una reducción de los requerimientos de la generación gestionable y de la demanda de energía no suministrada, mejorando la calidad del servicio de la red.

**Palabras clave:** energía renovable, parques fotovoltaicos, centrales térmicas de biomasa, energía no suministrada

### **INTRODUCCIÓN**

Los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) se encuentran en constante crecimiento, buscando como objetivo primario brindar un suministro energético confiable y económico, bajo el contexto de sustentabilidad energética y cumpliendo con estándares de calidad de servicio y producto técnico. Uno de los motivos asociados al crecimiento de los SEP responde a la cobertura del aumento de demanda producida por el crecimiento demográfico del país, el cual ronda en un 3% anual (INDEC, 2010) y se relaciona directamente con un mayor aporte energético del sistema.

Por otra parte, el 65% de la matriz energética del país se encuentra cubierta por tecnologías cuya generación eléctrica es obtenida a base de hidrocarburos, como lo es la Generación Térmica Convencional (GTC), mientras que el aporte de energías renovables es de tan solo 2,4% (CAMMESA, 2018), valor que pretende ser incrementado a un 20% en el año 2025, conforme al decreto 531/2016 de la ley 21.191 “Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica”.

El resultado de las causas mencionadas se traduce en un incremento de la importación tanto de energía eléctrica desde los países limítrofes como de gas natural, fuel oil y el diesel oil, para lograr el abastecimiento del sistema (EOTEC, 2018).

En el caso particular de la región centro-sur de la Provincia de Entre Ríos (que abarca los departamentos Paraná, Nogoyá, Basavilbaso, Victoria, Gualeguay y Gualeguaychu) el sistema de transmisión de 132 kV desde el cual se abastece la región está constituido por una red de tipo anillada, con una longitud de 520 km y presenta su vinculación con el Sistema Argentino de Interconexión (SADI) a través de las ETs Salto Grande y Gran Paraná, ambas de 500/132 kV. Con respecto a la demanda del sistema, el mismo cuenta con registros de demanda máxima del orden de los 250 MVA, presentando problemas para la regulación de tensión y saturaciones en líneas cercanas a los nodos SADI.



La solución a los problemas asociados al abastecimiento de energía de la región por el incremento de demanda requiere el desarrollo de obras de infraestructura con elevados plazos de ejecución y altos niveles de inversión, por lo que surge la Generación Distribuida (GD) como herramienta de transición para complementar el abastecimiento energético del subsistema, logrando una solución a corto plazo y evitando (o disminuyendo), los volúmenes de Energía No Suministrada (ENS) derivada de condiciones no admisibles de operación, tales como sobrecargas en líneas o sub-tensiones en los nodos extremos del corredor.

El presente trabajo describe la metodología utilizada para determinar los requerimientos de la GTC en el subsistema de 132 y 33 kV de la provincia de Entre Ríos necesaria para abastecer la demanda, manteniendo las condiciones admisibles de operación del sistema y evaluando el impacto de la GTC actual en conjunto con la integración de Parques Fotovoltaicos (PFVs) y Centrales Térmicas a base de Biomasa (CTBs).

## **METODOLOGÍA**

Como sistema de estudio se utiliza la porción de red de 132-33 kV perteneciente al Sistema Interconectado Provincial (SIP) de Entre Ríos, ubicada en la región centro-sur de la provincia. Este subsistema presenta una topología de tipo anillada y se compone de seis Estaciones Transformadoras (ET) 132/33/13,2 kV.

Se establece un escenario base de demanda, con el objetivo de determinar la potencia umbral de ingreso de la GTC que existe actualmente en el sistema. El escenario mencionado, se caracteriza por cumplir con los siguientes requisitos:

- Configuración correspondiente a la operación normal de la red.
- Sin despacho de la GTC actualmente instalada en los corredores.

Para el escenario Base, se realizan simulaciones tendientes a determinar los elementos del sistema que restringen el funcionamiento normal del mismo, forzando el despacho de GTC para lograr alcanzar las condiciones admisibles de operación de la red. Luego, para un período total de cuatro años de proyección de la demanda, de acuerdo a los resultados obtenidos, se determinan los requerimientos energéticos de la GTC y los niveles de ENS en caso de que la red no alcanzase los límites admisibles de operación.

A continuación, se determinan los módulos de potencia admisible de generación renovable (GR) verificando, a partir de simulaciones de flujos de carga, su impacto en las condiciones de operación de la red para los diferentes escenarios de configuración y/o demanda de la misma. En el caso de la GR de tipo no gestionable (PFV), se realizan verificaciones adicionales de fluctuaciones de tensión en los nodos del sistema debidas a las variaciones rápidas de potencia originadas por la intermitencia de la radiación solar incidente sobre los paneles. Por otro lado, para el caso de la GR gestionable en base a biomasa, además de las posibles restricciones dadas por el sistema eléctrico, se consideran las limitaciones en los módulos de potencia obtenidos según la producción de biogás de acuerdo a las cantidades físicas disponibles de materia prima (principalmente desechos del sector agroindustrial y chips de las industrias madereras) en la región de estudio, suponiendo para cada nodo, la materia prima potencial existente en el área de cobertura eléctrica de cada ET.

Luego, con los módulos de potencia de cada tipo de GR admitida por nodo, se analiza su impacto en las condiciones de operación de la red en términos de gestión de la energía y la potencia operada, según los requerimientos de la demanda. Para ello, se analiza la reducción de la energía aportada por el despacho forzado de GTC, así como también, los niveles de ENS, como consecuencia de la inserción de PFVs y CTBs.

### *Descripción del subsistema de transmisión modelado.*

Los estudios de inserción de los PFVs y las CTBs se realizaron en el SIP de Entre Ríos. Dicho sistema se compone de una red conformada por líneas aéreas de 132 kV, cuyas trazas se observan en la imagen satelital de la Figura 1.

La red presenta vinculación al SADI en 500 kV, a través de las ETs Salto Grande y Gran Paraná, ambas de 500/132 kV. Por otra parte, la región del SIP de Entre Ríos en estudio presenta una topología de tipo anillada, conformada por las ETs Crespo, Nogoyá, Basavilbaso, Colonia Elia, Gualeguaychu, Gualeguay y Victoria; con un total de 520 km de longitud.



Figura 1: Imagen satelital de las trazas del sistema del SIP enterriano de 132 kV.

El subsistema de estudio fue modelado con el software de simulación de sistemas de potencia PSSE. En la Figura 2 se muestra el modelo eléctrico del sistema de estudio correspondiente al escenario pico de verano. Por otra parte, en la Tabla 1 se resume el parque de GTC instalado en la región, el cual totaliza una potencia de 96 MW.

Nombre de la GTC	Potencia Nominal [MW]	Tipo de Tecnología	Nº de Máquinas y Potencia Unitaria	Tensión de Conexión [kV]
Paraná Este	36	Turbinas de Gas	2 de 18 MW	13,2
Concepción del Uruguay	40	Turbinas de Gas	2 de 20 MW	13,2
San Salvador	10	Motor Diesel	6 de 1,6 MW	0,4
Viale	10	Motor Diesel	6 de 1,6 MW	0,4

Tabla 1: Características técnicas de la GTC instalada en la región de estudio del SIP enterriano.

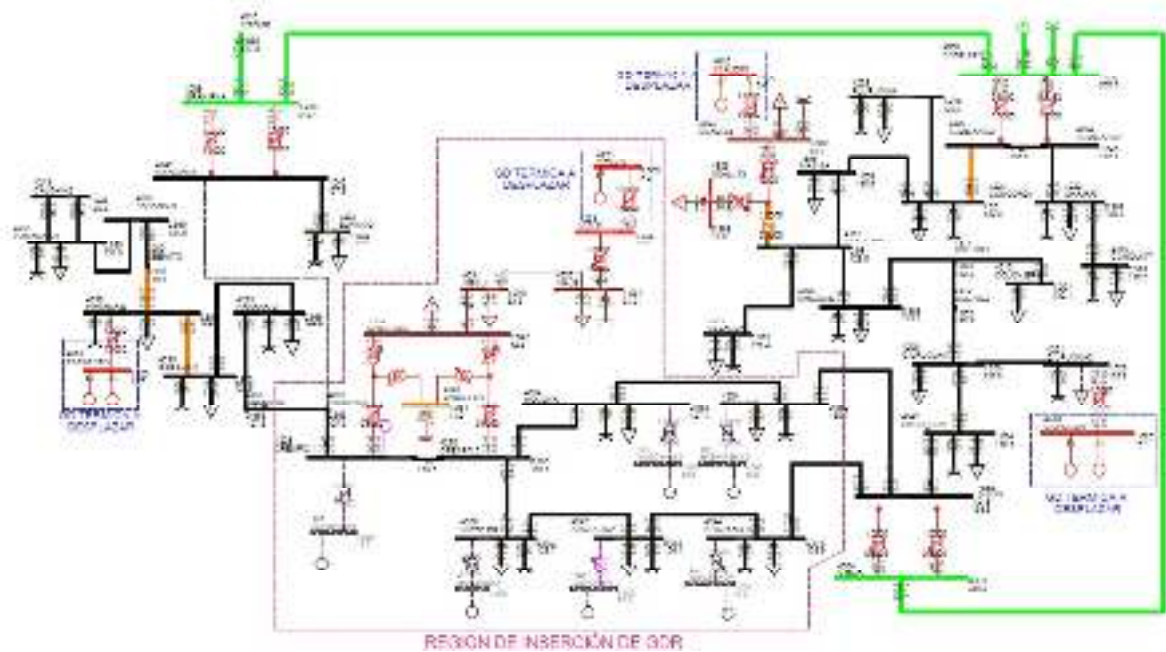


Figura 2: Modelo de red del SIP enterriano de 132 y 33 kV. Escenario de pico de verano

### Consideraciones adoptadas para las simulaciones.

Para los estudios de flujos de cargas se adoptaron las siguientes consideraciones:

- Caso Base correspondiente a un escenario de pico de demanda de verano del SIP Entrerriano, obtenido de la Guía de Referencia 2018-2022 de la empresa de Energía de Entre Ríos, Sociedad Anónima (ENERSA).
- Adopción de los niveles de calidad del producto técnico exigidos en el Anexo 27 de Los Procedimientos de (CAMMESA, 2012). Como límite operativo de la tensión en barras de 132 kV, se adoptó 0,90 pu.
- Adopción como límite de capacidad de transmisión de potencia de las líneas aéreas al límite térmico-mecánico impuesto por sus conductores.
- El límite admisible de condiciones normales de operación de transformadores de potencia (132/33/13,2 kV y 500/132/33 kV) corresponde a la capacidad nominal de la máquina, impuesta por el fabricante según su diseño.
- Las CTB a instalar en el sistema se consideran operando en modo control de tensión, con una curva de capacidad cuyos límites de operación a plena carga quedan establecidos según factores de potencia desde 0,85 inductivo a 0,95 capacitivo.
- Los PFV poseen, a través de sus inversores, capacidad para controlar tensión (reactivo) dentro de una curva de capacidad rectangular, con límite de factor de potencia de 0,95 inductivo/capacitivo, de acuerdo con los requerimientos de CAMMESA. (Molina, 2018).
- Los límites debidos a fluctuaciones máximas de tensión ocasionados en los nodos del subsistema por variaciones rápidas de potencia de los PFV son del 3% para voltajes de operación menores a 132 kV. Respecto a los porcentajes de variación de potencia, en sus procedimientos, CAMMESA (2017) sugiere fluctuaciones del 40% para PFV de potencias superiores a 10 MW y del 50% para PFV de potencias inferiores a 10 MW.

### Cálculo de la energía anual generada por los PFV.

La obtención de la energía anual generada por cada PFV, según el nodo de conexión en 132 kV, se obtuvo a partir de la ecuación (1) de cálculo de la potencia desarrollada por el panel propuesta por el autor Faisal (Faisal, 2008) para la irradiación normal incidente (GING). A su vez, la GING para cada coordenada geográfica de localización y nivel de irradiación del PFV fue calculada en base las ecuaciones presentadas por los autores Duffie y Beckman (Duffie y Beckman 2013). Se utilizó el modelo de panel comercial SOLARTECH ST-P660260WW, con una potencia nominal de 260 W a condiciones estandarizadas de ensayo (STC por sus siglas en ingles), que refieren a una temperatura ambiente de 25 °C y una irradiancia de 1000 W/m<sup>2</sup>.

La serie de datos de irradiancia y temperatura horaria para cada localización de los PFVs (coordenadas de latitud y longitud para las localidades de la región de estudio de la Provincia de Entre Ríos, coincidentes con las ubicaciones de las ETs 132) fueron recolectadas de la página web soda-pro (Solar Radiation Data, 2019).

$$P = N \cdot P_{STC} \cdot \frac{G_{ING}}{G_{STC}} \cdot [1 + k \cdot (T_c - T_r)] \cdot \eta_g \quad (1)$$

Donde:

N: Número de paneles.

PSTC: potencia máxima del módulo a STC, 260 W

GING: irradiancia incidente

GSTC: irradiancia a STC, 1000 W/m<sup>2</sup>

k: coeficiente de variación de la potencia con la temperatura, -0,0044 pu/°C

T<sub>c</sub>: temperatura de la celda

$T_r$ : temperatura de referencia, 25 °C

$\eta_g$ : Rendimiento global de la instalación, calculado a partir del producto de los rendimientos del inversor (92%), sintonizador de máxima potencia (96%), conecionado (95%), suciedad (95%), sombreado (97%) y transformador de bloque (97%)

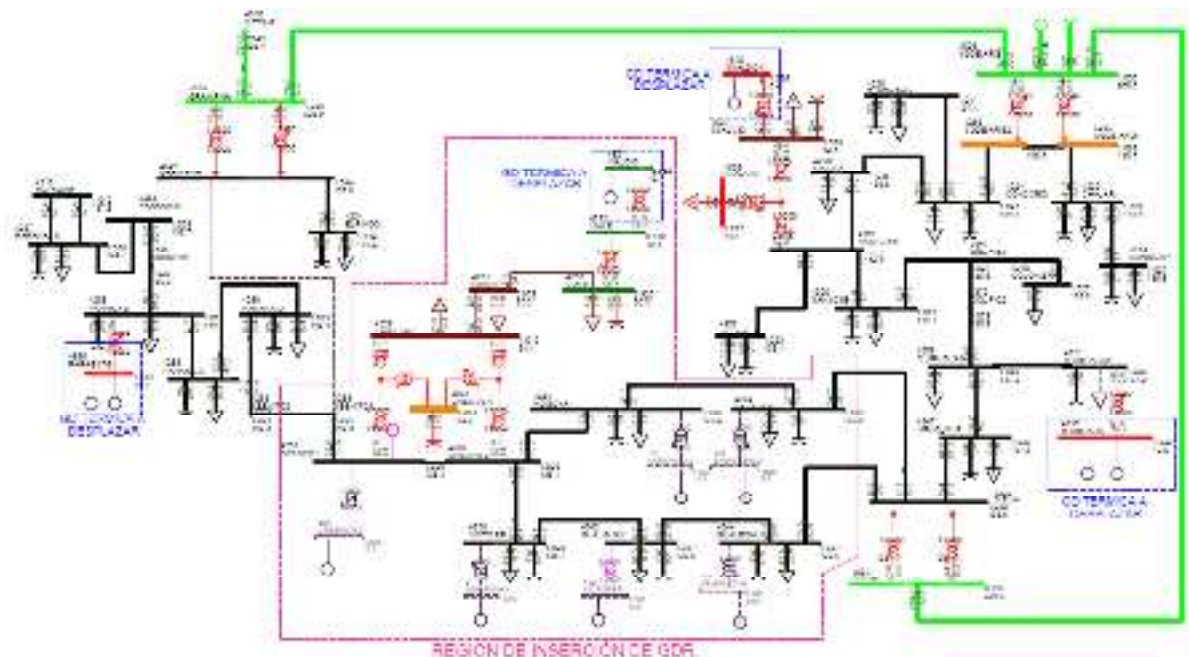
Con las potencias horarias calculadas para la GING se obtuvo en primer lugar la potencia media mensual para cada PFV como el promedio de la suma de las potencias horarias para las horas de irradiación solar de cada mes. Posteriormente, se calculan las energías mensuales según la potencia media mensual y las horas de cada mes; sumando finalmente las energías de cada mes para obtener la energía anual producida por cada PFV.

#### *Determinación del umbral de demanda para ingreso en servicio de la GTC*

La metodología utilizada para la estimación de la potencia mínima de ingreso de la GTC consistió en utilizar escenarios de demanda sin despacho de la GTC actualmente instalada en los corredores (ver Figura 3). Luego, a partir de este escenario de demanda, y sin modificar la configuración de la red ni forzar el despacho de la GTC existente, se realizaron simulaciones tendientes a determinar los elementos de red que ocasionan condiciones inadmisibles de operación.

Las simulaciones de flujos de carga del subsistema para sucesivos incrementos de demanda presentan como primera restricción condiciones de subtensión en el nodo de 33 kV de la barra Viale. Así, queda definida una demanda máxima de 598 MVA a partir de la cual se requiere el ingreso de GTC.

En la Tabla 2 se muestran los módulos de GTC requeridos para evitar condiciones de operación no admisibles en los corredores, tal que ocasionen ENS.



*Figura 3: Modelo eléctrico del SIP Entrerriano. Configuración de la red para escenarios de resto de demanda (sin despacho de la GTC del sistema)*

<b>GTC requerida</b>	<b>Demanda del corredor</b>
0 MW	Menor a 597,9 MVA
28 MW (10 MW Viale y 18 MW Paraná Este)	Entre 597,9 MVA y 700,0 MVA
86 MW (10 MW Viale, 36 MW P. Este y 40 MW C. del Uruguay)	Entre 700,0 MVA y 713,0 MVA

*Tabla 2. Módulos de potencia requeridos para despacho forzado de la GTC.*

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### *Determinación de potencias nominales admisibles de los PFVs y las CTBs*

Para determinar las potencias nominales de la GR, en primer lugar, se realiza el modelado eléctrico de la red de subtransmisión de 132/33 kV de la provincia de Entre Ríos para el escenario de valle de demanda. Para ambos tipos de tecnologías se realizaron simulaciones de flujos de carga en régimen estacionario, a los fines de evaluar el impacto del acceso de la GR en estudio en las variables de operación del sistema, cuyos elementos condicionantes se deben generalmente a sobretensiones en nodos y/o sobrecargas en líneas y transformadores.

Para el caso particular de los PFVs se evalúa, de manera independiente para cada ET, la potencia máxima admisible que es posible suministrar al SIP en función a fluctuaciones máximas admisibles de tensión en barras de AT y MT ante variaciones rápidas de la potencia generada.

Por otra parte, para el caso de las CTBs, el potencial teórico en los nodos mencionados se estimó en relación con la producción de desechos generados por acción de las actividades agrícolas y ganaderas de la región, encontrando como principales sustratos: guano avícola, bovino y ovino; Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) y chips de madera, derivados de aserraderos.

En función a las longitudes máximas de desarrollo de las redes de subtransmisión de 33 kV (del orden de 30 a 40 km) abastecidas desde las ETs 132/33/13,2 kV en estudio y adoptando a éstas como epicentro, se determinó el volumen de los sustratos disponibles implicados en un radio de 30 km. En el caso de la FORSU, la cantidad de sustrato disponible se calculó en base a la cantidad de habitantes (INDEC, Censo 2010), mientras que el guano avícola, bovino y ovino se estimó de acuerdo con la cantidad de animales existentes provenientes de granjas (Schell, 2010)- (SENASA, 2017).

Finalmente, con la producción total de biogás generado por los desechos mencionados, se determinan los módulos de potencia nominales de las CTBs a ubicar en los nodos de las ETs de 132/33/13,2 kV y se verifica su inserción en el sistema de transmisión mediante simulaciones de flujo de potencia.

En la Tabla 3 se detallan los módulos de potencias nominales definidos de la GR a ubicar en los nodos de 132 kV de la región centro-sur del SIP.

Barra de conexión de GDR	GDR		Limitación	
	CTBs	PFVs	Fluctuación de Tensión - Barra	Sobrecarga - Línea
CRESPO	27,2	310	GUALEGUAY_132	
NOGOYA	15,78	240		CRESPO2-NOGOYA
BASAVILB	105,7	230		BASAVILB- C. ELIA
GUALEGYCHU.	46,9	220		BASAVILB- C. ELIA
GUALEGUAY	60	210	GUALEGYCHU_132	
VICTOR ER.	7,62	190		CRESPO.2- VICTOR.

*Tabla 3. Módulos de potencia requeridos para despacho forzado de la GTC.*

### *Comportamiento de la demanda del corredor.*

En la figura 4 se observa la curva de demanda horaria del corredor correspondiente al día de máximo consumo energético, registrado en un día hábil del mes de diciembre. La demanda presenta sus niveles de mayor consumo a partir de las 13:00 horas, alcanzando su valor máximo a las 16:30 horas. Es debido a ello que reviste interés el análisis de inserción de PFVs, en donde su contribución energética en dichos horarios presenta un aporte relevante en relación con la energía consumida, impactando directamente sobre los requerimientos de la GD disponible en el corredor, y en la ENS originada cuando se alcanzan condiciones no admisibles de operación.

En la figura 4 se observa la curva de generación correspondiente a la contribución de los hipotéticos PFVs a ubicar en las ETs Crespo, Nogoyá, Basavilbaso, Gualeguay, Gualeguaychú y Victoria. El perfil de generación de dichos PFVs se calcula según el nivel de irradiación global y la temperatura ambiente de la región geográfica de cada ET.

El perfil de generación de las CTBs permanece constante, por tratarse de una tecnología de GR de tipo gestionable.

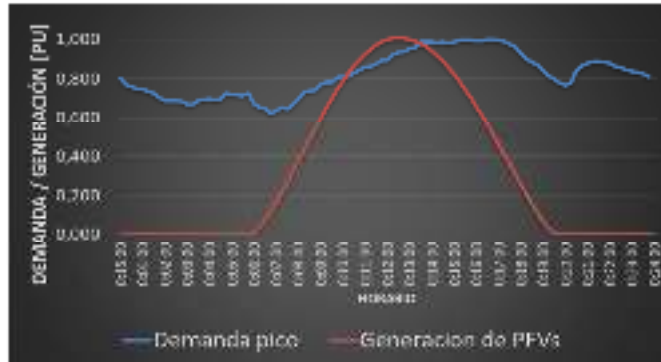


Figura 4. Comparación entre el perfil de demanda diario del subsistema registrado en el día de máximo consumo y el perfil de generación diario de los PFVs.

*Requerimientos proyectados de la GTC actual.*

En el resumen global del período 2018-2021 proyectado, el corredor del SIP entrerriano requeriría un aporte de energía base de GTC de 296.875 MWh, con un total de 6.780 horas de operación. En el término de cuatro años, de la comparación de los valores iniciales para el año 2018 y los finales para el año 2021, los requerimientos de despacho de GTC se incrementan 2 veces y las horas de operación aumentan 1,85 veces (Figura 5).

Los factores de utilización de la GTC (relación entre la energía real generada y la teórica disponible para el período de análisis), van desde 6,75% para el año 2018, hasta un 13,44% para el año 2021. Por otra parte, estos factores puestos en términos de las horas anuales de despacho (denominado factor de disponibilidad) van desde un 10,80% para el año, hasta un 13,76%.

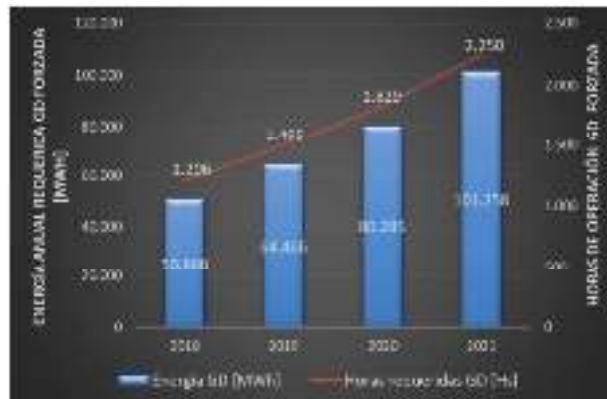


Figura 5: Energía anual y horas de operación requeridas de GTC en el SIP

*Impacto de la GR en las condiciones de operación del SIP Entrerriano.*

Se evalúa el impacto de las GR en el SIP entrerriano analizando los requerimientos de despacho de la GTC y los niveles de ENS producidos en el sistema.

En la Tabla 4 se resumen las características de desempeño técnico de los PFVs analizados, de acuerdo con las características climatológicas de la región (irradiancia solar y temperatura). Se detalla el mismo desempeño para las CTBs, donde se asume un factor de disponibilidad igual al 0,9 (relacionado a paradas técnicas por mantenimiento).

Indicador	PFVs	CTBs
Potencia Nominal [MW]	1.400	263
Producción anual [MWh]	2.015.382	2.305.632
Factor de utilización [%]	16	100
Horas anuales de generación	26.660	47.304
Factor de disponibilidad [%]	51	90

Tabla 4. Desempeño técnico y producción anual de energía de GR



La instalación de GDR en el SIP entrerriano presenta como uno de sus principales beneficios la reducción de GTC. En este aspecto, con la instalación de los seis PFVs en el corredor anillado del SIP se logra una disminución del 50,7% para el período analizado de cuatro años (equivalente a 150.514 MWh), reduciéndose en un 45,5% las horas totales de operación (equivalente a 3.084 horas). Con respecto a la inserción exclusiva de CTBs, se logra una disminución del 98% de la energía generada con GTC (que significa 291.009 MWh), mientras las horas totales de operación se redujeron a 198 horas, tal como se observa la Figura 6 y Figura 7.

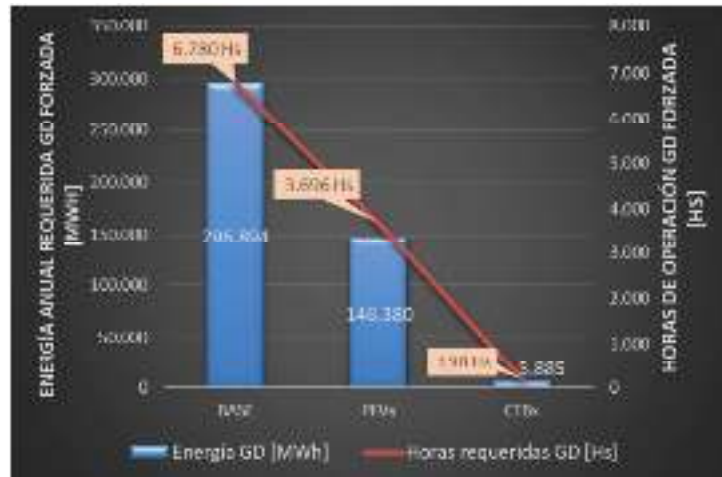


Figura 6. Requerimientos de la GD térmica en el SIP para el período de estudio de 4 años.



Figura 7. Evolución de: a) aporte de energía requerida a la GTC; b) horas totales de despacho de la GTC. Período 2018-2021

Respecto al aporte energético de la GTC para el cubrimiento de diario de la demanda, adoptando como referencia el año 2021, para el caso Base se requiere un despacho de GTC del 2,15% de la demanda total (ver Figura 8). Haciendo el mismo análisis referido a la inserción de los PFVs, el despacho de la GTC se reduce a un 1,15% de la demanda, con un aporte energético de los PFVs del 45,23% de la energía anual demandada (ver Figura 9). Finalmente, con el aporte de las CTBs se logra un cubrimiento de la demanda anual del 46,65%, mientras que el aporte de GTC se reduce a 0,06% de la demanda de energía del SIP.



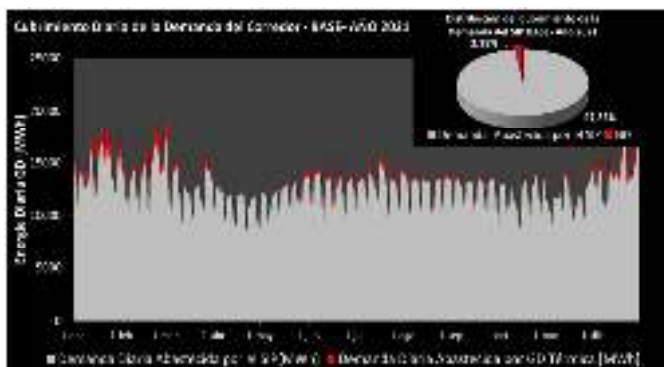


Figura 8. Cubrimiento de la demanda diaria del SIP entrerriano para el año 2021, en el caso Base.

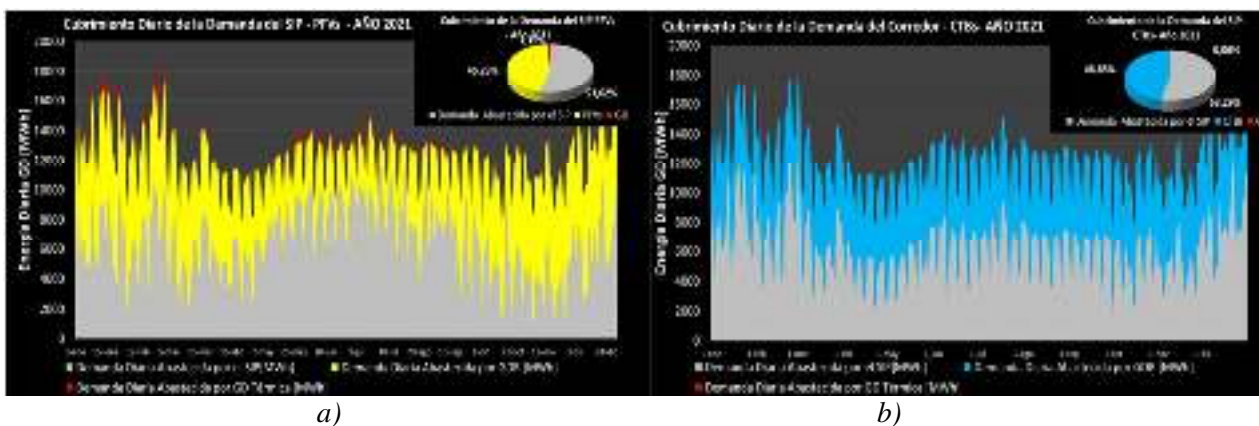


Figura 9. Cubrimiento de la demanda diaria del SIP entrerriano para el año 2021. Casos: a) con PFVs, b) con CTBs

Por último, la inserción de GR en el SIP entrerriano se traduce en reducciones significativas de ENS originada durante el período analizado. Como se observa en la Figura 10, para el año 1 de análisis los volúmenes de ENS se reducen un 82,04% con la inserción de PFVs, alcanzando niveles nulos en el caso de inserción de las CTBs proyectadas. Haciendo una proyección hacia el año 2021, la ENS va en aumento para los tres casos de estudio. Con respecto al caso Base, la ENS se reduce en un 70,7% con la inserción de PFVs y en un 99,6% con el aporte de las CTBs.

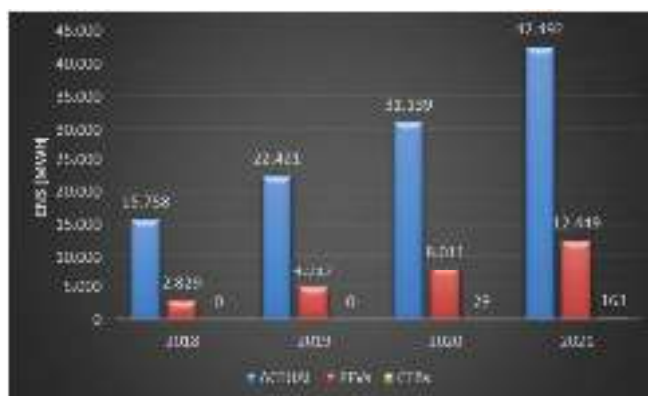


Figura 10. Evolución de la ENS. Período 2018-2021

## CONCLUSIONES

Las tecnologías de GR utilizadas para el caso de estudio, impactan significativamente en la reducción de ENS y requerimientos de GTC. Los resultados demuestran que las CTBs eliminan la ENS del SIP casi en su totalidad durante el período analizado, debido a que presentan factores de disponibilidad y de utilización cercanos a 1. En el caso de los PFV, si bien totalizan en su conjunto una potencia nominal considerablemente superior a las CTBs, debido a la condición no gestionable e intermitente de su producción de energía, sus factores de utilización y de disponibilidad resultan significativamente

menores (0,16 y 0,51 respectivamente), lo que conlleva a que sus aportes (tanto de potencia y energía) no logren eliminar la ENS del SIP.

En trabajos futuros se analizarán métodos para valorizar los costes globales de operación del sistema para casos con y sin GR en la red, incluyendo costos por despacho forzado de generación fósil local, ENS y pérdidas eléctricas.

## REFERENCIAS.

- CAMMESA (2011). Anexo 40: Generación Eólica. pp: 1-4.
- CAMMESA. (2012). Anexo 27: Reglamentación aplicable a la prestación adicional de la función técnica de transporte de energía eléctrica firme en el MEM. Pérez, Argentina, pp: 1-12.
- CAMMESA. (2017). Anexo J: “Generación fotovoltaica –Requisitos de conexión. Pérez.
- CAMMESA. (2018). Informe Anual 2018.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A. (2013). Solar engineering of thermal processes. John Wiley & Sons.
- EOTEC (2018). <<http://www.oetec.org/nota.php?id=3190&area=1>> [consulta: 10 de agosto de 2018]
- Faisal, A. M. (2008). Microgrid modelling and online management (Ph.D. Thesis). Helsinki University of Technology, Espoo. 2008
- INDEC. (2010) Censo Nacional de población, hogares y viviendas 2010 para el total de país.
- Schell H. L.; Cumini, M.L. y Bujía, D. (2010). Información de la Actividad Avícola en Entre Ríos, p.p: 9
- Molina, R; Sinagra, V.; Gallego, F. (2018). Requisitos técnicos para conexión de parques de generación fotovoltaica al SADI. Seminario Nacional CIGRE Argentina 2018: Desarrollo de los sistemas eléctricos de potencia y sus componentes. Capital Federal, pp: 1-8
- SENASA, 2017. Distribución de existencias bovinas por categoría y departamentos.
- Solar Radiation Data [en línea]. HelioClim-3 time series of the radiation components over a horizontal. Dirección URL: < <http://www.soda-pro.com/>> [consulta: 10 de julio de 2019]

## STUDY OF INSERTION OF PHOTOVOLTAIC AND CENTRAL BIOMASS PARKS IN THE 132 KV GRID OF ENTRE RÍOS

**ABSTRACT:** Electrical power systems around the world have a tendency to increase their energy matrix with renewable energy sources, replacing conventional thermal power plants. In this work, the insertion of photovoltaic parks and biomass-based thermal power plants in the 132 kV transmission system in the province of Entre Ríos is studied. Load flow simulations are carried out in order to evaluate the energy requirements of the current manageable distributed generation in the system, estimating the levels of energy not supplied by inadmissible operating conditions. The reduction of forced dispatch of conventional thermal generation, product of the impact of photovoltaic parks and biomass-based thermal power plants in the system, is evaluated. The results obtained imply a reduction in the requirements of the manageable generation and the demand for energy not supplied, improving the quality of the network service.

**Keywords:** renewable energy, photovoltaic parks, biomass thermal plants, energy not supplied

## **PÉRDIDAS E INCERTIDUMBRES EN LAS PROBABILIDADES DE EXCEDENCIA DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE PARQUES EÓLICOS. EJEMPLO DE UN CASO EN LA PATAGONIA**

**Fernando Tilca<sup>1</sup>; J.F. Mathisson Malvasio<sup>2</sup>**

<sup>(1)</sup>Facultad de Ciencias Exactas, INENCO – UNSa. Salta.Tel. +54 387 4255579; fertilca@gmail.com

<sup>(2)</sup> Universidad Tecnológica - Instituto Tecnológico Regional Centro Sur (UTEC-ITRSC), Uruguay

*Recibido 19/08/19, aceptado 25/10/19*

**RESUMEN:** Los métodos utilizados para calcular la Producción Anual de Energía (PAE) y las probabilidades de excedencia de P50 a P99 de los parques eólicos, requieren de una evaluación de las pérdidas técnicas y de las incertidumbres asociadas en cada medición o previsión. Los bancos exigen la evaluación de las pérdidas e incertidumbres, con el objeto de minimizar los riesgos financieros y asegurarse el retorno de la inversión. Esa confiabilidad necesaria asociada a un proyecto de desarrollo eólico, está estrechamente vinculada con el mejor y mayor conocimiento del comportamiento de los valores futuros de las variables, como ser velocidad de viento, comportamiento climático, topografía, rugosidad, efectos estelas, entre otros. En este trabajo, se presenta una forma de su determinación, y un análisis comparativo con un proyecto de parque eólico, que se encuentra aprobado y en funcionamiento.

**Palabras Clave:** incertidumbres, producción anual de energía, PAE parques eólicos.

### **INTRODUCCIÓN**

Montes et al. (2007) describe la evaluación de las inversiones en condiciones de riesgo e incertidumbre, donde la condición de riesgo se encuentra entre dos extremos, uno es la evaluación en condiciones de certidumbre y el otro la evaluación en condiciones de incertidumbre. La primera tiene como característica que asume que se tiene el conocimiento completo de los futuros valores de las variables consideradas, y el otro, asume una completa carencia de conocimiento de la evolución futura de las variables. Concluye que la existencia de altos niveles de incertidumbre en proyectos de centrales eólicas puede representar un obstáculo para obtener financiamiento en el corto plazo. Para un desarrollo exitoso de parque eólico, y la minimización de los riesgos financieros, es fundamental la cuantificación de la incertidumbre de la potencia en el sitio, dado que la Producción Anual de Energía (PAE) depende de las condiciones externas (recurso eólico) y de las condiciones de los aerogeneradores (estructural y mecánica), (Kwon, 2010).

El viento es una fuente intermitente, entonces la estimación o cálculo de la PAE de centrales eólicas requiere de análisis estadísticos. Para dicha determinación, que debe cumplir la exigencia de estar asociada con las probabilidades de ocurrencias P50 a P99, se deben estimar/calcular las pérdidas técnicas y las incertidumbres. La caracterización del viento se puede realizar mediante modelos de probabilidad, por ejemplo, asumir una distribución uniforme de la densidad del aire, distribución de Weibull para la velocidad de viento, al perfil vertical de la velocidad caracterizarlo por el coeficiente de rugosidad “alfa” de la ley de la potencia, entre otras variables (id, 2010).

Las pérdidas y las incertidumbres son dos conceptos distintos que menudo se mencionan juntos, lo que puede llegar a causar confusión. Una evaluación de recursos eólicos no es financiable sin un análisis cuidadoso de pérdidas e incertidumbre.

Una PAE P50 significa que hay un 50% de probabilidades de obtener al menos esa cantidad de energía en el parque eólico. En este caso intervienen solamente las pérdidas técnicas, y no las incertidumbres. Mientras mayores sean las pérdidas técnicas, menor será esa cantidad de energía.

Una PAE P90 significa que hay un 90% de probabilidades de obtener al menos esa cantidad de energía en el parque eólico. Mientras mayores sean las incertidumbres, menor será esa cantidad de energía y por lo tanto disminuye la viabilidad económica del parque eólico. Es decir que las probabilidades de superación de la producción anual esperada del parque eólico, dependen de la magnitud de las incertidumbres del proyecto. Un estudio cuidadoso de las incertidumbres, sirven al menos para cumplir los siguientes objetivos:

- El organismo del estado responsable de la provisión de energía eléctrica, tendrá mayor seguridad para satisfacer la demanda de la población.
- Los límites al riesgo financiero que exigen los bancos que financian la construcción de parques eólicos, se satisfacen mediante el aumento de la calidad del diseño al reducir la incertidumbre del proyecto.

Los cálculos o estimaciones de las pérdidas técnicas y de las incertidumbres de un parque eólico, se hacen utilizando diversos criterios que responden no sólo a las características propias de cada proyecto, sino también a la experiencia del diseñador, por lo tanto, distintos diseñadores muy probablemente van a obtener valores de pérdidas técnicas e incertidumbres diferentes aún con el uso de los mismos datos.

## **PÉRDIDAS TÉCNICAS**

En un parque eólico, normalmente se calcula la PAE bruta mediante la utilización de programas específicos: WindPRO, WAsP, GH WindFarm, Meteodyn, WindSim, entre otros (Windpro, 2019; WAsP, 2019; DNV-GL, 2019; Meteodyn, 2019; WindSim, 2019); programas que también entregan la PAE bruta (que ya incluye las pérdidas por efecto estela debido a la posición de los aerogeneradores en el parque); a esta cantidad, es decir que a la que ya se le resta la pérdida por efecto estela, es a quien llamaremos PAE bruta en este trabajo.

Las pérdidas técnicas siempre restan, son pérdidas debido a las leyes de la Física como efecto Joule o a la indisponibilidad de las máquinas, entre otras. Se reportan como un porcentaje de la energía bruta. Se determinan en base a experiencia y prácticas habituales de diseño de parques eólicos. Las categorías principales son 7, y son sugeridas en Stephen (2008), y dentro de cada una de ellos, existen sub-categorías. A continuación, se describen las principales (KEMA D, 2013):

1. Indisponibilidad y balance de planta.
2. Efecto de Estela.
3. Rendimiento de la turbina
4. Eléctricas.
5. Medioambientales.
6. Restricciones.
7. Otros.

### **1. Pérdidas por indisponibilidad y balance de planta**

Por indisponibilidad se debe al tiempo dedicado al mantenimiento durante el cual las máquinas estarán apagadas. Según garantía de disponibilidad de la empresa que los fabrica, puede ser hasta de un 3%. Las pérdidas por balance de planta, son aquellas debido a la inactividad de los componentes entre el interruptor principal de la turbina, el transformador de la subestación incluida en el proyecto y la línea de transmisión específica del proyecto. La disponibilidad de la red comprende otra sub-categoría, y es cuando el operador de la red (como CAMMESA, en Argentina, o ADME en Uruguay) puede ordenar la reducción de la producción de energía eólica por baja demanda, alto suministro de otras fuentes, falla de la red, etc. Es decir, por restricción en la red debido a razones externas. Se entiende en todos los casos de las pérdidas por balance de planta, que el recurso eólico está disponible y la máquina puede generar. Su valor depende de las condiciones eléctricas locales, del contrato de inyección de energía y de la empresa distribuidora; valores razonables se consideran de 1 a 2%.

### **2. Pérdidas por efecto estela**

Es la pérdida en la producción de energía debido a la reducción de velocidad de viento y mayor turbulencia a raíz de la estela por las turbinas. Pueden deberse a turbinas dentro del parque eólico, o a turbinas externas en parques eólicos adyacentes. Los aerogeneradores pueden tener ubicación tal que, en raras ocasiones, la dirección del viento haga que aquellos en la dirección de estela experimenten un alto grado de turbulencia; en este caso puede que la gestión del parque eólico las apague para mejorar la vida útil de las máquinas; este efecto se anula si se respetan las distancias mínimas. Los que por efecto estela pierdan más de un 4% en su producción de energía, muy probablemente requieran cambiar su ubicación dentro del parque. También se consideran dentro esta categoría a los efectos estela de futuros aerogeneradores que se instalen en proyectos eólicos en desarrollo.

### 3. Pérdidas rendimiento de la turbina

Esta categoría comprende las pérdidas por:

- *Flujo de viento*, son debido a turbulencia, flujo inclinado, entre otros, que representan las diferencias entre las condiciones de ensayo y las condiciones del emplazamiento.
- *Histéresis por vientos fuertes*: cuando la velocidad del viento excede la velocidad de corte, el aerogenerador se apaga y no se reinicia tan pronto como la velocidad está por debajo de la de corte, sino que el controlador espera a que la velocidad baje una cierta cantidad por debajo del límite antes de reiniciar. Puede determinarse con los datos de viento.

### 4. Pérdidas eléctricas

Su valor puede ubicarse entre 1 a 2.5%. Pueden ser de dos tipos:

- *Por efecto Joule*, son las que existen en el tramo entre los bornes del generador eléctrico y el punto de conexión del parque eólico a la red, incluye la de los transformadores de cada aerogenerador y los de la subestación transformadora. Según tamaño del parque, de 1 a 2%.
- *Por consumo propio del parque eólico*. 0.2 a 0.5 %.

### 5. Pérdidas medioambientales

Varios son los factores ambientales que pueden producir reducción de generación eléctrica. Según mantenimiento y clima puede valorarse de 1 a 2%:

- *Por degradación, por suciedad o formación de hielo en palas*, las palas reducen su rendimiento, por polvo que se adhiere o por formación de hielo por baja temperatura, o por degradación física del perfil aerodinámico. En el tiempo, puede considerarse un aumento lineal de 0.1% anual.
- *Por baja o alta temperatura*, son pérdidas debido a temperaturas por fuera de los rangos de operación de la turbina, pueden, por ejemplo, generar fallas debido a sobrecalentamiento de los componentes que integran la góndola. Se puede estimar con datos de temperatura del lugar.
- *Por rayos*, depende del clima y de la protección de los aerogeneradores.
- *Por forestación o deforestación de bosques cercanos*, depende de si es una forestación futura o una deforestación, puede resultar en una pérdida o una ganancia respectivamente.

### 6. Pérdidas por restricciones

- *Por circulación de aves migratorias*, para reducir el impacto el operador del parque ralentiza o apaga las máquinas; a veces es una condición para obtener un permiso ambiental.
- *Estrategia de paradas por sectores*, se puede dar en diseños de parques en donde las distancias entre turbinas son menores de lo recomendado y el efecto estela, para ciertas condiciones de velocidad de viento y dirección, produce pérdidas significativas. Además de aumentar la vida útil de las máquinas al no ser expuestas a la turbulencia de las estelas.
- *Parpadeo (Flicker)*, la sombra de las palas de los aerogeneradores, puede, en ciertas horas y días del año ocasionar parpadeo en un receptor de sombra (entiéndase como receptor de sombra, por ejemplo, una ventana de una casa), que genere un impacto negativo sobre las personas. Estas paradas se pueden predecir mediante la identificación de los posibles lugares

receptores de sombras, y luego ingresados a los cálculos del proyecto, teniendo en cuenta la orientación y recorrido del sol durante el año.

- *Ruido*. En los casos de Argentina y Uruguay, por ejemplo, salvo en aerogeneradores instalados insertos dentro de una zona urbana (por ejemplo, Parque Eólico Corfrisa-Cristal Pet, ver referencia), la mayoría se ubican en el medio rural. En este caso, se debe tener en cuenta la norma UNE-EN-61400-11, que especifica las directrices para la medición del ruido, además de que tener en cuenta la normativa nacional vigente respecto a ello, (Henin, 2010).

## 7. Otras Pérdidas

Otros eventos incluyen ciclones, huracanes y tornados. Si la zona es sísmica, durante la vida útil pueden ocurrir terremotos.

La **Pérdida Técnica Total** se calcula mediante la suma de cada uno de estos porcentajes.

La producción anual neta de energía (PAE neta) se obtiene restando a la PAE bruta, la que se pierde por las pérdidas técnicas. A esta cantidad se le llama P50, porque tiene una probabilidad del 50% de que la energía generada sea superior a este valor:

$$P50 = PAE_{Bruta} \left( \frac{100 - \%Pérdidas\ Técnicas}{100} \right) \quad (1)$$

## INCERTIDUMBRES

El cálculo de la PAE de un parque eólico debe incluir un análisis de incertidumbres, que dará como resultado un cierto grado de incertidumbre en la generación de energía, lo que a su vez se traduce en incertidumbre en los ingresos por la venta de la energía y en la rentabilidad del proyecto eólico. La evaluación del proyecto debe incluir un análisis de probabilidades de excedencia de PAE P50, P75, P90, P99, según la exigencia de la entidad que lo financie. Las probabilidades de excedencia están en función de las incertidumbres.

La Incertidumbre está relacionada con la imperfección en el conocimiento, depende del grado de información, precisión y dispersión de la medida de las variables, que entran en juego en el estudio de la energía eólica. Puede tener varios tipos de origen, desde errores cuantificables en los datos hasta terminología definida de forma ambigua o previsiones inciertas. La incertidumbre puede ser representada por medidas cuantitativas (por ejemplo, un rango de valores calculados según distintos modelos) o por afirmaciones cualitativas (por ejemplo, al reflejar el juicio de un grupo de expertos). Las incertidumbres están relacionadas con (A) las mediciones del recurso eólico y (B) con la producción de energía. A diferencia de las pérdidas técnicas, las incertidumbres pueden sumar o restar.

### A) Incertidumbres en las mediciones del recurso eólico

- Incertidumbres propias de los instrumentos (anemómetros, veletas, etc) y de su calibración.
- Incertidumbres por interferencia (Hunter et al, 1999; Hansen et al, 1999; Lubitz, 2009; UNE-EN 61400-12-1, 2018)
- Incertidumbres por el período de medición.
- Incertidumbres por ajuste de largo plazo.

### Incertidumbres propias del anemómetro y de su calibración

Los anemómetros más utilizados son los de copas. Suele ocurrir que los bancos que financian la construcción del parque eólico, requieran que las mediciones de viento se realicen con sensores de calidad reconocida, algunas de las marcas son Thies First Class, Second Wind, NRG System, RISOE.

La norma UNE-EN 61400-12-1 (2018), establece en el Anexo I la ecuación I.1 para determinar el Número de Clase kn del anemómetro:

$$k_n = 100 \times \text{Máx} \left| \frac{\varepsilon_i}{w_i} \right| \quad (2)$$

donde:

$k_n$  es el número de clase de un anemómetro con número de muestra  $n$  ( $n = 1 \dots 5$  o más);  
 $w_i$  es una función de ponderación, en m/s, que define la envolvente de la desviación, mediante la ecuación I.2 de dicha norma (ecuación (3) siguiente)  
 $\varepsilon_i$  es la desviación, en m/s, para la combinación  $i$  del parámetro de influencia.

La función de ponderación  $w_i$  promedia la influencia de las desviaciones absoluta y relativa. El error relativo es mayor para velocidades de viento más bajas, y viceversa. El absoluto es mayor para velocidades de viento altas.

$$w_i = 5 \text{ m/s} + 0.5 \cdot U_i \quad (3)$$

donde  $U_i$  es la velocidad del viento en m/s para la combinación del parámetro de influencia  $i$ .

La incertidumbre estándar a usar está dada por la misma norma, mediante la ecuación siguiente:

$$u_i = \left( 0.05 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 0.005 \cdot U_i \right) \cdot k_n \cdot \sqrt{3} \quad (4)$$

La calibración del anemómetro debe realizarse en túnel de viento aprobado por MEASNET, es decir que el certificado de calibración tenga el sello de esta institución.

De acuerdo a la experiencia, la incertidumbre por estos conceptos, varía entre 1.5% y 7%.

### **Incertidumbre debido a interferencias**

Existen para Argentina las recomendaciones para la medición de viento (H. Mattio et al, 2009), que en concordancia con normas internacionales como la UNE-EN 61400-12-1 (2018), indican detalles de instalación de anemómetros y otros instrumentos en la torre de medición, que tienen en cuenta dirección principal del viento, tipo de torre (reticulada o tubular) y distancias instrumentos – torre, de manera que las mediciones se vean afectadas lo menos posible. La incertidumbre por este concepto puede variar entre 0.5 y 4%, teniendo valores menores si se cumplen las recomendaciones.

### **Incertidumbre por el período de medición**

Es natural que haya una variación de la velocidad del viento de un año a otro. La variabilidad interanual representa esta incertidumbre, asociada al período de medición de un año. Para períodos de varios años, las variaciones de velocidad de viento tienden a compensarse y de esta forma, la incertidumbre para periodos largos es inferior a la incertidumbre para períodos de un año. La incertidumbre asociada a un período de  $n$  años se estima mediante el cociente entre el valor de la variabilidad interanual y la raíz cuadrada de  $n$ . En cuanto al impacto del cambio climático en el cambio de la velocidad del viento y también su dirección, se ha visto que, hasta el momento, no hay una tendencia apreciable para la velocidad del viento como sí la hay para la temperatura. Esta incertidumbre es menor si más años de medición se tienen. Para un año de medición, se puede tomar entre un 4 y 5%.

### **Incertidumbre por ajuste a largo plazo**

El viento tiene una variabilidad interanual, que tiene como consecuencia que la medición de 1 o 2 años puede que no sea representativa a largo plazo. Es importante entonces contar con series de datos de la denominada estación de referencia, que contenga datos de viento de 10 y hasta 30 años. Hay empresas e instituciones que venden o ponen a disposición este tipo de datos, que se utilizan para hacer la extensión de la serie de datos del sitio donde estará el parque eólico, mediante métodos como MCP (Medición, Correlación, Predicción). Empresas como Vortex SL, AWS Truepower; o instituciones como National Centers for Environmental Prediction (NCEP), North American Regional Reanalysis (NARR), y programas como MERRA-2 (Modern - Era Retrospective analysis for Research and



Applications, Version 2) de la NASA. Es decir, se cuenta con un período relativamente corto de datos medidos, los que se correlacionan con el conjunto de datos de la serie larga de la estación de referencia, consiguiendo la extensión de la serie, como se muestra en la figura 1:

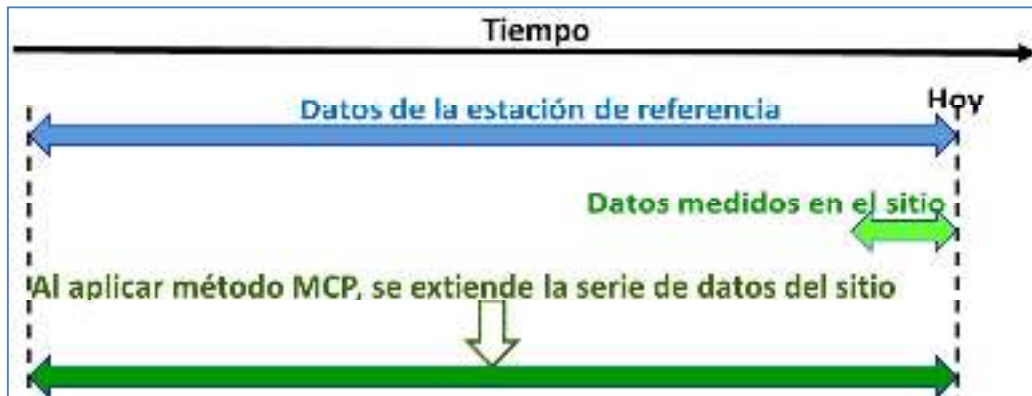


Figura 1: extensión de serie de datos utilizando datos de largo plazo y método MCP.

Un indicador del ajuste de la correlación es el valor de  $R^2$ , cuanto más se acerca a 1 mejor es la correlación. Una forma de obtener el valor de la incertidumbre por ajuste a largo plazo es mediante la siguiente relación lineal:

$$\text{Incertidumbre (\%)} = 10 - 10 \cdot R^2 \quad (5)$$

Si  $R^2$  es 0.5 o menor, no es conveniente trabajar con esa extensión de serie de datos. Para el caso de Parque Eólico en la Patagonia Argentina, que se comenta más adelante, el coeficiente de correlación, teniendo en cuenta los datos de MERRA-2 más cercano a la torre, tiene  $R^2 = 0.524$  en lo que respecta a la velocidad. Este coeficiente de correlación resulta del ajuste de la recta por mínimos cuadrados, en donde el objetivo (datos del sitio), se correlaciona con la referencia (MERRA-2). El período considerado de datos MERRA-2 comprende desde 01/01/1980 a 01/08/2019. Por lo tanto, para el caso en cuestión, la incertidumbre es del 4.76%.

Al realizar la extensión de datos para el período antes dicho, se obtiene un factor de ajuste climático a largo término de 0.981, mediante el método Matriz de Serie Temporal, con el programa Windographer (2019). Ese factor indica que la velocidad media mensual a largo término es 2.9% menor a la velocidad media mensual del período de medición en Torre anemométrica.

## B) Incertidumbres relacionadas con la producción de energía

### Incertidumbre relacionada con modelización del campo de viento

La modelización del flujo de viento en el sitio depende de varios factores, entre ellos de la topografía y rugosidad del terreno (mientras más complejo sea el terreno, más difícil será obtener un campo de viento que se acerque a lo real), de la distancia de la torre de medición a los aerogeneradores (el criterio adoptado en la licitación del plan RENOVAR I de Argentina, es que todo aerogenerador debe estar a no más de 12 km de la torre de medición y en promedio, todos los aerogeneradores a no más de 6 km de la torre). De acuerdo a lo mencionado, esta incertidumbre se puede valorar entre 2 y 5%.

### Incertidumbre relacionada curva de potencia del aerogenerador

Es natural que las características del viento del sitio en estudio (turbulencia, topografía) sean distintas de aquellas donde se ubicó el tipo de aerogenerador a utilizar cuando el fabricante realizó las mediciones para trazar la curva de potencia. En consecuencia, la producción de energía puede ser ligeramente distinta para una dada velocidad en el sitio real que la que indica la curva de potencia. Si la curva de potencia se ha trazado cumpliendo con los requisitos de las normas internacionales, este valor de incertidumbre se puede adoptar entre 2 y 4%.

### Incertidumbre por extrapolación vertical

Relacionada con la estimación de la velocidad de viento por encima del nivel del suelo, alturas para las cuales no hay mediciones directas. Son incertidumbres asociadas a la estimación del perfil de la velocidad horizontal del viento, dentro del rango de interés. Es aconsejable que si se antemano se sabe la altura del eje del aerogenerador, que esa altura este al menos entre dos medidas directas de viento, por ejemplo, si la altura es 90 m, es aconsejable que exista una medida a una altura menor a 90 m y otra a una altura mayor a 90m.

La INCERTIDUMBRE TOTAL se calcula mediante la raíz cuadrada de la suma de cada una de las incertidumbres al cuadrado.

## PAE Y PROBABILIDADES DE EXCEDENCIA

Como se indica en la ecuación (1), la Producción Anual de Energía neta, P50, se obtiene restando a la producción bruta la energía que se pierde por las pérdidas técnicas. Para calcular la PAE con cierta expectativa de probabilidad de que esa cantidad de energía sea excedida, se utilizan valores tabulados de distribución normal para probabilidades específicas y el factor de descuento  $F_p$ , según se indica en la ecuación (6):

$$P_{xx} = P50 * (1 - \text{Incertidumbre} * F_{p,xx}) \quad (6)$$

El valor de  $F_p$  se obtiene de la tabla 1:

Probabilidad de Excedencia (%)	Factor $F_p$
50	0.00
55	0.13
60	0.25
65	0.39
70	0.52
75	0.674
80	0.842
84	1.000
85	1.036
90	1.282
95	1.645
99	2.326

Tabla 1: valores del factor de descuento  $F_p$  de acuerdo a la probabilidad de excedencia.

Por ejemplo, para determinar la PAE con un 90% de probabilidad de que ese valor sea superado, es decir el P90, utilizamos la siguiente expresión:

$$P90 = P50 * (1 - \text{Incertidumbre} * 1.282) \quad (7)$$

## ANÁLISIS DE CASO: PARQUE EÓLICO EN LA PATAGONIA ARGENTINA

Se analiza seguidamente los cálculos realizados para obtener las probabilidades de excedencia de PAE de un parque eólico, del proyecto presentado por el Desarrollador del parque, que luego fue construido y desde fines del año 2017 está inyectando la energía que genera al Sistema Interconectado de Argentina.

### Resumen del Proyecto

En la tabla 2 se muestra un resumen del Proyecto analizado en este apartado, con datos del Proyecto.

Aerogenerador	V 100 – 2 MW. IEC II B
Altura de buje	80 m
Potencia instalada del parque eólico	20 MW
Velocidad media de viento a altura del buje	8.3 m/s
PAE bruta (sin restar pérdidas por efecto estela)	99.4 GWh/año
PAE P50	80.8 GWh/año
Pérdidas Totales	18.7%
Factor de capacidad P50	46.1%
PAE P90	68.0 GWh/año
Factor de capacidad P90	38.8%

Tabla 2: Resumen del parque eólico analizado.

En las pérdidas consideradas por el Desarrollador, se observan valores elevados a las debido a efecto estela (5.4%) y por limitaciones (7.7%).

Con los datos de la tabla 2 y las expresiones (1) y (7), obtenemos el valor de las pérdidas técnicas y el de las incertidumbres:

$$\text{Pérdidas técnicas} = 1 - (\text{P50}/\text{PAE}_{\text{bruta}}) = 1 - (80.8/99.4) = 0.187 \rightarrow \text{Pérdidas técnicas} = 18.7\%$$

$$\text{Incertidumbre} = (1 - \text{P90}/\text{P50})/1.282 = 0.1236 \rightarrow \text{Incertidumbre} = 12.36\%.$$

Cabe aclarar que, en este caso, en las pérdidas técnicas se incluye la pérdida por efecto estela que es de 5.4%, valor que consideramos alto.

Para dicho parque eólico, las categorías de incertidumbre y sus fuentes consideradas, son las siguientes:

Categoría	Fuente	Valor	Afecta
Medición de viento	anemometria	0.025	vel
	Interferencia estelas	0.005	vel
Regimen viento a largo plazo	Procedimiento de recración de datos	0.034	vel
	Representatividad del peridio a largo plazo 13.2 años	0.015	vel
	Correlación con los datos de referencia	0.003	vel
	Consistencia de los datos de referencia	0.007	vel
	representatividad de la distrib de frecu historica (% AEP)	0.024	pae
Modelización flujo de viento	Precisión del modelo	0.025	vel
Factores de pérdida	Efecto de estela	0.014	pae
	Eficiencia eléctrica	0.003	pae
	Rendimiento del aerogenerador	0.025	pae
	condiciones medioambientales	0	pae
	limitaciones	0.008	pae
Variabilidad interanual	Variabilidad de la distribución de frecuencia - futura	0.02	pae
	Variabilidad interanual de la velocidad de viento	0.055	vel
	Variabilidad de la disponibilidad del sistema	0.03	pae

Tabla 3: Incertidumbres. Nota: vel(velocidad), pae (Producción Anual de Energía)

## PRODUCCIÓN DE ENERGÍA DEL PARQUE EÓLICO

Considerando la producción real del parque eólico para el año 2018, según datos publicados por CAMMESA (2019, <http://www.cammesa.com>) en su página web en la sección Informe Anual, y luego mediante elaboración propia para el cálculo del Factor de capacidad, se obtiene:

$$FC = 48.5 \%$$

Este factor de capacidad, obtenido de la producción del año 2018, es mayor que el correspondiente al P90 del proyecto (38.8%), siendo incluso aún mayor que el correspondiente al P50 del proyecto (46.1%).

## CONCLUSIONES

Las previsiones del proyecto se cumplieron ampliamente para el primer año de funcionamiento del parque, lo que puede ocurrir si el año tuvo vientos con una distribución especialmente favorable.

La PAE mayor que la prevista posiciona al parque eólico del lado de mayor seguridad en cuanto al cumplimiento de las obligaciones financieras previstas dado el mayor valor de ingresos por venta de energía.

El valor de las pérdidas por efecto estela es elevado, lo que podría indicar que hubo algún defecto en la realización del mapeo eólico del sitio mediante el software utilizado.

## REFERENCIAS

2019, CAMMESA (<http://www.cammesa.com/linfoanu.nsf/MINFOANU?OpenFrameSet>).

ADME, Administración del Mercado Eléctrico de Uruguay. URL: <https://adme.com.uy/> (Acceso agosto 2019)

DNV-GL, “Wind Resource Assessment software - WindFarmer: Analyst”, URL: <https://www.dnvgl.com/services/wind-resource-assessment-software-windfarmer-analyst-3766> (acceso Agosto 2019)

Hansen, M. O., & Pedersen, B. M. (1999). Influence of the meteorology mast on a cup anemometer. *Journal of Solar Energy Engineering*, 121(2), 128-131.

Henin, C. A., Iannace, G., Maffei, L., Roggio, I. E., & Miretti, G. A. (2010, September). RUIDO DE GENERADORES EÓLICOS: ANÁLISIS Y APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE MEDICIÓN SEGÚN NORMATIVA VIGENTE. In *2º Congreso Internacional de Acústica UNTREF*.

Hunter, R. S., Pedersen, B. M., Pedersen, T. F., Klug, H., van der Borg, N., Kelley, N., & Dahlberg, J. Å. (1999). Recommended practices for wind turbine testing and evaluation. 11. Wind speed measurement and use of cup anemometry. 1. IEA.

Jones, Stephen, DNV Global Energy Concepts Inc., Standard Loss Definitions for Wind Resource/Energy Assessment, American Wind Energy Association WINDPOWER Conference, Houston Texas, June 2008

KEMA, D. (2013). Framework for the Categorisation of Losses and Uncertainty for Wind Energy Assessments.

Kwon, S. D. (2010). Uncertainty analysis of wind energy potential assessment. *Applied Energy*, 87(3), 856-865.

Lubitz, W. D. (2009, June). Effects of tower shadowing on anemometer data. In *Proceedings of the 11th Americas Conference on Wind Engineering*.

Mattio, H., & Tilca, F. (2009). Recomendaciones para mediciones de velocidad y dirección de viento con fines de generación eléctrica, y medición de potencia eléctrica generada por aerogeneradores.

CREE, INENCO, Ministerio de Planificación Federal Inversión Pública y Servicios, Secretaría de Energía de la Nación.

Meteodyn WT , URL: <https://meteodyn.com/en/logiciels/cfd-wind-farm-resource-software-meteodynwt/#.XVo0QGZ7nIU> (Acceso Agosto 2019).

MERRA-2, URL: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/> (2019)

Montes, G. M., & Martín, E. P. (2007). Profitability of wind energy: Short-term risk factors and possible improvements. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(9), 2191-2200.

Parque Eólico Corfrisa-Cristal Pet, Localización: Lat. -34.717430, Long. -56.219426. URL: [https://ventusenergia.com/proyectos/eolico/PE\\_Corfrisa.php](https://ventusenergia.com/proyectos/eolico/PE_Corfrisa.php)

UNE-EN 61400-11, Aerogeneradores, Parte 11: Técnicas de medida de ruido acústico. Julio 2013

UNE-EN 61400-12-1, Aerogeneradores, Parte 12-1: Medida de la curva de potencia de aerogeneradores productores de electricidad. Mayo 2018

WAsP - DTU, URL: <https://www.wasp.dk/> , (acceso Agosto 2019)

Windographer, URL: <https://www.windographer.com/> (2019)

WindPro – EMD International, URL: <https://www.emd.dk/windpro/> , (acceso Agosto 2019)

WindSim, URL: <http://windsim.com/software.aspx> (Acceso Agosto 2019)

**ABSTRACT:** The methods used to calculate the Annual Energy Production (AEP) and the probability of exceedance P50 to P99 of wind farms require an evaluation of the technical losses and the associated uncertainties in each measurement or forecast. Evaluation of losses and uncertainties are required by Banks, in order to minimize financial risks and ensure the return on investment. This necessary reliability associated with a wind development project is closely linked to the better and greater knowledge of the behavior of the future values of the variables such as wind speed, climatic behavior, topography, roughness, wake effects, among others. In this work, a form of its determination is presented, and a comparative analysis with a wind farm project, which is approved and in operation.

**Keywords:** uncertainties, Annual Energy Production, AEP, Wind Farms.

## **CERTIFICACIÓN DE SUSTENTABILIDAD AMBIENTAL PARA EDIFICIOS ESCOLARES EN ETAPA DE USO. ANÁLISIS COMPARATIVO DE CUATRO MODELOS INTERNACIONALES**

**M. Guillermina Ré<sup>1</sup>, M. Celina Michaux<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño, Universidad Nacional de San Juan.

Tel.: +54(0)264 423 2395 / 3259 Int. 318 - <http://www.irpha.faud.unsj.ar>

E-mails: [guillerminare@faud.unsj.edu.ar](mailto:guillerminare@faud.unsj.edu.ar); [celinamichaux@faud.unsj.edu.ar](mailto:celinamichaux@faud.unsj.edu.ar)

*Recibido 12/08/19, aceptado 22/10/19*

**RESUMEN:** El presente trabajo tiene por objetivo estudiar diversos modelos de certificación de sustentabilidad ambiental reconocidos en el ámbito internacional que consideran las particularidades de los edificios escolares como una tipología independiente. Para cada uno de ellos se revisan sus categorías, indicadores y estructuras de puntuación. Se identifican los criterios relacionados a la eficiencia energética y al confort térmico, y se conforman nuevos agrupamientos según las variables seleccionadas, que permitan realizar el análisis comparativo entre los sistemas. Por otro lado, se señalan y comentan los créditos específicos para escuelas, los cuales suelen estar referidos a aspectos educativos, sociales o funcionales. Como cierre del trabajo se concluye que TEENERGY es la herramienta que más se orienta a la evaluación térmico-energética de edificios escolares con un 46% de sus créditos involucrados en la temática, seguida de ITACA y BREEAM, que exhiben un 41% y 40% respectivamente.

**Palabras clave:** sistemas de certificación, eficiencia energética, confort térmico, escuelas.

### **INTRODUCCIÓN**

La necesidad, cada día más imperante, por preservar el medio ambiente, reducir el consumo energético y controlar las emisiones de CO<sub>2</sub>, ha motivado a nivel mundial el desarrollo de edificaciones sustentables. Este proceso estuvo acompañado de la aparición y perfeccionado de diversos Modelos de Certificación de la Sustentabilidad (MCS), que permitieran brindar una base de reglamentación para la evaluación de los edificios.

Los primeros sistemas fueron elaborados a finales de 1980, desde entonces, han evolucionado considerablemente, a la vez que han surgido nuevos modelos apropiados a la realidad económica, social y ambiental de cada país. Inicialmente, estas herramientas se enfocaban en la valoración de nuevas construcciones, relegando a un segundo lugar el parque edilicio existente (Ihobe, 2010). Sin embargo, con el correr del tiempo se comenzó a considerar el potencial que presentan las mejoras que se pudieran realizar sobre edificios construidos, y progresivamente se fueron incorporando versiones de certificación según las distintas etapas del ciclo de vida. A principios de esta década, había registradas en todo el mundo, 382 herramientas para evaluar la eficiencia energética y la sustentabilidad, sin embargo, solo unos pocos sistemas son ampliamente reconocidos y establecen un estándar para el desarrollo sustentable (Nguyen y Altan, 2011).

En 2015, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) aprobó la Agenda 2030, que cuenta con 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), entre los cuales se incluye el combate al cambio climático, la defensa del medio ambiente, la educación y la energía asequible, segura, sustentable. En este marco,

los Modelos de Certificación de la Sustentabilidad ambiental y edilicia se posicionan y toman fuerza, para contribuir desde el sector, en los esfuerzos por construir un mundo mejor.

Desde el ámbito académico y científico se ha trabajado en el estudio y análisis de métodos de evaluación de la sustentabilidad ambiental y edilicia, y programas de certificación de la eficiencia energética, con el fin de indagar en sus aspectos estructurales (Nguyen y Altan, 2011; Frade y Susumu Gomazako, 2016), o con el objetivo de proponer nuevas metodologías adecuadas al contexto local (Quesada Molina, 2014; Czajkowski, et al., 2017)

La presente investigación indaga y analiza comparativamente distintos MCS reconocidos en el ámbito internacional que posean programas de calificación específicos para edificios escolares como una tipología de estudio independiente. El propósito final es revisar críticamente antecedentes en la temática y generar conocimientos que contribuyan a la elaboración de una herramienta local para la calificación energética y evaluación de la sustentabilidad de edificios escolares existentes en el Área Metropolitana de San Juan. El desarrollo de dicha investigación se enmarca en el proyecto PROJOVI 2018-2019 / FAUD-UNSJ.

## **METODOLOGÍA**

El trabajo se orienta al estudio de diversos modelos de certificación de la sustentabilidad ambiental y edilicia en la etapa de uso que se caractericen por su popularidad, influencia y por ser técnicamente avanzados.

En una primera se realiza la revisión de los sistemas de clasificación más importantes del ámbito internacional, que posean versiones específicas para el caso de edificios escolares. En complemento se registran sus particularidades en función del ciclo de vida, diferenciando las versiones para evaluar nuevas construcciones y/o existentes. Del estudio de documentos normativos y del material libre disponible, se decide analizar en profundidad cuatro modelos, ellos son: BREEAM Education 2008 (2012), LEED for Building Operations and Maintenance Schools (2018), TEENERGY Schools (2012) y Protocollo ITACA Edifici Scolastici (2012). Se lleva a cabo una breve descripción de cada uno, y se indican las categorías de evaluación que los integran y sus porcentajes de incidencia en el total (obtenido a partir de la suma de los puntajes posibles de alcanzar con la aprobación de los créditos que las componen). A su vez se identifican las categorías orientadas a la evaluación de la performance energética del edificio, con el fin de reconocer su importancia relativa dentro del sistema.

Posteriormente se analizan comparativamente los modelos de certificación seleccionados, a partir de nuevos criterios de análisis: *sistemas energéticos, envoltente edilicia, energías renovables y confort térmico*. Por último, se mencionan los Créditos Específicos para Escuelas (CEE) reconocidos dentro de cada una de las estructuras de evaluación, agrupándolos según tres aspectos predominantes: educativo, social y funcional.

## **MODELOS DE CERTIFICACIÓN PARA EDIFICIOS ESCOLARES EN ETAPA DE USO**

En las últimas décadas se han desarrollado a nivel internacional, modelos de certificación de la sustentabilidad ambiental y edilicia, que buscan fomentar que construcciones nuevas y existentes se adecuen a criterios de sustentabilidad, a partir de la consideración del ciclo de vida. En su evolución, dichos sistemas han desarrollado diferentes versiones según el destino del edificio que se pretende certificar (comercial, residencial, educativo, oficinas, etc.) y en base a su funcionalidad se administran las categorías y los créditos que éstas incluyen.

El ciclo de vida de un edificio está compuesto por cuatro etapas (Figura 1), conocidas como: de producto, de construcción, de uso y de fin de vida. Durante dicho ciclo, la etapa de uso ocupa la mayor cantidad de tiempo, dado que contempla desde el momento en que se entrega el edificio a su propietario hasta el momento en que deja de usarse. Según diversos autores (Zabalza et al., 2009; Blengini y Di Carlo, 2010; Srinivasan et al., 2012) esta etapa puede durar entre 50 y 100 años, aunque muchas veces el plazo es superior. A su vez, en el uso es cuando se detectan importantes niveles de



consumos, entre los más significativos surgen los relacionados con la energía y el agua. Estos consumos generan residuos, elevados niveles de CO<sub>2</sub> y un gran impacto ambiental, favoreciendo el calentamiento global y el agotamiento de recursos bióticos y abióticos. Como estrategias para disminuir los niveles de impacto, desde una perspectiva sustentable, se busca extender el tiempo de vida del edificio utilizando materiales duraderos, adaptables, y realizar periódicamente inversiones en reparaciones y mantenimiento. También se recomienda la aplicación de pautas de diseño bioclimático, de aislamiento térmico, sistemas de reciclaje y reaprovechamiento del agua que permitan reducir gastos energéticos (Rieznik Lamana y Hernández Aja, 2005).



Figura 1: Etapas del ciclo de vida según Blengini y Di Carlo (2010). Fuente: Elaboración propia.

La búsqueda y revisión de antecedentes en el tema permitió elaborar un listado con los modelos de certificación de mayor reconocimiento y alcance internacional, que consideren la funcionalidad escolar para la elaboración de una versión de evaluación específica. La Tabla 1 muestra once MCS para escuelas, indicando para cada uno, el país al que pertenece, el año de publicación y la diferenciación para el análisis de edificios nuevos y/o existentes. La información utilizada fue obtenida de los sitios web oficiales de cada sistema.

MCS para edificios escolares	País de creación	Versión Año	Nueva construcción	Construcción existente
1 BREEAM Education	Reino Unido	2008	■	■
2 LEED O+M for education	E.E.U.U.	2014		■
3 DQI for Education	Reino Unido	2005	■	■
4 DGNB New construction of educational buildings	Alemania	2012	■	
5 CASBEE for Schools	Japón	2001	■	■
6 TEENERGY Schools	Italia, Grecia, España y Chipre	2011	■	■
7 ITACA School Building	Italia	2012	■	■
8 GRIHA for Existing Day Schools	India	2014		■
9 IGBC Green Schools	India	2015	■	■
10 Edge Education	India	2011	■	■
11 BCA Green Mark for Existing Schools	Singapur	2011		■

Tabla 1:

Modelos de Certificación de la Sustentabilidad para edificios escolares. Fuente: Elaboración propia.

A nivel general los sistemas de clasificación suelen mantener una estructura analítica similar, conformada por distintas categorías de evaluación, que a su vez se encuentran integradas por una serie

de créditos, ítems o pautas, a los cuales se le asigna un valor. Del total de créditos aprobados, se obtiene el puntaje final, que permite alcanzar determinado nivel o calificación (Figura 2).



Figura 2: Esquema de la estructura de los MCS. Fuente: Elaboración propia.

De los once modelos mencionados en la Tabla 1, se seleccionan cuatro para elaborar un estudio en profundidad que permita reconocer sus estructuras de análisis y aspectos de evaluación.

### BREEAM

Se utiliza el modelo BREEAM Education 2008, versión 4.1, publicada el 25 de mayo de 2012. Esta metodología de evaluación tiene como objetivos: mitigar los impactos que generan los edificios en el medio ambiente, proporcionar una etiqueta medioambiental fidedigna para los edificios y estimular la demanda de edificios sustentables. La versión en estudio permite medir el rendimiento del edificio en las etapas de diseño y pos-ocupación, y puede utilizarse para evaluar diferentes tipos de edificios educativos: pre-escolar o nivel inicial, escuelas de enseñanza primaria y secundaria, academias, escuelas de educación especial, edificios de educación superior e instituciones de formación profesional, laboratorios y talleres (BREEAM, 2012).

En el gráfico de la Figura 3, se indican las diez categorías que componen el sistema y los porcentajes de incidencia de cada una de ellas en el total. Se puede observar que la referida a la evaluación energética es la que mayor valoración presenta, con un 17%, seguida de salud y bienestar con un 14%. A la derecha se puede observar la escuela primaria Brandon ubicada en Durham, Inglaterra, que fue evaluada en su etapa de uso con BREEAM Education 2008 y obtuvo una puntuación Sobresaliente con 87.7%. Entre las características ambientales principales se pueden mencionar: máximo uso de iluminación y ventilación natural, utilización de masa térmica, hermeticidad y aislamiento de la envoltura del edificio, instalación fotovoltaica, uso de energía geotérmica y biomasa (BREEAM).



Figura 3. Izq.: Categorías de BREEAM Education 2008. Fuente: Elaboración propia. Der.: Escuela primaria Brandon, certificada con el mismo modelo. Fuente: [www.breeam.com](http://www.breeam.com)

### LEED

Se trabaja con el programa LEED for Building Operations and Maintenance (O+M), en su versión 4, actualizada el 5 de enero de 2018, que incluye a los Centros Educativos. El manual puede utilizarse para edificios con diferentes usos, ya que en cada crédito se especifica a cuál tipología funcional puede aplicarse. Este MCS tiene como meta calificar los edificios y otorgar un certificado de reconocimiento a aquellos que demuestran ser sustentables en cuanto al diseño, métodos constructivos y operativos. Con LEED O+M for Schools pueden certificarse escuelas primarias y secundarias, edificios de educación superior y construcciones complementarias de los campus escolares (LEED, 2018).

Las categorías que forman el sistema LEED O+M for Schools son ocho, entre ellas se destaca Energía y atmósfera, con un porcentaje del 35% sobre el total (Figura 4). Esta categoría, que supera al resto entre un 20% y 30%, está orientada a reducir la demanda de energía mediante acciones que promuevan la eficiencia. Un ejemplo de aplicación de este modelo es la escuela primaria Midtown ubicada en New Jersey, Estados Unidos, que en 2013 obtuvo la certificación de Platino con más de 80 puntos. La escuela posee tres pilares de sustentabilidad: impacto ambiental y costos reducidos, mejor salud y bienestar para estudiantes y educación ambiental efectiva y sustentable (SSPARCHITECTS).

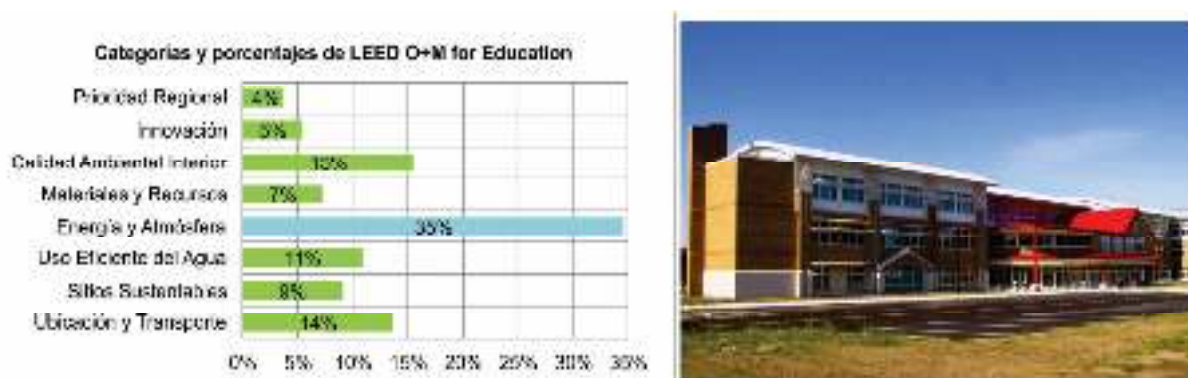


Figura 4. Izq.: Categorías de LEED O+M for Schools. Fuente: Elaboración propia. Der.: Escuela primaria Midtown, certificada con el mismo modelo. Fuente: [www.ssparchitects.com](http://www.ssparchitects.com)

## TEENERGY

La guía Escuelas TEENERGY (2012) es una síntesis de criterios tecnológicos y sustentables fundados en datos de 71 auditorías energéticas escolares. El objetivo de la guía es brindar respuesta a la falta de puntos de referencia de ahorro energético orientados a las condiciones climáticas del sur de Europa y a la baja eficiencia de los edificios escolares existentes. Las auditorías realizadas, la experimentación de técnicas de ahorro de energía, la integración de materiales innovadores y de energías renovables permitieron definir metodologías de análisis energéticos en escuelas existentes y soluciones tecnológicas apropiadas en la construcción de nuevos edificios educativos (Trombadore et al., 2011).

TEENERGY está compuesto por 4 categorías, de las cuales dos de ellas hacen referencia a la variable energía: Sistema de control para el ahorro energético y Energía producida por fuentes renovables; ambas representan el 30% del total del modelo. Con mayor porcentaje se encuentra Materiales y tecnologías de construcción (55%) y en último lugar Selección y diseño del sitio. En la Figura 5, se observa el Liceo Científico “A. Vallisneri” ubicado en Lucca, Italia, el cual fue remodelado entre 2010 y 2012, según las pautas de TEENERGY. La reestructuración energética y la remodelación arquitectónica realizada al edificio existente permitió lograr la disminución del consumo. Entre las principales intervenciones efectuadas se encuentran: aislamiento de la cubierta, reemplazo de carpinterías, incorporación de techo radiante y mejoramiento del sistema de iluminación (Lazzari y Romano, 2015).

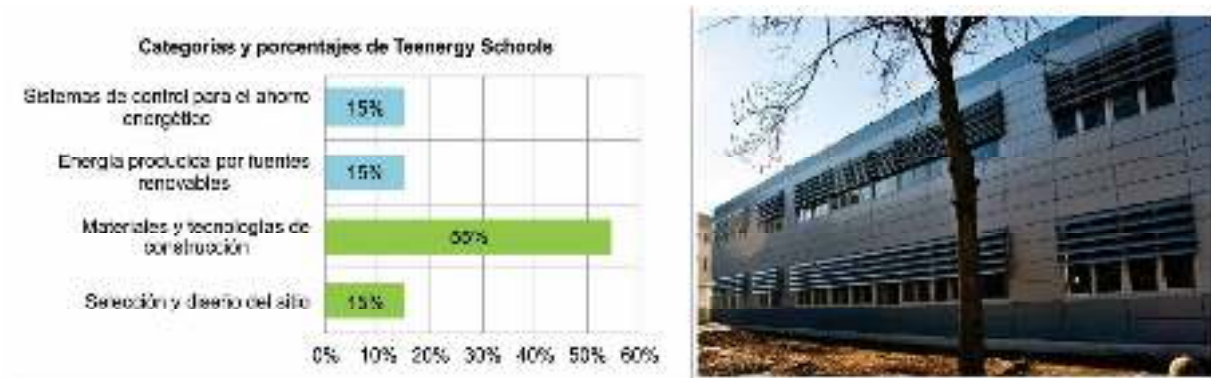


Figura 5. Izq.: Categorías de TEENERGY Schools. Fuente: Elaboración propia. Der.: Liceo Scientifico "A. Vallisneri", certificado con el mismo modelo. Fuente: [www.frangisolepapini.it](http://www.frangisolepapini.it)

## ITACA

El "Protocollo ITACA Nazionale 2011. Edifici Scolastici" ha sido actualizado en septiembre de 2012 y puede aplicarse a establecimientos escolares en todos los niveles, sean construcciones nuevas o edificios en etapa de renovación. El protocolo tiene como objetivo evaluar la sustentabilidad energética y medioambiental de los edificios mediante un sistema de análisis multicriterio. El mismo, se compone de un total de 39 ítem estructurados en cinco categorías o áreas de evaluación, que a su vez están divididas en aspectos, conformando distintos niveles jerárquicos (ITACA, 2012).

En la Figura 6 se ve representado gráficamente el puntaje relativo de cada una de las categorías que componen el Protocolo; con un 40% de incidencia, la categoría Consumo de recursos, que incluye la variable energética, predomina sobre el resto. Como ejemplo de utilización del modelo, se mencionan las escuelas gemelas de Acqui Terme en Alessandria, que son edificaciones idénticas entre sí, pero construidas en distritos diferentes entre los años 2017 y 2018. Una de ellas es la Scuola Monteverde, en Piazza Allende, la otra, es la Scuola Media Bella, en Via Salvadori, y constituyen los primeros edificios educativos certificados con ITACA, Edifici Scolastici. Tienen un bajo consumo de energía, y el resto de su requerimiento está proporcionado por fuentes renovables en un 74%. La arquitectura innovadora, el uso de materiales naturales y la búsqueda de sustentabilidad ambiental dieron como resultado un edificio altamente eficiente (Fissaggi Strutturali, 2018).



Figura 6. Izq.: Categorías de Protocollo ITACA. Fuente: Elaboración propia. Der.: Proyecto de escuelas gemelas de Acqui Terme, certificadas con ITACA. Fuente: [www.gpproject.eu](http://www.gpproject.eu)

## EFICIENCIA ENERGÉTICA Y CONFORT TÉRMICO

La revisión de los modelos seleccionados permitió identificar las particularidades de las estructuras organizacionales, destacando la incidencia del aspecto energético en la metodología global. Asimismo, se pudo reconocer la existencia de ítems o pautas que se relacionan a la eficiencia energética de los edificios, ubicados en otras categorías. A raíz de lo expuesto, se definieron los principios que guiarán



el análisis comparativo basado en entender que el alto consumo energético que registra el sector edilicio durante su etapa de uso requiere de la implementación de acciones integrales que contribuyan al aumento de la eficiencia con el objetivo de disminuir la demanda; las cuales deberían estar orientadas a:

- ✓ Mejorar la eficiencia de los sistemas energéticos que integran un edificio (iluminación, calentamiento de agua, calefacción, refrigeración y ventilación); considerando la eficiencia de las instalaciones en su conjunto, y de los artefactos y equipos que la integran.
- ✓ Evaluar la eficiencia de la envolvente edilicia, con la aplicación de reglamentaciones y normativas existentes que regulen la materialidad constructiva, y la utilización de pautas de diseño adecuadas al clima del lugar.
- ✓ Incorporación de energías renovables, que complementen las fuentes de energía utilizadas.
- ✓ Organizar auditorías periódicas y/o continuas del confort térmico, como mecanismos de control interior.

MCS	Categoría original	Nuevos criterios de análisis			
		Sistemas energéticos	Envolvente arquitect.	Energías renovables	Confort térmico
		Puntos	Puntos	Puntos	Puntos
BREEAM	Energía	21	1	8	
	Contaminación			3	
	Materiales		8		
	Salud y Bienestar				3
LEED	Energía y atmósfera	32		5	
	Calidad ambiental interior				2
TEENERGY	Sistemas de control para el ahorro	15			
	Selección y diseño del sitio		5		
	Materiales y tecnologías de		20		
	Energía producida por fuentes			20	
ITACA	Consumo de recursos	12	9	4	
	Cargas ambientales	5			
	Calidad de servicio		3		
	Calidad ambiental interior				10

Tabla 2: Puntos afectados en los cuatro criterios de análisis. Fuente: Elaboración propia.

De la consideración de las acciones mencionadas, se establecen para el trabajo, cuatro nuevos agrupamientos en dónde se reubican los créditos que involucran a la eficiencia energética y al confort térmico interior, con el fin de realizar un estudio comparativo entre los MCS. Los nuevos criterios de análisis son: sistemas energéticos, envolvente edilicia, energías renovables y confort térmico. En la Tabla 2 se presentan los puntajes obtenidos de la sumatoria de los créditos afectados a la temática; por un lado, en correspondencia con la categoría original a la que pertenecen, y por otro, a qué criterio responde según los nuevos grupos de variables establecidos para este trabajo.

Para BREEAM, el certificado de evaluación para edificios escolares permite obtener un puntaje total de 110. De éstos, 21 puntos tienen el propósito de mejorar la eficiencia de los sistemas energéticos, con sus artefactos y equipos; 9 se refieren a la eficiencia de la envolvente edilicia, 11 a la incorporación de energías renovables y 3 a la consideración de la ventilación natural y el confort térmico. La sumatoria del puntaje, cuyo objetivo es evaluar y mejorar la eficiencia energética y el confort térmico, es de 44 puntos que corresponde a un 40% del total del sistema (Figura 7).

En cuanto a LEED, el máximo puntaje que permite alcanzar el modelo analizado es también de 110 puntos, de los cuales el 35,4% se encuentran afectados al tema de interés del trabajo, distribuidos de la siguiente manera: 29,1% representan los objetivos destinados a mejorar el sistema energético del edificio, 4,5% a la incorporación de energías renovables y 1,8% a las auditorías del confort térmico. Este caso de estudio, no menciona a la envolvente edilicia como un elemento específico a evaluar,

pudiendo llegar a estar considerada dentro de los créditos de la categoría Energía y atmósfera destinados a la optimización del desempeño energético, como una de las estrategias a implementar.

El proyecto TEENERGY School posee una guía de trabajo compuesta por pautas de buenas prácticas que suman 130 puntos; entre ellas se pueden identificar 15 que responden al criterio Sistemas energéticos, 25 a la Envolvente arquitectónica, y 20 a Energías renovables (Tabla 2), representando un 46,1% del puntaje total (Figura 7). Para este modelo, se reconoce la inexistencia de un ítem orientado específicamente a la evaluación del confort térmico, que suma puntos por ello; sin embargo, la revisión de la información disponible ha permitido determinar que el tema formaría parte de la base conceptual del modelo, y estaría presente de manera indirecta en las acciones a implementar para promover la eficiencia energética en edificios existentes de escuela secundaria.

ITACA presenta una estructura de ítems que suman 104 puntos, siendo 43 los orientados a calificar y mejorar la eficiencia energética y el confort térmico (41,2%). Este modelo cuenta con los cuatro criterios de análisis conformados para la investigación: la eficiencia del sistema energético posee un peso relativo del 16,3%, seguida del comportamiento y mantenimiento de la envolvente arquitectónica con un 11,5% y del bienestar higrotérmico y ventilación con 9,6%, por último, la utilización de energía procedente de fuentes renovables representa un 3,8% (Figura 7).

El análisis comparativo entre los modelos de certificación permite reconocer que el criterio Sistema Energético es el que presenta mayor relevancia en LEED (29,1%), BREEAM (19,1%) e ITACA (16,3%), denotando el interés de esos sistemas por evaluar y mejorar la eficiencia del edificio considerando tanto de las instalaciones en su conjunto, como de los artefactos y equipos que las integran. A diferencia, para el caso de TEENERGY School, se valoran las acciones tendientes a la optimización de la Envolvente Arquitectónica, con la integración de materiales innovadores y la utilización de recursos pasivos de diseño bioclimático (19,2%), junto con la incorporación de Energías Renovables (15,4%) para alcanzar sus metas de ahorro energético y reducción del consumo.

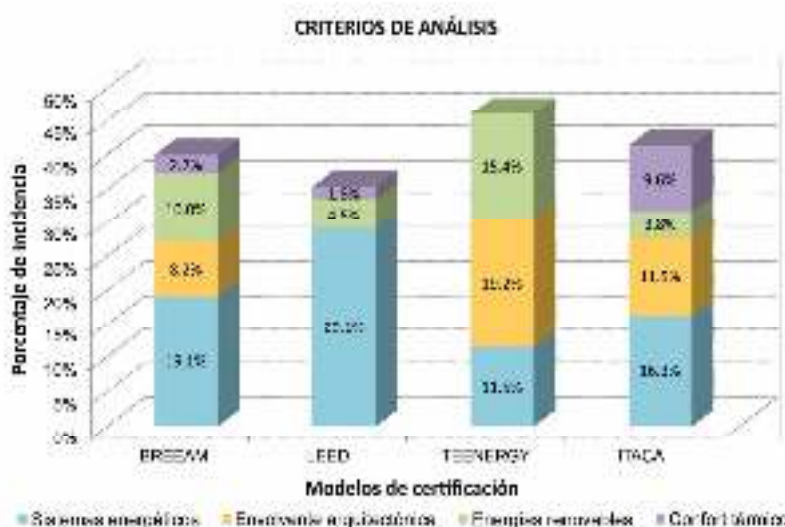


Figura 7: Incidencia de los criterios de análisis por modelo de certificación. Fuente: Elaboración propia.

## CRÉDITOS ESPECÍFICOS PARA ESCUELAS

Los MSC analizados en esta investigación, presentan dentro de sus estructuras de evaluación un cierto número de Créditos Específicos para Escuelas (CEE), que diferencian a dichos sistemas de otros elaborados para distintos usos, como podrían ser: residencial, industrial, edificios de oficinas o comerciales. A partir de la revisión llevada a cabo, es posible identificar los CEE que forman parte de cada modelo de certificación y compararlos según tres aspectos predominantes: educativo, social y funcional. El modelo TEENERGY, por ser una guía creada para aplicarse únicamente en escuelas, fue descartado, ya que todas las pautas que lo conforman están destinadas al uso escolar.

En la Tabla 3 se mencionan los CEE presentes en los tres modelos de certificación y se indica, para cada uno, a qué aspecto se orienta. Puede observarse que BREEAM tiene dos criterios, y que ambos responden al aspecto educativo, mientras que LEED posee solo uno, distinguido por propósito social. En cuanto a ITACA, son tres los CEE que integran el protocolo, dos de los cuales tienen una tendencia social y otro corresponde al aspecto funcional.

El aspecto educativo hace referencia a la utilización de la escuela como recurso de aprendizaje para demostrar conciencia ambiental. El edificio debe presentarse de manera que los usuarios puedan conocerlo, interpretarlo y aprender de él. Se busca fomentar la divulgación del proyecto, detalles del proceso constructivo, explicación de la función de aislaciones o tecnología innovadora de bajo impacto, exhibiciones con información del edificio donde se muestren las estrategias utilizadas para reducir el impacto ambiental.

El aspecto social tiene como objetivo lograr la integración entre escuela y comunidad, procura abrir el edificio al público y generar espacios accesibles para el uso compartido con la población local, como el auditorio, gimnasio y sus terrenos deportivos, para desarrollar actividades no relacionados con el centro educativo. Así mismo, considera como requerimiento para la alcanzar la sustentabilidad, el obtener un edificio inclusivo, que garantice el acceso a todas las personas, incluso aquellas con discapacidades motoras o sensoriales.

El aspecto funcional está referido a lograr eficiencia en las propiedades de cada espacio educativo, generando espacios adecuados a su función. Se tienen en cuenta los servicios auxiliares o accesorios que son ofrecidos en la oferta educativa de cada escuela. En ITACA, el crédito “calidad de sistema de cableado” (Tabla 3), busca garantizar la transmisión de datos dentro del edificio, instalando en las aulas cableado estructurado, adecuado para el funcionamiento de dispositivos de seguridad, confort ambiental y enseñanza.

Modelos de Certificación	Criterios Específicos de Escuelas	Aspecto Educativo	Aspecto Social	Aspecto Funcional
BREEAM	Publicación de información sobre el edificio	▪		
	Desarrollo como un recurso de aprendizaje	▪		
LEED	Uso conjunto de las instalaciones educativas		▪	
	Dotación de servicios			▪
ITACA	Calidad del sistema de cableado.			▪
	Diseño para todos		▪	

Tabla 3: Criterios específicos para escuelas. Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

Las escuelas desempeñan un papel decisivo al proporcionar entornos saludables y seguros para que los niños puedan desarrollar los procesos de aprendizaje. Estos espacios de características singulares, requieren ser accesibles, seguros y funcionales. No obstante, la escuela de hoy exige mayores desafíos. En el mismo entorno de aprendizaje las escuelas pueden educar sobre la importancia de la sustentabilidad ambiental y edilicia, el ahorro de energía y el cuidado del medio ambiente, permitiendo que el entorno construido se convierta en una herramienta de enseñanza interactiva.

Un edificio educativo efectivo y eficiente durante su post-ocupación, cuenta con usuarios que entienden el funcionamiento de los sistemas instalados, logrando que su participación prevenga de problemas de mantenimiento a largo plazo y del derroche de recursos no renovables. Las escuelas existentes que se acondicionan según pautas de sustentabilidad, contribuyen a disminuir los impactos ambientales, generando ahorro de recursos y disminución de la contaminación atmosférica mediante la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> durante su etapa de uso.



La Sociedad de Física Americana ha publicado que, si las medidas de eficiencia energética actuales y emergentes se emplean en edificios nuevos y en edificios existentes a medida que se reemplaza su calefacción, refrigeración, iluminación y otros equipos, la demanda de energía del sector de la construcción podría presentar una caída del aumento proyectado del 30% a cero hasta el año 2030 (American Physical Society, 2008).

En el presente trabajo, el estudio de los MCS de acuerdo a nuevos criterios de calificación, posibilita el análisis comparativo y permite identificar la valoración que cada uno de ellos otorga a las distintas acciones que contribuyen al mejoramiento de la eficiencia energética y al confort térmico en edificios escolares existentes. Se puede concluir que, para los cuatro modelos investigados, la incidencia relativa de la temática representa entre un 35% y un 46% de los créditos totales, siendo TEENERGY la herramienta que más se orienta a la evaluación térmico-energética de edificios escolares, seguida de ITACA y BREEAM, que exhiben un 41% y 40% respectivamente.

Los criterios analizados apoyan y se alinean con los ODS 2030, entre ellos: el objetivo 7, orientado a garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sustentable y moderna, y aumentar la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas. Y los objetivos 4 y 13, destacando la importancia de llevar a la práctica acciones tendientes a promover la educación sobre desarrollo sustentable y la mitigación del cambio climático.

Como cierre del trabajo se concluye que los modelos de certificación con trayectoria y reconocimiento internacional son un importante referente a considerar al momento de diseñar una herramienta local para la calificación energética y evaluación de la sustentabilidad de edificios escolares existentes.

## AGRADECIMIENTOS

La información presentada forma parte de la Tesis Doctoral de la Arq. Guillermina Ré, del Doctorado en Arquitectura, de la Universidad de Mendoza. Se agradece a la Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño Universidad Nacional de San Juan y a la Secretaria de Ciencia Tecnología e Innovación (SECITI) de la provincia de San Juan, por la contribución en el financiamiento de la investigación en el marco del PROJOVI 2018- 2019.

## REFERENCIAS

- American Physical Society. (2008). How America can look within to achieve energy security and reduce global warming. *Energy Future. Think Efficiency*, 01-112.
- Blengini, A. y Di Carlo, T. (2010). The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings. *Energy and Buildings* 42, 869-880. ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.12.009.
- BREEAM. (2012). BREEAM Education 2008. Code for a Sustainable Built Environment. United Kingdom, Hertfordshire, Watford: BRE Global Limited, Issue:4.1.
- BREEAM [en línea] Brandon Primary School. Dirección URL: <<https://www.breeam.com/case-studies/education/brandon-primary-school/>> [consulta: el 4 de marzo de 2019]
- Czajkowski, J., Gómez, A., Calisto Aguilar, M., Diulio, M., Basualdo, D., Reus Neto, G., Berardi, R., Camporeale, P., Giraldo, W., Fuentealba, M. y Coronel, A. (2017). Hacia un modelo de certificación de edificios sustentables adecuado al contexto regional. XXI Congreso Arquisur. Trabajo 17. UNSJ-FAUD, San Juan.
- Fissaggi Strutturali [en línea] Progetto Scuole gemelle di Acqui Terme - Alessandria. Blog Fischer. 2018. Dirección URL: <https://www.fissaggistrutturali.it/progetto-scuole-gemelle-di-acqui-terme-alessandria> [consulta: el 26 de marzo de 2019].
- Frade, Eric y Susumu Gomazako, Marcone (2016) Los modelos de las certificaciones sostenibles y las soluciones constructivas utilizadas en Brasil y España. *Construible*. Dirección URL: <https://www.construible.es/comunicaciones/modelos-certificaciones-sostenibles-soluciones-constructivas-utilizadas-brasil-espana> [consulta: el 14 de agosto de 2019].

- IHOBE. (2010). Green Building Rating System: ¿Cómo evaluar la sostenibilidad en la edificación? País Vasco, Departamento de Medio Ambiente, Ordenación del Territorio y Vivienda, Sociedad pública de gestión ambiental.
- ITACA. (2012). Protocollo ITACA Nazionale 2011. Edifici Scolastici. Istituto para la innovación y la transparencia de certificaciones de compatibilidad ambiental: Energía y Sostenibilidad Ambiental.
- Lazzari, F. y Romano, R. [en línea] Il Piano Strategico dell' Edilizia Scolastica Sostenibile della Provincia di Lucca. La ricognizione della qualità architettonica e la definizione degli interventi. Illustrazione di tre progetti in fase di realizzazione Servicio de Planificación Territorial y Movilidad. 2015.  
URL:[http://www.zemedes.eu/sites/default/files/11%20TEENERGY%20LUCCA\\_progetti\\_3\\_12\\_15.pdf](http://www.zemedes.eu/sites/default/files/11%20TEENERGY%20LUCCA_progetti_3_12_15.pdf) [consulta: el 19 de julio de 2019].
- LEED O+M Schools. (2018). LEED for building Operations and Maintenance: Schools. United States Green Building Council, Version 4.
- Nguyen, B. y Altan, H. (2011). Comparative review of five sustainable rating systems. International Conference on Green Buildings and Sustainable Cities. *Procedia Engineering* 21, 376-386. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2029
- Quesada Molina, Felipe (2014). Métodos de evaluación sostenible de la vivienda: Análisis comparativo de cinco métodos internacionales. *Revista Hábitat Sustentable*. V4, N1, pp. 56-67
- Rieznik Lamana, N. y Hernández Aja, A. (2005). Análisis del ciclo de vida. Biblioteca CF+S, Ciudades para un Futuro más Sostenible. España, Universidad Politécnica de Madrid.
- Romano, R., Giardinelli, M. y Di Zeno, A. (2012). Escuelas Teenergy. Arquitectura de alta eficiencia energética para edificios escolares secundarios en el área Mediterránea. Provincia de Lucca: Programa certificado por el fondo de desarrollo regional europeo.
- Srinivasan, R., Braham W., Campbell, D. y Curcija, C. (2011). Re (De) fining Net Zero Energy: Renewable Energy Balance in environmental building design. *Building and Environment* 47, 300-315. ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.07.010.
- SSPARCHITECTS [en línea] Architecture Project Details. NJ Schools Development Authority Neptune Midtown Community School. Dirección URL: <https://ssparchitects.com/projects/neptune-midtown-community-school> [consulta: el 29 de mayo de 2019]
- Trombadore, A., Winter Toshikazu, R. y Romano, R. (2011). Teenergy Schools: High Energy Efficiency in School Buildings in the Mediterranean Area. *Inter University Research Center Florence* 44, pp. 267-272.
- Zabalza, I., Aranda, A. y Scarpellini, S. (2009). Life cycle assessment in buildings: State of the art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. *Building and Environment* 44, 2510-2520. ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.05.001.

## **ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY CERTIFICATION FOR SCHOOL BUILDINGS IN USE STAGE. COMPARATIVE ANALYSIS OF FOUR INTERNATIONAL MODELS**

**ABSTRACT:** The objective of this work is to study certification models of environmental sustainability, recognized in the international sphere that consider the particularities of school buildings, as an independent typology. For each of them, their categories, indicators and scoring structures are reviewed. The criteria related to energy efficiency and thermal comfort are identified, and new groupings are formed according to the selected variables, which allow the comparative analysis between the systems. On the other hand, the specific credits for schools, which are usually related to educational, social or functional aspects, are indicated and commented. It is concluded that TEENERGY is more oriented to the thermal-energetic evaluation of school buildings with 46% of its credits involved in the subject, followed by ITACA and BREEAM, which exhibit 41% and 40% respectively.

**Keywords:** ranking systems, energy efficiency, thermal comfort, schools.

## **VALOR DEL SERVICIO: UNA ALTERNATIVA PARA LOS SISTEMAS DE COMERCIALIZACION DE ENERGIA EN GENERACIÓN DISTRIBUIDA**

**Claudio Reineri, Fabián Romero, Edgardo Florena y Hernán Rovere**

Instituto de Protecciones de Sistemas Eléctricos de Potencia, Facultad de Ingeniería, Universidad  
Nacional de Río Cuarto, Ruta N 36, Km 601, Río Cuarto, Córdoba, ARGENTINA  
Tel. +54 0358-4676171, e-mail: [creineri@ing.unrc.edu.ar](mailto:creineri@ing.unrc.edu.ar)

*Recibido 13/08/19, aceptado 21/10/19*

**RESUMEN:** Se describen los esquemas tradicionales de comercialización de energía empleados en los sistemas de Generación Distribuida. Seguidamente se plantean los inconvenientes y las distorsiones que se producen cuando estos esquemas se aplican superpuestos con los sistemas clásicos de tarifas. A partir de ellos se presenta conceptualmente el método del *Valor del Servicio* mediante el cual es posible evitar aquellas distorsiones asignando una valoración que resulta económicamente neutra en la asignación de los costos de distribución para todos los usuarios (Usuarios Generadores y no adoptantes) y una tarifa más justa que no penaliza económicamente al Usuario Generador ni le permite un uso gratuito del sistema eléctrico. El *Valor Solar* de una unidad de energía generada por un sistema fotovoltaico de Generación Distribuida es determinado a partir de los datos operativos históricos del sistema eléctrico de la provincia de Córdoba.

**Palabras clave:** Generación Distribuida, Balance Neto de Energía, Balance Neto de Facturación, Valor del Servicio

### **INTRODUCCIÓN**

Los sistemas energéticos han estado, y seguirán estando por mucho tiempo más, basados en los combustibles fósiles. Por tratarse de recursos naturales agotables constituye la primera gran limitación de su disponibilidad futura. Por otro lado, la combustión de los mismos constituye una de las principales razones del Calentamiento Global resultando por ende un serio obstáculo para los objetivos de un Desarrollo Sustentable.

Tal situación ha iniciado un proceso irreversible de transición desde las fuentes fósiles hacia las fuentes primarias renovables en los distintos sectores energéticos. Particularmente en el eléctrico esto se está manifestando a través de dos métodos:

- La contratación de grandes bloques de generación (típicamente parques eólicos o solares) los cuales operan en el sistema de manera similar a las clásicas centrales térmicas, nucleares o hidráulicas.
- Los sistemas de Generación Distribuida (GD) con fuentes primarias de origen renovables que se encuentran acoplados al sistema en los puntos eléctricos próximos a la demanda (a nivel de las redes de distribución) resultando en un sistema atípico respecto de las cuestiones operativas y comerciales clásicas de los Sistemas Eléctricos.

Si bien esta última opción puede no representar cuantitativamente un aporte mayoritario a la descarbonización de los sistemas de generación de energía eléctrica su implementación presenta una serie de ventajas desde distintas perspectivas:

Operativas:

- La aproximación eléctrica entre la generación y el consumo disminuye las pérdidas en las redes de transmisión y distribución,
- Posibilidades adicionales en la regulación de tensión sobre el usuario final,

- Control más próximo o local del factor de potencia,
- Mejora de Calidad y Confiabilidad del servicio.

#### Económicas:

- Aparición de nuevos oferentes de energía, democratizando y diversificando la oferta por tamaño y tipo de fuente,
- Postergación de inversiones tanto en el sector de generación como en el de la infraestructura de transporte y distribución,
- Desarrollo de nuevas tecnologías e innovación, generando no solo desarrollos tecnológicos sino también nuevas fuentes de trabajo directas e indirectas,
- Sustitución de importación de energías (como combustibles fósiles u otras formas de energía),
- En el largo plazo podría reducir los costos de la EE.

#### Ambientales y sociales:

- Reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI),
- Compromiso social en la protección ambiental,
- Conciencia social sobre ahorro y uso eficiente de la energía eléctrica

#### *Generación Distribuida y esquemas de transacción de la energía eléctrica*

Un factor determinante en las políticas de desarrollo y la sustentabilidad de los sistemas de GD es el esquema que se implementa para la comercialización de la energía generada o inyectada a la red por el usuario que ha adoptado la condición de Generador Distribuido. Esencialmente es posible distinguir dos grandes métodos para esta situación: Balance Neto de Energía o Balance Neto de Facturación. (Dufo & Bernal, 2015)

*Balance Neto de Energía (BNE):* Su implementación requiere cuantificar la Energía Consumida (EC) y la Energía Generada (EG) por el usuario (la que consume independientemente de la que genera). Su implementación requiere cuantificar ambas energías, lo que puede lograrse:

- Con dos medidores unidireccionales, uno para EC y otro para EG, o
- Un medidor bidireccional dispuesto de manera de cuantificar el flujo neto de energía; este medidor integra la diferencia instantánea entre el consumo y la generación entregando un número que será positivo o negativo según los valores de EC y EG (flujo neto resultante durante el período de medición a favor del Usuario o a favor de la Distribuidora).

A partir de lo anterior se pueden dar las siguientes situaciones:

- EC es mayor que EG. Entonces el UG paga a la Distribuidora una cantidad de energía, (EC-EG), a la tarifa correspondiente por consumo de energía.
- EG es mayor que EC. En esta situación puede suceder que:
  - ✓ El Usuario no reciba ninguna compensación,
  - ✓ El Usuario recibe una compensación por (EG-EC) a un precio menor, igual o mayor que a su tarifa correspondiente por consumo de energía,
  - ✓ El Usuario recibe un crédito a su favor en términos de energía, (EG-EC), que lo puede usar para reducir futuras facturas.

*Balance Neto de Facturación (BNF):* Este esquema admite un único sistema de medición basado en un medidor bidireccional con capacidad para acumular los valores “positivos” y “negativos” del flujo de energía, permitiendo de esta manera cuantificar dos magnitudes:

- Energía Efectivamente Inyectada (EEI)
- Energía Efectivamente Demandada (EED)

A los fines de la facturación, se plantean las siguientes alternativas:

- ✓ Ambos montos de energía (EEI y EED) tienen un mismo valor a los fines de la facturación,
- ✓ EED está tarifada a un valor menor, igual o mayor que la EEI,
- ✓ Admitiría la posibilidad que el usuario quedase con un crédito monetario a su favor que lo puede usar para reducir futuras facturas.

Se acaban de describir las metodologías básicas de transacción de energía que han dominado los sistemas de GD en su corta historia. De todas maneras, la aplicación de las mismas admite, entre otras, las siguientes variantes principales:

- ✓ BNE o BNF aplicados tal cual se han descrito,
- ✓ Combinación de ambos métodos,
- ✓ BNE o BNF, o una combinación de ambos, complementados con sistemas de incentivos a EG o a EEI (Sistemas Feed-in Tariffs – FIT).

#### *Sistemas tarifarios para la Distribución de energía eléctrica*

En general los sistemas de tarifas de los servicios públicos siguen el modelo tradicional de costo del servicio (agua, electricidad, gas). Tales esquemas tienden a basarse en los siguientes principios (ADEERA 2000):

- Proporcionar a las empresas ingresos adecuados y estables.
- Ser estable, predecible y de fácil comprensión para los usuarios.
- Reflejar una asignación justa de los costos para sector o segmento de usuarios.
- Desalentar el derroche del servicio.
- No introducir artificial o inadvertidamente mecanismos distorsivos en la asignación de costos (subsidios cruzados).
- Promover la eficiencia y la innovación.
- Reflejar los costos privados y sociales, presentes y futuros.

Su implementación está centrada en una estimación de los requerimientos de ingresos de la empresa encargada del servicio asignando costos a los distintos sectores o segmentos de usuarios. Los sistemas de facturación de electricidad (como los de otros servicios públicos) tienen dos componentes: un cargo fijo y otro variable basado en el consumo de energía. En una factura típica el componente variable tenderá a ser el dominante.

Lo que se acaba de describir resulta contradictorio con la estructura de costos de la Distribuidora, básicamente por dos razones:

- Los costos de la energía eléctrica (en el Mercado Mayorista) resultan variables en el tiempo (horas del día, estación del año, etc.) y los sistemas tarifarios asignan un cargo fijo en pesos por unidad de energía (\$/kWh) vendida.
- Cuando la distribuidora asigna sus costos gran parte de ellos se encuentran en los costos fijos que representan la construcción y el mantenimiento de las instalaciones para garantizarle al usuario la disponibilidad del servicio.

Que la componente dominante de la factura que recibe el usuario sea el cargo variable correspondiente al consumo de energía, contrariando la estructura de costos propia de la Distribuidora, no es un error de procedimientos ni de cálculos. Se trata de la herramienta más eficaz que se dispone para contemplar algunos de los principios enunciados en el diseño de tarifas de servicios públicos: desalentar el derroche y reflejar los costos privados y sociales, presentes y futuros.

#### *El conflicto entre los sistemas tarifarios y los sistemas de transacción empleados en GD*

Se supone que un usuario asume la condición de Usuario-Generador (UG) y que su instalación generará por mes una cantidad de energía igual a la que consume ( $EG - EC = 0$ ). Para que el ejemplo resulte más amplio se supondrá también que la instalación del UG generará energía en el mismo momento que la consume ( $EEI - EED = 0$ ). Tal condición representa una situación donde la facturación por BNE o BNF resulta en un mismo monto: el cargo fijo. También es cierto que la Distribuidora ahora no deberá comprar tal monto de energía en el Mercado Mayorista. Sin embargo en tal caso la Distribuidora tendrá un déficit en sus ingresos: el necesario para cubrir sus costos fijos más los beneficios esperados por el abastecimiento de tal Usuario. Bajo este esquema de tarifación, la única alternativa para la sustentabilidad económica de la Distribuidora, es solicitar un incremento tarifario general que le permita recuperar el déficit originado. Tal incremento tarifario recaerá sobre los UG y los usuarios que no adoptaron tal condición. O sea, tal déficit deberá recuperarse con un incremento

general de las tarifas, tanto para los UG como para los no adoptantes, a pesar de que quienes originaron tal situación fueron los UG.

Tal situación entra en contradicción con otro de los principios fundamentales que debe contemplar el sistema de tarifas: “No introducir artificial o inadvertidamente mecanismos distorsivos en la asignación de costos”. Particularmente en el caso argentino, el inciso e del art. 42 de la Ley 24065 establece: “En ningún caso los costos atribuibles al servicio prestado a un usuario o categoría de usuarios podrán ser recuperados mediante tarifas cobradas a otros usuarios”.

Una alternativa lógica frente a esta situación pareciera ser un sistema tarifario que refleje en la facturación la estructura de costos de la Distribuidora, al menos de una manera más aproximada, como la suma de sus dos componentes:

- Un cargo variable por energía igual al costo de adquisición de la energía en el Mercado, y,
- Un cargo fijo correspondiente a los “costos fijos” de las instalaciones más lo beneficios.

Sin embargo este criterio implica, entre otras cosas, que los Usuarios con relativamente bajos consumos paguen un precio unitario por cada kWh considerablemente mayor que quien tenga demandas relativamente altas, y, de la misma manera, la incidencia en la facturación de los mayores consumos deja de ser sensible. Esto significa entrar en contradicción con otro de los principios de los sistemas tarifarios, más aun cuando se trata de un servicio cuya fuente primaria sean Recursos Naturales mayoritariamente no renovables: “Desalentar el derroche del servicio”.

## VALOR DEL SERVICIO

La situación que se acaba de plantear ha llevado a que en varios países y desde hace algunos años se haya iniciado un proceso de rediseño de los esquemas de facturación para GD. Uno de ellos, y que ha resultado muy atractivo, es el denominado “Valor del Servicio”. En este esquema el UG compra toda la energía que consume y vende toda la energía que genera. La energía se compra al valor que determina la tarifa bajo la concepción clásica de los sistemas de tarifación. La determinación del valor al cual el UG vende la energía generada se basa en los costos y los beneficios que tal energía representa para la Distribuidora y/o para el Sistema Eléctrico en general.

### *Costos y Beneficios de la GD*

Tal como se acaba de afirmar, un aspecto central en la aplicación de este esquema es identificar, y cuando sea posible cuantificar, los efectos en términos de costos y beneficios que la GD representa para las empresas distribuidoras y para los sistemas de transmisión y de generación de un sistema eléctrico. (Denholm et al. 2014) (Zummo, 2015)

De manera general, y para una primera presentación aproximada, los beneficios de la GD son los siguientes:

- *Producción de energía evitada*: La energía ingresada a la red por un GD indefectiblemente desplazará a la energía generada por alguna central térmica que se encontraría consumiendo algún tipo de combustible. Los generadores se despachan en orden de costo variable para cumplir con la carga al costo más bajo. El despacho considera varios parámetros y restricciones tales como: costo del combustible, eficiencia de la planta de energía en función de la producción de la planta, disponibilidad de la planta, tiempos de arranque, etc. El efecto neto de la GD, en principio, es el de desplazar a los generadores de mayor costo variable. En este caso el beneficio es claramente identificable y cuantificable con un alto grado de aproximación ya que se trata de una conversión en términos de Kilocalorías que se “evitaron fuesen quemadas” y la conversión monetaria a partir del costo del combustible que corresponda.
- *Perdidas evitadas en Transmisión y Distribución*: La producción de energía en el punto de consumo, o muy próximo a él, evita las pérdidas técnicas ocasionadas en transmisión y distribución. Esto agrega un valor, cuantificable con buen grado de precisión, al kWh generado por el GD.
- *Reducción en la capacidad de generación*: Un componente significativo del costo de la energía puesta en disponibilidad en el mercado (sistema de generación) es atribuible a los

cargos fijos o costos asociados a la construcción, disponibilidad y construcción de plantas de generación. Evidentemente la GD tendrá un impacto económico en el reemplazo o diferimiento de inversiones de capital en el parque de generación. Se tratará entonces de calcular la fracción real de la capacidad de un sistema de GD que podría usarse de manera confiable para compensar la capacidad convencional.

- *Reducción en la capacidad de transmisión:* Las instalaciones GD pueden afectar tanto la congestión como la confiabilidad en el sistema de transmisión. Como la GD generalmente alivia el suministro de parte o toda la carga en una ubicación particular a través de la red de transmisión, la GD puede reducir efectivamente la necesidad de capacidad adicional de transmisión.
- *Reducción en la capacidad de distribución:* Conceptualmente se trata de la misma situación del apartado anterior pero que por cuestiones de operadores diferentes (por ejemplo, redes de transmisión y redes de distribución) o por asignaciones de costos diferentes por sectores son separados.

#### *Costos de integración de la GD*

Un aspecto central de la operación de un sistema eléctrico es el equilibrio entre la generación y el consumo en cada instante de tiempo. La integración de los recursos renovables intermitentes como parte de la matriz de generación, que además deben ser despachados cuando están disponibles, requiere que se encuentren disponibles otros recursos para hacerse cargo de tal déficit. Tal disponibilidad evidentemente significa un costo para el sistema.

Otro ejemplo en el mismo sentido es el impacto sobre las pérdidas eléctricas en las redes de transmisión y distribución. Cuando el estado de penetración de la GD es incipiente es obvia su incidencia positiva ya que la energía generada es consumida en el mismo punto de la red o en su entorno muy próximo. Sin embargo, cuando el nivel de penetración se incrementa su efecto en la reducción de las pérdidas puede verse disminuido debido a la inversión de los flujos de carga. Un efecto asociado a este último hecho, y que también podría constituir un costo, es la aparición de sobretensiones permanentes o la alteración de los esquemas de coordinación de las protecciones; esto podría requerir la incorporación de nuevos equipos o el reemplazo de otros.

En principio la asignación de “costos” atribuibles a la GD en sus estados iniciales de desarrollo resultan insignificantes y puede relegarse solamente a los costos de su “gestión y administración”.

### **VALOR SOLAR: UNA APROXIMACIÓN PARA SU APLICACIÓN EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA**

La tecnología que domina el mercado de la GD a nivel global es la fotovoltaica. Es de esperar que, en Argentina, al menos en la zona centro y norte del país, este fenómeno se reproduzca. Cuando el concepto del Valor de Servicio tal cual se ha planteado es aplicado a la tecnología fotovoltaica al mismo suele denominárselo como “Valor Solar”. (Norrism et al. 2014)

En lo que sigue se describe un procedimiento, y posteriormente se aplica, para una primera aproximación al Valor Solar a aplicar en un sistema de GD en la provincia de Córdoba. Este valor se plantea en una base \$/kWh, a partir de información operativa del sistema eléctrico del año 2017, incluyendo los beneficios según los siguientes tres ítems: (Convenio 2018)

- Producción de energía evitada
- Pérdidas de energía evitadas en transmisión y distribución
- Reducción en la capacidad de generación, transmisión y distribución

#### *Información y supuestos para el estudio*

En términos generales, tal implementación requiere de información muy diversa: datos técnicos operativos del sistema de generación (operado en Argentina por CAMMESA), información propia de la demanda general de la Provincia de Córdoba, datos de radiación o de la producción estimada “media” de un sistema fotovoltaico tipo en la provincia de Córdoba, etc.. A continuación se detallará el tipo de información al que se ha recurrido y que se empleará en el transcurso del trabajo. En muchos



casos la base de información es certera y completa (por ejemplo, la proveniente de CAMMESA), en otros se hace necesario recurrir a estimaciones (por ejemplo, la producción fotovoltaica) y en otros se recurre a suposiciones en base a antecedentes en estudios previos (por ejemplo, costos medios de ampliación en generación, transmisión o distribución, \$/kWh). De todas maneras en todos los casos es posible a futuro implementar sistemas y metodologías que permitan ir depurando y refinando la información de base como así también los aspectos metodológicos.

*Producción Fotovoltaica:* La aproximación que aquí se presenta requiere de una estimación por hora de producción anual de un sistema fotovoltaico típico (o medio) de, por ejemplo, 1kWp instalado. Para estimar tal producción anual, se procedió a evaluar la influencia de distintas posiciones relativas de los paneles en una instalación de 1kWp en la ciudad de Córdoba. Para ello se empleó el software on-line de SMA (<https://www.sma.de>).

Por otro lado, resulta necesaria una estimación por hora de radiación solar “media” para la provincia de Córdoba. Para ello se recurrió a la información suministrada por el Ministerio de Agricultura y Ganadería del Gobierno de la Provincia de Córdoba (<https://magya.omixom.com/>). A partir de tal información se procedió a generar un valor promediado de radiación a partir de 3 estaciones meteorológicas: Río Cuarto, Villa María (Universidad Nacional de Villa María) y 60 Cuadras (en proximidad de la ciudad de Córdoba). El valor así obtenido observa un alto grado de coincidencia con el valor publicado en “Mapa de Energía Solar Colectada Anualmente por un plano Inclinado”, ([http://www.cab.cnea.gov.ar/ieds/images/2011/hyfusen\\_2011/trabajos/11-161.pdf](http://www.cab.cnea.gov.ar/ieds/images/2011/hyfusen_2011/trabajos/11-161.pdf)). Este valor se encuentra entre 1,8 y 1,85 MWh/m<sup>2</sup> por año. Tales datos de radiación no han sido empleados como valores absolutos de radiación (ya que se desconoce el estado de calibración de los equipos). Los mismos han servido como información de la evolución por horas de la radiación solar que permiten que una instalación de 1kWp instalado produzca 1.550 kWh en un año.

*Sistema de Generación:* Si bien el tema se describirá posteriormente con detalle es posible intuir en este momento que para estimar la Producción de energía evitada resulta indispensable contar con información sobre el sistema de generación al cual está acoplado el sistema que se estudia. El sistema eléctrico provincial adquiere la energía en el MEM para su posterior distribución. En ese sentido se ha contado con información suministrada por CAMMESA respecto de la composición por horas del sistema de generación en el SADI, incluyendo también los precios marginales operados como la máquina a la cual se encuentra asociado. Estos datos se complementan con los informes mensuales de CAMMESA.

*Sistema de Transmisión y Distribución:* Es necesario contar también con información respecto del proceso de transmisión y distribución de la energía. Carga en una base por hora, pérdidas técnicas y costos de ampliaciones medias (\$/MVA).

#### *Producción de energía evitada*

La cuantificación del beneficio por energía evitada se basa en la generación desplazada cuando se suministra energía procedente del sistema de GD. Los generadores se despachan en orden de costo variable (de menor a mayor) para cumplir con la carga al costo más bajo. Eventualmente el despacho podría responder a otras cuestiones técnicas operativas pero para lo que aquí interesa esta alternativa no es considerada. El despacho considera muchos parámetros y restricciones, incluido el costo del combustible, la eficiencia de la planta de energía en función de la producción de la planta, la disponibilidad de la planta, los tiempos de arranque de la central eléctrica, las tasas de incremento de potencia, etc.

En la Figura 1 se muestra, sobre el mismo gráfico, en la escala de la izquierda la demanda total de la Provincia de Córdoba y en la escala de la derecha la producción de energía de un sistema fotovoltaico de 1kWp.

El procedimiento general para asignarle un valor monetario al kWh generado por la generación fotovoltaica distribuida es el que sigue:

Paso 1: Se sigue la información secuencial por horas de generación fotovoltaica estimada bajo los supuestos anteriores y se detecta la hora en la cual existe generación.

Paso 2: Se localiza para ese intervalo la máquina que determina el costo marginal.

Paso 3: Se identifica el combustible y el consumo específico (KCal/kWh) de tal máquina en ese período.

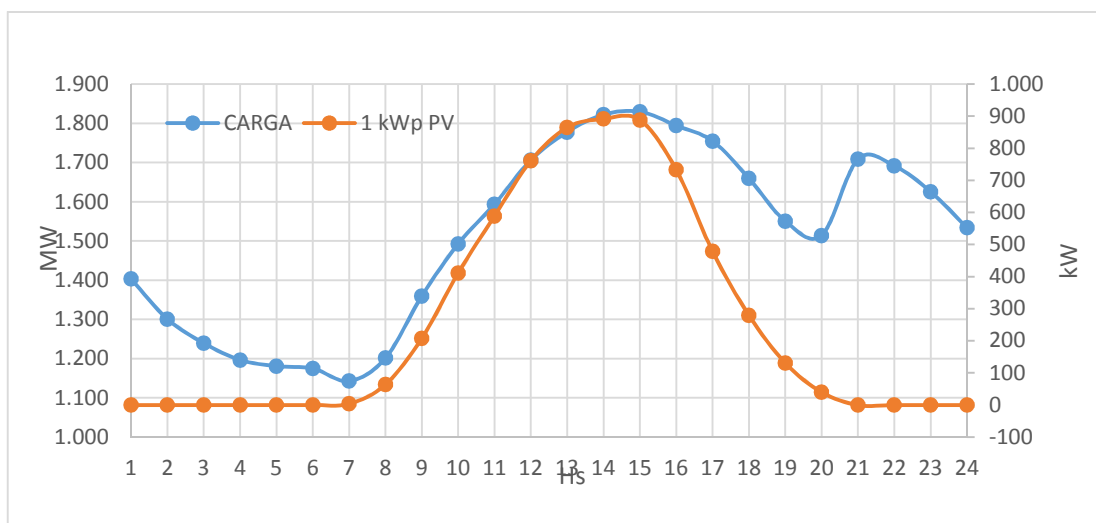


Figura 1 : Carga Córdoba y producción Fotovoltaica de 1kWp para el día 23/07/2017

Paso 4: El consumo específico es convertido en costo específico (\$/kWh) empleando el costo del combustible asumido por CAMESA en la última programación estacional.

Paso 5: Se asigna a la energía fotovoltaica generada en esa hora un valor total en función del valor monetario determinado en el paso anterior.

La secuencia se repite para cada hora en la que existe generación fotovoltaica.

#### *Pérdidas de energía evitadas en transmisión y distribución*

Un procedimiento elemental para asignarle un valor económico a tales pérdidas evitadas surge naturalmente: cuantificar en primer lugar la magnitud de la energía que no se perdió debido a la GD y posteriormente valorarla económicamente en un procedimiento como al que se ha recurrido en el apartado anterior.

Las empresas de T&D, en general, disponen de información respecto de sus pérdidas en términos de valores medios; típicamente en término de valores medios sobre su energía gestionada, transmitida o entregada al consumidor final. Esta cuantificación, si bien podría ser una primera aproximación, no representa conceptualmente el objetivo que se persigue. Tales pérdidas son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga y por lo tanto no pueden ser consideradas “constantes” durante un lapso de tiempo donde la carga es variable y también la incidencia de la GD en su efecto de reducir las. En general las empresas de T&D suelen disponer de estimaciones precisas de las pérdidas técnicas a partir de los modelados de sus redes y de los modelos dinámicos de potencias demandadas e ingresadas a los sistemas de transmisión. Tal información puede resultar importante para una aproximación más precisa.

En esta instancia es posible basar esta estimación a partir de dos suposiciones. Una de ellas es asumir un nivel de “pérdidas medias” en las redes de T&D de un determinado porcentaje de la energía gestionada por la red. Un valor típico en este sentido se encuentra entre el 7 y el 10% de la energía entregada (en base a los sistemas de facturación) a los usuarios finales. Tal valor surge de la diferencia entre el monto de energía considerado en el punto anterior y la “ingresada” a la red de transmisión durante, por ejemplo, un año. Otra información relevante es una curva de carga típica (potencia activa o aparente, ya que podría asumirse inicialmente un factor de potencia constante) por horas para ese mismo período de tiempo. Si se asume que la variación temporal de las pérdidas es proporcional al cuadrado de la demanda de potencia, entonces sería posible estimar tal constante de proporcionalidad para que las pérdidas en cada hora anualizadas resulten en el valor de “pérdidas medias” asumidas. Si

luego se reconstruye una nueva curva de demanda sustrayendo a la demanda original el efecto de la GD (para 1kWp instalado) y se recalculan las pérdidas empleando la misma constante de proporcionalidad anterior es posible estimar las “nuevas pérdidas” anualizadas. Las pérdidas evitadas (energía) resultan de la diferencia de los cálculos anteriores. Tal monto de energía se cuantifica económicamente en términos de “energía evitada” bajo el mismo procedimiento que en el título anterior.

#### *Reducción en la capacidad de generación, transmisión y distribución*

Se procura cuantificar el impacto de una fuente de generación no despachable (en este caso Fotovoltaica) en cuanto a su “capacidad de asumir carga” y/o de “descargar” los sistemas de Transmisión y Distribución y asignarle un valor económico.

Mediante la Figura 2 se pretende evidenciar el efecto que tendría la presencia de instalaciones de GD PV de 20 y 100 MWp respectivamente. En tal caso la representación “Demanda Normal” es la efectivamente registrada y las dos restantes surgen de sustraerle a esta el impacto de la GD atribuible a sistemas PV.

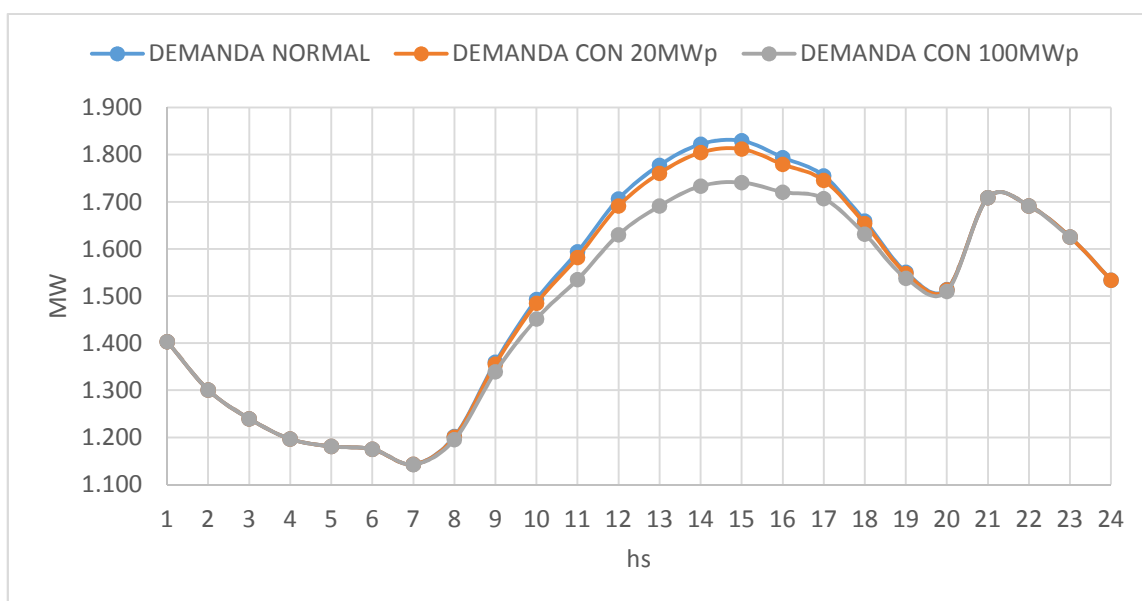


Figura 2: Efecto de la producción Fotovoltaica sobre la curva de carga (23/02/2017)

El fenómeno que se está explicando puede mostrarse más explícitamente a través de la representación gráfica de la carga acumulativa que es la metodología base empleada en estudios de planificación o previsión de demanda. La Figura 3 muestra la curva de carga original de la Provincia de Córdoba (año 2017). La curva denominada “CARGA ORIGINAL” es la carga real acumulada para el año 2017 de la provincia de Córdoba. “CARGA - 100MW” representa la manera en que se modificaría la curva original si se incorporase “internamente” al sistema un Generador cuyo aporte fuese de 100MW durante todas las horas del año. “CARGA - 100MW PV” representa la manera en que se modificaría la curva original si se incorporasen 100MWp PV como GD. En la Figura 4 se ha concentrado la atención en las 100 hs de mayor carga procurando evidencia lo que se explica. De la observación de la misma se puede decir que los 100MWp PV podrían “hacerse cargo” de unos 80MW de la demanda máxima del sistema (o el 80% del que se podría hacer cargo una planta de generación convencional, por ejemplo, un ciclo combinado de 100MW). Sin embargo tal conclusión está basada exclusivamente en el comportamiento de las variables de carga y generación PV del año 2017. Esto puede observarse en la Figura 3 para las 100 hs de mayor carga.

*Capacidad Efectiva de Carga (ELCC - Effective Load-Carrying Capacity):* A los fines de aplicar estos conceptos para la determinación de la Reducción en la Capacidad de Generación, Transmisión y Distribución una alternativa es emplear la definición del ELCC de un generador. El ELCC se define como la cantidad en que la carga del sistema puede aumentar (cuando un generador se agrega al

sistema) mientras se mantiene la misma confiabilidad del sistema medida por la Probabilidad de Pérdida de Carga (LOLP: Loss Of Load Probability) y la Esperanza de Pérdida de Carga (LOLE: Loss of Load Expectation). (PEREZ 2014)

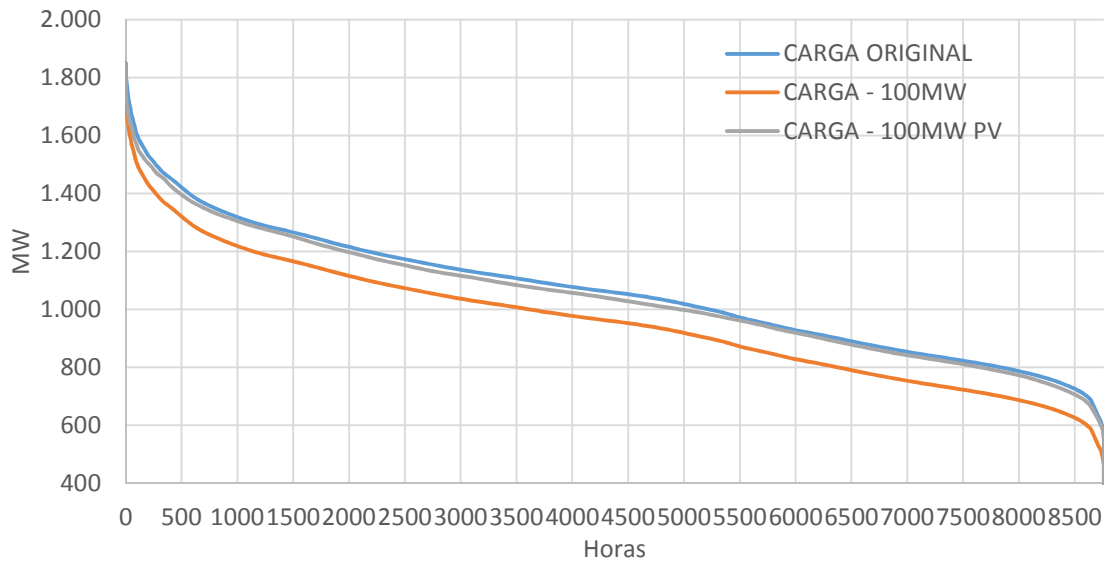


Figura 3: Carga acumulativa original (año 2017) y modificada por la incorporación de una central de 100MW “despachable” o por un Sistema Fotovoltaico de 100MWp

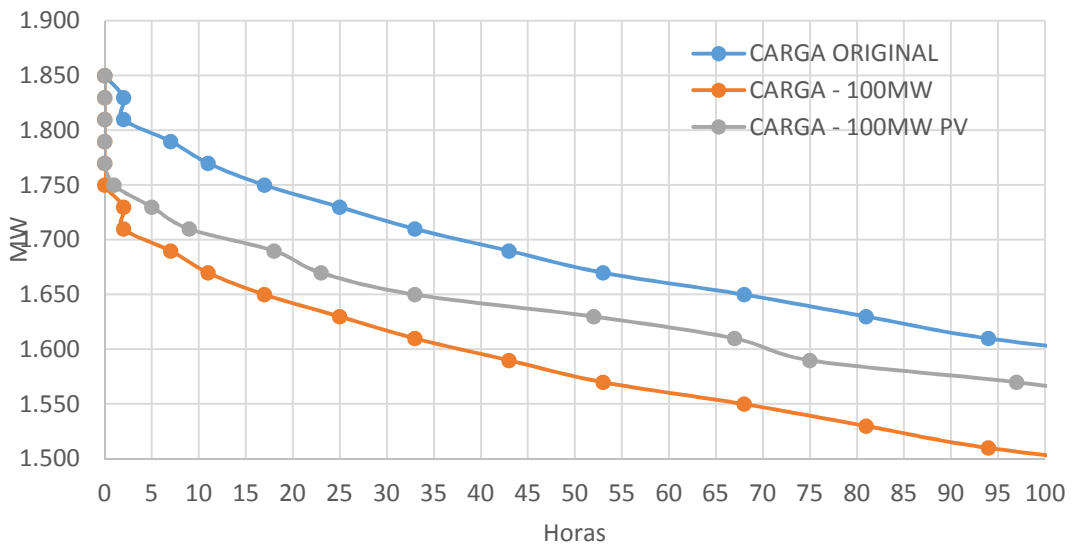


Figura 4: Idem Figura 3 sobre las 100 horas de mayor carga

En la Figura 5 se muestra el efecto de un Generador sobre una curva de confiabilidad de un sistema. Se observa la curva de confiabilidad original y también la modificada al incorporar un generador “G” de 500 MW. Se plantea una LOLE objetivo de 1 día cada 10 años (0,1 días/año). O sea, el sistema está planificado para “abastecer una carga” de 8.500 MW con una LOLE de 0,1 día/año. La incorporación de un Generador de “G” MW permite incrementar la carga en “G” MW manteniendo la LOLE objetivo. Como complemento de la conclusión también se puede decir que con esta nueva incorporación, si la carga se mantiene constante, entonces la LOLE puede reducirse a 0,09 día/año.

La aproximación para determinar el ELCC de un sistema fotovoltaico es encontrar un generador con una potencia constante de ELCC de modo que el LOLP del sistema sea el mismo que para el sistema con la planta fotovoltaica.

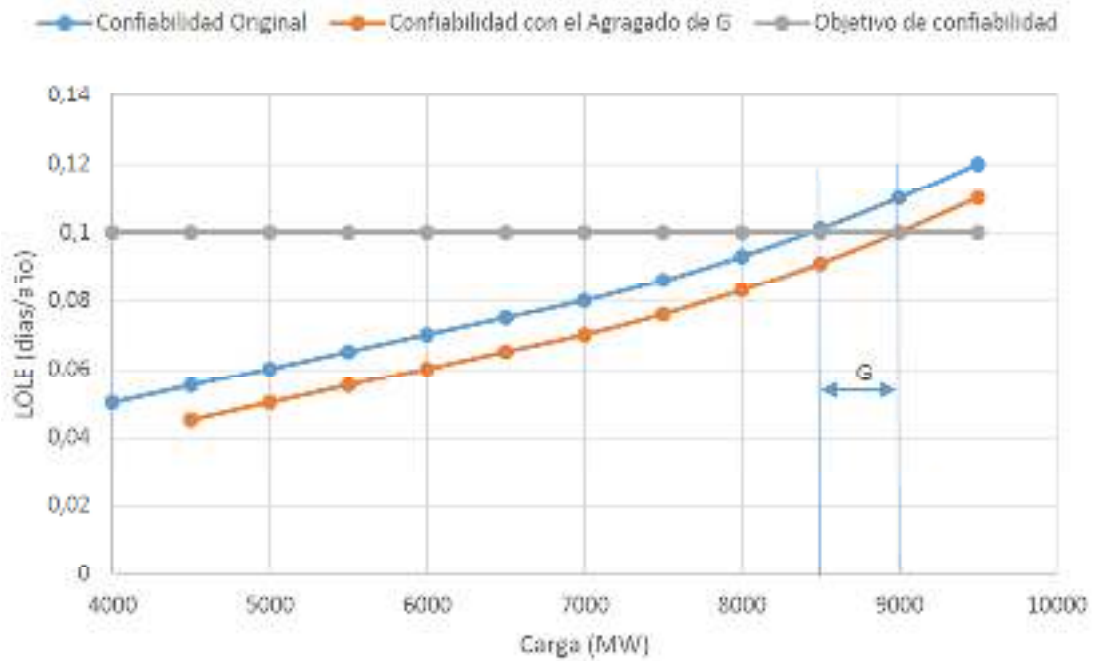


Figura 5: Efecto de un Generador sobre la curva de confiabilidad

El LOLP cuando se incorpora el sistema fotovoltaico será:

$$LOLP_{PV} \approx \left[ \frac{LOLP_{pico}}{8760} \right] \sum_{hora=1}^{8760} \exp \left[ - \frac{(pico\ de\ carga - (carga_{hora} - Salida\ PV_{hora}))}{m} \right] \quad (1)$$

El LOLP cuando se incorpora un generador con una potencia fija de ELCC será:

$$LOLP_{ELCC} \approx \left[ \frac{LOLP_{pico}}{8760} \right] \sum_{hora=1}^{8760} \exp \left[ - \frac{(pico\ de\ carga - (carga_{hora} - ELCC))}{m} \right] \quad (2)$$

La Capacidad Constante Equivalente que provee el sistema fotovoltaico al sistema ocurre cuando ambas ecuaciones son iguales tal que el  $LOLP_{PV}$  es igual al  $LOLP_{ELCC}$ . Esto es:

$$ELCC = m \cdot \ln \left\{ \frac{\sum_{hora=1}^{8760} \exp \left[ - \frac{pico\ de\ carga - carga_{hora}}{m} \right]}{\sum_{hora=1}^{8760} \exp \left[ - \frac{pico\ de\ carga - carga_{hora} + PV_{hora}}{m} \right]} \right\} \quad (3)$$

Para completar este cálculo solo resta disponer de los costos propios de expansión para cada uno de los sectores en cuestión: Generación, Transmisión y Distribución. Esta información se encuentra típicamente expresado como \$/kW o \$/kVA. Para avanzar con la aproximación se adoptaron los mismos valores propuestos en (Norrism et al. 2014).

## RESULTADOS

A partir de la información operativa del año 2017, recurriendo a los precios de los combustibles previstos en la Reprogramación Estacional Provisoria Agosto-Octubre 2019 de CAMMESA mostrados en la Tabla 1 y con un tipo de cambio de 46 \$/US\$ se obtiene el Valor Solar mostrado en la Tabla 2.

	U\$\$/MMBTU
Gasoil	14,7
Fuel Oil	11,1
Carbón Mineral	6,8
Gas Natural	4,3

*Tabla 1: Precios de los combustibles según Reprogramación Estacional Provisoria Agosto-Octubre 2019 de CAMMESA*

	\$/kWh
Combustible Evitado	3,42
Combustible Evitado por Pérdidas Evitadas	0,55
Costos Capacidad de Generación Evitada	0,97
Costos Capacidad de Generación Evitada	0,52
Costos Capacidad de Generación Evitada	0,19
TOTAL	5,65

*Tabla 2: Componentes del Valor Solar resultante*

Resulta razonable comparar este valor con:

- El Costo Total MEM previsto en la Reprogramación Trimestral antes citada: 3,62 \$/kWh.
- El Precio Estabilizado de la Energía (PEE) para la demanda General Distribuidor Residencial considerado en la Resolución 14/2019 de la Secretaria de Recursos Renovables y Mercado Eléctrico del Ministerio de Hacienda: 1,85, 1,76 y 1,67 \$/kWh para horario pico, Resto y Valle respectivamente para el periodo agosto-octubre de 2019. Estos valores son la referencia prevista por la ley 27.424 como precio de reconocimiento hacia el Usuario Generador de la Energía Efectivamente Inyectada.

## CONCLUSIONES

Se han presentado las metodologías clásicas empleadas en la transacción de energías en los sistemas de GD.

Se han planteado los problemas que generan estos esquemas de transacción cuando se implementan conjuntamente con los sistemas clásicos de tarifas eléctricas.

Se ha presentado un concepto metodológico, de incipiente desarrollo en otros países, denominado “Valor del Servicio” que pretende evitar tales distorsiones y cuyas principales características son:

- El UG “compra” toda la energía que su instalación demanda y “vende” toda la que genera.
- El valor económico que se le reconoce por la energía generada es determinado por una evaluación de los beneficios y los costos que tal generación representa para el sistema eléctrico en general.
- Tal valoración resulta económicamente neutra en la asignación de costos de distribución para todos los usuarios (UG y no adoptantes)
- Resulta una tarifa más justa y precisa que no penaliza económicamente al UG ni le permite un “uso gratuito” del sistema eléctrico.

El método para la determinación del “Valor del Servicio” ha sido implementado en base a datos operativos del MEM y de la demanda de la provincia de Córdoba de un año.

En Argentina, la Ley 27.424 (Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable Integrada a la Red Eléctrica Pública) y su correspondiente reglamentación, han definido el sistema descripto anteriormente como Balance Neto Facturación para la transacción de la energía entre el usuario y la distribuidora. El precio fijado para la Energía Efectivamente Inyectada es esencialmente el valor al que la empresa distribuidora compra la energía en el Mercado. Esto conduce actualmente a que la remuneración percibida por la Energía Efectivamente Inyectada resulte más de 2 veces menor que la pagada por la Energía Efectivamente Demandada lo que efectivamente no constituye un elemento que en general fomente la Generación Distribuida. Por otro lado, tal cual se encuentra

implementado el sistema, se pierde de vista la Energía Consumida por el usuario, un factor no menor para la planificación de las empresas distribuidoras o a los simples fines estadísticos energéticos de un país. Estos son dos de los elementos que permiten afirmar que el sistema de Generación Distribuida tal cual se encuentra implementado en Argentina no fomentará efectivamente su desarrollo. Si realmente se pretende incentivar este sistema deberán buscarse nuevas variantes entre las cuales el método presentado puede resultar una alternativa superadora.

## REFERENCIAS

- ADEERA 2000, “El proceso de cálculo de los cuadros tarifarios de empresas distribuidoras de electricidad”, Asociación de Distribuidores de Energía Eléctrica de la República Argentina (ADEERA), Buenos Aires, 2000.
- Convenio específico y protocolo de trabajo entre el ministerio de agua, ambiente y servicios públicos de la Provincia de Córdoba y la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto: “Estudio y redacción de las normas referentes a los requisitos y procedimientos técnicos para la instalación y operación de sistemas de generación distribuida menores a 300 kW conectados al sistema eléctrico de distribución”
- Paul Denholm, Robert Margolis, Bryan Palmintier, Clayton Barrows, Eduardo Ibanez, and Lori Bird, “Methods for Analyzing the Benefits and Costs of Distributed Photovoltaic Generation to the U.S. Electric Utility System”, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Technical Report NREL/TP-6A20-62447, September, 2014.
- Rodolfo Dufo & José Bernal, “A comparative assessment of net metering and net billing policies - Study cases for Spain”, Elsevier, Energy 84 (2015), pp. 684-694.
- Ahlmahz Negash, “Valuing Distributed Energy Resources”, Thesis by degree of Doctor of Philosophy, University of Washington, 2015.
- Benjamin L. Norris, Morgan C. Putnam & Thomas E. Hoff, “Minnesota Value of Solar: Methodology”, Clean Power Research, April 2014.
- Richard Perez, Mike Taylor & Tom Hoff, “Moving Toward Consensus on a Photovoltaic Generation Capacity Valuation Methodology”, Solar Power 2007, PV Capacity Workshop, September 2007.
- Thuy Phung, Isabelle Riu, Nate Kaufman, Lucy Kessler, Maria Amodio & Gyan de Silva, “The effect of austin energy’s value-of-solar tariff on solar installation rates”, Yale School of Forestry & Environmental Studies, may 2017.
- Andrew Satchwell, Andrew Mills & Galen Barbose, “Financial Impacts of Net-Metered PV on Utilities and Ratepayers: A Scoping Study of Two Prototypical U.S. Utilities”, Environmental Energy Technologies Division, Berkeley National Laboratory, Supported by U.S. Department of Energy, September 2014
- Paul Zummo, “Rate Design for Distributed Generation”, American Public Power Association, Junio, 2015, Dirección URL: <[http:// \[www.PublicPower.org\]](http://www.PublicPower.org)> [consulta: 13 de agosto de 2019]

## SERVICE VALUES: AN ALTERNATIVE FOR ENERGY COMMERCIALIZATION IN DISTRIBUTED GENERATION

### ABSTRACT

The traditional energy marketing schemes used in Distributed Generation systems are described. The inconveniences and distortions that occur when these schemes are applied are superimposed with the classic tariff systems. From them, the “Service Value” method is presented conceptually, through which it is possible to avoid those distortions by assigning a valuation that is economically neutral in the allocation of distribution costs for all users (Generator User and non-adopting Users) and a fairer rate that does not economically penalize the Generator User or allow a free use of the electrical system. The “Solar Value” of a unit of energy generated by a distributed generation photovoltaic system is determined from the historical operational data of the electrical system of the province of Córdoba.

**Keywords:** Distributed Generation, Net Energy Balance, Net Billing Balance, Service Value



## **TRANSICIÓN ENERGÉTICA Y CALIDAD TÉRMICA EN VIVIENDAS RURALES DEL NOROESTE DE PATAGONIA**

**M. Betina Cardoso<sup>1</sup>, Lucas Zanovello<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Instituto Andino Patagónico de Tecnologías Biológicas y Geoambientales (IPATEC), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad Nacional del Comahue, San Carlos de Bariloche, Argentina. Av. Pioneros Km 2350, CP: 8400

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) [zanovello.lucas@inta.gob.ar](mailto:zanovello.lucas@inta.gob.ar)  
Tel. +54 294 444 2676 / 2382 int 210 e-mail: [betinacardoso@comahue-conicet.gob.ar](mailto:betinacardoso@comahue-conicet.gob.ar)

*Recibido 14/08/19, aceptado 23/10/19*

**RESUMEN:** Se estudiaron los cambios en el uso de energía debido a un programa que intenta reemplazar la leña por combustibles fósiles en viviendas rurales de la Patagonia argentina, donde se encuentra un suministro limitado de leña y vulnerabilidad social. El estudio se realizó en la comunidad de Laguna Blanca, provincia de Río Negro, ubicada en la estepa patagónica. Las viviendas unifamiliares fueron construidas sin medidas de eficiencia energética, presentando estructuras de concreto reforzado, ladrillos de arcilla cocida, techos de metal y ventanas de vidrio simple. Desde 2014, un programa gubernamental subsidió por completo la recarga de gas licuado de petróleo (GLP) a las comunidades rurales vulnerables, que recibieron un tanque de gas de 200 kg y un calentador de gas en cada hogar. Se observó una disminución esperada en el uso de leña, junto con un consumo muy alto de GLP (alrededor de 650 kWh/m<sup>2</sup> al año), que puede evaluarse por primera vez debido a la cantidad actual de GLP suministrada. La falta de políticas de eficiencia energética condujo a costos operativos muy altos e impactos ambientales. Con base en las características de las viviendas, hemos encontrado que los subsidios de GLP ahorrados en 2.2 años, devolverían la inversión para un aislamiento térmico que reduciría el 50% el consumo de gas y mejoraría sustancialmente la comodidad.

**Palabras clave:** biomasa, hogares, transición energética, eficiencia térmica, gas licuado de petróleo.

### **INTRODUCCIÓN**

#### *Modelos de transición energética*

Existen avances en los esfuerzos de fomentar procesos de transición energética hacia un uso combinado de combustibles. En un gran número de comunidades rurales en el mundo la leña es la única fuente de energía, y esto conduce a la importancia de estudiar el uso residencial de biomasa en relación a sus problemáticas. A raíz de esto surge una diferenciación donde se clasifican a los usuarios exclusivos, y por otro lado a los usuarios mixtos cuando utilizan más de un tipo de combustible.

Desde la década de los 90' se plantean modelos para explicar la transición energética en el uso residencial de países menos favorecidos económicamente, por ejemplo, el modelo utilizado llamado "La Escalera Energética o Energy Ladder" (Barnes y Floor, 1996). Este modelo supone que las familias abandonan el uso de un combustible por otro de manera que hay un cambio lineal de los combustibles menos eficientes, menos costosos, a más eficientes como son el gas licuado de petróleo (GLP) y la electricidad, y que sólo las familias con mayores ingresos pueden adquirirlos. En este sentido, cuando se asciende económicamente se sustituyen los combustibles tradicionales por los modernos (Smith et al 1994; Barnes y Floor, 1996). Sin embargo, este planteamiento es limitado si se analizan las relaciones dinámicas que ocurren en comunidades rurales de los países considerados en vías de desarrollo (van der Kroon et al., 2013). Existen estudios que sugieren que no hay una fuerte relación entre el tipo de combustible y el nivel de ingresos (Arnold et al., 2006), mencionan que la leña puede ser un recurso importante de energía tanto para familias de zonas rurales como urbanas

(Hiemstra-van der Horst y Hovorka, 2008; Schueftan et al., 2016), aunque el combustible utilizado siempre dependerá del recurso que se encuentre al alcance. Link et al. (2012) y Cardoso et al. (2013) observan que la sustitución de combustibles se favorece en las zonas donde hay desarrollo en las oportunidades de empleo, mercados, escuelas, subsidios, puestos de salud y paradas de autobús, es decir donde hay un cambio en el entorno social, además de económico.

Se han desarrollado otros modelos que proponen que la transición energética no es un proceso lineal y se deben de considerar más factores para poder explicarla. A diferencia del modelo Energy Ladder, se propone el “Multiple Fuel Model” (Masera et al., 2000), este modelo plantea que la transición de combustibles no es lineal, las familias no sustituyen un combustible tradicional por uno moderno necesariamente, sino que adquieren una estrategia de uso de múltiples combustibles en la cual se incorporan nuevos recursos y tecnologías. Estos son integrados a los tradicionales y el consumo de cada combustible está determinado por su disponibilidad, sus características, por el dispositivo de uso final y por los contextos socio-culturales (Masera et al., 2000; Reyes et al., 2015). A esta dinámica también se la conceptualiza como “Fuel Stacking” y es el proceso en que los hogares utilizan diferentes combustibles complementarios al mismo tiempo (van de Kroon et al., 2013).

#### *Antecedentes de eficiencia térmica para el caso estudiado*

En Argentina el uso de leña está relacionado con la cocción y calefacción. Sin embargo, el consumo de este recurso no es tan elevado en comparación con otros países como Chile, México, países asiáticos o africanos. Cerca del 60% de la población urbana tiene provisión de gas natural subsidiado, principalmente en las zonas más frías como es la Patagonia. Sin embargo, la falta de aislación térmica adecuada conduce a mantener una temperatura confortable a través de un gran consumo de energía. La demanda energética para calefacción no está determinada sólo por las diferencias de temperatura entre el interior y el exterior de la vivienda, sino además por la calidad de la aislación térmica en relación al material de las envolventes. A mayor diferencia de temperatura y baja calidad térmica, los consumos de energía para calefacción aumentan. Entonces, en las zonas de climas fríos es necesario aumentar la eficiencia térmica, de manera de utilizar la menor cantidad posible de energía para mantener una temperatura constante, confortable y uniforme dentro de toda la vivienda.

En trabajos previos se encontró que en Argentina la construcción no es sensible al clima, con índices térmicos similares para regiones cálidas y frías, y en todos los casos con consumos específicos muy superiores a los que se obtienen en países con climas similares como Suecia o Canadá, pero donde se implementan medidas de eficiencia energética en las envolventes (González, 2009). En el noroeste de Patagonia donde el clima es frío, puede notarse que tanto los pobladores como los extensionistas o investigadores que trabajan en las zonas rurales, hasta el momento no han mencionado la falta de eficiencia energética (EE) en relación a la baja calidad térmica de las viviendas. Sin embargo, otros estudios enfocados en estimar la EE doméstica en ciudades de la región, han revelado que las necesidades energéticas son reducidas por la implementación de medidas de eficiencia térmica (Schueftan et al., 2016; González, 2014a; 2014b), y la biomasa como combustible puede ser un recurso sustentable si se realiza un manejo de forma sostenible (Lebed, 2003; Reyes et al., 2015).

Si bien la compra de GLP en las ciudades de la Patagonia se subsidia, es menor comparado con el subsidio para el gas natural de red; resultando el GLP 8 veces más costoso por unidad de energía (González, 2013), y la leña sólo se encuentra apenas subsidiada en pequeñas cantidades para sectores rurales aislados, y en algunos periurbanos más vulnerados (Cardoso et al., 2012). En este sentido en el año 2014 comenzó un programa de entrega de GLP en sectores rurales del noroeste de Patagonia, sumado a las instalaciones necesarias para su almacenamiento en cada vivienda y a los dispositivos que utilizan ese combustible en el hogar. El programa de ayuda se originó por varios factores: 1) las consecuencias de la erupción volcánica del Puyehue-Cordón Caulle en 2011, que provocó graves daños a la economía de subsistencia rural; 2) la falta de recursos de biomasa en la región, agravada por la sequía de la última década y por la ceniza volcánica; y 3) políticas de ayuda energética a sectores vulnerables, que ya se aplicaban en entrega de leña a través del programa “Plan Calor”. Sin embargo, no se trabajó sobre la mejora térmica de las viviendas. A través de los programas de gobierno se instalaron dispositivos que consumen GLP, el cual se entrega con 100% de subsidio, con la idea de reemplazar el uso de biomasa, debido a sus costos y escasez. Con estos antecedentes, el objetivo de

este trabajo es analizar la transición energética desde el uso de biomasa al reemplazo directo por combustibles fósiles; y la calidad térmica de las viviendas del paraje rural de Laguna Blanca en el noroeste de Patagonia.

## **METODOLOGÍA**

### *Caracterización de la región de estudio*

El estudio se realizó en la comunidad de Laguna Blanca, ubicada en las últimas estribaciones de la Pre-cordillera de los Andes, de oeste a este. Cuenta con 180 habitantes aproximadamente (40° 43' S y 69° 50' W; 1251 msnm) y se encuentra situada en una región de la estepa arbustiva patagónica que limita con una zona erial (León et al., 1998). El relieve se caracteriza por valles, pantanos y afloramientos rocosos (Figura 1). El clima es predominantemente árido y frío, con precipitaciones anuales de entre 150 y 300 mm, concentradas en otoño e invierno en forma de lluvia y nieve, siendo la temperatura media anual de 8 °C (Bran et al., 2000; Bustos, 2006).



*Figura 1: Comunidad de Laguna Blanca en la estepa patagónica.*

La actividad económica principal es la cría de cabras y ovejas para la venta de lana y el autoconsumo de carne, llevando adelante una forma de vida de subsistencia, con ingresos monetarios por debajo de la línea de pobreza definida para las ciudades de la región. Asimismo, estas poblaciones deben ajustarse a los parámetros productivos propios de la sociedad de mercado, como son el precio actual de la lana o las formas de comercialización, que en este caso se produce a través de cooperativas regionales. El centro urbano más cercano es el pueblo de Comallo (ca. 2.000 habitantes) a una distancia de 70 km (Figura 2). El acceso a la zona de estudio es dificultoso, contando con una sola línea de transporte público que pasa por el paraje una vez a la semana, y debe enfrentar caminos con bajo mantenimiento, sinuosos, desnivelados y con bordes de rocas sobresalientes.

Las viviendas están construidas preferentemente de ladrillo cocido, en algunos casos de adobe y cuentan con dos o tres ambientes. Las paredes internas están revestidas de un revoque delgado y las exteriores con el ladrillo vista. La Figura 3 muestra una vivienda típica, donde se observa el recipiente para GLP con capacidad de 200 kg para calefacción, y el recipiente menor de 10 kg de GLP usado en la cocina.



Figura 2: Localización del área de estudio.

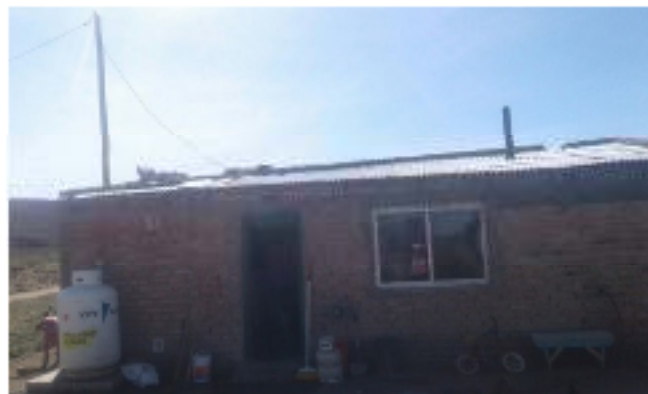


Figura 3: Vivienda típica con un tanque de GLP de 200 Kg.

La mayor parte de las familias posee una vivienda en el paraje y otra en el campo, esto es, el área dispersa donde se encuentra la unidad doméstica de producción, la mantención del ganado y de los pastizales. En las viviendas del paraje habitan los niños y sus madres, debido a que el padre de familia permanece en el campo para el cuidado y crianza de los animales. Las viviendas del campo suelen ser más grandes en tamaño por ser la primera construcción familiar, generalmente heredada. Por otro lado, la vivienda del paraje fue construida por razones de escolaridad de los hijos en tiempos actuales y con ayuda gubernamental en ciertos casos. Hasta el año 2014, las familias dependían exclusivamente del consumo de leña para calefaccionar los ambientes, realizando la recolección de leña generalmente a pie o a caballo (Cardoso et al., 2013).

#### *Recursos energéticos de biomasa*

Debido a la economía de subsistencia, el ingreso principal anual se provee a través de la venta de lana de oveja y pelo de cabra, y gran parte de estas ganancias se destinaban a la compra de leña para calefacción. En estudios anteriores (Cardoso et al., 2012) se demostró que el 83 % de las familias de este paraje compraban leña de especies nativas de la región, de árboles exóticos de plantaciones de la zona y leña externa debido a la falta de combustible leñoso en el lugar. En general la leña comprada proviene de otras áreas geográficas alejadas del paraje, pero dentro de Argentina, pertenecientes a los bosques nativos del centro y norte del país. Para agregar valores, esta leña se obtenía por 4 pesos el kg aproximadamente, considerándose “la leña dura”. También se compraba leña más barata proveniente de las podas de manzanos y perales comerciales y cercanos del Valle de Río Negro, a un precio de 2,70 pesos el kg (Tasa de conversión 1 USD = 14 ARS, comienzos del año 2016).

#### *Métodos de colección de datos*

La información etnográfica en la región comenzó en el año 2009 (Cardoso et al., 2013), pero los datos para esta investigación sobre la transición energética, el consumo de GLP y la calidad térmica fueron recolectados en 2016. Estudios anteriores en la región han abordado la problemática sobre el uso de

leña como eje principal, intentando relevar los factores que influyen en la recolección y consumo de este recurso en la vida de subsistencia, teniendo en cuenta las características socio-ecológicas (Cardoso et al., 2013; 2015).

La metodología etnográfica se llevó adelante a través de observación participante y entrevistas profundas, teniendo en cuenta la complejidad de esta metodología en el compromiso de la repregunta y reflexión en cada uno de los actos como propone Guber (2004; 2011). Las entrevistas se realizaron en las viviendas del paraje, se orientaron hacia la situación actual sobre el cambio de combustible desde biomasa a GLP, sobre la permanencia en el uso de biomasa y/o sobre las preferencias de la biomasa como fuente de calor. Los resultados se han cuantificado en relación al consumo energético de leña antes del año 2014 y el consumo actual de GLP y la calidad térmica de las viviendas.

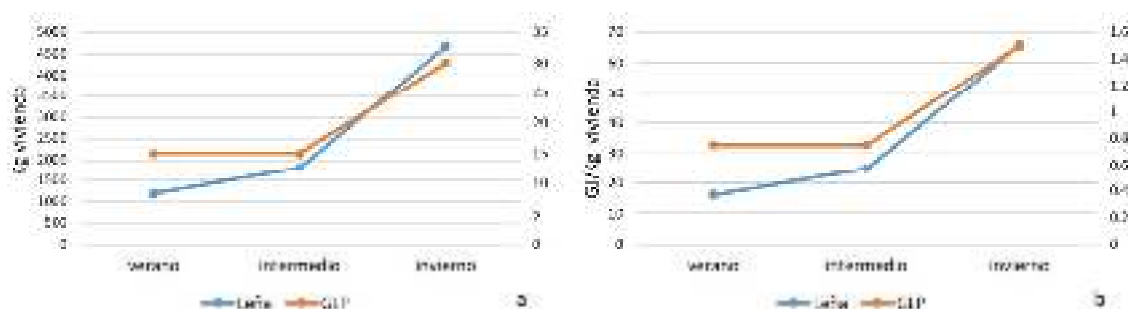
Se visitaron 28 hogares. Se realizó una visita a cada familia, y se entrevistó a uno de los integrantes adultos. Para analizar los datos sobre la calidad térmica de las viviendas las preguntas fueron enfocadas a los materiales de construcción, su calidad como aislante térmico y su disposición. Todo esto en relación a las fuentes de provisión de energía calórica, a la eficiencia en el uso de la misma, los costos y la relación con la economía de subsistencia.

## RESULTADOS

### *Uso de biomasa previo a la instalación de GLP*

Previo al suministro de GLP para calefaccionar los ambientes en el paraje de Laguna Blanca, ciertos pobladores se trasladaban una distancia de búsqueda promedio de 4 Km cada 3 días para la recolección de leña (Cardoso et al., 2013). Si bien la recolección de leña es una práctica tradicional, para las familias que lo siguen haciendo en el presente se ha vuelto una tarea muy dificultosa, no sólo por la distancia, sino también por la falta del recurso. La leña recogida es de madera principalmente seca y se complementa con madera verde. La mezcla de madera seca y verde es una preferencia en la práctica de los usuarios exclusivos, debido a que permite mayor duración de la llama y el calor, a expensas del menor poder calorífico debido a la humedad del combustible. Este indicio de escasez del recurso leñoso se suma a que en trabajos previos se encontró que el 59 % de la población en Laguna Blanca usaba estiércol vacuno como el principal complemento (Cardoso et al., 2013).

Hasta el año 2014 las viviendas del paraje contaban con una cocina alimentada con una garrafa de 10 kg de GLP que en general tiene una duración de dos meses. En la Figura 4 pueden observarse el consumo de leña en kilogramos por vivienda, mostrando la diferencia estacional, de manera de conocer también el promedio anual estimado en kilogramos (Figura 4a) y en unidades de consumo energético (Figura 4b). Esta medición corresponde a leña recolectada silvestre, más la leña comprada principalmente en los inviernos y el GLP utilizado para la cocina.



*Figura 4: Consumo de leña y GLP antes de la intervención con Gas Licuado de Petróleo. El eje izquierdo corresponde a los datos de leña y el eje derecho a los datos de GLP. a) Consumo en kg de leña y GLP para calefacción y cocción. b) Consumo energético en GJ/Kg de leña y GLP.*

Debido a las mediciones y cálculos realizados durante los años en los cuales se ha visitado y trabajado junto a esta comunidad, en ese momento una familia necesitaba en promedio 13 kg de leña por día en la estación estival, la cual se estima permanece durante 3 meses; 20 kg de leña por día teniendo en cuenta una temperatura intermedia con una estimación también de 3 meses, y 26 kg de leña por día en

un invierno prolongado que en este caso consideraremos de 6 meses (Figura 4a). Así, antes del 2014 una familia tenía acceso a 110 GJ/año, 107 provenientes de la leña y 3 GJ provenientes de GLP (Figura 4b).

Se ha documentado que el 83 % de las familias compraban leña en este paraje (Cardoso et al 2013). Sin embargo, resulta difícil calcular la cantidad de dinero destinado a este fin debido a que se compra leña dura, de podas, de los vecinos, y además muchas familias que no cuentan con el ingreso suficiente se abastecen principalmente de la recolección de leña silvestre, aunque ésta escasee. Sin embargo y debido a las dificultades en la homogenización de los datos obtenidos en relación a la compra del recurso, en esta investigación se muestra una estimación del costo de la compra de la leña requerida anualmente y por vivienda. Para ello se tomó como referencia el precio de la leña dura en el 2016 que fue de 4 pesos el kg siendo la madera mayormente requerida, ya que la leña de podas cercanas es temporaria. En este sentido, el abastecimiento de leña para calefacción en una familia durante los 3 meses de verano con un consumo de 13 kg diarios a 4 pesos el kg requería un gasto de 4680 pesos; para los 3 meses de estación intermedia a 20 kg diarios, se gastaban 7200 pesos, y para los 6 meses de temperatura invernal con un consumo de 26 kg por día serían 18.720 pesos. La estimación nos informa que una familia de crianceros rurales en un paraje de ambiente estepario en el noroeste de Patagonia necesitó 32.400 pesos para calefaccionarse y 600 pesos correspondientes a 60 kg/año de GLP para cocción. Debido a la actividad agropecuaria independiente, sumada a trabajos realizados para terceros, es difícil estimar el ingreso de una familia en la población estudiada. Sin embargo, podemos comparar este gasto energético con el salario del trabajador rural registrado, que fue de aproximadamente 143.000 pesos/año neto (UATRE, 2017). De esta manera, el gasto energético con el uso de leña, previo a la entrega de GLP subsidiado representaba el 21% de un salario rural neto.

#### *Transición energética: de biomasa a gas licuado de petróleo*

A partir del año 2014 las viviendas del paraje cuentan con un estanque de GLP con capacidad de carga de 200 kg. En este sentido, a cada vivienda se le colocó un calefactor de tiro balanceado de 4000 kcal/h de potencia. Si bien el llenado del estanque de gas envasado se encuentra subsidiado en el 100%, los pobladores complementan la calefacción con el uso de leña. El cambio en el uso de combustible de ser usuario exclusivo a ser usuario mixto, en este caso ha beneficiado la economía familiar pero no ha resuelto en realidad la calidad de vida, debido a que no se mantiene una temperatura estable y templada en la vivienda. Si bien las familias optan por concentrar sus actividades en la cocina/comedor, también se ha comprobado que las demás habitaciones no alcanzan una temperatura confortable.

Las superficies de las viviendas son en promedio de 62 m<sup>2</sup> y la habitan de 3 a 7 personas. Los resultados de las entrevistas muestran que cuando se usa el calefactor de tiro balanceado en invierno, la carga de gas de 200 kg puede mantenerse entre 15 y 30 días según la vivienda, con un promedio de 19 días. En los 3 meses de verano y teniendo en cuenta 3 meses de estación intermedia, la duración de 200 kg de gas es aproximadamente de 30 a 45 días, con 35 días de promedio. Dada la rigurosidad climática, el uso del calefactor en la zona es intensiva en 6 meses del año, y moderada en otros 6 meses. Por lo tanto, podemos estimar un consumo promedio de 1895 kg de GLP en 6 meses de calefacción intensa y 1028 kg de GLP en la otra mitad del año. Este consumo anual estimado resulta de 2923 kg/año de GLP por vivienda, los cuales entregan un poder calorífico bruto de 144 GJ/año para la vivienda del paraje (Figura 5). Si bien las familias no pagan por la recarga de gas, su costo para el programa gubernamental es cercano a \$87690/año-vivienda, teniendo en cuenta el costo de recarga de \$30/kg GLP en 2017. El costo por unidad de energía (GJ) del GLP es más del doble que el de leña (\$609/GJ LPG vs. \$284/GJ leña).



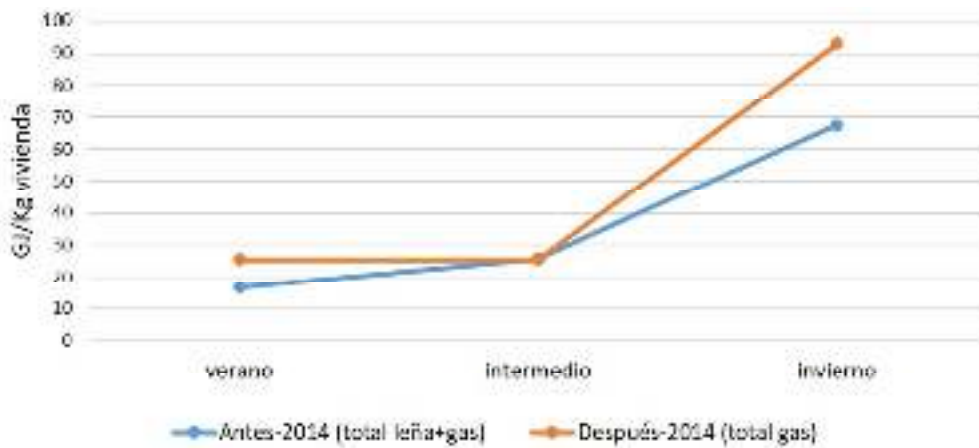


Figura 5: Energía expresada en GJ/Kg requerida en una vivienda del paraje de Laguna Blanca, antes y después de la intervención con GLP.

La transición de combustible también ha afectado la energía total consumida. Antes de 2014, el consumo anual de energía en calefacción era de 110 GJ por hogar, mientras que en 2017 era de 144GJ, lo que representa un aumento del 31%. Por otro lado, en el paraje se encuentra la escuela pública rural, la cual ya recibía suministro de GLP subsidiado en el 100% previo a los programas iniciados en las viviendas en 2014. La escuela utiliza un estanque con una capacidad de carga de 1734 kg y que se consume en dos meses, lo que implica un consumo anual cercano a 427 GJ/año considerando los 10 meses (solo en momento de clases se usa) de funcionamiento de la escuela. Este consumo resulta muy elevado teniendo en cuenta que 40 niños asisten todos los días a tomar el almuerzo, la escuela consta de 3 salas de clases, un comedor y tres habitaciones donde residen los docentes. La escuela tiene ciertas mejoras en la calidad constructiva respecto de las viviendas, pero también carece de aislamiento térmico.

#### *Aislación térmica de las viviendas y eficiencia energética*

Considerando la vivienda promedio de 62 m<sup>2</sup>, el requerimiento actual de GLP implica un consumo específico de 645kWh/m<sup>2</sup>año; mientras que con los consumos de leña previos al programa de subsidios se usaban 479kWh/m<sup>2</sup>año. En ambos casos el consumo es extremadamente alto, y es consecuencia de la falta de aislación térmica de las viviendas a través de las envolventes, es decir a una carencia en la eficiencia térmica. Por ejemplo, en la ciudad de Bariloche, y en viviendas urbanas con provisión de gas natural, de 100m<sup>2</sup> y de mejores características constructivas que las informadas aquí, se encontró un promedio cercano a 400kWh/m<sup>2</sup>año (González et al., 2007). Si bien la vivienda en la ciudad de Bariloche es de mejor calidad general que las viviendas de Laguna Blanca, ambas carecen de aislamiento térmico.

Las viviendas de Laguna Blanca no están adaptadas al clima frío patagónico: no tienen revestimientos, sólo poseen ladrillos cocidos, y stucco del lado interno; las ventanas son de chapa o madera con vidrio simple y presentan serias infiltraciones de aire; las puertas son de madera con grietas y separaciones que facilitan aún más la infiltración de aire en la vivienda; los techos están contruidos con vigas de madera sobre las cuales se coloca una lámina de cartón embreado y por encima se clava el cerramiento del techo, en algunos casos de chapa galvanizada y en otros de enchapado de cartón embreado de forma sinusoidal. La mayor parte de los techos están cubiertos de piedras para evitar la voladura de las chapas por los fuertes vientos; y los pisos son de hormigón liviano. Debido a las propiedades físicas de los distintos materiales y a las técnicas de construcción es que se conoce que en estas condiciones las pérdidas de calor por la envolvente son muy elevadas, especialmente por los techos, sumando las infiltraciones en ventanas y puertas. Como lo demuestran los consumos de energía analizados anteriormente, se necesitan grandes cantidades de combustibles para mantener condiciones de confort higrotérmico, empujando a la familia a calentar sólo una o dos habitaciones en la casa y dando prioridad a la sala de estar y la cocina, donde también se usa la cocina de leña, cuyo uso se sostiene incluso luego del abastecimiento del GLP en el paraje.



## DISCUSIÓN

Los resultados muestran que una familia en Laguna Blanca usa una gran cantidad de energía para cubrir su calefacción durante el año. Antes del programa, en 2014, esa cantidad de energía significaba el 21% del ingreso anual por familia. Después del programa, la necesidad de comprar leña disminuye, aunque se observó en las entrevistas que también compran leña para acompañar el calentamiento con GLP debido a la tradición y a aumentar el calor en la casa. Por lo tanto, los valores ofrecidos en las figuras se encuentran probablemente subestimados.

### *Ventajas y desventajas en la transición energética*

Las mejoras que observamos en relación al cambio en el uso de combustible con respecto a la calidad de vida son: que los pobladores no necesitan salir todos los días a recolectar leña, que el calefactor no libera humo dentro de la vivienda y que se observa un beneficio económico en el ámbito privado debido a que los usuarios no necesitan pagar la recarga. Sin embargo, los beneficios podrían ser mayores si se implementaran mejoras en la aislación térmica de las viviendas en todo sentido. Esto se traduciría en un ahorro muy importante en el sector público, quien en este momento paga por el GLP y lo hace a un costo elevado debido a las distancias recorridas, al tipo de gas entregado y a los altos consumos.

Con las medidas de EE sugeridas se ahorraría gran parte de este combustible fósil, los camiones de recarga tendrían que llegar hasta el paraje con menos frecuencia y podrían colocarse más calefactores de menor potencia para una mejor distribución del calor en cada una de las viviendas. Es importante tener en cuenta este último punto, debido a que las familias que poseen varios hijos y de diferentes edades se concentran en la cocina, y entonces el hogar se mantiene debajo de la línea de bienestar básico, debido a que no existen habitaciones confortables para las tareas escolares o los espacios propios de los integrantes.

Como se comentó en la sección anterior, los usuarios utilizan los dos dispositivos, el calefactor y además la cocina a leña para complementar la calefacción del ambiente. Sin embargo, la persistencia en el uso de leña también puede deberse a que la recarga de GLP no es un recurso seguro, sino que genera una dependencia externa creando inseguridades con respecto a la provisión. De esta manera, los pobladores continúan utilizando leña como un recurso requerido debido a su poder calórico y como recurso seguro ante cualquier eventualidad. Así se observa la recurrencia en el uso de leña, y por lo tanto la necesidad de tener en cuenta un modelo mixto de uso de dispositivos y fuentes, de manera de abordar una complementariedad energética (Mäser et al., 2000; Battista et al., 2017).

### *Ahorro energético*

La restauración térmica de estas viviendas para adecuarlas a un nivel moderado de eficiencia energética es simple y se aplica en viviendas de ciudades cercanas. Los materiales son de fabricación nacional y se encuentran en los comercios de la región. En trabajos previos se compararon los costos de una rehabilitación térmica moderada, que permite reducir el consumo de energía en calefacción a la mitad, con los ahorros que implican en combustibles (González, 2009). De la misma forma puede lograrse para las viviendas de Laguna Blanca. Consideramos el revestimiento de las paredes externas con siding de 6mm y aislamiento térmico de Expanded Polyesterene (EPS) de 50 mm de espesor, con soportes de 70 mm donde además se alojan dos cámaras de aire de 10 mm. La mejora de las ventanas es simple realizarlas agregando una segunda ventana situada a 50 mm de separación de la existente, sin alterar las fijaciones de ésta. Para el techo consideramos la intervención desde el lado interno de la casa, agregando aislante entre los tirantes y cerrando en forma de cielorraso con placas de Medium Density Fiberboard (MDF) de 5 mm de espesor. El agregado de 2 capas de EPS de 50 mm entre los tirantes se realiza de forma tal de dejar tres cámaras de aire, una arriba contigua al techado existente, una entre las placas de EPS y la de más abajo contra el cerramiento de MDF. Las cámaras de aire asociadas al EPS aumentan significativamente la eficiencia térmica del compuesto (Juanicó y González, 2017). Las infiltraciones se resuelven con sellados comerciales tipo poliuretano expandido o siliconados. Para la vivienda promedio de 62 m<sup>2</sup> de Laguna Blanca, el costo total de esta rehabilitación es cercano a \$90000 incluyendo la mano de obra, de los cuales \$50000 corresponden a las paredes, \$30000 al techo, \$5000 a las ventanas, y \$5000 a las infiltraciones. Con esta rehabilitación térmica se

reduciría la energía usada en calefacción a la mitad y aumentaría el confort por homogeneización de la temperatura y aprovechamiento de la masa térmica de los ladrillos y hormigón, los cuales conservan calor en la nueva configuración con aislantes. El ahorro estimado es de 1340 kg GLP por año. Con un costo evitado de \$40000 por año y por vivienda.

El costo de la rehabilitación térmica se recupera en 2,25 años con el ahorro en GLP (para comparar, todos los precios pertenecen a enero de 2018 para reacondicionamiento y combustible).

El programa de subsidios al 100% comenzó en 2014, e incluyó la entrega gratuita de tanques y calefactores. Si además hubiese incluido una rehabilitación térmica moderada de las viviendas, al momento actual todo el gasto se hubiese pagado con las reducciones de consumo, quedando hacia futuro una situación de confort y menor uso de energía que contribuirían a la sostenibilidad del programa.

#### *Subsidios*

De acuerdo a esta investigación es posible observar que subsidios aplicados en la instalación y provisión de GLP en Laguna Blanca, son necesarios para sostener la economía y mejorar la calidad de vida de una población en situación de vulnerabilidad energética. Los subsidios al consumo de energía deberían ser una herramienta para beneficiar a los sectores más vulnerables y ocasional de urgencia para la población de bajos ingresos en general, con la posibilidad de reemplazarlo con subsidios orientados a la eficiencia energética. En este caso de estudio el subsidio del sector público asume el costo del 100% para reemplazar la leña. De todos modos, no se resuelve el problema de poder mantener una temperatura interna constante en las viviendas, de manera de contar con ambientes confortables la mayor parte del invierno. Cabe destacar la voluntad del Estado y la inversión significativa que éste realiza. Sin embargo, intentar abordar la temática de manera estructural y promover la eficiencia energética conduciría a menores costos públicos y mayores beneficios a quienes va dirigido el programa.

El paraje de Laguna Blanca también se favorecería con un programa de capacitación en el estudio sobre los materiales de las envolventes, y el trabajo de la aislación térmica en las viviendas, haciendo partícipes a los integrantes locales. Esta iniciativa puede formar parte de políticas públicas las cuales podrían extrapolarse a distintas comunidades de la región.

#### *Importancia de la forestación peridoméstica*

Hace dos décadas aproximadamente se han iniciado distintos planes de forestación en la región patagónica, con el fin de crear bosquetes leñeros y además propiciar barreras de viento y mitigar los efectos de la convección (Peralta, 2002; Lebed, 2003; Izquierdo et al., 2009). Sin embargo, las dificultades de acceso a la zona de estudio y la rigurosidad climática provocan la falta de seguimiento de estas tareas. Por otro lado, ciertos productores locales intentan llevar adelante la forestación peridoméstica, con la cual en muchos casos los árboles logran buen crecimiento cuando se los protege del viento en los primeros años y disponen de agua suficiente. El uso de “alamedas” en los peridomicilios patagónicos ha sido documentado en las zonas rurales en el noroeste de Patagonia (Lebed, 2003; Cardoso y Ladio, 2011; Cardoso et al., 2012; 2013).

Desde el punto de vista ambiental y social, las plantaciones domésticas forman parte de la resiliencia ecológica-social porque constituyen un sistema multipropósito. Los beneficios de las plantaciones peridomésticas en relación a la eficiencia térmica de las viviendas son variados: protección, leña de poda, madera para construcción de muebles, residuos combustibles, protección de la fauna, retención del suelo y también evitan las inundaciones por eventos climáticos extremos que en los últimos años han sido muy severos. La elección de la vegetación es importante para determinar el volumen del follaje y el grado de amortiguación de estos fenómenos físicos ambientales. Especies adecuadas tendrían que presentar un crecimiento y desarrollo rápido y es necesario que no requieran demasiada disponibilidad de agua. En este sentido se tendrían que contemplar cuáles son las especies adecuadas y tener en cuenta su comportamiento y sus propiedades fisiológicas. Por todo esto consideramos que la dinamización de la práctica de la forestación debería incrementarse como fuente de biomasa y de mitigación de los efectos climáticos; de manera de contribuir directamente en la eficiencia energética local.

## CONCLUSIONES

La transición energética de la leña a una mezcla de GLP y leña observada en el paraje de Laguna Blanca, contribuyó a mejorar la calidad de vida, siendo también parte de un proceso de ayuda social a un sector vulnerable que redujo rápidamente su gasto en combustibles para calefacción. Sin embargo, la transición al GLP totalmente se vio afectada por la falta de eficiencia energética en las viviendas y ha aumentado la energía consumida en la calefacción. Se observó que incluso con la provisión de GLP, los hogares mantienen el uso tradicional de las estufas de leña, debido a su alto poder calórico y a la falta de eficiencia térmica.

Si las viviendas tuvieran un buen aislamiento térmico, el estado podría promover un programa en el que se proporcione GLP y leña para complementar con dos combustibles, uno fósil y uno renovable, colocando calentadores, pero también dejando la estufa de leña tradicional en las zonas rurales. De esta manera, colabora con el “fuel stacking” como en la mayoría de las áreas rurales del mundo donde los habitantes usan varios combustibles simultáneamente, de acuerdo con la disponibilidad, los dispositivos adquiridos y la seguridad de obtener los combustibles junto con las tradiciones y los significados culturales.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos profundamente a los habitantes del paraje de Laguna Blanca por su amabilidad, por compartir sus conocimientos con nosotros y por su hospitalidad. Este trabajo fue posible por el apoyo del proyecto de la Universidad Nacional del Comahue PIN I B191 “Medioambiente y sociedad: peligros naturales y vulnerabilidad en poblaciones de Patagonia Andina”, y por el proyecto CONICET PIP 0048 “Uso eficiente de energía y aprovechamiento del recurso solar en la Patagonia Andina”.

## REFERENCIAS

- Battista E, Justianovich S, Ocampo F, y L. Zanovello. (2017). Usos energéticos de la agricultura familiar pampeana: una caracterización para pensar políticas de acceso a la energía en el ámbito agrario. Acta de la XL Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente 5, 95-104.
- Barnes D. F. y Floor W. M. (1996). Rural energy in developing countries: a challenge for economic development. Annual Review of Energy and the Environment. 21, 497-530.
- Bustos J. C. (2006). Características climáticas del campo, Anexo Pilcaniyeu (Río Negro). Comunicación Técnica N° 25, Estación Experimental Agropecuaria, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, San Carlos de Bariloche, Argentina.
- Bran D., Ayesa J. y Lopez C. (2000). Regiones Ecológicas de Río Negro I. Estación Experimental Agropecuaria, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, San Carlos de Bariloche, Argentina.
- Cardoso, M. B., Ladio, A. H. y Lozada, M. (2012). The use of firewood in a Mapuche community in a semiarid region of Patagonia, Argentina. Biomass and Bioenergy 4, 155-164.
- Cardoso, M. B., Ladio, A. H. y Lozada, M. (2013). Fuelwood consumption patterns and resilience in two rural communities of the northwest Patagonian steppe, Argentina. Journal of Arid Environments. 98, 146-152.
- Cardoso, M. B. y Ladio, A. H. (2011). Forestación peridoméstica en Patagonia y conocimiento ecológico tradicional: un estudio de caso. Sitientibus, Série Ciências Biológicas. 11 (2), 321-327.
- Cardoso, M. B., Ladio, A. H., Dutrus, S. y Lozada, M. (2015). Preference and calorific value of fuelwood species in rural populations in northwestern Patagonia. Biomass and Bioenergy 81, 514-520.
- Hiemstra-van der Horst, G. y Hovorka, A. J. (2008). Reassessing the “energy ladder”: Household energy use in Maun, Botswana. Energy Policy, 36 (9), 3333-3344.
- González, A. D. (2014a). Casas confortables con mínimo uso de energía: estudio de casos prácticos para Argentina y Chile. San Carlos de Bariloche. 133 pp.

- González, A. D. (2014b). La importancia de la construcción eficiente en la Patagonia. Desde la Patagonia: Difundiendo Saberes. 11 (18), 38-45.
- González A. D. (2013). Management of disaster risks derived from very large fuel subsidies to natural gas in Argentina. In: Leal W, editor. Climate Change and Disaster Risk Management, Part 3. Berlin: Springer-Verlag. 463-473.
- González, A. D. (2009). Energy subsidies in Argentina lead to inequalities and low thermal efficiency, *Energies*. 3, 769-788.
- González, A. D., Carlsson-Kanyama, A., Crivelli, E. S. y Gortari, S. (2007). Residential energy use in one-family households with natural gas provision in a city of the Patagonian Andean region. *Energy Policy* 35(4), 2141-2150.
- Guber, R. (2001). La etnografía. Método, campo y reflexividad. Enciclopedia Latinoamericana de Sociocultura y Comunicación, Norma, Bogotá, Colombia, 1ª edición, 146 p.
- Guber, R. (2004). El salvaje metropolitano. Reconstrucción del conocimiento social en el trabajo de campo. Paidós. Serie de Estudios de Comunicación, Buenos Aires, Argentina, 1ª edición, 220 pp.
- Juanicó, L. E. y González, A. D. (2017). Thermal efficiency of natural gas balanced-flue space heaters: measurements for commercial devices. *Energy Buildings* 40 (6), 1067–1073.
- Leon, R. J. C., Bran, D., Collantes, C. Paruelo, J. M. y Soriano, A. (1998). Grandes unidades de vegetación de la Patagonia extra-andina. *Ecología Austral* 8, 125-144.
- Reyes, R., Nelson, H., Navarro, F. y Retes, R. (2015). The firewood dilemma: human health in a broader context of well-being in Chile. *Energy for Sustainable Development*, 28, 75-87.
- Schueftan, A., Sommerhof, J. y González, A. D. (2016). Firewood demand and energy policy in south-central Chile. *Energy for Sustainable Development* 33, 26-35.
- Izquierdo, I., Velasco, V. y Nasif, A. (2009). Montes leñeros y cortinas de reparo en la Región Sur de Río Negro. Estación Experimental Agropecuaria, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, San Carlos de Bariloche, Argentina.
- Arnold, J. E. M., Köhlin, G. y Persson, R. (2006). Woodfuels, livelihoods and policy interventions: Changing perspectives. *World development*. 34 (3), 596-611.
- Lebed, O. G. (2003). Cultivo de plantas en la estepa. Patagonia - Argentina. Ente para el desarrollo de la Región y Línea Sur de la provincia de Río Negro, San Carlos de Bariloche, Argentina.
- Link, C. F., Axinn, W. G. y Guimire, D. G. (2012). Household energy consumption: Community context and the fuelwood transition. *Social Science Research*, 41 (3), 598-611.
- Masera, O. R., Saatkamp, B. D. y Kammen, D. M. (2000). From linear fuel switching to multiple cooking strategies: a critique and alternative to the energy ladder model. *World development*, 28(12), 2083-2103.
- Peralta, C. (2002). Experiencias de Desarrollo Rural. Estación Experimental Agropecuaria, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, San Carlos de Bariloche, Argentina.
- Van der Kroon, B., Brouwer, R., Pieter van Beukering, J. H. (2013). The energy ladder: Theoretical myth or empirical truth? Results from a meta-analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 504-513.
- UATRE [en línea]. Dirección URL: <<https://www.uatre.org.ar/home.aspx>> [consulta: 1 octubre de 2018].

## **ENERGY TRANSITION AND THERMAL QUALITY IN RURAL HOUSEHOLDS IN NORTHWESTERN PATAGONIA**

**ABSTRACT** Changes in energy use were studied due to a program that attempts to replace firewood with fossil fuels in rural households in Patagonia Argentina, where there is social vulnerability and a limited supply of firewood. We focus on the community of Laguna Blanca, province of Río Negro, located in the Patagonian steppe. The households are single-family homes that were built without energy efficiency measures, presenting reinforced concrete structures, baked clay bricks, metal roofs and simple glass windows. Since 2014, a government program completely subsidized the recharge of liquefied petroleum gas (LPG) to vulnerable rural communities, which received a 200 kg gas tank and a gas heater in each household. An expected decrease in the use of firewood was observed, together

with a very high consumption of LPG (around 650 kWh/m<sup>2</sup> per year), which can be evaluated for the first time due to the current amount of LPG supplied. The lack of energy efficiency policies led to very high operating costs and environmental impacts. Based on the characteristics of the homes, we have found that LPG subsidies saved in 2.2 years would return the investment for thermal insulation that would reduce gas consumption by 50% and substantially improve comfort.

**Keywords:** biomass, households, energy transition, energy efficiency, LPG.

## **ANALISIS DE LA HUELLA DE CARBONO EN PLACA DE REVESTIMIENTO RESUELTAS CON SCRAP**

**Vanesa Saez<sup>1,2</sup>, Beatriz Garzon<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Concejo Nacional de Investigaciones Científicas y Térmicas (CONICET)

<sup>2</sup>Facultad de Arquitectura y Urbanismo- Universidad Nacional de Tucumán (FAU-UNT). Tucumán  
C.P. 4000 - Tel. 00 54 (381) 436-4093 - e-mail: [vanesaez@gmail.com](mailto:vanesaez@gmail.com), [bgarzon06@gmail.com](mailto:bgarzon06@gmail.com)

*Recibido 14/08/19, aceptado 22/10/19*

**RESUMEN:** En este trabajo se aborda el análisis de la Huella de Carbono del prototipo en estudio por nuestro equipo de investigación: Placa de Revestimiento resuelto con scrap de Poliestireno Alto Impacto (PAI), en las etapas que abarca su fabricación “de la cuna a la fábrica”.

El objetivo es determinar la Huella de Carbono, es decir, la cantidad kg CO<sub>2</sub> equivalente (eq) que se emiten al ambiente en la fabricación del prototipo diseñado, y poder aproximarnos a evaluar sus propiedades ecológicas.

La metodología utilizada será la propuesta por la Norma ISO 14040, en las siguientes etapas: Objetivo y Alcance del estudio, Análisis del Inventario, Análisis del Impacto, Interpretación.

Los resultados obtenidos en el cálculo de la huella de carbono, son muy alentadores. Por cada m<sup>2</sup> producido del prototipo en estudio se emite al ambiente 9,27E +00 kg CO<sub>2</sub> eq. Estos nos permiten seguir avanzando en las mejoras del elemento diseñado quedando para un próximo trabajo ampliar más el estudio del ACV y mejorar la “coefectividad” del producto.

**Palabras clave:** Residuo industrial, reciclaje, elemento constructivo, impacto ambiental.

### **INTRODUCCION:**

En este trabajo se aborda el análisis de la Huella de Carbono (HdC) del prototipo en estudio por nuestro equipo de investigación: Placa de Revestimiento (PR) resuelto con scrap de Poliestireno Alto Impacto (PAI), en las etapas que abarca su fabricación “de la cuna a la fábrica”. Los residuos sólidos urbanos y el scrap de las industrias de la provincia de Tucumán, especialmente los plásticos, son objeto de estudio en nuestro grupo de trabajo. Se considera material viable para reemplazar materia prima virgen en la producción de elementos constructivos. Los diseños y propuestas con las que trabaja el equipo de investigación tienen como objeto, reducir la cantidad de residuos plásticos los cuales, tienen como destino final el relleno sanitario, alargar la vida útil de los mismo y generar nuevos materiales, bajo el concepto de “upcycling”: proceso de convertir materiales de desecho o productos inútiles en nuevos materiales o productos de igual calidad o mejor. (Departamento de Sostenibilidad y Responsabilidad Social de Knauf de España, 2013).

El equipo de trabajo realizó un prototipo de PR, resuelto en scrap de PAI, residuo proveniente de la elaboración del envase de una golosina, producida por una industria local que opera a nivel nacional e internacional con lo cual, se considera dentro de la categoría de grandes generadores de residuos. El PAI, al ser reciclado no pierde sus propiedades originales, es decir, constituye lo que se denomina un material 100% reciclable. En este caso en particular por tratarse de scrap o remanente pie de máquina, se reconoce otro beneficio que pertenece a la etapa de su reciclado mecánico, el ser material limpio y no estar contaminado o mezclado con otro material, facilita el proceso de recuperación y preparación del mismo, reduciendo actividades y en efecto, ahorrando energías y disminuyendo las cargas ambientales por emisión de CO<sub>2</sub>. La elaboración del elemento constructivo trata de ajustarse al concepto de “material sustentable”, aquel cuyo proceso de extracción, manufactura, operación y disposición final tiene un impacto ambiental bajo o inexistente “sustentabilidad ambiental” (Alvarez y Ripoll Meyer, 2018). Por lo tanto, se comienza con los primeros estudios del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) del prototipo según Norma ISO 14040, 14041, 14042, 14043 (Antón Vallejo, 2004). Se

comienza con el análisis de la HdC siendo el cálculo más apropiado para medir los impactos negativos, relacionado directamente al calentamiento global que genera el ciclo de vida de un producto. El objetivo del presente trabajo es determinar la HdC, es decir, la cantidad kg CO<sub>2</sub> eq que emiten al ambiente la fabricación del producto diseñado, y poder aproximarnos a evaluar sus propiedades ecológicas, en su periodo de fabricación. Para una mejor valoración de los resultados obtenidos, se realiza una comparativa con materiales constructivos de similar uso en la obra, producidos con materia prima virgen, no renovables.

## METODOLOGÍA:

La metodología propuesta para la elaboración de este estudio es la sugerida por la normativa ISO 14040, 14041, 14042, 14043 para el desarrollo del ACV, según la interpretación de (Antón Vallejo, 2004), la cual plantea dividirse en cuatro fases: alcance del estudio, análisis del inventario, análisis del impacto e interpretación, esta última refleja los resultados y discusión del presente trabajo. La metodología permite analizar las distintas fases del ciclo de vida de un material denominado también de la “cuna a la tumba” e interpretar las distintas categorías de impactos negativos generados al ambiente y los seres vivos, como así también permite hacer foco y seleccionar solo algunas etapas y una o más categorías de impactos, dependiendo de los datos que se necesiten cotejar para evaluar el producto. En este caso, se hará un análisis acotado de ACV del elemento constructivo, por lo que se trata de un prototipo en estudio, del cual se manejan los datos referidos a las etapas donde prima la Energía Incorporada (EI) para la fabricación del producto y el transporte de la materia prima. Se trabajó en articulación con el Centro de Interpretación Ambiental y Tecnológica (CIAT) de Tafí Viejo, Tucumán, el cuál proporcionó datos relevantes para el estudio del caso, suministró el material Scrap de PAI, nos facilitó sus instalaciones y maquinarias.

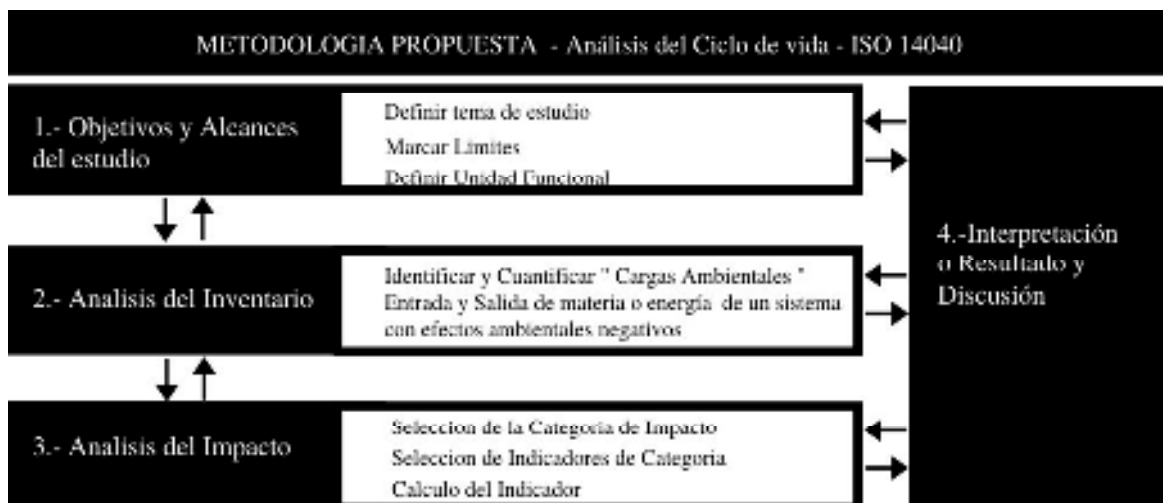


Figura 1: Interpretación de la Metodología ISO 14040. Fuente: Elaboración propia

### 1.-Alcance del caso de estudio

Proporcionar datos cuantitativos de una de las categorías de impacto: Indicador Cambio Climático (ICC), mediante el cálculo de la HdC, es decir, obtener la cantidad de kg CO<sub>2</sub> eq que se emite al ambiente durante la elaboración de PR resuelta con material scrap de PAI. El límite establecido para el estudio del caso es: “de la cuna a la fábrica”. Se define mediante 3 fases del diagrama del ACV: I) Recuperación, II) Preparación de la Materia, III) Diseño y Producción. La unidad funcional considerada para este análisis será de 1 m<sup>2</sup>.

Al tratarse de un material nuevo obtenido desde el residuo que genera la producción de otro producto, en la figura 2 en la parte superior del gráfico se muestra el diagrama de ACV del envase realizado con PAI siendo esta su función original, definida su situación actual en el marco de una economía lineal basada en «tomar, hacer, desechar»y luego en la parte inferior del gráfico se presenta la situación propuesta por el equipo de trabajo, recuperar el desecho de otra cadena de producción y generar un producto desde la perspectiva de una economía circular «tomar, hacer, reintegrar».



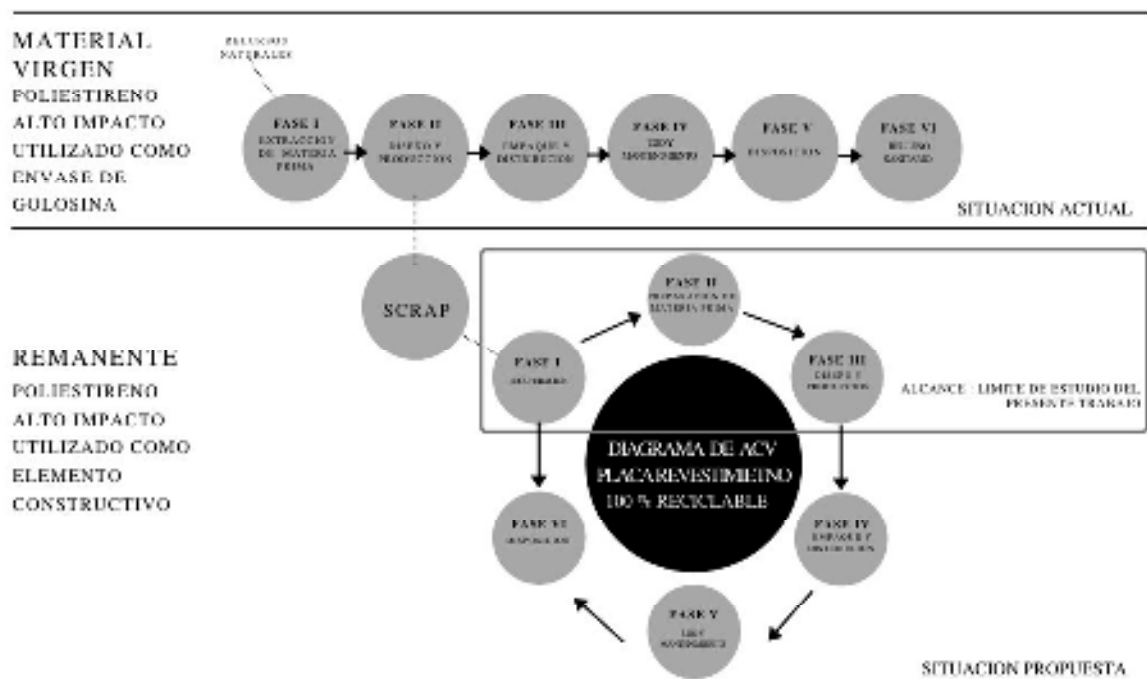


Figura 2: Situación actual y situación propuesta para el scrap de PAI. Fuente: Elaboración propia.

## 2. Análisis del Inventario:

De acuerdo a los límites establecidos en el apartado anterior, se procede a identificar y cuantificar las “cargas ambientales”, es decir, las entradas de materia y energía que se generan en las tres etapas del ACV analizadas en este trabajo. Delimitadas en el concepto de la “cuna a la Fabrica” se cuantifica lo que Quispe Gamboa (2016) define como “Energía Incorporada” (EI) correspondiente a la energía consumida para el transporte y fabricación del elemento constructivo por cada metro cuadrado de construcción (Alvarez y Ripoll Meyer, 2018).

A continuación, se presenta en la Tabla 1 las actividades desarrolladas en cada etapa, diferenciado las mas relevantes a tener en cuenta para el cálculo de la energía consumida las cuales se traducirán en emisiones depositadas en el ambiente.

Análisis del Inventario		
Fase I	Fase II	Fase III
RECUPERACION SCRAP de PAI	PREPARACIÓN SCRAP de PAI	DISEÑO Y PRODUCCION
<ul style="list-style-type: none"> <li>Traslado de scrap de PAI (*)</li> </ul> <p><b>Tramo N°1 :</b> De la industria en Lules, Tucumán a la planta de separación residuos sólidos CIAT en Tafí Viejo, Tucumán.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Acopio y ubicación del material</li> <li>Molienda fina (*)</li> <li>Embalaje del material PAI triturado</li> <li>Traslado de Scrap Preparado (*)</li> </ul> <p><b>Tramo N°2:</b> De la Planta de Separación (TF), Tucumán a centro de producción la FAU-UNT-CONICET</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Diseño del prototipo</li> <li>Calentamiento del Horno (*)</li> <li>Colocación de desencofrante al molde</li> <li>Colocación del material al molde</li> <li>Cocción de las unidades (*)</li> <li>Enfriamiento de las piezas</li> <li>Desmolde</li> </ul>

(\*) Actividades a considerar para el cálculo.

Tabla 1: Actividades definidas en cada etapa del análisis. Fuente de elaboración propia

### Fase I: Recuperación de Scrap de PAI

El scrap de PAI, se obtiene de una industria alimenticia ubicada en el municipio de Lules, Tucumán. Este remanente que queda al pie de máquina, se genera en el proceso de envasado de una golosina. Se obtienen (6000 kg)<sup>1</sup> de scrap de PAI al mes, el mismo es un material limpio, sin contaminación con otras sustancias a diferencia del plástico post-consumo y no está mezclado con otros tipos de plásticos, (Ecoplast, 2019). Se lo recoge y queda contenido en bolsas big bag de 1500kg, las cuales se envían al CIAT en el municipio de Tafí Viejo, Tucumán. El traslado se realiza una vez al mes con la totalidad del material, en un camión chasis de 2 ejes simple, con un consumo promedio de 6 Km/l. La distancia del recorrido, identificada como tramo n°1 en el inventario Tabla 1 es de 33 km. El análisis de inventario del caso de estudio, considera como dato relevante a tener en cuenta para el posterior cálculo, el consumo de energía líquida (EL) Gasoil unidad de medición litros (l) realizado por el transporte. En la tabla 2 se detalla el consumo en (l) de gasoil que se obtiene por el recorrido del tramo 1.

<b>Consumos Energéticos Fase I: Recuperación de scrap de PAI</b>					
Proceso	Característica	Tipo Energía	Consumo	Incidencia p/ 1(un) m <sup>2</sup> o 10 kg	Unidad
Traslado del scrap	Tramo 1 33 km	Gasoil	5,5 E + 00	9,1 E - 04	l

Tabla 2: Actividad considerada para el cálculo fase I. Fuente: Elaboración propia.

### 2.2 Fase II: Preparación del Scrap de PAI

El material a reciclar llega al CIAT, donde se descarga y se ubica mediante un Transpallet Manual cerca del molino triturador de plástico. El molino funciona con Energía Eléctrica (EE) unidad de medición KWh, capacidad de procesamiento 350 a 450 kg/h motor 20 caballos de fuerza. Luego queda el material preparado en big bag de 1500 kg. La actividad que se considera relevante a nivel de gasto energético en esta etapa, es el triturado del plástico. Posteriormente se procede al traslado de la materia preparada en el CIAT, hacia el lugar de la producción del prototipo FAU-UNT- CONICET, en la capital de la provincia. Este recorrido se lo denomina en la tabla 1 como tramo 2, se consideró la utilización del mismo vehículo de traslado, que en el tramo 1, y la distancia efectuada es de 16 km. En la tabla 3 se detalla el consumo en KWh que genera la trituración de 6000 kg, (cantidad total recibida por el CIAT en el transcurso de 1 mes), el consumo de energía incidente en la trituración de 10 kg de PAI, cantidad que se necesita para realizar un m<sup>2</sup> de prototipo, así como también los litros de gasoil utilizado para el recorrido del tramo 2 y su incidencia en la unidad funcional del trabajo.

<b>Consumos Energéticos Fase II: Preparación de scrap de PAI</b>					
Proceso	Detalle	Tipo Energía	Consumo	Incidencia p/ 1(un) m <sup>2</sup> o 10 kg	Unidad
Trituración Fina	13 horas	Eléctrica	195 E+00	0,325 E + 00	KWh
Molino 20 HP	6000 kg				
Traslado del scrap de PAI	Tramo 2 16 km	Gasoil	2,8 E+00	4,66 E - 04	l

Tabla 3: Actividades consideradas para el cálculo de la Fase II. Fuente: Elaboración propia.

### 2.3 Fase III: Diseño y producción del Prototipo

Luego de diseñar el prototipo, se comenzó la experimentación de su materialización hasta obtener la propuesta superadora del mismo con las siguientes características:

<sup>1</sup> Datos proporcionados por el Centro de Interpretación Ambiental y Tecnológica, Tafí Viejo, Tucumán.

a.- Dimensiones por unidad: 200 mm x 200mm x 20 mm; b.- Peso unitario: 400 g.

La cantidad de unidades necesarias de placas para conformar la unidad funcional determinada en 1 m<sup>2</sup> es de 25 piezas, con un valor total de peso unitario de 10 kg. La fase de diseño no se toma a consideración en el cálculo de energía consumida, si se toman los datos físicos del elemento producido. El proceso de producción se realizó por termo moldeo, se utilizó un horno eléctrico, Marca Hornos Simcic, ModeloHSP-30, Voltaje220V, Capacidad del horno 30 litros, temperatura máxima 1300 °C, Potencia 3 kW, consumo por hora de horneado 1,5 KWh. En la tabla 4 se detalla un gasto energético de 0,5 KWh para el calentamiento del horno realizado en 20 minutos y 2,5 KWh para la cocción de 25 placas en un periodo de tiempo de 100 minutos.

Consumos Energéticos Fase III: Diseño y producción				
Proceso	Detalle	Tipo Energía	Consumo	Unidad
Calentamiento del horno	20 minutos	Eléctrica	0,5 E + 00	KWh
Cocción del PAI 25 placas	100 minutos	Eléctrica	2,5 E + 00	KWh

Tabla 4: Actividad considerada para el cálculo en la Fase III. Fuente: Elaboración propia.



Figura 3: Imágenes de las diferentes etapas de estudio. Fuente: Elaboración propia

### 3. Análisis del Impacto

La categoría de impacto elegida para este análisis es el Cambio Climático (CC) o sus siglas en inglés CCI (Climate Change Indicator) proveniente del calentamiento global, considerada una de las 7 amenazas más severas para el planeta por el programa ambiental definido por las Naciones Unidas en la reunión de Nairobi, Kenia 1992.

Con el cálculo de la HdC, se propone cuantificar CC de nuestro prototipo. En la tabla 5, se detalla el consumo de combustible por tramo, se considera la incidencia que tiene en un m<sup>2</sup> de material, se obtiene el total de consumo de EL Gasoil en litros y se convierte mediante el (Factor de Emisividad para Gasoil)<sup>2</sup> en la cantidad de Kg CO<sub>2</sub> eq que ésta energía fósil emite al ambiente para la producción del prototipo.

<sup>2</sup> Datos proporcionados por: United Kindon Government (Departament for Bussines, Energy & Industrail Strategy, 2017). <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2017>

Total de Consumos Gasoil Etapa I y II							
Proceso	Detalle	Tipo de Energía	Consumo	Incidencia p/ 1(un) m <sup>2</sup> o 10 kg	Unidad	Factor de Emisividad	Unidad
Traslado del Scrap 6000 kg	Tramo 1 33 km	Gasoil	5,5 E + 00	9,1E -04	1	2,8	Kg CO <sub>2</sub> eq
Traslado del Scrap 6000 kg	Tramo 2 16 km	Gasoil	2,8 E + 00	4,66 E -04	1	2,8	Kg CO <sub>2</sub> eq
<b>Total</b>				1.38 E -03	1	3,87 -03	Kg CO <sub>2</sub> eq

Tabla 5: Conversión de datos a su equivalente en Kg CO<sub>2</sub>. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 6, se detalla el total de consumo de Energía Electrica en KWh, luego se convierte con el (Factor de Emisividad para consumo de EE)<sup>3</sup>, en la cantidad de Kg CO<sub>2</sub> eq que genera y emite al ambiente la producción del prototipo.

Total de Consumos EE Etapa II y II							
Proceso	Detalle	Tipo de Energía	Consumo	Incidencia p/ 1(un) m <sup>2</sup> o 10 kg	Unidad	Factor de Emisividad	Unidad
Trituración Fina	13h= 6000kg	Eléctrica	195	0,325	KWh	2,79	KgCO <sub>2</sub> eq
Cocción del PAI	2h= 25 placas	Eléctrica	3	3	KWh	2,79	KgCO <sub>2</sub> eq
<b>Total</b>				3,325	KWh	9.27675	KgCO <sub>2</sub> eq

Tabla 5: Conversión de datos a su equivalente en Kg CO<sub>2</sub>. Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizada la conversión de los datos a su equivalente en Kg CO<sub>2</sub>, se procede a volcar los datos en la fórmula que nos determinará el ICC de nuestra propuesta.

$$CCI : \sum GWP * m_i = Kg CO_2 eq \quad (1)$$

$$CCI : 1 * 3,87E -03 + 1 * 9.27675 E +00 = 9.2765 E + 00 Kg CO_2 eq \quad (1)$$

donde:

CCI: Climate Change Indicator o Indicador del Cambio Climático

GWP: Global Warming Potencial o Potencial Calentamiento Global = 1 (horizonte temporal de 100 años )<sup>4</sup>

m<sub>i</sub>: Substancia del tipo de energía expresada en KG CO<sub>2</sub> eq





<sup>3</sup> Datos proporcionados por: United Kingdom Government (Departament for Bussines, Energy & Industrail Strategy, 2017). <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2017>

<sup>4</sup> Datos proporcionados por: (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)) <https://archive.ipcc.ch/index.htm>

## RESULTADOS Y DISCUSION

### *Interpretación de la metodología propuesta*

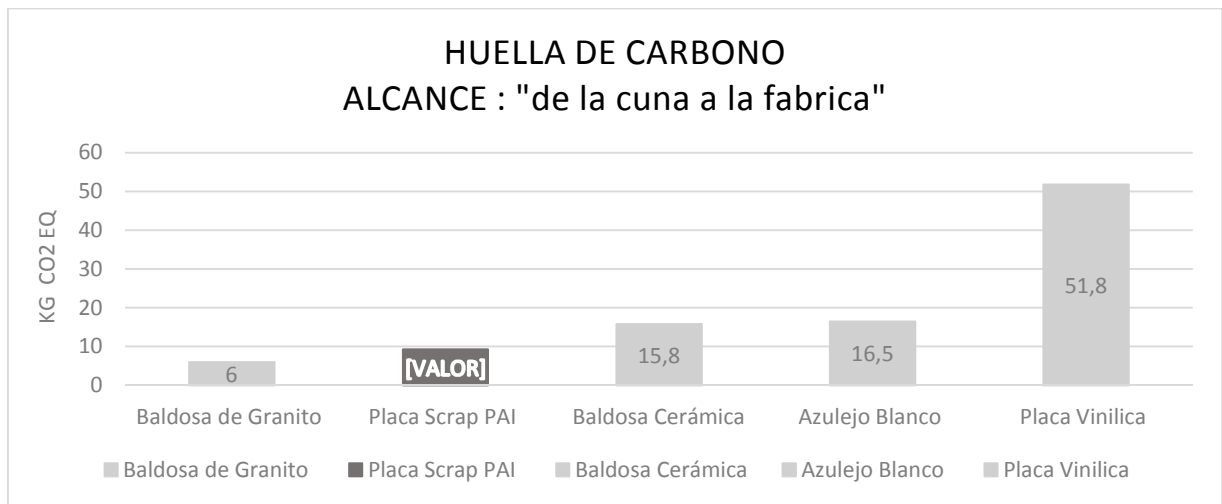
Los resultados obtenidos en el cálculo de la HdC, son muy alentadores. Por cada m<sup>2</sup> producido de PR de scrap de PAI se emite al ambiente 9,2765 E +00 kg CO<sub>2</sub> eq. Para una mejor comprensión y valoración del mismo, se realiza un análisis comparativo con elementos constructivos que prestan la misma función en una obra. Para la realización de la comparativa de la HdC de los diferentes productos constructivos que participaron en el estudio, se seleccionaron Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) vigentes y avaladas por entidades Administradoras de Programa, nacionales e internacionales, de este tipo de ecoetiquetas tipo III. (Centro tecnológico del Granito de Galicia España, 2019) En esta comparativa los valores de huella de carbono se refieren a un alcance de “Cuna a la fábrica” de todos los productos seleccionados. Queda excluido el gasto energético de la obtención y transporte de la materia prima virgen, objeto de un próximo estudio. A continuación, se muestran en la tabla 7 cada tipo de elemento constructivo, indicando materia prima, usos y su carga ambiental referida a su huella de carbono.

	BALDOSA DE GRANITO	PLACA SCRAP PAI	BALDOSA CERÁMICA	AZULEJO BLANCO	PLACA VINÍLICA
<b>MODELO</b>	FUNDACIÓN CENTRO TECNOLÓGICO DEL GRANITO DE GALICIA (CTG)	PROTOTIPO EN ESTUDIO	SERANIT	COLORKER	KARNDEAN DESIGN FLOORING
<b>MATERIA PRIMA (MP)</b>	Granito	Scrap Poliestireno Alto Impacto	Arcilla, pegmatita y arena de sílice, pueden incluir otros materiales tales como alúmina, dolomita, bario y calcita.	Arcilla, feldespato y arena con una capa de esmalte compuesto por feldespato, carbonato, silicatos, caolín y otros	Carbonato de calcio ( piedra caliza) , cloruro de polivinilo , plastificantes , aditivos.
<b>USO</b>	Revestimiento Paredes y Techos	Revestimiento Paredes	Revestimiento de superficies verticales.	Revestimiento Paredes	Pisos y Revestimientos interiores
<b>Fuente DAP</b>		FAU-UNT CONICET			
<b>CCI KG CO<sub>2</sub></b>	6,0 E + 00	9,2765 E + 00	15,8 E + 00	16,5 E + 01	51,8 E + 00

*Tabla 7: CCI de elementos constructivos similares pero fabricados con materiales diferentes.*

*Fuente: Elaboración propia con base de datos del CTG.*

En la Tabla 7, se observa que el prototipo en estudio se ubica en el segundo lugar dentro de los productos con más baja emisión de gases al ambiente. Se ubica con el valor más bajo la Placa de Granito con 6,00E+00 Kg CO<sub>2</sub> eq, Sin embargo, si se hubiera tenido en cuenta la extracción y transporte de la materia prima, lo valores generados por la Placa granítica se elevarían por ser un producto fabricado con materia prima virgen, al igual que los otros productos de la comparativa, en contraposición al caso de estudio el cuál, incluye en el presente cálculo sus cargas ambientales por la obtención de material. (fase I detallada en el análisis de inventario ver Tabla 1). En cuanto a los demás materiales comparados, se observa que superan al valor resultante del prototipo generado por este equipo de trabajo: la Baldosa Cerámica en 75%, el Azulejo Blanco en 80% y la Placa Vinílica en 558%.



*Figura 4: Potencial de Calentamiento Global de diferentes elementos constructivos.  
Fuente: Elaboración propia.*

## CONCLUSIÓN

Realizar el análisis de HdC a un producto permite identificar problemas u oportunidades para mejorar los aspectos ambientales del mismo. En el presente trabajo, se consiguen como resultado los siguientes valores: a.- consumo de EL por un total de  $1.38 \text{ E } -03$  litros incidentes en un  $\text{m}^2$  de producción y corresponde a  $3,87 \text{ E } -03 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$  y b.- consumo de EE por un total de  $3.35 \text{ E } +00 \text{ KWh}$  incidentes en un  $\text{m}^2$  de producción y corresponden a  $9.27675 \text{ E } +00 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$ , c.- Valor del cálculo de la HdC, objeto de este trabajo, un valor total de  $9.2765 \text{ E } +00 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$ . Se detecta que la EE, es la energía que más se consume en las etapas analizadas, por lo cual, la utilización parcial o completa de energías renovables en la Etapa III, es un recurso viable para poner disminuir la HdC del producto analizado. En los resultados obtenidos en la comparativa con productos similares con mismo uso en la obra, se observa la importancia de reciclar los plásticos en relación a la utilización de materia prima virgen, la Placa Vinílica arroja los valores más altos y con diferencias mayores a un 500% en comparación de nuestro prototipo.

Los resultados obtenidos en el cálculo de la HdC, son muy alentadores. Estos nos permiten seguir avanzando en las mejoras del elemento diseñado quedando para un próximo trabajo, ampliar el estudio del ACV, y mejorar la "ecoefectividad" del prototipo, es decir, su relación con la naturaleza y seres humanos. Así como también, si su elaboración y distribución es económicamente viable mediante la elaboración de su Cadena de Valor.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Centro de Interpretación Ambiental y Tecnológico (CIAT) de Tafi Viejo, Tucumán porque proporcionó datos relevantes para el estudio del caso, suministró el material scrap de PAI, nos facilitó sus instalaciones y maquinarias para la etapa II.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alvarez A. y Ripoll Meyer V. (2018). Matriz de referencia para la optimización del ciclo de vida de los materiales constructivos de la vivienda social en zona árido-sísmicas). Hábitat Sustentable, 52-63.
- Antón Vallejo, A. (2004). Utilización del Análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo. Tesis Doctoral. España: Universidad Politecnica de Catalunya.
- Ecoplast [en línea]. Entidad técnica profesional especializada en plásticos y medio ambiente. Dirección URL: <<http://ecoplas.org.ar/pdf/9.pdf>. > [consulta: 15 de julio de 2019]

- Ecoplast [en línea]. Entidad técnica profesional especializada en plásticos y medio ambiente. Dirección URL: < <http://ecoplas.org.ar/pdf/11.pdf> > [consulta: 15 de julio de 2019]
- UK Government [en línea]. Department for Business, Energy & Industrial Strategy. United Kingdom Dirección URL: < <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2017> > [consulta: 15 de julio de 2019]
- Knauff [en línea]. Departamento de Sostenibilidad y Responsabilidad Social de Knauf de España, 2013). Dirección URL: < <https://www.interempresas.net/Reciclaje//Articulos/109556-Reciclaje-y-cierre-del-ciclo-de-vida-de-las-placas-de-yeso-laminado.html> > [consulta: 15 de julio de 2019]
- CTG [en línea]. Centro tecnológico del Granito de Galicia. Dirección URL: < <https://www.litonline.com/es/article/el-granito-y-su-baja-huella-de-carbono-frente-otros-productos-constructivos> > [consulta: 10 de agosto de 2019]
- IPCC [en línea]. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Dirección Dirección URL: < [https://archive.ipcc.ch/home\\_languages\\_main\\_spanish.shtml](https://archive.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml) > [consulta: 15 de julio de 2019]

## **CARBON FOOTPRINT ANALYSES OF COATING PLATES RESOLVED WITH SCRAP**

**ABSTRACT:** This paper deals with the analysis of the carbon footprint of the prototype under study by our research team: Research Plate solved with High Impact Polystyrene scrap (PAI), in the stages covered by its manufacture "from the cradle to the factory".

The objective is to determine the Carbon Footprint, that is, the amount kg CO<sub>2</sub> equivalent (eq) that is emitted to the environment in the manufacture of the designed prototype, and be able to approximate to evaluate its ecological properties.

The methodology will be the one proposed by the ISO 14040 Standard, in the following stages: Objective and Scope of the study, Inventory Analysis, Impact Analysis, Interpretation.

The results obtained in the calculation of the carbon footprint are very encouraging. For each m<sup>2</sup> produced of the prototype under study, 9.27E +00 kg CO<sub>2</sub> eq is emitted into the environment. These allow us to continue advancing in the improvements of the designed element, leaving for the next work to further expand the study of LCA and improve the "eco-effectivity" of the product.

**Keywords:** Industrial waste, recycling, construction element, environmental impact.



## **GENERACIÓN Y ALMACENAMIENTO DISTRIBUIDOS DE ENERGÍA ELÉCTRICA COMO HERRAMIENTAS DE FLEXIBILIDAD PARA EL SISTEMA ENERGÉTICO DE LA PROVINCIA DE MENDOZA: ANÁLISIS BASADO EN EL MODELO LEAP**

**Andrés O. Benito<sup>1</sup>, Alejandro P. Arena.**

Grupo CLIOPE, UTN, FRM J. Rodríguez 273, Mendoza, Pcia. de Mendoza, Argentina, Tel: +54-261-5244693, andresbenito@frm.utn.edu.ar, aparena@frm.utn.edu.ar.

*Recibido 16/08/19, aceptado 24/10/19*

**RESUMEN:** En este trabajo, se simula mediante del modelo LEAP (Long-range Energy Alternatives Planning), a nivel regional y a largo plazo, el rol del almacenamiento de electricidad como herramienta de flexibilidad tendiente a mejorar la paulatina integración de fuentes renovables de energía variables al sistema eléctrico de la provincia de Mendoza; entre otros, consideramos los sistemas de generación centralizados y distribuidos con tecnología fotovoltaica, teniendo en cuenta la variabilidad temporal de la fuente. Se incluye el almacenamiento de energía diario vinculado a los vehículos eléctricos (con baterías de ion-litio) en su concepción de inyección a la red (V2G). En los resultados alcanzados se observa que, con las tasas de incorporación, tanto de vehículos eléctricos, como de instalaciones fotovoltaicas distribuidas, no se aprecian variaciones considerables por su inserción al sistema eléctrico. Por el contrario, se mejoran los indicadores medioambientales. Estos hallazgos sugieren la necesidad de abordar un enfoque de optimización.

**Palabras clave:** energía solar, vehículos eléctricos, planificación energética, simulación

### **1. INTRODUCCION**

La búsqueda de un desarrollo energético sustentable es la razón de ser de la planificación energética, entendiéndose que el resultado de ésta es alcanzar un plan que tenga los beneficios necesarios para guiar las actividades y recursos de un sistema energético, especialmente durante tiempos de elevada incertidumbre, entendiéndose dicho sistema como el conjunto de actividades mediante las cuales las distintas fuentes de energía se producen, transportan, transforman, distribuyen y consumen para satisfacer determinadas necesidades energéticas de los sectores socio-económicos a los que está ligado. De este modo, la formulación del plan energético objetivo de dicha planificación requiere de un análisis prospectivo donde se modelen escenarios que contengan, dentro de límites racionalmente aceptables, la trayectoria futura del sistema y particularmente la evolución de los requerimientos de energía a nivel del consumo final y por lo tanto a nivel de generación de la energía relacionada.

Haciendo foco sólo en los requerimientos de energía eléctrica, diversas son las posibilidades que permiten una mejor integración de generación de energía a partir de fuentes renovables de energía al sector energético, tanto en su concepción centralizada como distribuida, tomando al mismo tiempo en consideración, su variabilidad dependiente de las condiciones geográficas, estacionales y climáticas (Grossi Gallegos, H. y Righini, R., 2007), (Grossi Gallegos H., 1998b).

Por otra parte, el almacenamiento de energía en forma de electricidad puede representar un modo de acumular energía cuando ésta está disponible en condiciones técnico-económicas convenientes (por ejemplo, ante una diferencia de precios), para utilizarla nuevamente cuando sea necesaria. El almacenamiento de energía eléctrica también tiene el potencial de mejorar la eficiencia y confiabilidad de la red, optimizando los flujos de energía y complementando la generación de energía a partir de fuentes renovables (Parfomak, 2012). Las particularidades técnicas de diferentes tecnologías de almacenamiento se desarrollan en (Akhil et al., 2013). Existen diversos factores que podrían favorecer el desarrollo del almacenamiento energético, en este sentido (Sioshansi et al., 2012) y (Denholm y Hand, 2011) han estudiado cuestiones técnicas, así también como las barreras políticas que experimenta la evolución de aplicaciones de almacenamiento dentro de los mercados energéticos.

Por lo antedicho, hemos centrado el desarrollo de este artículo en el rol que juega el almacenamiento de energía en la construcción de escenarios a largo plazo (análisis prospectivo) a nivel regional, ya que este particular no se ha estudiado en profundidad hasta ahora. Particularmente, elegimos concentrarnos sólo en el uso de las tecnologías de baterías de ion-litio asociadas al alto potencial de desarrollo que tienen de la mano del cada vez mayor uso y difusión de los vehículos eléctricos.

Cabe destacar, que el almacenamiento de electricidad tiene el potencial de generar grandes cambios en el sector transporte, ya que los vehículos eléctricos son una alternativa a los que funcionan con combustibles fósiles. Al mismo tiempo, las baterías de los vehículos eléctricos pueden usarse para aplicaciones de inyección de energía a la red, comúnmente denominadas por el acrónimo “V2G”, derivado de sus siglas en inglés de Vehicle To Grid, lo cual tiene algunas restricciones operativas y de uso específicas, por ejemplo, la disponibilidad de dicha energía en un momento determinado y las necesidades de utilizar el vehículo como medio de movilidad. Sin embargo, los intercambios de electricidad entre consumidores y prosumidores son un área de continuo crecimiento.

Para realizar el análisis conjunto y mutuamente dependiente de lo anteriormente mencionado, deben utilizarse modelos computacionales, los cuales son herramientas desarrolladas para analizar los sistemas energéticos de forma integral. En esta línea, diversos modelos han sido desarrollados con propósitos particulares (Gargiulo, M. y Gallachóir, B., 2013), así, algunos de ellos son adecuados para analizar sólo una porción del sistema y otros para analizar su totalidad (Suganthi, L. y Samuel, A., 2012); (Keirstead, J; Jennings, M. y Sivakumar, A., 2012); (Evans, J. & Hunt, L. C., 2009). Otro aspecto relevante, es que el análisis prospectivo suele realizarse a nivel nacional, por ende, este ejercicio raramente se lleva a cabo en niveles geográficos inferiores como las provincias de un país, sino que éstas sólo se limitan a adherirse en mayor o menor medida a las políticas estatales del país del que forman parte. Como antecedentes dentro de Argentina se pueden mencionar las iniciativas de la Provincia de Entre Ríos (Tito Murgia et. al., 1980), de la Región Noreste (NEA) (Programa de Estudios Energéticos Regionales de Argentina, 1990) y de la Provincia de Mendoza (Matriz Energética Provincia de Mendoza, 2007).

Nuestro objetivo es lograr una representación explícita de los desafíos de integración de las fuentes renovables de energía y de las opciones de flexibilidad mencionadas anteriormente, al sistema energético de la provincia de Mendoza, mediante la utilización del modelo de simulación energética a largo plazo Long-range Energy Alternatives Planning (LEAP) o modelo de Planificación de Alternativas Energéticas de Largo Plazo, según su traducción al español, el cual es probablemente el más conocido y utilizado con fines de planificación en los países en vías de desarrollo (Huang, Y., Bor, Y. J., & Peng, C. Y., 2011); (McPherson, M., & Karney, B., 2014); (Emodi, N. V, 2017); (Sadri, A. et al, 2014).

## **2. EL SECTOR ELÉCTRICO DE MENDOZA**

### **2.1. Estructura del Sector Generación**

De acuerdo a los datos oficiales reportados al 31 de diciembre del 2018 (CAMMESA, 2018), la provincia de Mendoza posee una potencia instalada total de 1.440,00 MW, los cuales se distribuyen de forma porcentual según como sigue: 41,24% Térmica (25,99% Ciclos Combinados, 4,14% Turbinas a Gas, 8,33% Turbop vapor, 2,78% Motor Diesel), 53,64% Hidráulica No Renovable (>50 MW) y 5,13% Hidráulica Renovable (<50 MW), conjunto que en dicho periodo generó en total 4.851.824 MWh, hidroeléctrica más térmica. En la Figura 1, se aprecia gráficamente la generación mensual del año 2018, térmica e hidroeléctrica, tanto en MW-h (Figura 1a) como en términos relativos (%) (Figura 1b). Dicha oferta de energía, implicó un consumo de combustible total a lo largo del año 2018 de 628.023 Dam3 de Gas Natural y de 9.538 Toneladas de Fuel Oil.

#### **2.1.1. Generación Distribuida**

A partir de marzo del año 2015 la provincia de Mendoza, a través de su ente regulador eléctrico (EPRE, Ente Provincial Regulador Eléctrico) resolvía en su Resolución N° 019/15 el Reglamento de las Condiciones Técnicas para la Operación y Facturación de Excedentes de Energía Volcados a la Red Eléctrica de Distribución. Posteriormente a nivel nacional se sanciona la ley 27.424: Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable Integrada a la Red Eléctrica Pública, a la

cual la provincia de Mendoza adhiere. Esta, establece la obligación de los prestadores del servicio público de distribución de facilitar dicha inyección, asegurando el libre acceso a la red de distribución, sin perjuicio de las facultades propias de las provincias.

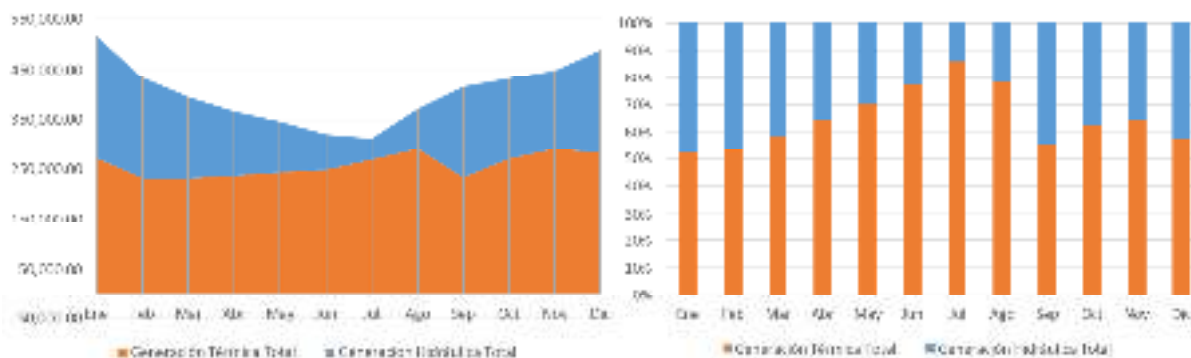


Figura 1: a) Generación Hidroeléctrica y Térmica de Mendoza. Valores Mensuales en [MWh]. Año 2018. b) Generación Hidroeléctrica y Térmica de Mendoza. Participación [%] Mensual. Año 2018

Desde el 12 de agosto de 2016, fecha en que se habilitó el primer Usuario-Generador de la provincia a la actualidad, se han incorporado anualmente como Usuarios-Generadores la cantidad de instalaciones y consecuente Potencia DC que se observan en la Figura 2 (EPRE, 2019). La simulación de los sistemas instalados, según sus características técnicas promedio, se realizó con el programa System Advisor Model Version 2018.11.11-r3 (SAM 2018.11.11-r3).

## 2.3. Estructura del Sector Demanda

### 2.3.1. Demanda de Energía Eléctrica

La caracterización del sector Demanda de energía eléctrica de la provincia de Mendoza se cuantificó con la información reportada por la Dirección de Estadísticas e Investigaciones Económicas (DEIE, 2018) de la provincia de Mendoza, de donde se puede discriminar: Residencial (1.562.096 MW-h), Grandes Demandas (2.491.507 MW-h), General (incluye las categorías Pequeños Comercios, Pequeña Industria, Asociaciones Civiles, Servicio Sanitario, Oficial y Tarifas transitorias) (455.171 MW-h), Riego Agrícola (508.491) y Alumbrado Público (217.355 MW-h). En relación a la generación en el mismo periodo la Demanda se comportó como se observa en la Figura 3.

### 2.3.2. Demanda del Sub-Sector Transporte

Los datos de transporte relacionados en particular con el parque automotor de la provincia se obtienen de la información reportada por el Observatorio Nacional de Datos de Transporte (ONDaT, 2018), el cual informa que Mendoza a finales del 2017 poseía una cantidad total de 519.972 vehículos (se excluyen vehículos utilitarios livianos, vehículos de carga y autobuses). Luego, de acuerdo a la evolución del parque de automóviles de los últimos 12 años y a la variación inter-anual en dicho periodo, podemos estimar que el año 2018 finalizó con una cantidad total de 534.258 vehículos y una variación en alza de 2,75% respecto del 2017.

Luego la información antes indicada se cruza con lo propio reportado por la DEIE sobre la Evolución del Mercado de Combustibles en Mendoza, donde se reportan las ventas mensuales en estaciones de servicio, por tipo de combustible. A efectos de nuestro análisis hemos agregado las cantidades de Gas Oil y Naftas, indiscriminado las tipologías de gas oil (Gas Oil Grado 2 y Grado 2B) y de naftas (Nafta "Premium" de más de 95 Ron y Nafta "Súper" entre 92 y 95 Ron), encontrando que en el año 2018 se consumieron en total 358.124 m<sup>3</sup> de Gas Oil y 324.932 m<sup>3</sup> de Naftas, con una distribución mensual como la que se muestra en la Figura 4b. Para nuestro estudio hemos hipotizado que dichas cantidades de combustibles son consumidas por el parque automotor de vehículos reportados por el ONDaT.

## 2.4 Almacenamiento de Energía Eléctrica

El almacenamiento de energía eléctrica no se puede comparar con las tecnologías de generación, ya que aporta otras importantes cualidades o valores al sistema (Akhil et al., 2013; Rastler, 2010) que pueden ser clasificadas en tres aspectos.

- i. *Valor Energético:* El "valor energético" se relaciona con la gestión de la generación, basándose en una diferencia de precios ("precio diferencial") dentro de un período de tiempo. La energía eléctrica se almacena en períodos de exceso de producción (precios bajos en el mercado spot) y se produce (o vuelca a la red) durante períodos de alta demanda (precios altos).

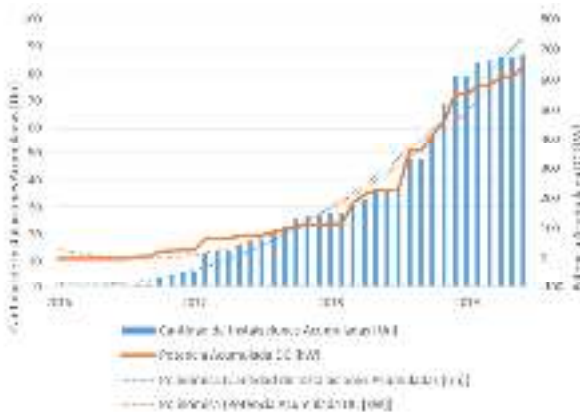


Figura 2. Crecimiento Acumulado de Instalaciones de Generación Distribuida en Mendoza. Período agosto 2016 – marzo 2019



Figura 3. Demanda y Generación de Electricidad. Mendoza. Año 2018

- ii. *Valor de Capacidad:* Una segunda característica del almacenamiento de energía eléctrica, es su capacidad de poder usarlo como una instalación de generación de respaldo, la cual puede aportar energía en los períodos de punta con precios de mercado excepcionalmente altos, tales que sean suficientes para pagar los costos fijos de las centrales de generación de punta. Esto sugeriría la posibilidad de un diseño de mercado de capacidad dedicada, posibilitando que una instalación de almacenamiento de energía eléctrica pueda reemplazar a otra de capacidad despachable en momentos de punta.
- iii. *Valor de Equilibrio:* Se supone que la tercera característica o valor ("valor de equilibrio") tiene en cuenta todas las contribuciones adicionales asociados al almacenamiento de energía eléctrica. Por ejemplo, las instalaciones de almacenamiento pueden contribuir con funciones de regulación de frecuencia, regulación de tensión y arranque autógeno o de emergencia (reinicio de una central de eléctrica aislada de red de transmisión). También pueden retrasar los flujos de inversiones económicas en la red (Poudineh y Jamasb, 2014).

#### 2.4.1. Almacenamiento Energético Distribuido

Si bien conceptualmente podríamos considerar como almacenamiento distribuido distintas aplicaciones que nos rodean diariamente, como los teléfonos celulares personales, bicicletas y otros medios de movilidad eléctricos, en este trabajo sólo se analiza la inserción paulatina de vehículos eléctricos.

Los autos eléctricos funcionan con energía eléctrica almacenada en distintos tipos de tecnologías de medios asociadas a la fuente que luego se utilizará para suministrar la energía al vehículo, por ejemplo, medios electroquímicos como las baterías recargables, medios químicos como las celdas de combustible o medios eléctricos como los ultracapacitores. Por lo antedicho, dependiendo de la fuente de energía, los vehículos eléctricos son de varios tipos, como vehículos eléctricos híbridos, con baterías, fotovoltaicos y con celdas de combustibles, entre otros (Chan CC, Chau KT, 2002), (US Department of Energy, 2003). Sin embargo, los vehículos eléctricos deben cargarse o recargarse desde la red eléctrica, lo que conlleva una demanda adicional de energía, lo que se supone un nuevo desafío para las redes eléctricas convencionales.

Tal es así, que el uso generalizado de vehículos eléctricos puede causar posibles problemas técnicos: por ejemplo, la red eléctrica puede verse perjudicada por eventos de recarga no controlados y por recargas excesivamente prolongadas en el tiempo. Además, la Demanda Agregada de Recarga debe controlarse cuidadosamente para evitar la interrupción del servicio eléctrico cuando se introduzcan al

sistema varios miles de vehículos eléctricos en un corto periodo de tiempo, como puede suceder en estacionamientos públicos o estaciones de recarga (Yagcitekkin B, et al, 2013).

Para controlar lo antes mencionado, entre otros factores también importantes, es que distintos autores plantean el uso de Sistemas Inteligentes de Gestión de Recarga de manera de poder realizar una programación y control de las situaciones de carga, que satisfaga tanto a los usuarios de los vehículos eléctricos como así también a los operadores de la red eléctrica, entre ellas se pueden mencionar alternativas diversas: (Masoum AS, et al, 2011), (Cao Y., et al, 2012), (Dallinger D, et al 2013), (Reiner U, et al, 2012), (Di Giorgio A, Liberati F, 2014), entre otras. Como puede apreciarse en los estudios de dichos autores, la recarga de autos eléctricos es un proceso complejo que requiere una estrategia más avanzada para satisfacer ciertas necesidades generales: comportamiento y expectativas de los conductores, diferentes limitaciones de la red eléctrica, consideraciones económicas y ubicación estratégica de puntos o lugares de estacionamiento con esta funcionalidad, entre otras.

### **3. METODOLOGÍA**

#### **3.1. Marco del Modelado en LEAP del Sistema Eléctrico de Mendoza**

En nuestro marco de trabajo, el sistema de simulación LEAP (Long-range Energy Alternatives Planning) se utiliza como una herramienta de modelado de contabilidad energética que iguala la demanda con la generación de energía eléctrica del lado de la oferta, describiendo los impactos del sistema, incluyendo la generación de electricidad por fuente y el potencial de emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Sobre la base del sector eléctrico de Mendoza, se desarrollan tres escenarios, para los cuales el año 2018 se utiliza como año base para todos los senderos energéticos.

El escenario BAU o Tendencial (Business As Usual por sus siglas en inglés) es un sendero energético centrado en las políticas y planes actuales de la Secretaría de Energía, dependiente del Ministerio de Hacienda de la Nación, de la Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico S.A. (CAMMESA) y a nivel provincial de la Empresa Mendocina de Energía SAPEM (EMESA, 2018). Luego el escenario REN-GD se centra en la incorporación de los parques fotovoltaicos y pequeñas centrales hidroeléctricas (PCHs) adjudicados en la edición 1.5 y 2.0 del Programa RenovAr. Al mismo tiempo, se contemplan las proyecciones de inserción de generación distribuida a partir de tecnología fotovoltaica. Por su parte, el escenario V2G se focaliza en las proyecciones de sustitución de automóviles a combustible fósil por automóviles eléctricos y cómo ésta tecnología puede ser utilizada como una herramienta de almacenamiento distribuido que permita equilibrar las intermitencias natas que presenta la generación a partir de fuentes variables de energía renovable.

En este trabajo, el módulo Demanda del LEAP se caracteriza tal como se mencionó en el apartado 2.3.1. Éste módulo toma el PBI y PBG (Producto Bruto Geográfico) y otras variables socioeconómicas como la tasa de crecimiento de la intensidad energética de cada sector y las proyecciones de uso final de la energía de cada sector para proyectar la demanda de los mismo.

#### **3.2. Principales Suposiciones en el Modelo LEAP**

En esta sección, se presentan los supuestos para los principales parámetros involucrados en el modelado del sistema de eléctrico de Mendoza. El valor adoptado de la tasa de crecimiento de los sectores Residencial y Alumbrado Público se basó en la información reportada por la DEIE, arrojando una tasa promedio del 1,09% (DEIE, 2018). Luego para los sectores Grandes Demandas, General y Riego Agrícola se establece una tasa de crecimiento promedio interanual de 23,1%, obtenida en función de los valores analizados del Producto Bruto Geográfico reportados por el organismo antes mencionado (DEIE, 2018).

Como se optó por trabajar directamente con las demandas de las distribuidoras, en los resultados presentados se contabilizan en este segmento unas pérdidas del 12% para el año base, un 10% para el 2030 y un 7% para el 2050. Por otro lado, las pérdidas de transporte se estiman en un 3,5% y se espera que sean del 2,5% para 2030 y del 1,75% para 2050. El margen de reserva planificado se estima en 5%.

Las emisiones de GEI y los parámetros ambientales se evalúan sobre la base de los factores de emisión TIER 1 según lo establecido por el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): lineamientos revisados para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, Volumen 3 (IPCC, 1996).

### 3.2.1. Elementos de Variabilidad Temporal de la Demanda y la Generación de Energía Eléctrica

Otra información importante para la modelación es la morfología del Despacho de Carga ocurrido en el Año Base, para lo cual se utilizó la Curva de Carga de la región Cuyo reportada por CMMESA, a partir de la cual también se construye la Curva de Duración de Carga. Con estas curvas se realiza una representación con un grado mayor de detalle de la variabilidad en la demanda eléctrica asociándola con la época del año. Simultáneamente, se considera la disponibilidad de las distintas máquinas de generación en los períodos del año considerados. Para ello se divide al año en 8 períodos, correspondientes a los cuatro trimestres del año, éstos a su vez divididos en las horas de punta para la demanda eléctrica (19, 20, 21 y 22 hs) y las horas fuera de punta. Estos intervalos temporales sirven para modelar los requerimientos anuales de energía y potencia, así como para confrontar los mismos con las tecnologías de producción.

Con lo informado por CMMESA (Datos Síntesis Mensual, CMMESA, diciembre de 2018) y del consecuente análisis de la información allí manifestada: disponibilidades promedias de cada tipo de central, periodos de mantenimientos programados; junto con la información del régimen hidrológico de las cuencas de Mendoza (Departamento General de Irrigación, 2010) y la variabilidad estacional propia de la geometría solar regional (Jan Remund et. al, Data source Meteonorm [7.2], 2018), se obtienen los valores de la Disponibilidad Máxima (Maximum Availabilty) de las centrales de generación, de Mendoza, lo que se resume en la Tabla 1.

División Temporal			Demanda Promedio <sup>2</sup>	Disponibilidad Máxima						
Trimestres	Partición <sup>1</sup>	Cant. hs		TV	TG	CC	MC	HI <sup>3</sup>	FV <sup>4</sup>	ES (EV)
Q1	FP	1.800	67,32%	95,20%	67,95%	73,10%	67,95%	90,00%	79,02%	0,00%
	P	360	72,47%		45,81%		45,81%		0,00%	63,40%
Q2	FP	1.820	53,96%	95,20%	67,95%	73,10%	67,95%	35,00%	41,38%	0,00%
	P	364	63,08%		45,81%		45,81%		0,00%	63,40%
Q3	FP	1.840	57,44%	95,20%	67,95%	68,10%	67,95%	50,00%	50,14%	0,00%
	P	368	64,93%		45,81%		45,81%		0,00%	63,40%
Q4	FP	1.840	61,72%	76,70%	67,95%	73,10%	67,95%	80,00%	90,37%	0,00%
	P	368	66,36%		45,81%		45,81%		0,00%	63,40%

TV: Turbo Vapor; TG: Turbo Gas; CC: Ciclo Combinado; MC: Motores de Combustión Interna; HI: Hidráulicas; FV: Fotovoltaicas; ES (EV): Almacenamiento de Energía Eléctrica en Vehículos Eléctricos.

<sup>1</sup> Partición: FP: Horas Fuera de Punta; P: Horas de Punta

<sup>2</sup> Demanda expresada en términos de energía media respecto a la máxima demanda anual de energía.

<sup>3</sup> Valores correspondientes tanto para centrales hidráulicas >50 MW como para centrales <50 MW.

<sup>4</sup> Valores correspondientes tanto para instalaciones centralizadas como de generación distribuida.

Tabla 1: Disponibilidad Máxima de las distintas tecnologías de generación de energía eléctrica.

### 3.3. Limitaciones del Modelo LEAP

En este modelado existen varias restricciones de datos y limitaciones de contorno. En primer lugar, no se considera la capacidad de la red de transmisión, ni tampoco la distribución geográfica de las centras de generación de energía eléctrica. El modelo supone que el suministro de energía eléctrica se transporta sin restricciones a cualquier centro de carga y en cualquier momento. En cuanto a las limitaciones de modelado, el modelo no considera los perfiles de carga por hora, sino que calcula los perfiles de generación anuales. Uno de los inconvenientes de esta limitación es que el modelo no contempla ninguna correlación del impacto que tienen los patrones climáticos en las tecnologías renovables como la hidráulica y solar. Para superar las limitaciones del modelo, se requiere incorporar una base de modelado más compleja y una cantidad mayor de datos y de mayor profundidad, como

por ejemplo los perfiles de carga horarios basados en mapas de recursos renovables estacionales, entre otros.

### **3.4. Desarrollo de Escenarios**

La planificación y formulación de escenarios es una técnica útil para por ejemplo desarrollar planes de infraestructura eléctrica a largo plazo, que aborden las perspectivas de los requerimientos energéticos futuros. Esto, “permite el desarrollo de las potencialidades que están vinculadas con la diversidad de políticas y senderos tecnológicos, tendientes a evaluar eficientemente las inquietudes que yacen en la interrelación de los sectores energético, económico y medioambiental” (Craig PP, et al, 2002). En las investigaciones relacionadas con energía, la construcción (o imaginación) de distintos senderos energéticos a largo plazo, ofrece la posibilidad de conformar diferentes conjuntos de situaciones, propensas a alcanzar un futuro energético determinado. Luego, este conjunto de características o “escenario”, se evalúa en función de las filosofías particulares que dieron como resultado el marco de desarrollo de aquella estrategia energética particular.

#### **3.4.1. Escenario BAU o Tendencial**

El escenario BAU o Tendencial describe el escenario energético que se basa en las tendencias actuales mediante el uso de políticas gubernamentales, planes y pronósticos oficiales que definen la forma del sector para las próximas décadas. El objetivo de este escenario es ilustrar el futuro a través del análisis de las estrategias y políticas de gobierno y plasmar la relación del sector eléctrico con los acontecimientos políticos, económicos y ambientales de la región. La demanda de electricidad por sector se toma según las tasas de crecimientos promedios presentadas por (DEIE, 2018): Residencial (4,98%), Grandes Demandas (1,23%), General (4,02%), Riego Agrícola (2,79%) y Alumbrado Público (1,02%). La tasa de crecimiento del sector Transporte se plasma según el apartado 2.3.2, sin embargo, para el consumo de combustible de los vehículos incorporados a lo largo de los años, se plantea un decrecimiento del 1% en su consumo, ya que se espera que con mejoras tecnológicas los vehículos serán más eficientes en la conversión de energía a partir de combustibles líquidos. Para establecer la tendencia de la oferta de energía eléctrica se recurre a los planes de la Secretaría de Energía para el sector, donde a través del Programa Nacional de Obras Hidroeléctricas (Resolución Secretaría de Energía 762/2009) se configura una propuesta de obras hidroeléctricas nacionales para la presente y próxima década, esperándose se integren en la provincia de Mendoza los emprendimientos hidroeléctricos priorizados de nivel I y priorizados de nivel II (Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, 2015). No se prevé la incorporación de nueva generación térmica en el territorio provincial, de acuerdo a lo expresado en la Resolución 155/206 y Resolución 387 - E/2016 de la Secretaría de Energía de la Nación.

#### **3.4.2. Escenario REN-GD**

Reconociendo la fuente de energía solar como una fuente de energía renovable “variable”, cabe mencionar que ésta presenta algunos desafíos para la gestión del sector de generación de energía eléctrica. Este tipo de fuente, al igual que otras también renovables, son variables a lo largo de varias escalas temporales: anual, estacional, diaria, horaria e incluso a escalas menores y, por tanto, la principal limitación que presentan es que no se pueden despachar a voluntad, ya que el operador del sistema o un Usuario-Generador (Ley 27.424 y Res SE N° 314-2018) no pueden controlar la salida de la cantidad de energía generada, más allá de poder sacar de servicio la instalación, como así tampoco pueden reducir la generación voluntariamente. Finalmente, la energía disponible de estas fuentes es incierta, ya que los pronósticos meteorológicos siempre tienen un margen de error, lo que provoca variaciones en la producción de energía. Las fuentes de energía renovable variables tienen un fuerte impacto en el sector de generación de energía eléctrica, ya que se usan primero en el orden de mérito (el costo marginal es cero) y por lo tanto la Carga Residual o Demanda Neta tiene que estar cubierta por otras tecnologías despachables. Para este escenario, en el lado de la oferta se supone la entrada en funcionamiento al año 2025 de los Parque Solares y las centrales hidráulicas renovables adjudicados dentro del territorio provincial en las rondas 1.5 y 2.0 del Programa Renovar (EMESA, 2018). Al mismo tiempo, para este escenario se supone una continuidad de la tendencia provincial en cuanto a la incorporación de instalaciones de generación distribuida con tecnología fotovoltaica, marcada por una tasa de crecimiento promedio anual del 265% (de agosto del 2016 al 31 de diciembre de 2018). Para no suponer un crecimiento abrupto como el que supondría dicha tasa de crecimiento, se plantea una



función de interpolación por escalones de acuerdo a las incorporaciones de generación distribuida tal como se observó en la Figura 2. En cuanto a la demanda de energía eléctrica se continua con los supuestos planteados en el escenario BAU.

### **3.4.3. Escenario V2G**

Para este escenario se supone una penetración de vehículos eléctricos en el parque automotor de la provincia de Mendoza, a una tasa del 0.1% anual (535 vehículos/año) a partir del año 2025, producto de una política pública que fomenta la adquisición de este tipo de vehículos. Al mismo tiempo se retiran del parque automotor vehículos a combustibles líquidos a una tasa decreciente del 0,001% a partir del año 2025 también.

Se considera que los vehículos eléctricos ingresantes tendrán una capacidad promedio de sus baterías de 46,2 kWh y una autonomía promedio de 258 km por cada recarga de sus baterías, con una eficiencia promedio de 16,9 kWh/km recorrido. Por otra parte, se toma que la distancia promedio recorrida diariamente por un vehículo de uso doméstico es de 75 km desde que sale de su hogar hasta que regresa, esto equivaldría a decir que cada día tendríamos un remanente del 71% de energía eléctrica almacenada (32,8 kWh) disponible para otros usos, por ejemplo, para ser inyectada a la red en un horario de punta con valores altos en los precios de la energía, es decir para un uso con formato de generador distribuido de energía eléctrica. Se considera además que, a ese precio alto del valor de energía, se suma un adicional económico que motiva la inyección de energía a la red a partir de vehículos eléctricos, instrumento resultante de la misma política de fomento antes mencionada.

Paralelamente podemos hipotizar que, si en promedio estos vehículos tardan 8 horas en alcanzar su carga máxima (desde la batería totalmente descargada), también mantendrán la misma tasa de transferencia de energía en sentido opuesto, es decir hacia la red eléctrica. De aquí se desprende por tanto que, durante las 5 horas del periodo de punta (19 hs a 23 hs inclusive) el vehículo inyectará a la red el 89,3% de su carga remanente, lo que equivale al 63,4% de su capacidad total (29.3 kWh). Así mismo, le alcanzan las horas desde las 00 hs hasta dejar el domicilio para recargarse nuevamente a pleno, y si no alcanzara a tomar la carga completa podrá llegar al máximo al llegar al punto de estacionamiento de las horas diurnas hasta retornar al domicilio y comenzar un nuevo ciclo.

Tal como ha sido configurada en LEAP la partición temporal del año (Time Slices), en horas de punta y horas fuera de punta, y de acuerdo a las hipótesis antes mencionadas sobre la inyección a la red a partir de baterías de vehículos eléctricos, para el escenario V2G la configuración de la Disponibilidad Máxima de este centro de transformación (considerado como un generador distribuido conectado a la red) se establece según la Tabla 1.

## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1. Proyecciones de la Demanda**

En la Figura 4 se aprecia el crecimiento de la demanda del sector energético de la provincia de Mendoza de acuerdo a las proyecciones al año 2050 según las tasas de crecimiento antes planteadas. Puede observarse que el sector residencial toma preponderancia como consecuencia del crecimiento poblacional a las tasas reportadas en los últimos 10 años. De acuerdo a las hipótesis planteadas para el escenario V2G se aprecia cómo procede el retiro de vehículos que funcionan con combustibles fósiles (lo que se ve plasmado en una disminución del consumo de nafta y diésel), en pos de la inserción de vehículos eléctricos, sin embargo, la incorporación de estos últimos aumenta el consumo de energía eléctrica, pero sin presentar una tendencia marcada al alza y de por lo tanto de forma sectorial, el consumo del sector Transporte Vehicular evoluciona a la baja.

### **4.2. Proyecciones de la Generación de Energía Eléctrica**

A través de la Figura 5 se observa primeramente que la curva de incorporación de generación acompaña la forma y tendencia del crecimiento de la demanda antes presentado. También se aprecia cómo gana participación la generación de energía a partir de centrales fotovoltaicas en su configuración centralizada, en detrimento de generación con base en combustibles fósiles, para el escenario V2G el cual es una alternativa dentro del escenario REN-GD. Por el contrario, en el escenario BAU se aprecia que la generación de fuentes renovables sólo es aportada por las centrales

hidroeléctricas incorporadas de forma escalonada de los emprendimientos priorizados de nivel I y priorizados de nivel II mencionados precedentemente.

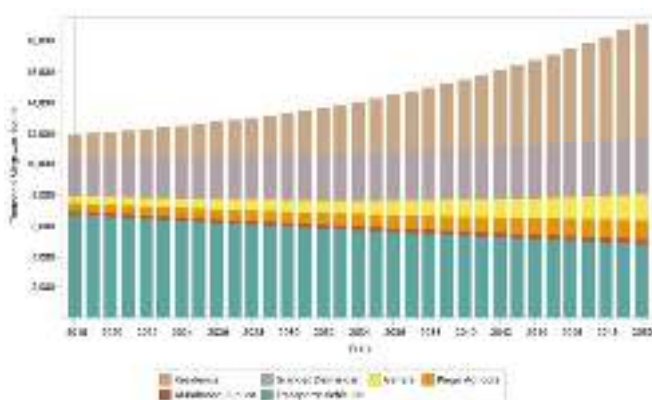


Figura 4. Evolución y Variación Inter-Anual de la Demanda de Energía Eléctrica. Escenario V2G. Años 2018 a 2050. Provincia de Mendoza, Argentina.

Adicionalmente podemos decir, de forma preliminar, que, con las tasas de incorporación de vehículos eléctricos planteadas, no se aprecian variaciones considerables al considerar la inyección de energía remanente en las baterías a la red de distribución. Esto implicaría que debe fomentarse aún más el uso de movilidad eléctrica para que su incorporación como usuario-generador cobre significancia. Lo mismo sucede con la generación distribuida de tecnología fotovoltaica, si bien crece con el tiempo, deberán instrumentarse los beneficios fiscales y las políticas públicas que permitan una presencia más agresiva de esta fuente de generación.



Figura 5. Proyección del Sector Generación de Energía Eléctrica. Comparación entre el escenario BAU y los escenarios REN-DG y V2G. Años 2018 a 2050. Provincia de Mendoza, Argentina.

Los aportes de generación a partir de fuentes con combustibles fósiles se mantienen, aunque a tasas menores de participación, como necesidad para abastecer los empuntamientos de la demanda.

#### 4.4. Perspectivas Medioambientales

En lo que respecta a las perspectivas medioambientales, podemos decir que las emisiones de gases de efecto invernadero, mostradas bajo el indicador de Potencial de Calentamiento Global a 100 años (100-Year GWP: Direct (At Point of Emissions)) se ven reducidas por la disminución del consumo de combustibles fósiles para el sector Transporte Vehicular, como consecuencia de la política de fomento del uso de vehículos eléctricos. Esto se observa en la Figura 10. Además, en la Tabla 2 se aprecian a paso quinquenal los valores de los efectos más representativos por emisiones al ambiente ocasionadas por el sector Demanda para el escenario V2G.

El sistema energético actual no es sostenible y debe transformarse en un sistema con bajas emisiones en una a largo plazo. Por lo tanto, algunas decisiones importantes deben tomarse ahora en el presente, justificando la necesidad de escenarios integrales y a largo plazo de todo el sistema energético regional. Se espera que el sector eléctrico pueda verse beneficiado con relativa facilidad mediante la generación y el transporte de energía electricidad de origen renovable, y que ello se presente como una

herramienta crucial en pos de alcanzar un sistema energético con menor carga de emisiones de carbono. Sin embargo, un sistema energético con alta participación de energías renovables se convierte en un desafío, principalmente debido a la variabilidad de algunas de las fuentes correspondientes. Por lo tanto, los escenarios energéticos a largo plazo tienen que integrar estas características de forma cuantitativa.

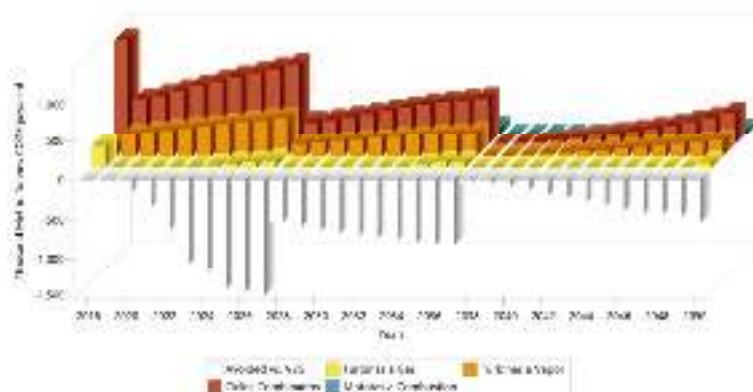


Figura 10. Emisiones evitadas. Comparación escenario BAU versus V2G. Indicador: 100-Year GWP: Direct (At Point of Emissions). Provincia de Mendoza, Rep. Argentina. Año 2018 a 2050.

EMISIONES	AÑOS						
	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Dióxido de carbono	1.693,4	1.610,4	1.531,5	1.456,4	1.385,0	1.317,2	1.252,6
Monóxido de carbono	97,7	92,9	88,4	84,0	79,9	76,0	72,3
Metano	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
Compuestos orgánicos volátiles distintos del metano	18,5	17,6	16,7	15,9	15,1	14,4	13,7
Óxidos de nitrógeno	16,9	16,1	15,3	14,6	13,8	13,2	12,5
Dióxido de azufre	2,6	2,5	2,4	2,3	2,2	2,0	1,9
<b>Total</b>	<b>1.829,4</b>	<b>1.739,7</b>	<b>1.654,5</b>	<b>1.573,4</b>	<b>1.496,3</b>	<b>1.423,0</b>	<b>1.353,2</b>

Tabla 2: Emisiones al Ambiente del sector Demanda para la provincia de Mendoza. Años 2018 a 2050, paso quinquenal.

## 6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

La representación de la operación del sistema energético requiere tener en cuenta ciertos detalles técnicos y temporales, por ejemplo, la variabilidad de la energía solar de acuerdo a sus restricciones inter-temporales. El almacenamiento de electricidad también requiere este tipo de restricción ya debe ser equilibrado temporalmente. Estas restricciones sugieren la necesidad de abordar un enfoque de optimización.

A su vez, la variabilidad de los recursos renovables requiere la construcción de una Curva de Duración de Carga Residual, también llamada Curva de Carga Residual o Curva de Demanda Neta, la cual se construye restando a la curva de demanda los valores de generación de las centrales e instalaciones autodespachable, es decir las centrales de energía solar, tanto concentradas como distribuidas. Por lo tanto, la Demanda Neta es la que realmente debe ser cubierta con generación convencional, con capacidad de adecuarse a las necesidades de la demanda (despachable).

Se plantea la implementación en el modelado de otros instrumentos de almacenamiento de energía, como, por ejemplo, sistemas hidráulicos a partir de los embalses de ciertas centrales hidráulicas de la provincia, de manera que estas alternativas puedan conjugarse técnicamente con el almacenamiento distribuido planteado a través de las baterías de los vehículos eléctricos de incipiente incorporación regional.

## 7. REFERENCIAS

Grossi Gallegos, H. y Righini, R. (2007). Atlas de energía solar de la República Argentina. Universidad Nacional de Luján y la Secretaría de Ciencia y Tecnología. ISBN 978-987-9285-36-7.

Grossi Gallegos H. (1998b) Distribución de la radiación solar global en la República Argentina. II. Cartas de radiación. *Energías Renovables y Medio Ambiente* 5, 33-42.

Parfomak, P.W. (2012). *Energy Storage for Power Grids and Electric Transportation: A Technology Assessment* (No. R42455). Congressional Research Service.

Akhil, A.A., Huff, G., Currier, A.B., Kaun, B.C., Rastler, D.M., Chen, S.B., Cotter, A.L., Bradshaw, D.T., Gauntlett, W.D. (2013). *DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA*. Ed Albuquerque, NM Sandia Natl. Lab.

Denholm, P., Hand, M. (2011). Grid flexibility and storage required to achieve very high penetration of variable renewable electricity. *Energy Policy* 39, 1817–1830. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.01.019>.

Sioshansi, R., Denholm, P., Jenkin, T. (2012). Market and policy barriers to deployment of energy storage. *Econ. Energy Environ. Policy* 1. <http://dx.doi.org/10.5547/2160-5890.1.2.4>.

Gargiulo, M. & Gallachóir, B. (2013). Long-term energy models: Principles, characteristics, focus, and limitations. *WIREs Energy and Environment*, 2(2), 158–177.

Suganthi, L. & Samuel, A. (2012). Energy models for demand forecasting—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2), 1223-1240.

Keirstead, J., Jennings, M., & Sivakumar, A. (2012). A review of urban energy system models: Approaches, challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3847-3866.

Evans, J. & Hunt, L. C. (2009). *International Handbook on the Economics of Energy*. Jaccard, M. (Ed.), *Combining top down and bottom up in energy economy models* (pp. 311-331). Cheltenham, UK: Edward Elgar

Tito Murgia y Asociados (1981). *Planeamiento energético global de largo plazo*. Provincia de Entre Ríos. Buenos Aires, ARG: IDEE - Fundación Bariloche

Instituto Regional de Estudio sobre Energía (2007). *Matriz Energética Provincia de Mendoza*. Mendoza, ARG: UTN-FRM.

Huang, Y., Bor, Y. J., & Peng, C. Y. (2011). The long-term forecast of Taiwan's energy supply and demand: LEAP model application. *Energy policy*, 39(11), 6790-6803.

McPherson, M., & Karney, B. (2014). Long-term scenario alternatives and their implications: LEAP model application of Panama's electricity sector. *Energy Policy*, 68, 146-157.

Emodi, N. V., Emodi, C. C., Murthy, G. P., & Emodi, A. S. A. (2017). Energy policy for low carbon development in Nigeria: A LEAP model application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 247-261.

Sadri, A., Ardehali, M. M., & Amirnekoeei, K. (2014). General procedure for long-term energy-environmental planning for transportation sector of developing countries with limited data based on LEAP (long-range energy alternative planning) and EnergyPLAN. *Energy*, 77, 831-843.

Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico S.A. (CAMMESA). (2018). *Datos Síntesis Mensuales, BASE\_INFORME\_MENSUAL\_2018-12*.

Departamento General de Irrigación, et al. (2010). *Estudio exploratorio para el aprovechamiento de pequeñas y medianas centrales Hidroeléctricas en áreas de estudio pertenecientes al oasis norte de la provincia de Mendoza*.

Jan Remund, Stefan Müller, Christian Studer, René Cattin (2018). *Meteonorm (Versión 7.2)* [Windows]. Bern, Switzerland: Meteotest.

Ente Provincial Regulador Eléctrico de Mendoza (EPRE). (2019).

System Advisor Model Version 2018.11.11-r3 (SAM 2018.11.11-r3). National Renewable Energy Laboratory. Golden, CO. Accessed April 18, 2019. <https://sam.nrel.gov/content/downloads>.

Dirección de Estadísticas e Investigaciones Económicas (DEIE), Ministerio de Economía, Infraestructura y Energía, Gobierno de Mendoza. (2018). *Mendoza en Datos, Datos Económicos: i) Población estimada al 1° de julio de cada año calendario por sexo (ambos sexos), según departamento. Mendoza. Años 2010-2025; ii) Producto Bruto Geográfico. Valor Agregado Bruto por año y tasa de crecimiento interanual. En miles de pesos corrientes. Mendoza. Años 2004-2017; iii) Consumo de energía eléctrica según categoría de usuarios. Mendoza. Años 2003-2018*.

Observatorio Nacional de Datos de Transporte (ONDaT), Centro Tecnológico de Transporte, Tránsito y Seguridad Vial, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Avellaneda. (2018). *Sección: Industria automotriz, Evolución del parque de automóviles, vehículos livianos, camiones y autobuses de Argentina, Parque automotor de Argentina por provincia. Automóviles*.

- Rastler, D., 2010. Electricity Energy Storage Technology Options (No. 1020676). EPRI.
- Poudineh, R., Jamasb, T. (2014). Distributed generation, storage, demand response and energy efficiency as alternatives to grid capacity enhancement. *Energy Policy* 67, 222–231. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.11.073>.
- Chan CC, Chau KT (2002). *Modern electric vehicle technology*. New York: Oxford University Press.
- US Department of Energy (2003). Just the Basic: electric vehicle, freedom cars & vehicle technologies program. Energy efficiency and renewable energy. Disponible en: [http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/basics/jtb\\_electric\\_vehicle.pdf](http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/basics/jtb_electric_vehicle.pdf). [14.5.2018].
- Yagcitekcin B, Uzunoglu M, Karakas A, Erdinc O. (2013). Assessment of electrically driven vehicles in terms of emission impacts and energy requirements: a case study for Istanbul, Turkey. *J Clean Prod* 2013;1–7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.063>.
- Masoum AS, Deilami S, Moses PS, Masoum MAS, Abu-Siada A. (2011) Smart load management of plug-in electric vehicles in distribution and residential networks with charging stations for peak shaving and loss minimization considering voltage regulation. *IET Gener Transm Distrib* 2011;5:877. <http://dx.doi.org/10.1049/iet-gtd.2010.0574>.
- Masoum MAS, Member S, Moses PS, Member S, Hajforoosh S. (2012). Distribution transformer stress in smart grid with coordinated charging of plug-in electric vehicles. In: *IEEE innov smart grid technol (ISGT)*; 2012. p. 1–8. <http://dx.doi.org/10.1109/ISGT.2012.6175685>.
- Cao Y, Tang S, Li C, Zhang P, Tan Y, Zhang Z, et al. An optimized EV charging model considering TOU price and SOC curve. *IEEE Trans Smart Grid* 2012; 3:388–93. <http://dx.doi.org/10.1109/TSG.2011.2159630>.
- Dallinger D, Gerda S, Wietschel M. (2013). Integration of intermittent renewable power supply using grid-connected vehicles – a 2030 case study for California and Germany. *Appl Energy* 2013; 104:666–82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.065>.
- Reiner U, Elsinger C, Leibfried T. (2012). Distributed self organising electric vehicle charge controller system. *Electr veh conf (IEVC)*. Greenville, SC: 2012 IEEE Int; 2012. p. 1–6.
- Di Giorgio A, Liberati F. (2014). Near real time load shifting control for residential electricity prosumers under designed and market indexed pricing models. *Appl Energy* 2014; 128:119–32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.032>.
- Empresa Mendocina de Energía SAPEM (2018). Proyectos adjudicados en el territorio de la Provincia de Mendoza. Programa Renovar, versión 1.5 y 2.0. Disponible en <http://emesa.com.ar/wp-content/uploads/2017/07> (último acceso Julio 2019).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, vol. 3; 1996.
- Takase K, Suzuki T. (2011). The Japanese energy sector: current situation and future paths. *Energy Policy* 2011; 11:6731e44.
- Aliyu AS, Ramli AT, Saleh MA. (2013). Nigeria electricity crisis: power generation capacity expansion and environmental ramifications. *Energy* 2013; 61:354e67.
- Craig PP, Gadgil A, Koomey JG. (2002). What can history teach us? A retrospective examination of long-term energy forecasts for the US. *Annu Rev Energy Environ* 2002; 27:83e118.
- Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, Secretaría de Obras Públicas, Subsecretaría de Recursos Hídricos (2015). Programa Nacional de Obras Hidroeléctricas (Resolución Secretaría de Energía 762/2009).

## 8. ABSTRACT

In this paper, we simulate, through the LEAP model (Long-range Energy Alternatives Planning), the role of energy storage at a regional and long-term horizon, as a flexibility tool tending to improve gradual integration of variable renewable energy sources into the electric system of Mendoza province; among others, we study centralized and distributed photovoltaic power systems, considering temporal variability of the source. Daily energy storage related to electric vehicles (by means of lithium-ion batteries) is represented by vehicle to grid (V2G) technology. The results show that, inclusion rates of both, electric vehicles and distributed photovoltaic power systems, do not present significant variations because of their share in the electrical system. However, environmental effects are improved. These findings suggest a further optimization approach.

**Keywords:** solar energy, electric vehicles, energy planning, simulation

## **POTENCIAL FOTOVOLTAICO GLOBAL DE LA PROVINCIA DE SALTA. UN INDICADOR MULTICRITERIO PARA LA DEFINICIÓN DE ÁREAS DE ACCIÓN PRIORITARIA DEL SECTOR RESIDENCIAL**

I. Cruz<sup>1,2</sup>, J. Sauad<sup>2,3</sup>, R. Durán<sup>1</sup> y M. Condorí<sup>1</sup>

Instituto de Investigaciones de Energías No Convencionales (INENCO)<sup>1</sup>

Universidad Nacional de Salta<sup>2</sup>

Instituto de Recursos Naturales y Ecodesarrollo (IRNED)<sup>3</sup>

Av. Bolivia 5150 – A4408FVY Salta, República Argentina Tel. 0387-4255325 e-mail:  
icruz.unsa@gmail.com

*Recibido 19/08/19, aceptado 23/10/19*

**RESUMEN:** Se presenta el desarrollo de un indicador multicriterio adimensional denominado Potencial Fotovoltaico Global, para la definición de áreas de acción prioritaria. El indicador se conformó a partir de la integración de un pool de indicadores de sustentabilidad, utilizando un enfoque de ponderación basada en comprensión de datos. El Potencial Fotovoltaico Global fue mapeado para toda la Provincia de Salta, con un nivel de detalle de radio censal. Se obtuvo un indicador con una consistencia interna satisfactoria ( $\alpha = 0.77$ ). Las regiones de Puna y Prepuna son áreas de acción prioritaria (0.81-1). La región de Yungas posee valores mínimos (0.01-0.75). La Provincia de Salta cuenta con un elevado Potencial Fotovoltaico Global. La variabilidad espacial del indicador depende principalmente del potencial técnico fotovoltaico.

**Palabras claves:** potencial fotovoltaico, sustitución energética, sustentabilidad, evaluación multicriterio

### **INTRODUCCIÓN**

El crecimiento poblacional ha potenciado el desarrollo residencial y la expansión del entorno construido, generando cambios en el uso del suelo e impactos ambientales locales negativos. El sector residencial representa un tercio de la demanda de energética mundial y genera emisiones de CO<sub>2</sub>eq con impactos sobre el cambio climático (Amado et al., 2018; International Energy Agency, 2016). Revertir el escenario actual, plantea la necesidad de un cambio de paradigma en la planificación energética y en el modelo energético de producción y consumo de energía. En este marco las Energías Renovables tienen potencial para contribuir a avanzar en el camino hacia sociedades sustentables (Foley y Olabi, 2017). Entre los principales beneficios de la implementación de tecnologías de aprovechamiento de las Energías Renovables se encuentran: i) mejora de la sustentabilidad del medio ambiente (Chapman et al., 2017), ii) mejora en la salud pública (Shih y Tseng, 2014), iii) creación de empleo (Dvořák et al., 2017), y iv) beneficios financieros (Krupa y Harvey, 2017).

La incorporación de sistemas fotovoltaicos (FV) en el sector residencial, está siendo promovida a nivel global en el marco del paradigma de la sustentabilidad (Pandey et al., 2017). La implementación de sistemas FV constituye un instrumento estratégico con potencial para mitigar el impacto ambiental del modelo energético actual y reducir la inequidad social (Cruz, 2018). Para abordar la complejidad de las estrategias de fomento a la implementación de sistemas FV en el sector residencial, los tomadores de decisiones deben contar con herramientas que permitan: i) cuantificar el potencial regional fotovoltaico, ii) evaluar la viabilidad financiera y económica de los sistemas, iii) evaluar el impacto de la implementación de sistemas FV incorporando el componente social, y iv) identificar áreas de acción prioritaria que maximicen los impactos positivos de la sustitución energética (Calvillo et al., 2016; Caragliu y Del Bo, 2019). Para reducir el riesgo en la toma de decisiones, en el proceso de

transición hacia sociedades sustentables, la planificación energética inicio abordan las complejidades enunciadas mediante el desarrollo de Sistemas de Información Geográfica (SIG) que integren indicadores de sustentabilidad mediante evaluación multicriterio (Bottaccioli et al., 2017).

Para Argentina el desarrollo de las Energías Renovables es una política de estado, que se refleja en el Plan de energías renovables Argentina 2016 - 2025 y en la Ley 27.191 de Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía. La provincia de Salta cuenta con un Plan Provincial de energías renovables (2014) y es pionera en la promulgación de una ley de implementación de generación distribuida (Ley N° 7824 de Balance Neto), con vistas a la transición hacia un modelo energético sustentable. En este contexto, se señala la necesidad de la generación de sistemas de soporte a las decisiones, que permitan abordar la complejidad ya enunciada, en base al viraje de paradigma que plantea la planificación energética. En este marco el presente trabajo tiene como objetivo el desarrollo de un indicador multicriterio para la identificación de áreas de acción prioritaria para la implementación de energía solar FV en el sector residencial de la Provincia de Salta.

## **METODOLOGÍA**

El indicador multicriterio adimensional denominado Potencial Fotovoltaico Global se desarrolló a partir de la integración de un pool de indicadores que abordan las siguientes dimensiones de la sustentabilidad: ambiente, economía y sociedad. El Potencial Fotovoltaico Global fue mapeado para toda la Provincia de Salta, con un nivel de detalle de radio censal. Para la estimación del Potencial Fotovoltaico Global a nivel de departamento, se efectuó un promedio de los valores que adquiere el indicador en los  $r$  radios censales pertenecientes al departamento  $h$  de la Provincia de Salta. Una descripción de los indicadores para cada dimensión de la sustentabilidad, se presenta a continuación.

### Indicadores de la dimensión Ambiente

La dimensión Ambiente incluye dos indicadores: el Potencial Técnico de implementación de energía solar fotovoltaica y la energía producida por la generación fotovoltaica.

El Potencial Técnico de implementación de energía solar fotovoltaica es la cantidad de potencial geográfico que puede convertirse en energía eléctrica utilizando un sistema FV. El potencial geográfico es la cantidad de radiación solar global anual que recibe una región. El Potencial Técnico Fotovoltaico es una función del potencial geográfico (Hoogwijk, 2004) y un indicador de la máxima capacidad que posee el Sistema Socio Ecológico para para sostener el uso final evaluado, dadas las características técnicas del sistema tecnológico.

El potencial geográfico fue estimado utilizando la base de datos de radiación solar global anual sobre el plano horizontal del Laboratorio Nacional de Energía Renovable de Estados Unidos (NREL). La base de datos de NREL es una matriz de puntos con coordenadas geográficas, que contiene datos de radiación solar global anual. La base de datos fue importada al software de geoprocésamiento ArcGis, para generar una capa vectorial de puntos georeferenciados. Posteriormente, un modelo de interpolación de distancia inversa ponderada (IDW) fue aplicado a la capa vectorial correspondiente a la Provincia de Salta. IDW determina los valores de celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra. La ponderación es una función de la distancia inversa. Como resultado se obtuvo un mapa del potencial geográfico de la Provincia de Salta, en formato raster con una resolución espacial de 40x40 km. El mapa de potencial geográfico fue vinculado con el mapa de radios censales de la Provincia de Salta (INDEC, 2016) mediante un join espacial. El Potencial Técnico fue estimado en base al mapa del potencial geográfico según el modelo desarrollado por Sun et al., (2013), considerando un sistema de generación tipo de 1Kwp.

La energía es un indicador que evalúa el impacto ambiental local de la generación fotovoltaica, se define como la cantidad de energía que fue utilizada directa o indirectamente para generar un producto o servicio (Odum, 1996). La energía se expresada en equivalentes de energía solar (Em joule- SeJ). Para este caso la energía contabiliza la energía que ha sido implicada de forma directa e indirecta para alcanzar el Potencial Técnico Fotovoltaico. El indicador se estimó siguiendo la metodología de



Síntesis Emergética de Odum (1988). En el software ArcGis 10.3 se aplicaron herramientas de geoprocesamiento, para transformar el mapa de Potencial Técnico Fotovoltaico en emergía.

Las formulas empleadas para el cálculo de los indicadores de la dimensión Ambiente se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Indicadores de la sub dimensión ambiente

INDICADOR	CODIFICACION	EXPRESION ALGEBRAICA
<b>Potencial fotovoltaico técnico</b>	<b>POPV<sub>r</sub></b>	$POPV_r = \frac{P_i * G_r * n_i}{1000}$ <p>POPV<sub>r</sub> = Potencial Fotovoltaico Técnico del radio censal r.  P<sub>i</sub> = Potencia máxima del sistema fotovoltaico instalado.  G<sub>r</sub> = Cantidad total anual de radiación global en el plano horizontal para del departamento o radio censal r.  n<sub>i</sub> = Relación de rendimiento del sistema fotovoltaico. Se adoptó el valor típico de 0.75 para sistema fotovoltaico con módulos mono o policristalino.</p>
<b>Emergía generada</b>	<b>EMEG<sub>r</sub></b>	$EMEG_r \left( \frac{SeGj}{año} \right) = POPV_r * \theta$ <p>EMEG<sub>r</sub> = Emergía generada en el radio censal r  θ = Factor de Transformicidad (SeGj/Gj). Fuente: Paoli et al. (2008).</p>

#### Indicadores de la dimensión Economía

En la dimensión Economía se incluyeron los siguientes indicadores: Valor Actualizado Neto (VAN) y Costo Evitado por reducción de CO<sub>2</sub>eq (Tabla 2).

El VAN es un indicador de rentabilidad financiera del proyecto de inversión de implementación de energía solar fotovoltaica. Es el valor monetario que resulta de restar la suma de los flujos descontados a la inversión inicial. El VAN es la suma de dinero equivalente a los ingresos netos presentes y futuros de la generación fotovoltaica para el sistema tecnológico de referencia, empleado en la estimación del potencial técnico. El indicador es una medida del potencial financiero de la generación fotovoltaica.

El costo de inversión corresponde a la cotización del sistema de generación fotovoltaica de referencia en el mercado de proveedores regionales. Los costos operativos se estimaron como función porcentual del costo de inversión. Se computó como ingreso el ahorro económico generado por la sustitución de energía convencional por energía solar fotovoltaica. El ahorro económico es una función del Potencial Técnico Fotovoltaico y la tarifa vigente para generación eléctrica de la ley de balance neto de la Provincia de Salta (Resolución ENRESP 1512/17). El horizonte de evaluación del proyecto es equivalente a la vida útil de sistema tecnológico de referencia. Se utilizó como tasa de descuento una tasa efectiva anual del 10%.

El Costo Evitado por reducción de emisiones CO<sub>2</sub>eq, constituye la valoración económica del impacto de liberación del recurso atmosfera como fuente sumidero de CO<sub>2</sub>eq, por la sustitución de fuentes convencionales por energía solar fotovoltaica. En este estudio, dicho impacto se estimó mediante la valoración a precio de mercado de las emisiones evitadas de CO<sub>2</sub>e, considerando un nivel de producción de energía equivalente con fuentes térmicas al del potencial técnico fotovoltaico.

Tabla 2. Indicadores de la sub dimensión economía.

INDICADOR	CODIFICACION	EXPRESION ALGEBRAICA
Valor actualizado neto	$VAN_r$	$VAN_r = -CI + \sum_{i=1}^n \frac{(POPV_r * \theta) - (CI * \epsilon)}{[(1 + r)^n]}$ <p> <math>VAN_r</math> = Valor actualizado neto del radio censal r.  <math>POPV</math> = Potencial técnico fotovoltaico del radio censal r.  <math>CI</math> = Costo de inversión del sistema de generación fotovoltaico de referencia.  <math>\theta</math> = Tarifa energética de generación fotovoltaica Resolución ENRESP 1512/17.  <math>\epsilon</math> = Coeficiente de proporcionalidad de costos operativos.  <math>r</math> = Tasa de interés de oportunidad, en este caso equivalente al 10%.  <math>n</math> = Horizonte de proyecto.                 </p>
Costo evitado de emisiones de CO <sub>2e</sub>	$COVE_r$	$COVE_{rj} = \sum_j = (POPV_r * \sigma_j) * \gamma$ <p> <math>COVE_{rj}</math> = Costo evitado por emisiones de CO<sub>2e</sub> del departamento o radio censal r.  <math>POPV</math> = Potencial técnico fotovoltaico del radio censal r.  <math>\sigma_j</math> = Factor de emisión de la fuente energética j (Tn CO<sub>2eq</sub>/Kwh). Fuente: Ministerio de Energía y Minería, (2016).  <math>\gamma</math> = Cotización de bonos de carbono en el mercado internacional (\$/Tn CO<sub>2e</sub>).                 </p>

#### Indicadores de la dimensión Sociedad

La dimensión sociedad se abordó mediante el indicador GDI, desarrollado por Durán y Condorí (2016). GDI es una métrica de la privación mapeado a nivel de radio censal. El índice comprende las siguientes dimensiones: Hogar, Educación, Empleo, Propiedad y aspectos sociales. El Hogar comprende las variables de Porcentaje de viviendas con Calidad Constructiva Insuficiente (CCI), el Porcentaje de viviendas con Calidad de Conexión a Servicios Básicos Insuficientes (CSBI) y Hacinamiento. En la dimensión educación considera la tasa de analfabetismo. Mientras que en la dimensión empleo analiza el porcentaje de Porcentaje de personas mayores de 14 años sin empleo. La propiedad se compone del porcentaje de casos en los que tanto la vivienda como el terreno sobre el que esta edificada pertenece a algunos de los integrantes del hogar. La dimensión social comprende el porcentaje de hogares mono parentales y porcentaje de personas que viven solas. Los valores de ponderación de GDI son el resultado de la aplicación del análisis de factores principales.

#### Normalización de variables y análisis de fiabilidad

Los indicadores fueron normalizados para unificar la escala de análisis en rango de valores de 0-1. Se aplicó un enfoque de maximización de impactos positivos para re escalar los indicadores. Valores de 1 reflejan situaciones de optimización de la variable. En la Tabla 3 se detallan las técnicas y expresiones algebraicas utilizadas en el proceso de normalización.

Tabla 3. Expresiones algebraicas empleadas en el proceso de normalización de variables.

INDICADOR	CODIFICACION	TECNICA DE NORMALIZACION	EXPRESION ALGEBRAICA DE NORMALIZACION
Potencial técnico fotovoltaico	$POPV_r$	Normalización por el máximo	$nPOPV_r$ $nPOPV_r = \text{Potencial técnico fotovoltaico normalizado del radio censal } r.$ $POPV_r = \text{Potencial técnico fotovoltaico del radio censal } r.$ $max POPV_r = \text{Máximo potencial técnico fotovoltaico de los radios censales } r \text{ de la Provincia de Salta.}$
Energía	$EMEG_r$	Normalización por el máximo	$nEMEG_r = \frac{EMEG_r}{max EMEG_r}$ $nEMEG_r = \text{Energía normalizada del radio censal } r$ $EMEG_r = \text{Energía del radio censal } r.$ $max EMEG_r = \text{Máxima energía de los radios censales } r \text{ de la Provincia de Salta.}$
Valor actualizado neto	$VAN_r$	Normalización por el máximo	$nVAN_r = \frac{VAN_r}{max VAN_r}$ $nVAN_r = \text{Valor actualizado neto normalizado del radio censal } r.$ $VAN_r = \text{Valor actualizado neto del radio censal } r.$ $max VAN_r = \text{Máximo VAN de los radios censales } r \text{ de la Provincia de Salta.}$
Costo evitado de emisiones de CO <sub>2e</sub>	$COVE_r$	Normalización por el máximo	$nCOVE_{rj} = \frac{COVE_{rj}}{max COVE_{rj}}$ $nCOVE_{rj} = \text{Costo evitado de emisiones de CO}_{2e} \text{ anual normalizado del radio censal } r \text{ para la fuente energética } j.$ $COVE_{rj} = \text{Costo evitado de emisiones de CO}_{2e} \text{ anual del radio censal } r \text{ para la fuente energética } j.$ $max COVE_{rj} = \text{Costo evitado de emisiones de CO}_{2e} \text{ anual máximo de los radios censales } r \text{ de la Provincia de Salta para la fuente energética } j.$
Índice general de privación	$GDI_r$	Normalización por el máximo	$nGDI_r = \frac{GDI_r}{max GDI_r}$ $nGDI_r = \text{Índice general de privación normalizado del radio censal } r.$ $GDI_r = \text{Índice general de privación del radio censal } r.$ $max GDI_r = \text{Máximo índice general de privación de los radios censales } r \text{ de la Provincia de Salta.}$

La consistencia interna de los indicadores normalizados se evaluó mediante el estadístico alfa de Cronbach. El análisis de fiabilidad basado en alfa de Cronbach asume que los ítems que miden un mismo constructo están altamente correlacionados. Si el valor de alfa de Cronbach es próximo a 1 la consistencia interna de los ítems analizados es alta (Campo Arias y Oviedo, 2008).

### Conformación del indicador de Potencial Fotovoltaico Global

Para la obtención de valores de ponderación del indicador multicriterio de potencial fotovoltaico global, se optó por un enfoque de ponderación basada en comprensión de datos (Decancq y Lugo, 2013). En este estudio los valores de ponderación se generaron en base a un análisis de componentes principales con rotación ortogonal VARIMAX. El indicador de Potencial Fotovoltaico Global se conformó a partir del score de los *i* factores obtenidos para cada radio censal de la Provincia de Salta. Las ecuaciones empleadas pueden consultarse en Langlois y Kitchen (2001) y Durán y Condorí (2016).

## RESULTADOS

El Potencial Fotovoltaico Global tiene una consistencia interna satisfactoria ( $\alpha = 0.77$ ). El indicador posee una escala con un rango de variación de 0-1. Valores cercanos a 1 indican áreas prioritarias de acción en las que se maximizan los impactos positivos de la sustitución energética.

El Potencial Fotovoltaico Global es máximo en las regiones de Puna y Prepuna y mínimo en la región de Valles Templados y Yungas. En la

Tabla 4 se presentan los valores promedio del indicador, discriminados por tipo de radio censal.

*Tabla 4. Potencial Fotovoltaico Global por tipo de radio censal*

Tipo de radio	PGPV				
	Media	Desviación típica	Máximo	Mínimo	Recuento
<b>Mixto</b>	0.18	0.06	0.30	0.03	150.00
<b>Rural</b>	0.34	0.18	1.00	0.07	415.00
<b>Urbano</b>	0.18	0.08	0.90	0.00	793.00

Un ranking de departamentos de acción prioritaria se presenta en la Tabla 5. Los departamentos de acción prioritaria para implementación de energía solar fotovoltaica son: Los Andes, La Poma, Molinos, San Carlos y Cafayate. Los departamentos de Capital, Orán y General José de San Martín presentan valores mínimos de Potencial Fotovoltaico Global. Los departamentos con máximo Potencial Fotovoltaico Global presentan densidad poblacional baja, mientras que los departamentos con valores mínimos son centros urbanos con densidad poblacional alta.

El comportamiento geoespacial del Potencial Fotovoltaico Global para la Provincia de Salta, con un nivel de detalle de radio censal, se presenta en la Figura 1. En el mapa es posible observar que la región de Puna y Prepuna de la Provincia de Salta posee los máximos valores de Potencial Fotovoltaico Global (0.81-1). La región de valles templados posee valores intermedios (0.76-0.77). La región de Chaco adquiere valores medios altos comprendidos entre 0.77 y 0.79. El indicador adquiere valores mínimos en la Región de Yungas (0.01-0.75), donde se presenta el menor potencial técnico.

Tabla 5. Ranking de departamentos de acción prioritaria, definido en base al valor medio del potencial fotovoltaico global.

Departamento	PGPV					
	Media	Recuento	Desviación típica	Máximo	Mediana	Mínimo
Los Andes	0.82	17.00	0.09	1.00	0.83	0.70
La Poma	0.74	10.00	0.10	0.99	0.72	0.62
Molinos	0.67	10.00	0.11	0.81	0.63	0.52
San Carlos	0.66	17.00	0.08	0.78	0.67	0.43
Cafayate	0.51	18.00	0.05	0.58	0.53	0.39
Cachi	0.51	11.00	0.16	0.70	0.54	0.26
Santa Victoria	0.49	21.00	0.09	0.63	0.47	0.35
La Candelaria	0.35	14.00	0.07	0.46	0.35	0.26
Iruya	0.30	30.00	0.10	0.47	0.34	0.16
Rivadavia	0.30	44.00	0.03	0.39	0.30	0.18
Rosario de Lerma	0.29	51.00	0.15	0.90	0.26	0.15
Guachipas	0.29	14.00	0.10	0.46	0.27	0.09
Rosario de la Frontera	0.27	54.00	0.05	0.38	0.26	0.17
La Caldera	0.26	18.00	0.03	0.32	0.27	0.18
La Viña	0.26	15.00	0.08	0.36	0.22	0.14
Anta	0.25	102.00	0.04	0.30	0.26	0.14
Metán	0.20	51.00	0.04	0.31	0.18	0.13
General Guemes	0.19	55.00	0.04	0.29	0.18	0.11
Cerrillos	0.19	36.00	0.04	0.27	0.18	0.14
Chicoana	0.18	21.00	0.02	0.21	0.18	0.15
Capital	0.16	460.00	0.02	0.28	0.17	0.08
Orán	0.16	128.00	0.05	0.47	0.14	0.08
General José de San Martín	0.12	161.00	0.03	0.32	0.12	0.00

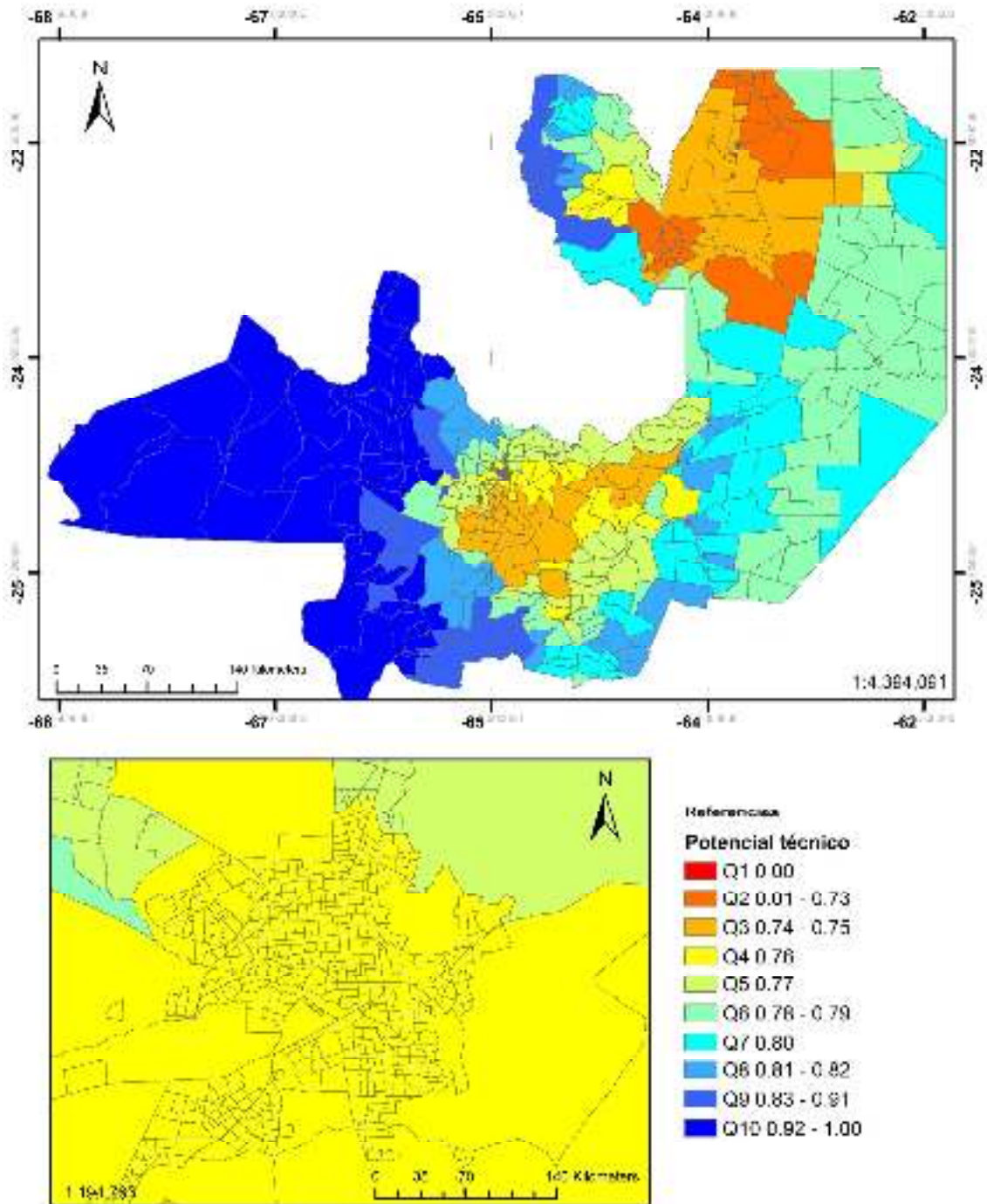


Figura 1. Mapa del potencial fotovoltaico global de la Provincia de Salta, nivel de detalle de radio censal.

## CONCLUSIÓN

Se desarrolló un indicador multicriterio de Potencial Fotovoltaico Global para identificar áreas de acción prioritaria para la implementación de energía solar fotovoltaica en el sector residencial de la Provincia de Salta, utilizando un enfoque territorial mediante el uso de SIG. El producto obtenido es un sistema de soporte a las decisiones, que permite definir áreas prioritarias de acción a nivel regional, departamental y radio censal. El enfoque de maximización de impactos positivos permite mejorar la eficacia y eficiencia de futuras políticas públicas de intervención en el territorio.

El análisis de consistencia interna de las variables normalizadas evidencia que el indicador desarrollado es confiable para la toma de decisiones. La metodología de ponderación aplicada demuestra que es posible conformar un indicador multicriterio sensible y objetivo, basado en el comportamiento de la matriz de datos.

La Provincia de Salta cuenta con un elevado Potencial Fotovoltaico Global. La variabilidad espacial del indicador depende principalmente del potencial técnico fotovoltaico. Áreas con máximos valores de potencial técnico fotovoltaico maximizan el potencial económico financiero. El Potencial Fotovoltaico Global puede incrementarse con mejoras en la eficiencia de los sistemas de generación fotovoltaica y reducción de los costos de inversión. La evolución del impacto económico depende de la cotización de los bonos de carbono en el mercado internacional.

A futuro, un programa de subsidio a la inversión de sistemas fotovoltaicos, podría resultar adecuado para fomentar la transición energética dadas las características socio económicas de la población de la Provincia de Salta. Los valores máximos de Potencial Global Fotovoltaico se corresponden con áreas de alta vulnerabilidad social y baja densidad poblacional. Un programa de subsidio a la inversión focalizado en estas regiones, podría coadyuvar a reducir la inequidad socio económica de la Provincia. Mientras que un programa focalizado en áreas urbanas, con menor Potencial Fotovoltaico Global pero elevada densidad poblacional, podría tener un impacto económico global relevante.

## REFERENCIAS

- Amado, M., Poggi, F., Ribeiro Amado, A. y Breu, S. (2018). E-City Web Platform: A Tool for Energy Efficiency at Urban Level. *Energies*, 11(7), 1857.
- Bottaccioli, L., Macii, E., Patti, E., Estebansari, A., Pons, E. y Acquaviva, A. (2017). PVInGrid: A Distributed Infrastructure for Evaluating the Integration of Photovoltaic Systems in Smart Grid.
- Calvillo, C. F., Sánchez-Miralles, A. y Villar, J. (2016). Energy management and planning in smart cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 273–287.
- Campo-Arias A y Oviedo H. Propiedades Psicométricas de una Escala: la Consistencia Interna. *Revista de salud pública*, 10 (5), 831-839.
- Caragliu, A. y Del Bo C. F. (2019). Smart innovative cities: The impact of Smart City policies on urban innovation. *Technological Forecasting and Social Change*, 142, 373–383.
- Chapman, A. J., Tezuka, T. y McLellan, B. (2017). Renewable Energy Policy Efficacy and Sustainability: The Role of Equity in Improving Energy Policy Outcomes.
- Cruz I. (2018). Implementación sustentable de energía solar en la provincia de Salta. Herramientas de planificación estratégica. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional de Salta. Facultad de Ciencias Exactas.
- Decancq, K. y Lugo, M. A. (2013). Weights in multidimensional indices of wellbeing: An overview. *Econometric Reviews*, 32(1), 7-34.
- Durán, R. J. y Condorí, M. Á. (2019). Deprivation Index for Small Areas Based on Census Data in Argentina. *Social Indicators Research*, 141(1), 331-363.
- Dvořák, P., Martinát, S., der Horst, D. Van, Frantál, B. y Turečková, K. (2017). Renewable energy investment and job creation; a cross-sectoral assessment for the Czech Republic with reference to EU benchmarks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 360–368.
- Ente Regulador de los Servicios Públicos. (2017). Resolución ENRESP 1512/17.
- Foley, A. y Olabi, A. G. (2017). Renewable energy technology developments, trends and policy implications that can underpin the drive for global climate change. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 1112–1114.
- Hoogwijk, M., 2004. On the global and regional potential of renewable energy sources. Utrecht University.
- INDEC. (2016). Base datos del Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010, procesado con Redatam+SP. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- International Energy Agency. (2016). Energy Technology Perspectives 2016 Towards Sustainable Urban Energy Systems. Retrieved from [www.iea.org/tyc/](http://www.iea.org/tyc/)
- Krupa, J. y Harvey, D. (2017). Renewable electricity finance in the United States: A state-of-the-art review. *Energy*.



- Langlois, A. y Kitchen, P. (2001). Identifying and measuring dimensions of urban deprivation in Montreal: An analysis of the 1996 census data. *Urban Studies*, 38(1), 119–139.
- Ley N° 27.427 Régimen de fomento a la generación distribuida con energías renovables.
- Ley N° 27.191 Régimen de Fomento para las Energías Renovables. Promulgada en 2014.
- Ley N° 7824 Balance Neto. Generadores Residenciales, Industriales y/o Productivos. Promulgada en 2014.
- Ministerio de Energía y Minería, 2015. Plan de energías renovables Argentina 2016 – 2025
- Ministerio de Energía y Minería. (2016). Inventario de Gases de Efecto Invernadero. Buenos Aires, Argentina.
- National Renewable Energy Laboratory (NREL) (2017). Data base of Programme of Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA).
- Odum, H. (1996). *Environmental Accounting, Energy and Decision Making*. New York, USA: John Wiley & sons.
- Odum, H. T. (1988). *Energy, environment and public policy. A guide to the analysis of systems*. Nairobi, Kenia: UNEP.
- Pandey, A. K., Rahim, N. A., Hasanuzzaman, M., Pant, P. C. y Tyagi, V. V. (2017). Solar Photovoltaics (PV): A Sustainable Solution to Solve Energy Crisis. In *Green Technologies and Environmental Sustainability* (pp. 157–178).
- Paoli, C., Vassallo, P. y Fabiano, M. (2008). Solar power: An approach to transformity evaluation. *Ecological Engineering*, 34(3), 191-206.
- Secretaria de Energía de Salta. Argentina. 2014. Plan Provincial de Energías Renovables.
- Shih, Y. H. y Tseng, C. H. (2014). Cost-benefit analysis of sustainable energy development using life-cycle co-benefits assessment and the system dynamics approach. *Applied Energy*, 119, 57–66.
- Sun, Y. W., Hof, A., Wang, R., Liu, J., Lin, Y. J. y Yang, D. W. (2013). GIS-based approach for potential analysis of solar PV generation at the regional scale: A case study of Fujian Province. *Energy Policy*, 58, 248-259.

## **ABSTRACT**

A Global Photovoltaic Potential is presented for the definition of priority action areas in Salta Province. The multicriteria indicator was formed based on the integration of a pool of sustainability indicators, using a weighting approach based on data understanding. The Global Photovoltaic Potential was mapped for the entire Province of Salta, with a census radius level of detail. An indicator with a satisfactory internal consistency was obtained ( $\alpha = 0.77$ ). The Puna and Prepuna regions are priority action areas (0.81-1). The Yungas region has minimum values (0.01-0.75). The Province of Salta has a high Global Photovoltaic Potential. The spatial variability of the indicator depends mainly on the photovoltaic technical potential.

**Keywords:** Photovoltaic Potential, Energy Substitution, Sustainability, Multicriteria Evaluation

## **POBREZA ENERGÉTICA EN LA ARGENTINA URBANA. VALIDACIÓN DE UN INDICADOR BASADO EN LA LÍNEA DEL 10% DE LOS INGRESOS TOTALES FAMILIARES**

R. Durán<sup>1</sup>, M. Condori<sup>2</sup>

Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO, UNSa. CONICET)  
Universidad Nacional de Salta  
Av. Bolivia 5150 A4408FVY Salta, República Argentina  
FAX 54 387 4255489 email: duran.cayon@gmail.com

*Recibido 16/08/19, aceptado 24/10/19*

**RESUMEN:** En esta contribución se presenta la determinación, estimación y validación de un indicador de pobreza energética para la población urbana de Argentina. Este indicador, ampliamente difundido en la literatura y utilizado como métrica de referencia por numerosos organismos internacionales y países, evalúa si el hogar destina el 10% o más de su ingreso total familiar como gasto para el acceso a los energéticos de uso residencial. El indicador fue estimado trimestralmente para los aglomerados urbanos de Argentina y se presenta su evolución desde el año 2003 al cuarto trimestre del 2018. Se lo ha validado siguiendo el método del doble de la media nacional (2M) para el periodo de referencia. Así, se observa que el valor de 2M para el primer trimestre del año 2016 es aproximado al 10% esto permite apoyar el uso de la línea del 10% para estimar la evolución de intensidad de la pobreza energética con respecto al periodo 2015 - 2016.

**Palabras Clave:** Pobreza energética – Índice de pobreza energética – Política energética – Desarrollo Social

### **INTRODUCCIÓN**

El concepto de pobreza energética – entendido como la imposibilidad de un hogar a hacer frente a los requerimientos energéticos necesarios para su funcionamiento (González-Eguino, 2015) - y su estudio en el contexto de Argentina resulta útil para la definición de políticas públicas de desarrollo energético con un enfoque humano y adecuado a los hogares económicamente vulnerables (Bazilian et al., 2014). Asimismo, si bien las investigaciones relativas a la situación de pobreza energética y sus estimaciones se constituyen como un espacio de discusión relativamente nuevo en el contexto argentino y latinoamericano (García Ochoa, 2014), cobran cada vez mayor relevancia con respecto a las políticas energéticas definidas para el sector residencial nacional, un espacio que sufre el impacto de los aumentos tarifarios en un contexto de recesión y pérdida del valor adquisitivo (Beker, 2019; Varesi, 2018).

En este sentido, resulta importante obtener estimaciones nacionales relativas a la intensidad con que actúa la situación de pobreza energética sobre los hogares argentinos. De allí que, en este trabajo, se proponga la evaluación y validación de un indicador de pobreza energética basado en ingresos. Este indicador, llamado comúnmente “línea del 10%” (González-Eguino, 2015; Pachauri and Spreng, 2011; Romero et al., 2018), compara los ingresos totales de los hogares con respecto a los costos empleados para el acceso a la energía, definiendo en situación de pobreza energética aquellos que emplean el 10% o más de sus ingresos totales para pagar los servicios de energía.

Así, en esta publicación se presenta la estimación y validación de un índice de pobreza energética basado en la línea del 10% a ser implementado en los hogares urbanos de Argentina. Este índice ha sido estimado trimestralmente para el periodo 2003 – 2018, lo cual permite apreciar el impacto que tienen sobre la economía de los hogares urbanos, tanto el aumento tarifario como también los efectos de los aumentos de consumo derivados de los cambios climáticos estacionales. Asimismo, el periodo definido permite observar los cambios en la intensidad con que actúa la pobreza energética en términos de las problemáticas económicas y decisiones políticas implementadas por los gobiernos de turno.

---

<sup>1</sup> Becario doctoral CONICET

<sup>2</sup> Investigador Independiente CONICET – Personal jerárquico INENCO

Este trabajo constituye la primera estimación de la pobreza energética para los hogares urbanos de Argentina y está fundamentado en la Encuesta Permanente de Hogares, relevada trimestralmente por el INDEC, alcanzando a más del 80% del total de hogares de Argentina y permitiendo describir la composición de los hogares energéticamente pobres. El enfoque basado en el gasto que realizan los hogares para acceder a la energía – considerada como un bien necesario para el desarrollo y la vida digna – en relación a sus ingresos, permite la definición de políticas públicas que aseguren la adecuación y la posibilidad del pago para el acceso. Finalmente, tras la quita del subsidio a la energía destinada al consumo residencial, este trabajo resulta oportuno, ya que permite visualizar el impacto y evolución de esta medida, tomada en un contexto de crisis económica, en los hogares urbanos argentinos.

### **CONCEPTOS DE POBREZA ENERGÉTICA.**

En los últimos 30 años, en el contexto de estudios sobre salud, bienestar y desarrollo y su vinculación con las problemáticas de la desigualdad y pobreza, se han propuesto distintos acercamientos a estas problemáticas, entre ellas, a partir de la complejización del concepto de pobreza multidimensional, la definición de índices e indicadores de privación (Domínguez-Berjón et al., 2008; Fu et al., 2015; Gradín, et al. 2014; Havard et al., 2008; C. Salmond et al., 1998). El concepto de privación hace pie en las dimensiones materiales y sociales de la situación de pobreza, lo que permite complejizar la definición y metodología de las estimaciones de pobreza basadas exclusivamente en los ingresos. (Morris y Carstairs, 1991). Así, los índices de privación son conformados generalmente a partir de la aproximación a dimensiones tales como: nivel educativo, vivienda, empleo, ingreso, segregación y aislamiento, por nombrar las más comunes.

Vinculado a la redefinición multidimensional del concepto de pobreza, como también de los efectos en el sector residencial de las políticas económicas y energéticas de la crisis del petróleo de los 70's del siglo XX, en Inglaterra se proponen las primeras definiciones del concepto de pobreza energética. Los trabajos de Brenda Boardman (Boardman, 1991, 1988; Milne and Boardman, 1997) y su desarrollo del concepto “fuel poverty” (pobreza de combustibles, actualmente considerado como sinónimo de pobreza energética) apuntan a visibilizar la problemática de la población inglesa de los años 70 con respecto a la consecución de un estándar energético para asegurar su bienestar físico.

Actualmente, el concepto de pobreza energética está íntimamente vinculado a la relación entre el acceso a la energía y distintos aspectos del desarrollo sustentable, los cuales vienen siendo desarrollados por numerosos autores (Cottrell, 2009; Kaygusuz, 2012; Omer, 2008; Toman y Jemelkova, 2003). En particular, el acceso a la energía como derecho humano se discute a partir de la responsabilidad que tiene el Estado para asegurar el acceso a las fuentes energéticas en pos del desarrollo de una población (Bradbrook y Gardam, 2006; Tully, 2006). Para el caso de Salta, en Argentina, se han publicado resultados en torno a la relación entre el acceso residencial a la energía y a otros derechos elementales (Durán y Condorí, 2015) evidenciando que existe una fuerte vinculación entre ellos. Enmarcado en la equidad, integración y sustentabilidad, los aspectos del acceso a la energía son revisados a partir del estudio de las políticas públicas de desarrollo energético y su impacto en las problemáticas socio-económicas de la población (Allcott et al., 2014; Santoyo-Castelazo y Azapagic, 2014). De esta manera, la definición de problemáticas socio-económicas tales como la desigualdad, exclusión y pobreza, clásicamente abordadas desde las ciencias sociales, son comprendidas en la definición de políticas de desarrollo y planificación energética (Bazilian et al., 2014; Pachauri y Spreng, 2004).

Así, el acceso a la energía está conformado como una condición en la vida urbana, que no solo posibilita el desarrollo y bienestar de un hogar, sino que condiciona su inclusión o exclusión con respecto al acceso a otros derechos elementales, tales como educación, comunicación y salud. De allí que resulte estratégico, a los fines de la definición de políticas públicas de desarrollo social, evaluar, no solo el acceso o energización de la población, sino también el grado de seguridad y costos asociados a este acceso.

En este marco, las definiciones de pobreza energética vienen siendo trabajadas desde distintas perspectivas, las cuales son fundamentadas implícitamente mediante el concepto de desarrollo (Bouzarovski et al., 2012). En términos generales, el concepto de pobreza energética refiere a la imposibilidad que tiene un hogar de poder acceder o costear los requerimientos energéticos considerados como básicos para el desarrollo y el mantenimiento de la vida digna (Okushima, 2016).

Las diferentes interpretaciones a las que da lugar esta idea general y su adecuación al contexto en el cual se estima, han llevado a variaciones en torno a la definición de pobreza energética. Algunos autores ponen énfasis en los aspectos relativos a la desigualdad en el acceso y disponibilidad de los recursos energéticos (Pachauri y Spreng, 2004), la asequibilidad del recurso, o la definición de un estándar energético mínimo que debe ser cubierto para vivir confortablemente (Nussbaumer et al., 2012).

Asimismo, la estimación del concepto implica su adaptación a las características propias del espacio ambiental y sociocultural en el que será aplicado. En consideración de esto, algunos autores diferencian formas de estimación de la pobreza energética a partir de su aplicación en países desarrollados o en vías de desarrollo (Kaygusuz, 2011). Esta diferencia está fundamentada principalmente en la proporción de hogares que pueden acceder a los energéticos secundarios.

Con respecto a la región las estimaciones de la pobreza energética son nuevas, en el contexto de Latinoamérica; la Comisión Económica Para América Latina (CEPAL) ha publicado un informe sobre el estado de pobreza energética de algunos de los países de la región, buscando adaptarlo a sus características. Así, propone un índice multidimensional basado en el concepto de pobreza elaborado por Amartya Sen; dicho concepto remite a la relación entre las capacidades que tiene una persona para poder realizar sus derechos como libertades individuales. En ese sentido, el trabajo publicado por CEPAL parte de la consideración de las particularidades que tiene el caso latinoamericano en relación al uso social de la energía. Tanto las temperaturas promedio anuales, como también la temperatura de confort de un hogar difieren entre Latinoamérica y Europa. De esta manera, CEPAL discute la definición de las características térmicas para cada locación y, a su vez, considera la tecnología necesaria para poder lograr estas temperaturas.

Por otro lado, las investigaciones sobre pobreza energética en Argentina han cobrado cierta actualidad a partir de la dolarización del costo de los energéticos y la quita del subsidio universal al sector residencial. En ese marco, el Centro de Economía Política Argentina (CEPA) ha comunicado algunas mediciones del concepto de pobreza energética para hogares urbanos de la región metropolitana de Buenos Aires. La publicación de mayo del 2017 estima el nivel de pobreza energética a partir del concepto de insuficiencia de ingresos no destinados a alimentación para el gasto en energía. Esta metodología estima el nivel de PE (Pobreza Energética) a partir del ingreso total familiar, menos el costo de la canasta básica de alimentos definido por INDEC. Los costos de consumo de energía están determinados a partir del cálculo de una canasta básica energética, la cual está definida a priori a partir de la definición de un hogar ideal cuyo consumo de artefactos eléctricos y de gas varía de acuerdo a la época del año. Los valores de consumo son variables de acuerdo a la tenencia de agua y gas en este hogar ideal; en caso de la falta de uno de estos insumos básicos, se adiciona una carga energética por cada miembro de la familia. Los resultados de este ejercicio sitúan a un 25% de los hogares de la región metropolitana en estado de pobreza energética.

Asimismo, el Banco Mundial ha publicado en mayo de 2017 una investigación basada en gastos destinados al consumo de energéticos básicos para el desarrollo, a nivel de hogares para algunos países de Latinoamérica. Está basado en las encuestas de gastos de hogares de Bolivia, Brasil, Costa Rica, República Dominicana, Ecuador, Guatemala, Honduras, Jamaica, Méjico, Nicaragua, Perú, Paraguay y Uruguay. Se han considerado los gastos en combustibles utilizados para el transporte, electricidad y gas utilizado como combustible para cocinar. Se analizó cómo se distribuyen los gastos en estos energéticos de acuerdo al quintil de ingreso total del hogar, determinando que, en hogares pobres, los gastos en electricidad y gas corresponden a una mayor porción con respecto al ingreso total que para aquellos hogares de deciles superiores (en promedio un 8.5% del ingreso total contra 2%). De manera complementaria, los gastos realizados en combustible utilizados para transporte son mayores en hogares con mayores ingresos, llegando a ser del 5% en los hogares más ricos; de allí que para los hogares más ricos el gasto total en energía (transporte, gas y electricidad) corresponda con un 7.5%.

## **INDICADORES Y FORMAS DE ESTIMACIÓN DE LA POBREZA ENERGÉTICA**

Existen diversos indicadores que apuntan a estimar la intensidad con que actúa la pobreza energética sobre los hogares urbanos. En su parte, los índices de pobreza energética son elaborados replicando las formas de acercamiento y conceptualización del problema que integran el sistema de indicadores nacionales de Unión Europea, lo cual permite cierto grado de comparabilidad entre distintos países. En términos generales, se han definido dos tendencias para la conceptualización de indicadores

nacionales de pobreza energética, por un lado, aquellos basados en ingresos, y por el otro, indicadores basados en el consenso sobre el nivel de bienestar.

Los indicadores basados en ingreso (Tabla 1) parten de la definición de una línea de pobreza energética de acuerdo a variables tales como el costo que implica el acceso a la energía, su relación con el ingreso total del hogar, y la comparación entre el costo de vida (incluidos los gastos en energía) y la línea de pobreza general. A este grupo de indicadores pertenece el indicador del 10%, ampliamente utilizado en la bibliografía, su fácil definición y comparabilidad lo ha posicionado como un indicador de referencia entre distintos sistemas nacionales.

Grupo	Nombre del indicador	El hogar está en situación de pobreza energética cuando	Justificación
Según una línea de costos destinados al acceso de energía	2M	La fracción del ingreso total familiar de un hogar, utilizado para cubrir el costo destinado a la energía es mayor o igual a dos veces la media nacional de esa misma fracción.	Permiten su actualización anual.  No permite estimar los aumentos de PE a partir del cambio tarifario.
	2M del costo	El costo que destina un hogar para acceder a la energía es dos veces la media nacional del gasto destinado al costo de la energía	Al duplicar la media, se intenta distinguir hogares que realizan gastos excesivos para el acceso a la energía.
	10%	El hogar destina el 10% o más de su ingreso total familiar a cubrir el costo de acceso a la energía	Este indicador es ampliamente difundido y utilizado por diferentes autores, fácil de comunicar y comparar.  La definición está basada en el valor de 2M para Inglaterra en el año 1989.
Estándar de ingresos mínimos	Bajo ingreso y costo alto.	Los costos destinados a la energía están por encima de la media y el resto de ingreso total familiar, luego de pagar el costo está por debajo de la línea oficial de pobreza.	Permite diferenciar mejor a la pobreza energética de otras formas de pobreza basada en los ingresos.
	Media de los gastos de los hogares pertenecientes a los primeros cuatro deciles.	El ingreso disponible luego de pagar el costo de vida es igual o menor a la media de los gastos de los hogares pertenecientes a los primeros cuatro deciles	Esta medida es más descriptiva que la de “bajo ingreso y costo alto” permitiendo precisar el peso de los costos energéticos por fuera de los costos de vida, lo que puede ser bien aprovechado para distinguir el influjo de la pobreza energética entre distintos grupos vulnerables.
	La mitad de la media nacional de los gastos	El ingreso disponible luego de pagar el costo de vida es igual o menor a la mitad de la media nacional de los gastos de consumo en energía.	

Tabla 1 – Indicadores de pobreza energética basados en ingresos

Por otro lado, los indicadores basados en el consenso del nivel de bienestar, hacen pie en características cualitativas relacionadas al confort térmico o la definición de una línea de consumo

energético mínima para el desarrollo de una familia en el mundo urbano. Algunos de ellos se encuentran esquematizados en la Tabla 2

Grupo	Nombre del indicador	El hogar está en situación de pobreza energética cuando	Justificación
Basado en el consenso	Hogar no confortable	El hogar declara que no puede mantener el confort térmico.	Sin importar el nivel de ingresos, permite describir la situación de confort térmico del hogar.
	Atrasos en el pago de servicios energéticos	El hogar declara que paga sus servicios con atrasos inferiores a lo de un mes.	Permite verificar casos en los que el comportamiento de consumo energético se mantiene estable, es decir no es absorbido por una limitación en el consumo energético o una disminución en la calidad de vida, a pesar de la dificultad de honrar pago.
	Atrasos graves en el pago de servicios energéticos	El hogar declara retrasos en los pagos de sus servicios energéticos con atrasos mayores a los de un mes.	Permite vincular la situación de pobreza estructural con respecto a la de pobreza energética.
	Hogar térmicamente ineficiente	Por sus características constructivas, el hogar no puede lograr mantener el confort térmico.	Permite describir el comportamiento de consumo energético y su eficiencia en hogares en situación de pobreza energética.
	Hogar con consumos energéticos ineficientes	Por sus características de comportamiento de consumo y eficiencia energética del equipamiento, el hogar declara que debe limitar su confort al consumo que puede pagar.	

Tabla 2 – Indicadores de pobreza energética basados en el consenso

## MÉTODOS Y FUENTES DE DATOS

La especificidad del concepto de pobreza energética cobra relevancia en el vínculo entre los aspectos demográficos, culturales y sociales de una población en relación al acceso y uso social que se le brinde a la energía. De esta manera, la determinación de un índice de pobreza energética requiere del uso de información de diversas características, por lo que es habitual recurrir a múltiples fuentes. Teniendo en cuenta las características de las fuentes de datos públicos en Argentina, es posible la estimación de un índice de pobreza energética basado en la definición de línea de pobreza energética basada en la relación entre ingresos familiares con respecto a los gastos realizados para acceder a los energéticos secundarios.

Así, en este trabajo se propone la validación de la definición de línea de pobreza energética establecida según la línea del 10% de los ingresos totales familiares. Este indicador ha sido definido en los primeros trabajos de Brenda Boardman para Inglaterra, a partir de la definición del doble de la media nacional de la relación entre gasto e ingreso total familiar. Actualmente, el indicador del 10% es validado mediante el cálculo del doble de la media y utilizado como métrica por distintos países

Teniendo en cuenta la definición de línea de pobreza energética, en este trabajo se emplean datos pertenecientes a la Encuesta Permanente de Hogares (EPH). En Argentina, el Instituto de Censos y Estadísticas de la Nación (INDEC) es el órgano estatal encargado del registro y análisis de datos poblacionales y demográficos. Los aspectos económicos del país vienen siendo abordados por INDEC a través de la aplicación de programas de consulta a la población en general y a sectores de la industria en particular. Entre ellos, la EPH es un instrumento que viene siendo implementado de manera trimestral en los aglomerados urbanos del país, revisa aspectos económicos, laborales, de vivienda, acceso a servicios y relativos a la población en general (como los son las trayectorias educativas, composición familiar, acceso al sistema de salud entre otros). Si bien al tratarse de una encuesta, los resultados de la EPH son afectados por un error estadístico, la fuerte centralización urbana de la población argentina (un 88.9% del total de la población) hacen que las descripciones, análisis y conclusiones a las que se arriba a partir de la EPH tengan un alto alcance y potencial explicativo con respecto a la población total del país. De allí su amplia utilización por el INDEC para la definición de indicadores relativos a la estimación de calidad de vida en la población, como lo son, por ejemplo, el Índice de Precios al Consumidor (IPC) y el Índice de Pobreza (IP).

En este trabajo, la información relativa tanto a ingresos familiares totales, como a la composición del hogar y edilicios, están basados en la EPH y han sido calculados trimestralmente desde el año 2003 al cuarto trimestre del 2018. Es necesario advertir que, la serie de publicaciones de la EPH ha sido interrumpida en algunas ocasiones, en el tercer trimestre del año 2007 y más recientemente en el tercer y cuarto trimestre del año 2015 y primero del año 2016.

Los aspectos relacionados con la demanda energética y su costo para el sector residencial fueron estimados según fuentes oficiales y de acuerdo al tipo de energía. Así, para estimar el costo del acceso a la energía eléctrica, se han utilizado los datos de consumos anuales facturados por las prestadoras a nivel de Departamento, total de usuarios por Departamento y el cuadro tarifario vigente en el cuarto trimestre del año en curso. Se ha estimado el consumo mensual de los distintos Departamentos a partir de su promedio anual ponderado según los consumos mensuales publicados por CAMMESA

Los valores de consumo de electricidad facturados por las prestadoras para el año 2017 y 2018 todavía no han sido publicados por la Secretaría de Energía de la Nación. De allí que, para realizar el cálculo del Índice de Pobreza Energética para estos años, se ha elaborado una metodología de proyección de los consumos residenciales de electricidad a nivel de Departamentos para Argentina. Con este método se ha obtenido un ajuste de  $R^2$  para los años 2013 – 2016 superior al 0.96.

Los costos y consumos relativos al acceso a gas han sido estimados a partir de la consulta a la base de datos del Ente Nacional Regulador del Gas (ENARGAS). Se utilizaron las tablas de gas residencial entregado, según mes del año, cantidad de usuarios y cuadro tarifario. Esta información sólo se encuentra disponible a nivel de Provincias. No obstante, considerando que las redes de gas cubren principalmente zonas urbanas, se ha empleado un valor único para los Aglomerados Urbanos de una misma provincia. Asimismo, algunos Aglomerados Urbanos no disponen de acceso al gas de red; para estos casos, se estimó el costo mensual como el valor de una garrafa de 10 Kg con subsidio, según el periodo considerado.

Si bien no está integrado entre los objetivos de esta publicación, una de las ventajas de contar con los microdatos de la EPH tiene que ver con la posibilidad de poder estimar indicadores auxiliares y comprobar su comportamiento hacia el interior de hogares en situación de pobreza energética. De esta manera, es posible revisar aspectos de composición de los hogares en situación de pobreza energética, como, por ejemplo, la situación de los jefes en términos de variables laborales o educativas y sus diferencias con respecto a los hogares que no vivencian una situación de pobreza energética.

En tabla 3 se ofrece una descripción de las variables utilizadas para la definición del índice de pobreza energética y las fuentes utilizadas para su consulta.



Indicadores	Descripción	VARIABLES	Fuentes de Datos
Ingreso total familiar	Estimado a partir de la suma del total de los ingresos particulares de los integrantes de un hogar.	Ingreso total familiar para hogares de un aglomerado urbano. Consultado por INDEC para el trimestre en curso.	EPH
Consumo de energía eléctrica	Promedio mensual del consumo energético facturado por una prestadora por cada usuario de un Departamento, ponderado según la desviación trimestral del promedio anual de energía entregada por esa prestadora.	Consumo mensual promedio para un Departamento según datos de facturación de la distribuidora para un año.	Secretaría de Energía de la Nación.
		Energía eléctrica entregada a una distribuidora, utilizada para cubrir el requerimiento del sector residencial en un mes de referencia.	CAMMESA
Consumo de Gas	Promedio trimestral del consumo de gas entregado por una prestadora para una provincia para un año.	Promedio del gas entregado por una prestadora según con respecto al promedio de usuarios para un trimestre.	ENARGAS
Costo de energía – Componente eléctrico	Producto entre el valor de consumo medio mensual anual y la tarifa vigente para el Departamento en donde se sitúa el aglomerado urbano. Estimado de acuerdo al año y valores fijos y variables de la tarifa.	Tarifa de electricidad para el trimestre en curso, de acuerdo al aglomerado urbano de referencia.	Facturación publicada por las diferentes prestadoras del servicio
Costo de energía – Componente combustibles	Producto del consumo medio mensual de acuerdo a la tarifa para un Aglomerado. Si no hubiera conexión de gas residencial en ese aglomerado, corresponde al costo de una garrafa de 10 kg para el año.	Tarifa de gas para el cuarto trimestre del año considerado.	ENARGAS
		Costo de una garrafa de 10 kg según el año considerado.	Costos según distribuidoras

Tabla 3 Descripción de variables utilizadas para la definición del índice de pobreza energética

#### Índice de Pobreza Energética

Como se destacó anteriormente, el cálculo empleado para la estimación del Índice de Pobreza Energética se aplica en los distintos aglomerados urbanos de Argentina.

$$IPE_i = \left( \frac{HogPE_{ik}}{TotHog_{ik}} \right) 100 \quad (1)$$

donde:

- $IPE_i$ : es el Índice de Pobreza Energética para un aglomerado urbano  $k$  en el trimestre  $i$ .
- $HogPE_i$ : es la cantidad de hogares situados bajo la línea de Pobreza Energética para un aglomerado urbano  $k$  en el trimestre  $i$ .
- $TotHog_i$ : Es el total de hogares para un aglomerado urbano  $k$  en el trimestre  $i$ .

El número de hogares en situación de pobreza energética varía de acuerdo a la métrica que se tome de referencia, en el caso de la línea del 10% corresponderá con la relación que se define entre los ingresos totales familiares con respecto a los gastos efectuados para lograr el acceso a los energéticos residenciales. Los gastos son estimados siguiendo los componentes fijo y variable definidos por las prestadoras y de acuerdo al consumo realizado por el hogar. En el caso en que el aglomerado urbano no cuente con conexión de gas de red, se lo estimó suponiendo que un hogar consume como mínimo una garrafa de 10 kg por mes, en cuyo caso el costo corresponde con el valor de una garrafa de 10kg subsidiada por el Estado.

Así, el número de hogares en situación de pobreza energética se define como:

$$HogPE_{ik} = \sum HogITF_{ik} < (0.1 * (((CGA_{ik} * TGvA_{ik}) + TGfA_{ik}) + ((CEA_{ik} * TEvA_{ik}) + TEfA_{ik}))) \quad (2)$$

en donde:

- $HogITF_{ik}$ : es el ingreso Total Familiar de un hogar perteneciente a un aglomerado urbano  $k$  en el trimestre  $i$ .
- $CGA_{ik}$ : es el consumo promedio trimestral que efectúan los usuarios residenciales de Gas para un aglomerado urbano  $k$  en el trimestre  $i$ , estimado a partir del volumen de gas entregado a usuarios residenciales y el total de usuarios para la Provincia en donde se sitúa ese Aglomerado Urbano.
- $TGvA_{ik}$ : es el componente variable de la Tarifa de Gas vigente en la Provincia donde se sitúa el aglomerado urbano  $k$  en el trimestre  $i$ . El componente variable es una constante que está tabulada de acuerdo al consumo efectuado en el periodo considerado por la prestadora.
- $TGfA_{ik}$ : es el componente fijo de la Tarifa de Gas vigente en la Provincia en donde se sitúa el aglomerado urbano  $k$  en el trimestre  $i$ . El componente fijo es un costo constante que se adiciona al total, está tabulado según la magnitud de consumo efectuado en el periodo considerado por la prestadora.
- $CEA_{ik}$ : es el consumo promedio trimestral que efectúan los usuarios residenciales de Electricidad para el trimestre  $i$ . Está estimado a partir de la determinación del total de energía eléctrica facturada según el número total de usuarios residenciales para un aglomerado urbano  $k$  en el trimestre  $i$ . Desde el año 2013 en adelante, este valor ha sido calculado afectando el consumo promedio anual, declarado por las prestadoras que ocupan el área de concesión integrada por el aglomerado  $k$ , con un factor de ponderación  $\sigma_{ik}$ .
- $TEvA_{ik}$ : Es el componente variable de la Tarifa de Electricidad vigente en el Departamento en el que se sitúa el aglomerado urbano  $k$  para el trimestre  $i$ . El componente variable es una constante que está tabulada de acuerdo al consumo efectuado en el periodo considerado por la prestadora.
- $TEfA_{ik}$ : Es el componente fijo de la Tarifa de Electricidad vigente en el Departamento en donde se sitúa el aglomerado urbano  $k$  para el trimestre  $i$ . El componente variable es una constante que está tabulada de acuerdo al consumo efectuado en el periodo considerado por la prestadora.

El factor de ponderación para definir la variación del consumo trimestral de energía eléctrica ha sido definido mediante la siguiente relación:

$$\sigma_{iak} = \frac{x_{ik} - \bar{x}_{ka}}{\bar{x}_{ka}} \quad (3)$$

Donde:

- $x_{ik}$ : Es el promedio mensual de energía entregada por CAMMESA, evaluado en el trimestre  $i$ , a una prestadora cuya área de concesión integra el aglomerado  $k$
- $\bar{x}_k$ : Es el promedio mensual de energía entregada por CAMMESA, evaluado en el año  $a$ , a una prestadora cuya área de concesión integra el aglomerado  $k$
- $\sigma_{iak}$ : Es la desviación del promedio de energía entregada en un trimestre  $i$  por CAMMESA a una prestadora cuya área de concesión integra el aglomerado  $k$  con respecto al promedio anual de energía entregada por esa prestadora para un aglomerado  $k$  evaluado en el año  $a$

## RESULTADOS

La línea del 10% es uno de los indicadores de pobreza energética utilizados como métrica nacional en distintos países de unión europea. Asimismo, es un indicador de amplia referencia en la bibliografía especializada en la temática.

La utilización del 10% como valor universal es validada a partir de la evaluación del comportamiento de la mediana nacional de la relación entre los gastos que realiza un hogar para lograr el acceso a las fuentes energéticas secundarias y los ingresos totales con que cuenta ese hogar para un mes. Se estima que el valor de dos veces la mediana es un parámetro suficiente para definir cuándo la relación entre gastos e ingresos es alta.

Con el fin de validar el uso de este indicador para el caso de Argentina, en el gráfico 1, se expone la evolución trimestral del valor correspondiente a dos veces la media de la proporción entre costo destinado al acceso a la energía con respecto al ingreso total familiar de un hogar (2M). Como se observa, los valores varían ampliamente, resultando como un efecto de las siguientes variables: ambiental (variaciones según la estación del año), el costo asociado al consumo energético, los cuadros tarifarios en vigencia y los ingresos totales familiares.

Por otro lado, el valor de 2M que se toma como referencia para la definición de un indicador de pobreza energética es escogido según el periodo analizado. Así, las comparaciones se realizarán con respecto a ese periodo. Por otro lado, estadísticamente, es conveniente utilizar un valor de 2M que corresponda a un periodo tarifario constante. Estos argumentos apoyan la definición de una línea de pobreza energética para Argentina definida entre el 2015 y el 2016, periodo en el que se da inicio al proceso de desregularización tarifaria y a la quita del subsidio universal al consumo energético residencial. Teniendo en cuenta esto, el valor de 2M para el primer trimestre de 2016 corresponde a 9,7%, un valor cercano al 10%, por lo que esta línea resulta como válida para analizar la evolución de la intensidad de la pobreza energética en Argentina con respecto al inicio del periodo de aumento tarifario.



Gráfico 1 - Evolución trimestral de la relación 2M para Argentina 2003 - 2018

El impacto del aumento tarifario queda en evidencia al analizar, en el gráfico 2, la evolución del indicador de pobreza energética 2M, es decir al definir para cada periodo temporal el porcentaje de hogares cuya proporción entre los costos de energía y el ingreso total familiar son mayores o iguales a la media nacional. Como anticipa la literatura, en aquellos casos en que existe un marcado incremento tarifario los valores de pobreza energética estimada a partir de 2M muestran un descenso. Esto se explica debido a que, al aumentar el costo de las tarifas, aumenta correlativamente la relación de 2M por igual para todos los hogares, lo cual lleva a un ocultamiento del nivel de pobreza energética real.



Gráfico 2 - Evolución trimestral del indicador 2M para Argentina 2003 - 2018

Finalmente, si se considera a la relación del 10% como línea de pobreza energética, en el gráfico 3 se describe su evolución para el total de hogares de los aglomerados urbanos de Argentina. El indicador permite apreciar el impacto que tuvo el aumento tarifario, pasando en el segundo trimestre del año 2015 de 0.8% a un 14,8% al primero del 2016. El porcentaje de hogares en situación de pobreza energética se mantiene, con un comportamiento aproximadamente constante durante el periodo 2016 – 2017, no obstante, durante el periodo 2018 aumenta nuevamente, observando valores del doble con respecto al año 2016 / 2017. Estos aumentos obedecen a un doble aumento de las tarifas, por un lado, con respecto al aumento pautado desde las prestadoras con anticipación, y por el otro, debido a la dolarización de los precios de la energía, con respecto a la devaluación del peso en relación al dólar.

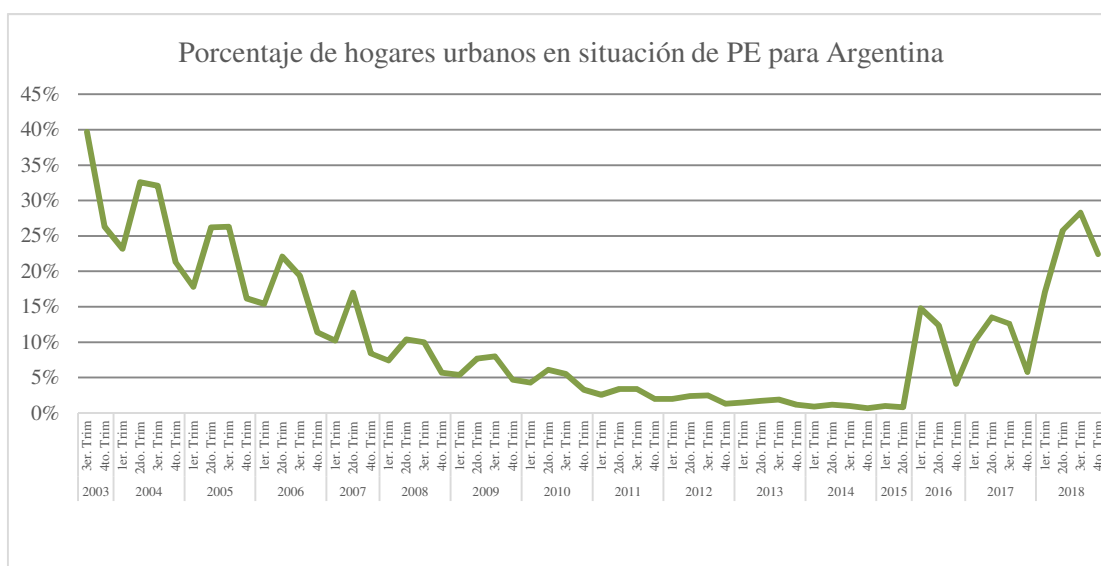


Gráfico 3 - Evolución trimestral del indicador 10% para Argentina 2003 - 2018

## CONCLUSIONES

Se ha presentado la definición, validación y estimación de un indicador de pobreza energética para Argentina ampliamente utilizado en la literatura y como métrica de referencia para diferentes países y organismos internacionales. Así, se ha determinado que, para el periodo de aumento tarifario evidenciado entre los años 2015 – 2016, el valor de 2M es aproximado al 10%, por lo que la utilización de esta métrica constituye un método estadísticamente aceptable para la comparación de la intensidad con que actúa la pobreza energética en relación al año 2015.

Si bien existen diferentes alternativas para la estimación de indicadores de pobreza energética, la métrica basada en el 10%, por su sensibilidad a los cambios tarifarios, se constituye como una herramienta útil para valorar el impacto de la dolarización de los costos de la energía sobre el sector residencial y, especialmente, sobre la situación económica de los hogares urbanos.

Finalmente, la conceptualización del acceso a la energía como derecho humano abre una vía de trabajo sobre la pobreza energética en términos de su posicionamiento político. En este sentido, conocer la evolución de un indicador de pobreza energética permite plantear trabajos de políticas energéticas para el sector residencial que apunten, no solo a lograr que la energización urbana sea realmente accesible para todos, sino también a plantear el vínculo entre los estudios clásicos sobre pobreza y estructuras de clase y desarrollo social desde las políticas energético. Así, la definición de la situación de pobreza energética a nivel nacional abre una vía para plantear la íntima vinculación entre la definición de políticas energéticas para el sector residencial y políticas de desarrollo social.

## BIBLIOGRAFÍA

- Allcott, H., Mullainathan, S., Taubinsky, D., 2014. Energy policy with externalities and internalities. *Journal of Public Economics* 112, 72–88. <https://doi.org/10.1016/j.jpubeco.2014.01.004>
- Bazilian, M., Nakhooda, S., Van de Graaf, T., 2014. Energy governance and poverty. *Energy Research & Social Science* 1, 217–225.
- Beker, V., 2019. La evolución del dólar y la política cambiaria. Universidad de Belgrano-Centro de Estudios de la Nueva Economía (CENE).
- Boardman, B., 1991. Fuel poverty: from cold homes to affordable warmth. Pinter Pub Limited.
- Boardman, B., 1988. Economic, social and technical considerations for fuel poverty policy. (PhD Thesis). University of Sussex.
- Bouzarovski, S., Petrova, S., Sarlamanov, R., 2012. Energy poverty policies in the EU: A critical perspective. *Energy Policy* 49, 76–82.
- Bradbrook, A.J., Gardam, J.G., 2006. Placing Access to Energy Services within a Human Rights Framework. *Human Rights Quarterly* 28, 389–415. <https://doi.org/10.1353/hrq.2006.0015>
- Cottrell, F., 2009. *Energy & society: the relation between energy, social change, and economic development*. AuthorHouse.
- García Ochoa, R., 2014. *Pobreza energética en América Latina*.
- González-Eguino, M., 2015. Energy poverty: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 47, 377–385.
- Kaygusuz, K., 2012. Energy for sustainable development: A case of developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 1116–1126.

- Kaygusuz, K., 2011. Energy services and energy poverty for sustainable rural development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 936–947. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.003>
- Milne, G., Boardman, B., 1997. Making cold homes warmer: the effect of energy efficiency improvements in low-income homes. Eaga Charitable Trust.
- Nussbaumer, P., Bazilian, M., Modi, V., 2012. Measuring energy poverty: Focusing on what matters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 231–243.
- Okushima, S., 2016. Measuring energy poverty in Japan, 2004–2013. *Energy Policy* 98, 557–564. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.09.005>
- Omer, A.M., 2008. Energy, environment and sustainable development. *Renewable and sustainable energy reviews* 12, 2265–2300.
- Pachauri, S., Spreng, D., 2011. Measuring and monitoring energy poverty. *Energy policy* 39, 7497–7504.
- Pachauri, S., Spreng, D., 2004. Energy Use and Energy Access in Relation to Poverty. *Economic and Political Weekly* 39, 271–278.
- Romero, J.C., Linares, P., López, X., 2018. The policy implications of energy poverty indicators. *Energy policy* 115, 98–108.
- Santoyo-Castelazo, E., Azapagic, A., 2014. Sustainability assessment of energy systems: integrating environmental, economic and social aspects. *Journal of Cleaner Production* 80, 119–138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.061>
- Toman, M.A., Jemelkova, B., 2003. Energy and economic development: An assessment of the state of knowledge. *The Energy Journal* 93–112.
- Tully, S., 2006. The Human Right to Access Electricity. *The Electricity Journal* 19, 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2006.02.003>
- Varesi, G.Á., 2018. Relaciones de fuerza bajo la presidencia Macri. *Realidad económica* 47, 9–44.

**ABSTRACT:** This contribution presents the determination, estimation, and validation of an indicator of energy poverty for the urban population of Argentina. This indicator is widely disseminated in the literature and used as a reference metric by numerous international organizations and countries. It assesses whether the household allocates 10% or more of its total family income as an expense for access to residential energy use. The indicator was estimated quarterly for urban agglomerates in Argentina, and its evolution is presented from 2003 to the fourth quarter of 2018. It has been validated following the method of twice the national average (2M) for the reference period. Thus, it is observed that the value of 2M for the first quarter of 2016 is approximately 10%, which allows supporting the use of the 10% line to estimate the evolution of energy poverty intensity to the 2015 - 2016 period.

**Keywords:** Energy poverty - Energy poverty indexes - Energy policy - Social Development

## **REDUCCION DE EMISIONES EN LA INDUSTRIA DE LITIO EN LA PUNA ARGENTINA MEDIANTE TECNOLOGIAS SOLARES DE CONCENTRACION**

**P. Dellicompagni<sup>a</sup>, J. Franco<sup>a</sup>, V. Flexer<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), 5150 Bolivia Av. (4400). Salta, Argentina. E-mail address: [pablodellicompagni@gmail.com](mailto:pablodellicompagni@gmail.com)

<sup>b</sup>Centro de Investigación y Desarrollo en Materiales Avanzados y Almacenamiento de Energía de Jujuy (CIDMEJu), Juan A. Rojas esq. San Martín (4612). Palpalá, Jujuy. Argentina.

*Recibido 13/08/19, aceptado 22/10/19*

**RESUMEN:** Este artículo propone una estimación de reducción de las emisiones de dióxido de carbono en la actividad minera extractiva de carbonato de litio en la región Puna Argentina. Se consideraron quince regiones potenciales para diseñar proyectos mineros con una capacidad de producción previamente establecida. Se comparan dos escenarios principales, el primero bajo un régimen de producción 100% abastecido con recursos carburíferos (gas natural), mientras que el segundo escenario se diseña con implementación de tecnologías solares de concentración. Este último permite determinar la mitigación de emisiones hacia la atmósfera cuando el recurso solar se emplea para generación térmica. Además, se determina la incidencia en la matriz de consumo de energía térmica de la actividad minera, basada parcialmente en tecnologías solares de concentración.

**Palabras claves:** Carbonato de litio, tecnologías solares, mitigación de emisiones

### **INTRODUCCIÓN**

Existen dos cuestiones fundamentales que despertaron el interés de la incorporación de tecnologías solares en el ámbito minero Argentino, la primera de ellas se enmarca en un contexto legal establecido por la Ley Nacional 27191, que modifica a la Ley 26190, denominada *Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica* (Boletín Oficial Nacional, 2015). La misma establece, en su artículo 5 del Capítulo 2, lograr una contribución de las fuentes renovables de energía hasta alcanzar el veinte por ciento (20%) del consumo de energía eléctrica nacional, al 31 de diciembre de 2025. El cumplimiento de estas obligaciones deberá hacerse en forma gradual, incorporando un 4% por año del total del consumo eléctrico hasta alcanzar la tasa final en el 2025. Por otra parte, las empresas, cualquiera sea su rubro, tienen compromisos asumidos en sus estatutos en cuanto a Responsabilidad Social Empresarial (RSE), lo cual establece un lineamiento, entre otros tantos, relativo a la responsabilidad ambiental de sus actividades.

En un contexto global, los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) (Naciones Unidas, 2015) establecen la importancia de garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos (Objetivo 7) y de adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos (Objetivo 13) (Naciones Unidas, 2019). La Organización de las Naciones Unidas reporta (2019) que un 90% de la población mundial tiene acceso a la energía eléctrica, pero será necesario redoblar los esfuerzos para alcanzar a aquellos que todavía no tienen acceso a ella. A nivel mundial, la electrificación de las zonas rurales progresó rápidamente entre los años 2015 y 2017, pero continúa existiendo una amplia brecha. En 2017, la cobertura en las áreas rurales era del 78%, en comparación con el 97% en las zonas urbanas. Esto significa que el 87% de las personas que no disponen de energía eléctrica actualmente viven en zonas rurales.



La proporción de la energía renovable en el consumo total de energía alcanzó el 17.5% en 2016, en comparación con el 16.6% en 2010. En términos absolutos, el consumo de energía renovable aumentó un 18% durante ese período. La proporción de energía renovable moderna aumentó a un ritmo más rápido, del 8.6% en 2010 al 10.2% en 2016. Esta categoría no incluye el uso tradicional de la biomasa, que refiere al uso ineficiente de la biomasa sólida, como la combustión de madera, carbón u otra materia orgánica. El mayor crecimiento de energía renovable se concentra en el sector de la energía eléctrica. Esto se debe principalmente a la rápida expansión de la energía eólica y solar, impulsada por el apoyo sostenido de políticas y la reducción de costos. Sin embargo, la energía eléctrica solo representa el 20% del consumo final de energía. El 80% restante se concentra en los sectores de calefacción y transporte, en los que las fuentes renovables modernas en el año 2016 representaron solo el 9% y 3.3% del mercado mundial, respectivamente. Por otro lado, la financiación internacional en energía renovable en los países en desarrollo está aumentando considerablemente, además, la eficiencia energética sigue mejorando, pero es necesario tomar medidas más concertadas para alcanzar la meta de los ODS. La mejora de la eficiencia energética, junto con un mayor acceso a la energía eléctrica y su asequibilidad, son fundamentales para el objetivo mundial de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

En su reporte del 2019, las Naciones Unidas alertan que el cambio climático está ocurriendo a un ritmo mucho más acelerado de lo previsto y sus efectos son evidentes en todo el mundo. La temperatura media mundial para 2018 superó por aproximadamente 1°C la línea de base preindustrial y los últimos cuatro años han sido los más cálidos registrados. Es por ello que se estableció limitar el calentamiento global a 1.5 °C para evitar consecuencias catastróficas y cambios irreversibles. Esto requerirá transiciones rápidas y de gran alcance en los sectores de energía, suelo, infraestructura urbana y sistemas industriales. Desde ésta perspectiva, los países constituyentes han adoptado medidas de contribuciones determinadas a nivel nacional (CDN) a efectos de plantear un escenario de mitigación de GEI, a mediados de siglo (Figura 1).

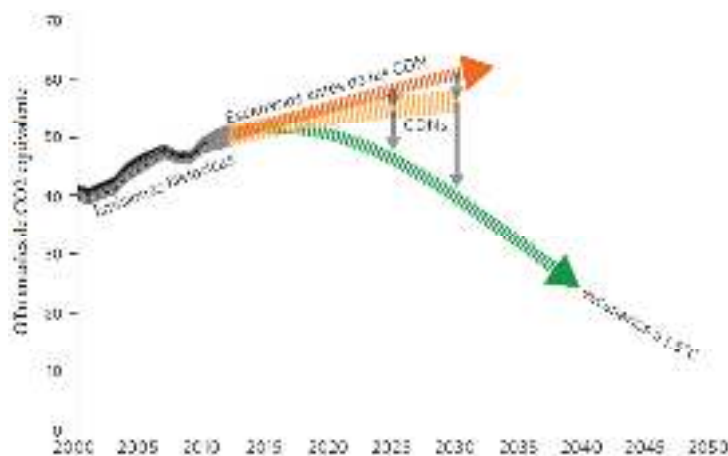


Figura 1. Escenario global de emisiones de CO<sub>2</sub>, antes y después de CDN.

Fuente: United Nations Climatic Change (UNCC, 2016).

Por otro lado, el Consejo Mundial de la Energía (WEC) plantea la necesidad de resolver el *trilema energético* de todas las naciones. El trilema se refiere a los complicados objetivos que afrontan los gobiernos de asegurar el suministro energético competitivo, proporcionando a su vez el acceso universal a la energía y promoviendo la protección ambiental. Trata pues tres aspectos fundamentales de la energía: la seguridad de suministro, la equidad social y la mitigación del impacto ambiental (Camacho Parejo, 2012). En su reporte, Wyman (2015) asevera que tanto el sector energético como el político, a nivel global, están preparados para establecer metas claras con el objeto de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. La estabilidad del sector político podrá facilitar al sector energético a estar inmerso en la transición energética hacia la sustentabilidad a futuro (WEC, 2016). Para lograr tales metas los gobiernos deberán focalizar la atención en financiamiento y soporte, tanto nacional como internacional, público y privado, a la investigación, diseño y desarrollo de nuevas tecnologías, materiales y combustibles.

Argentina, desde 1994, ratifica su pertenencia a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), asumiendo la obligación de informar sus inventarios nacionales de GEI y programas nacionales que contengan medidas para mitigar el cambio climático. El segundo Reporte Bienal de Actualización (2017) muestra el inventario de emisiones de GEI del año 2014, estimadas e informadas de acuerdo con las Directrices del Panel Internacional de Cambio Climático (IPCC, 2006). Para el 2014, Argentina emitió poco más de 368 GgCO<sub>2</sub> equivalentes, muy por debajo del pico histórico registrado en el 2007, como se observa en Figura 2.

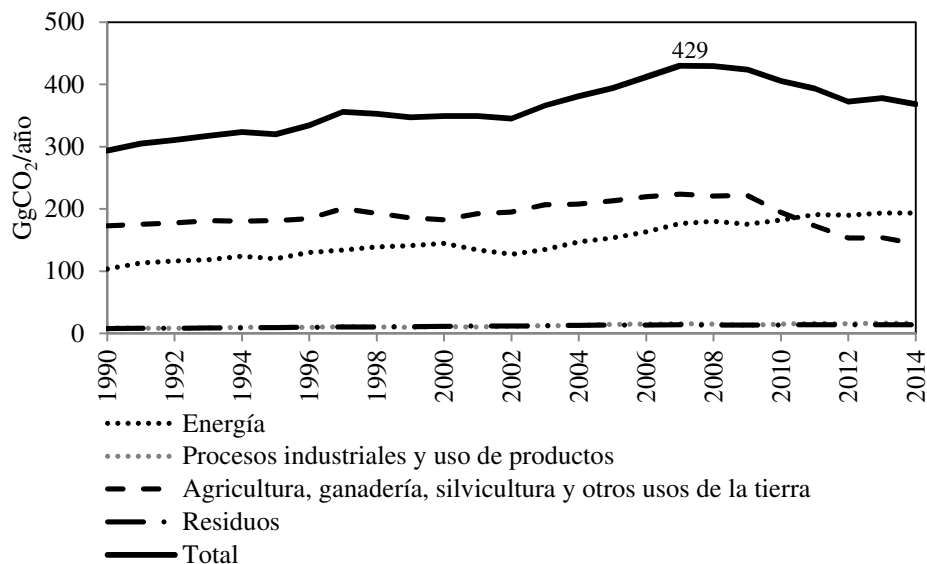


Figura 2: Estimación histórica de emisiones de dióxido de carbono en Argentina.

Si bien las emisiones totales han marcado un descenso hacia el año 2014, Argentina adoptó diversas medidas de mitigación de emisiones a través de la generación eléctrica a partir de fuentes renovables, conectadas a la red (programas RenovAr, MaTer); generación eléctrica aislada de la red mediante el Proyecto de Energías Renovables en Mercados Rurales (PERMER); iluminación residencial y alumbrado público mediante el Programa Nacional de Uso Racional y Eficiente de la Energía (PRONUREE); corte con biocombustibles en gasoil y naftas para el transporte carretero; promoción en el desarrollo de proyectos de forestación y conservación, manejo sostenible y recuperación de bosques nativos. En materia de minería metalífera, en particular carbonato de litio, no se adoptaron medidas de mitigación a nivel nacional dado que la urgencia global abarcaba aquellos sectores con mayores índices de emisiones. No obstante, las regulaciones Provinciales prevén que las empresas mineras realicen planes de manejo ambiental, como en el caso de la Provincia de Jujuy que en su Decreto N° 5772 exige la inclusión de un Plan de Monitoreo de las emisiones sólidas, líquidas y gaseosas, según resultare necesario (Boletín Oficial de la Provincia de Jujuy, 2010). En el mismo decreto, se establecen los niveles guía de calidad del aire, en los cuales no están contempladas las emisiones de CO<sub>2</sub>.

En el presente, existe una cartera de proyectos mineros, involucrados principalmente en la producción de carbonato y borato de litio, en la Puna Argentina, que se extiende en las provincias de Jujuy, Salta y Catamarca e integran una región globalmente conocida como *el triángulo del litio* (USGS, 2019; BGS, 2019). Este escenario plantea un futuro promisorio para la industria metalífera argentina en el corto y largo plazo. Como contrapartida, se tiene que la mayoría de las empresas han puesto su atención en salares alejados de las principales fuentes de energía: gas y electricidad. Un vasto número de proyectos tienen contemplada la generación termoeléctrica a partir del recurso gasífero, estando ubicadas a una distancia promedio de 40 km del abastecimiento energético.

En este artículo, se estima el potencial de calentamiento global (PCG) de proyectos de producción de carbonato de litio equivalente (CLEq) de capacidades estándar de producción (20000 y 25000 Tn<sub>CLEq</sub>/año) para quince (15) salares extendidos a lo largo de toda la Puna. El método de estimación se basa en el factor de emisiones de CO<sub>2</sub> de la red Argentina de energía eléctrica (Secretaría de Energía,

2006). Además se estima el potencial de reducción de emisiones (PRE) para distintas tecnologías de concentración solar (Fresnel y cilindro parabólico) sin almacenamiento térmico. Finalmente, se determina la incidencia en la matriz de consumo térmico.

## REGION DE ESTUDIO

Los proyectos de explotación minera y las empresas ya instaladas con sus respectivos regímenes de producción, se dispersan en distintos salares de la Puna, en el Noroeste Argentino (NOA). La Tabla 1 muestra los salares considerados para el presente estudio. Puede observarse que las distintas locaciones se encuentran en un rango de 3000 – 4300 metros sobre el nivel del mar. Este hecho da la pauta de que las condiciones climáticas son relativamente similares, fundamentalmente los valores de irradiación global sobre superficie horizontal, acumulada anual (Sarmiento et al., 2019).

Provincia	Salar	Latitud (°)	Longitud (°)	Altura (m.s.n.m.)	Irradiación anual (kWh/m <sup>2</sup> )
Salta	Rincón	-24.171	-67.096	4308	2307.64
	Pastos Grandes	-24.567	-66.699	3774	2254.75
	Pozuelos	-24.700	-66.820	3758	2276.47
	Centenario	-24.883	-66.733	3820	2156.28
	Arizaro	-24.723	-67.738	3469	2232.44
	Diablillos	-25.253	-66.744	4028	2182.17
	Pocitos	-24.372	-66.986	3682	2247.99
Jujuy	Guayatayoc	-23.416	-65.850	3411	2283.04
	Olaroz	-23.486	-66.707	3899	2284.65
	Jama	-23.293	-67.041	4079	2292.74
	Cauchari	-23.787	-66.758	3903	2274.04
	Salinas Grandes	-23.733	-66.056	3408	2303.03
Catamarca	Hombre Muerto	-25.424	-67.094	3968	2274.14
	Antofalla	-25.716	-67.711	3326	2241.29
	Carachi Pampa	-26.469	-67.535	3006	2176.99

Tabla 1: Salaros seleccionados para la estimación de emisiones de dióxido de carbono y potencial de reducción de emisiones en base solar térmica.

Puede observarse que la irradiación solar en la región de estudio alcanza valores por encima de los 2100 kWh/m<sup>2</sup>-año. Estos valores son comparables con otros lugares del mundo donde la irradiación solar presenta valores favorables para la generación de potencia, tal como en ciertas regiones de la India (Ramachandra et al, 2011) y Saudi Arabia (Zell et al., 2015). Según un estudio realizado por Carmona et al. (2017) y Sarmiento et al. (2019), la región de Puna en general, y en particular el lado noroeste de Argentina, pertenece a una de las regiones de mayor recurso solar en el mundo. Coincidentemente, ésta región también pertenece a al *triángulo del litio*, conformada por una larga región del norte de Chile, sudoeste de Bolivia y noroeste de Argentina. Esta área concentra alrededor del 66% del recurso global de litio (Sterba et al., 2019).

## PROCESO DE OBTENCION DE CLE

El litio mineral es relativamente abundante en el planeta, ocupa la vigésimo quinta posición en el ranking global, y se encuentra combinado con más de 150 minerales, en arcillas, salares, agua geotermal y agua de mar (Taylor and McLennan, 1985). En nuestra región, el método actual de obtención del carbonato de litio puede observarse en la Figura 3.

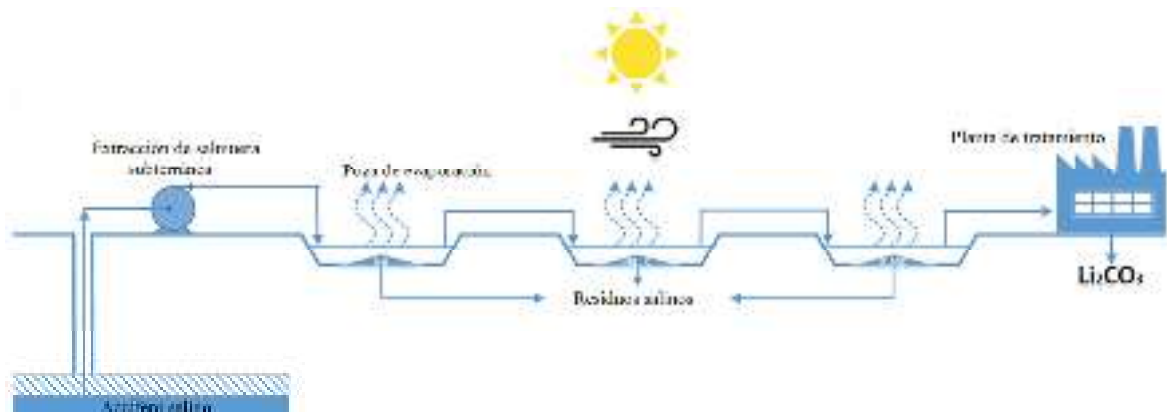


Figura 3: método actual de obtención de carbonato de litio, por decantación, concentración y post procesamiento de la salmuera.

La salmuera es bombeada desde el acuífero salino hasta el sistema de pozas, en las cuales le produce evaporación debido a la acción solar y del viento. Este método para la extracción de litio se conoce generalmente como tecnología evaporítica. Implica varios pasos de evaporación sucesiva de la salmuera nativa en diferentes pozas con precipitación concomitante y recolección de sales de los otros iones (Na, K, Mg) (Flexer et al., 2018). Cuando el cloruro de litio en las pozas de evaporación alcanza la concentración óptima, la salmuera concentrada se bombea a una planta de recuperación o tratamiento. El proceso que acontece en dicha planta se muestra en la Figura 4.

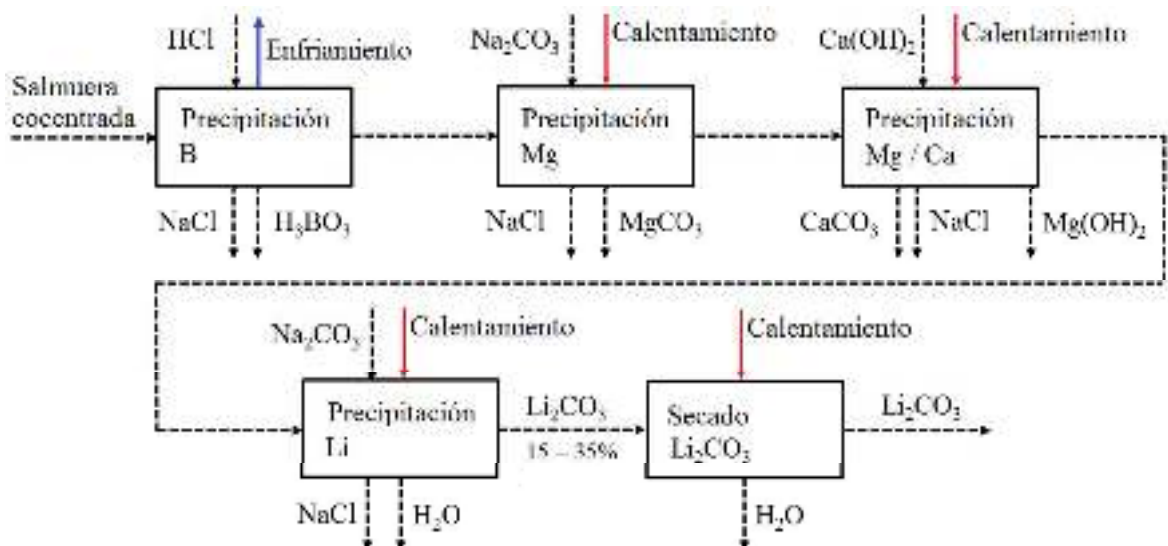


Figura 4: Proceso de obtención del carbonato de litio a partir de la salmuera concentrada proveniente del sistema de pozas (Telsnig et al., 2017).

Primero, el boro se elimina de la salmuera agregando ácido clorhídrico durante un proceso de enfriamiento para evitar la precipitación de boro con litio como borato de litio. En segundo lugar, la salmuera se mezcla con carbonato de sodio para reducir el contenido de magnesio y se trata con hidróxido de calcio para reducir al mínimo el contenido de magnesio y calcio. Finalmente, el carbonato de litio se obtiene agregando carbonato de sodio y el contenido de agua se elimina mediante calentamiento. Los pasos de precipitación y el secado del material obtenido requieren energía térmica. La cual es abastecida actualmente mediante vapor de agua generado por la quema de gas.

## MODELO DE PROYECTOS

Se consideraron dos modelos de proyectos de producción de carbonato de litio: uno de una capacidad de 20000  $Tn_{CLEq}$ /año y otro de 25000  $Tn_{CLEq}$ /año. Según las entrevistas realizadas a las empresas del ámbito, el primer modelo demanda un consumo de gas natural de 38000  $m^3$ /día y 52000  $m^3$ /día, cuando todo el proceso se abastece 100% a gas. Con respecto a la demanda térmica de vapor, se

corresponde a cada uno 6 Tn/hora y 7 Tn/hora. En un régimen de producción ininterrumpida, la potencia térmica nominal para cada modelo es de 4.6 MWt y 5.4 MWt. El análisis de performance de las tecnologías de concentración Fresnel lineal (FL) y cilindro parabólica (CP) se realiza mediante el software de cálculo SAM (System Advisor Model), desarrollado por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL, Estados Unidos) (Wagner, 2012; Wagner and Zhu, 2012). De manera preliminar, se analizan ambas tecnologías para ambas capacidades de producción en un régimen de operación sin almacenamiento térmico.

La tabla 2 muestra las características técnicas de los proyectos de concentración solar a analizar para la generación de vapor de proceso, según la capacidad de producción anual. Los parámetros climatológicos son tomados de las bases de datos climáticas provistas por las compañías. SAM determina los valores medios de dichos parámetros y los muestra en la interface del software.

Parámetro	Unidad	Valor	
<b>Capacidad de producción anual</b>	<b>Tn<sub>CLEq</sub></b>	<b>25000</b>	<b>20000</b>
<i>Condiciones meteorológicas de diseño</i>			
Irradiancia directa normal de diseño	W/m <sup>2</sup>	700	750
Velocidad media de viento	m/s	2.3	2.2
Temperatura media	°C	6.9	7.7
<i>Parámetros del campo solar</i>			
Múltiple solar teórico	-	1	1
Múltiple solar real	-	1.17	2.05
Área de apertura por circuito	m <sup>2</sup>	4087.5	17200
Área de apertura total	m <sup>2</sup>	12262.5	17200
Cantidad de circuitos	-	3	1
Eficiencia térmica por circuito	-	0.771	0.984
Eficiencia térmica total	-	0.738	0.735
Ocupación terrestre	m <sup>2</sup>	48562.3	25800
<i>Generación de vapor de agua</i>			
Potencia térmica pico	MW <sub>t</sub>	6.34	4.63
Temperatura del agua de ingreso	°C	35	35
Temperatura del vapor de salida	°C	180	180

Tabla 2: Parámetros de entrada para la simulación de los sistemas de concentración en SAM.

#### Resultados: PCG y PRE

La figura 5 muestra el potencial de calentamiento global (PCG), o bien el potencial de emisiones de CO<sub>2</sub> cuando los proyectos de extracción del carbonato son abastecidos con gas natural en su totalidad. La determinación de éste parámetro se determina multiplicando el consumo anual de gas natural por un factor de emisión y luego dividiéndolo por la producción anual del carbonato. Este método de estimación se basa en el factor de emisiones de CO<sub>2</sub> de la red Argentina de energía eléctrica (Secretaría de Energía, 2006), dicho factor vale 1.936 TnCO<sub>2</sub>/dam<sup>3</sup> (1 dam<sup>3</sup> = 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>). Si bien se emplearon las nomenclaturas CP, FL y las capacidades productivas de cada proyecto, estas no hacen referencia a la implementación de las tecnologías solares de concentración. Vale decir, que la figura 4 indica el PCG que podrían tener los proyectos definidos anteriormente pero sin la implementación de tecnologías solares de concentración.

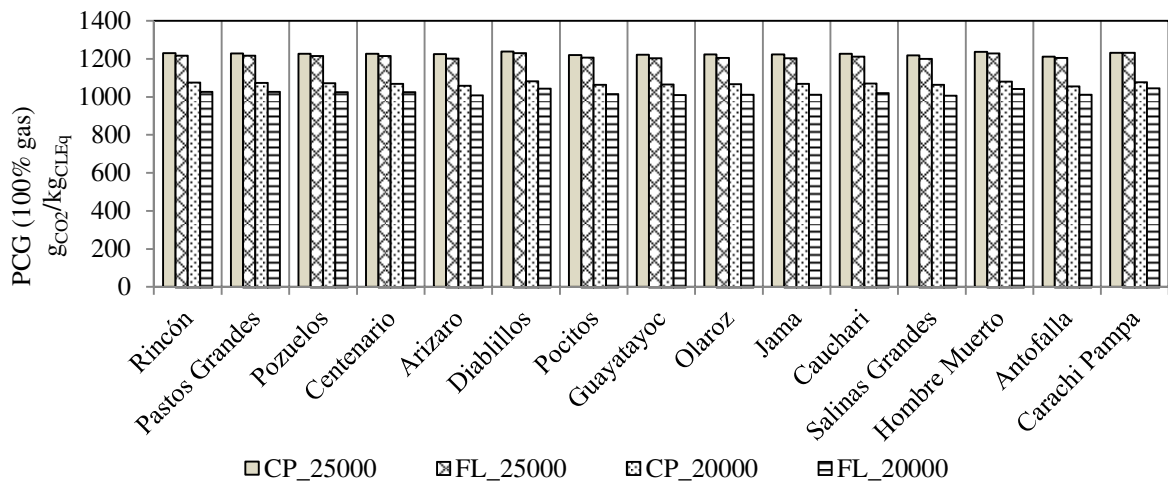


Figura 5: Potencial de calentamiento global para proyectos 100% abastecidos a gas natural.

Las simulaciones en SAM se realizan para los quince salares, combinando las dos capacidades de producción anual con las dos tecnologías de concentración. Sin almacenamiento térmico en todos los casos. La figura 6 muestra el PCG de los proyectos cuando se incorporan tecnologías solares de concentración, mientras que la figura 7 muestra el potencial de reducción de emisiones (PRE).

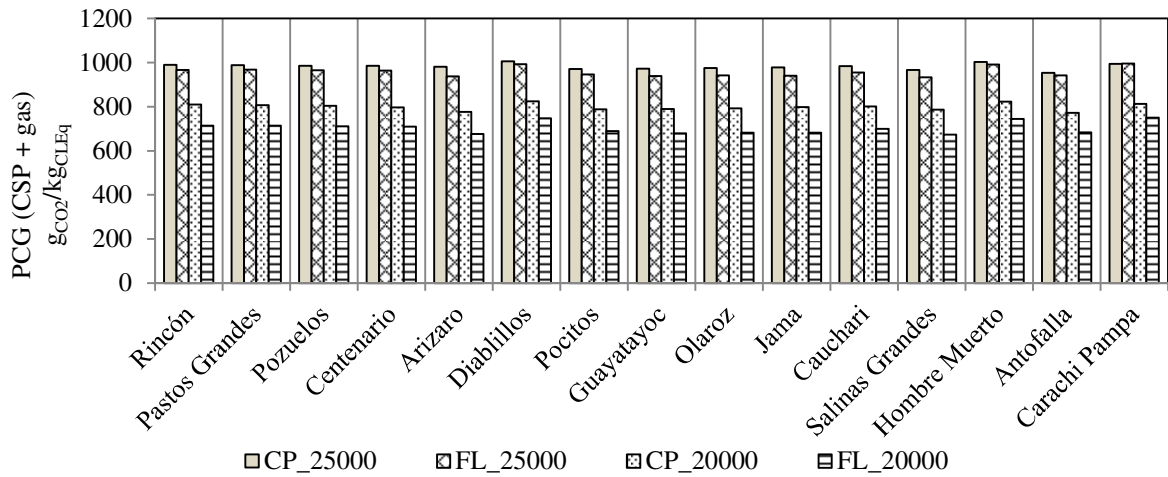


Figura 6: Potencial de calentamiento global para proyectos con incorporación parcial de tecnologías de concentración solar sin almacenamiento térmico.

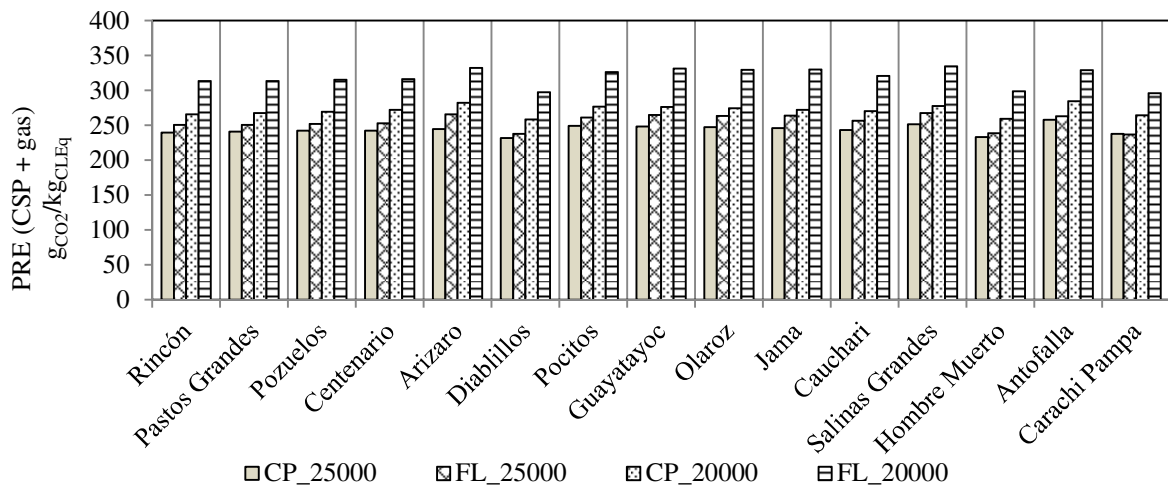


Figura 7: Potencial de reducción de emisiones para proyectos con incorporación parcial de tecnologías de concentración solar sin almacenamiento térmico.

Resulta de interés determinar cuánto es capaz de emitirse a la atmósfera en toda la región de Puna bajo la hipótesis de que los proyectos considerados en éste trabajo se encuentran en su régimen de producción nominal, así como las emisiones cuando las tecnologías de concentración son implementadas y el potencial de reducción de emisiones debido a estas. La tabla 3 resume estos tres parámetros a nivel regional, en la que, además, puede verse una considerable reducción porcentual de emisiones que, en el peor de los casos, es del 24%.

Tecnología	Generación	Capacidad	PCG (100% gas)	PCG (CSP + gas)	PRE (CSP+gas)	Reducción de emisiones
		Tn <sub>CLEq</sub> /año	gCO <sub>2</sub> /kg <sub>CLEq</sub>	gCO <sub>2</sub> /kg <sub>CLEq</sub>	gCO <sub>2</sub> /kg <sub>CLEq</sub>	%
Fresnel	Térmica	20000	15348	10557	4791	31
Fresnel	Térmica	25000	16802	11557	5245	31
Cilindroparabólico	Térmica	20000	16061	12249	3812	24
Cilindroparabólico	Térmica	25000	17045	12042	5003	29

Tabla 3: Resumen regional de emisiones y reducción de emisiones para la Puna Argentina.

#### Resultados: incidencia en la matriz térmica

Las tecnologías de concentración proyectadas en este trabajo tienen el fin de generar vapor de agua y su posterior utilización en la cadena de obtención del carbonato de litio. Durante las horas de sol, los sistemas generaran el vapor de agua, reduciendo así el consumo de gas -total o parcialmente-, por lo que el ahorro de combustible dependerá de la heliofanía de cada región dentro de la Puna. Cabe destacar que, dado a que son sistemas sin almacenamiento térmico, es de esperar que los índices de incidencia en la matriz de consumo sean relativamente bajos. Se tiene que para un régimen ininterrumpido de operación, una planta de carbonato demanda un consumo diario de gas según se resume en la Tabla 4.

Capacidad de producción	Consumo de gas	Demanda térmica anual
20000 Tn <sub>CLEq</sub> /año	38000 m <sup>3</sup> /día	66898 MWht
25000 Tn <sub>CLEq</sub> /año	52000 m <sup>3</sup> /día	91545 MWht

Tabla 4: Consumo diario de gas natural y demanda térmica anual asociada.

La generación de energía térmica de cada planta solar se determina mediante SAM y los resultados se muestran en la tabla 5. Estos valores representan a la energía generada solamente aprovechando la radiación solar disponible. La energía restante se produce mediante un sistema de *back up* a gas. Los índices de penetración en la matriz térmica se determinan tomando los valores de la Tabla 5 y se los compara con la demanda térmica total indicada en la Tabla 4. Se obtiene así la figura 8, para cada locación.

Provincia	Salar	Energía térmica generada (CSP) (MWht)			
		CP_25000	FL_25000	CP_20000	FL_20000
Salta	Rincón	14930	15647	13261	15647
	Pastos Grandes	15003	15641	13350	15641
	Pozuelos	15096	15732	13433	15732
	Centenario	15096	15778	13585	15778
	Arizaro	15229	16583	14088	16583
	Diablillos	14429	14831	12906	14831
	Pocitos	15526	16287	13808	16287
Jujuy	Guayatayoc	15475	16526	13781	16526
	Olaroz	15395	16445	13698	16445
	Jama	15325	16470	13577	16470
	Cauchari	15145	16014	13500	16014
	Salinas Grandes	15648	16686	13853	16686
Catamarca	Hombre Muerto	14533	14895	13853	14895
	Antofalla	16072	16417	14209	16417
	Carachi Pampa	14792	14766	13194	14766

Tabla 5. Energía térmica generada con base CSP sin almacenamiento.



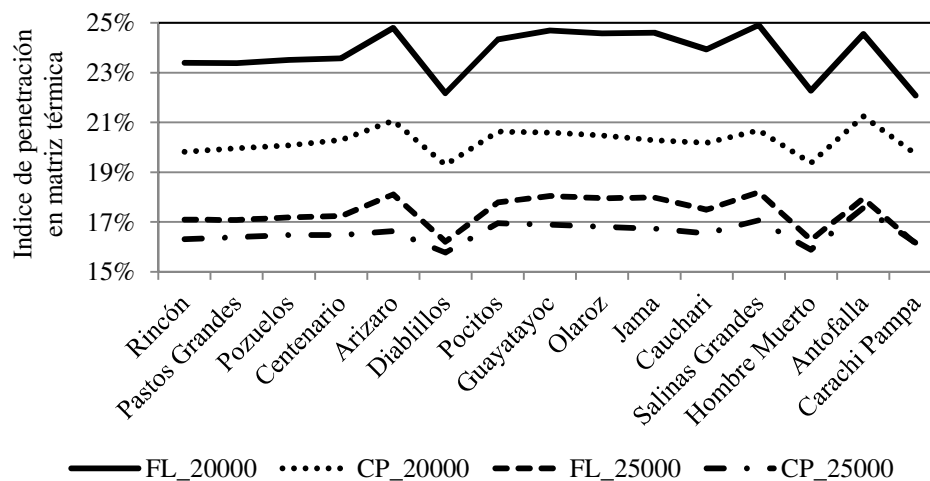


Figura 8: Índices de penetración en la matriz térmica de cada proyecto.

## DISCUSION Y CONCLUSIONES

En este trabajo se ha abordado la estimación del potencial de calentamiento global tomando como base la determinación de la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> hacia la atmósfera cuando un proyecto de producción de carbonato de litio se abastece completamente de gas natural, como así también de manera parcial mediante la implementación de tecnologías solares de concentración. En una primera instancia, se escogieron tecnologías sin almacenamiento térmico. A la vez, se ha determinado qué porcentaje del abastecimiento térmico se supliría mediante dichas tecnologías. Como punto de partida, se han adoptado procesos estándar de producción anual de CLEq para dos capacidades de planta. Así mismo, se seleccionaron dos tecnologías a implementar con sus respectivas configuraciones de diseño. Se realizaron simulaciones de performance de generación térmica mediante SAM, para los quince salares y ambas tecnologías. Los resultados se mostraron en una base anual para cada locación.

La reducción porcentual de emisiones depende tanto de la energía térmica que cada sistema es capaz de generar, de la demanda de vapor de proceso y de la radiación solar disponible –o heliofanía efectiva. Como primera conclusión, puede destacarse que la reducción de emisiones se encuentra en un rango aceptable de 24% - 31% según sea la tecnología a implementar, mostrándose valores más favorables para la tecnología Fresnel lineal. Si bien el potencial de calentamiento global, que supera el orden de los 1000 grCO<sub>2</sub>/kgCLEq para un escenario de 100% gas, puede resultar en valores intuitivamente altos, se debe tener en cuenta que para la obtención de 1 kg de CLEq se deben procesar 383.4 l de salmuera, tomando como referencia una concentración de Li<sup>+</sup> de 700 ppm en poza, a una tasa de recuperación de Li<sup>+</sup> del 70%. Por lo que las emisiones de CO<sub>2</sub> por cada litro de salmuera procesado rondan los 3 g en promedio. Este último parámetro de emisión se reduciría a 1.9 g promedio en el caso de implementarse tecnologías de concentración solar.

Con respecto a la cuota de incidencia en la matriz de consumo térmico de cada proyecto, se encontró que dicho parámetro oscilaría en un rango de 16% a 25%. Rango que, si bien es amplio, permite dilucidar con mayor precisión cual tecnología resulta conveniente desde el punto de vista del ahorro energético. Tal caso es el de un sistema Fresnel lineal para una capacidad de 20000 Tn<sub>CLEq</sub>/año. El hecho de que éste escenario de producción térmica resultara conveniente se relaciona al bajo consumo térmico de gas con respecto al caso base (100% gas natural). No obstante, un análisis más detallado requiere considerar otros factores como ser superficie necesaria para la colección en relación con la superficie disponible en las locaciones, uso anual del agua para la generación de vapor, distancia de la planta solar al sitio de montaje del proceso minero, costo nivelado de la producción de calor, costos capitales de inversión, operación y mantenimiento, etc., para determinar qué tecnología resulta conveniente.

Las posibilidades de implementar sistemas solares con almacenamiento térmico en sales fundidas son altas, dado que los componentes que conforman las sales térmicas se podrían obtener de los subproductos de la cadena de obtención del carbonato de litio. Tópico que demanda mayor análisis en

función de las concentraciones de cada solar y en consecuencia de las capacidades productivas de los mismos. Un estudio realizado por los autores del presente trabajo (no publicado hasta la fecha), revela que el ahorro energético dentro de la matriz de *consumo eléctrico*, cuando se implementan tecnologías de concentración solar con almacenamiento en sales fundidas, puede alcanzar valores medios anuales de 51%, con una autonomía termo-eléctrica de 16 hs nominales.

El último reporte del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) establece un nuevo límite para la temperatura global de referencia: 1.5 °C, con respecto a la época pre-industrializada. Será necesario cubrir todos los escenarios posibles de producir emisiones de GEI, para una proyección de cambio climático al año 2100. Esto implicaría tomar decisiones en presentes y futuras tendencias en el manejo de los recursos humanos, naturales, bienes y servicios, económicos, tecnológicos y políticos. En nuestro país, la temática no ha sido pasada por alto. Si bien Argentina no contribuye en gran medida con el calentamiento global, es altamente vulnerable al cambio climático dado que está expuesta en toda su extensión a eventos climáticos extremos, que resultan cada vez más frecuentes. Por ello, la sumatoria de todos los esfuerzos en la reducción de emisiones será necesaria para la mitigación del cambio climático.

## REFERENCIAS

- Boletín Oficial de la Provincia de Jujuy. Poder Ejecutivo. (2010). Decreto 5707. <http://www.boletinoficial.jujuy.gob.ar/>.
- Boletín Oficial Nacional. (2015). Ley 27191. Régimen de fomento nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica. Modificación. Creación del fondo fiduciario público. <https://www.boletinoficial.gob.ar/>.
- British Geological Survey (BGS). Commodities & statistics. Mineral profiles. <https://www.bgs.ac.uk/mineralsUK/statistics/mineralProfiles.html>, (last access: February 2019).
- Camacho Parejo M. (2012). El trilema energético. Secretaria General del Comité Español del Consejo Mundial de la Energía. Gerente de Asuntos Globales de Repsol. Separata del n° 38 de Cuadernos de Energía. ISSN: 1698-3009.
- Carmona F., Orte P. F., Rivas R., Wolfram E., Kruse E., Development and analysis of a new solar radiation atlas for Argentina from ground-based measurements and ERES\_SYN1deg data, The Egyptian J. Remote Sensing Space Sci. (2017). <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.11.003> (in press).
- Flexer V., Baspineiro C. F., Galli C. I. Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing. Science of the Total Environment 639 (2018) 1188–1204. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.223>.
- IPCC.(2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Sitio web: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>. (Último acceso: Enero de 2019).
- Naciones Unidas. (2015). Objetivos de Desarrollo del Milenio. 2015: es hora de la acción mundial por las personas y el planeta. Informe anual. Sitio web: <https://www.un.org>. (Último acceso Diciembre de 2018).
- Naciones Unidas. (2019). Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. eISBN: 978-92-1-047889-2, ISSN: 2521-6899, ISSN: 2521-6902.
- Ramachandra T.V., Jain R., Krishnadas G. (2011). Hotspots of solar potential in India. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15, 3178 – 3186.
- Sarmiento N., Belmonte S., Dellicompagni P., Franco J., Escalante K. (2019). A Solar Irradiation GIS as Decision Support Tool for the Province of Salta, Argentina. Renewable Energy 132, 68 – 80.
- Secretaría de Energía. (2006). Cálculo del factor de emisiones de CO<sub>2</sub> de la red Argentina de energía eléctrica. <http://www.energia.gob.ar>.
- Sterba J., Krzemień A., Riesgo Fernández P., Escanciano García-Miranda C., Valverde G. F. (2019). Lithium mining: Accelerating the transition to sustainable energy. Resources Policy. Volume 62, August, Pages 416-426.

- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell Scientific Pub., Palo Alto, CA, United States.
- Telsnig T., Potz C., Haas J., Eltrop J., Palma-Behnke R. (2017). Opportunities to integrate solar technologies into the Chilean lithium mining industry – reducing process related GHG emissions of a strategic storage resource. AIP Conference Proceedings 1850, 110017; doi: 10.1063/1.4984491.
- U.S. Geological Survey (USGS). National Minerals Information Center. <https://www.usgs.gov/centers/nmic/lithium-statistics-and-information>, (last access: March 2019).
- United Nations Climatic Change (UNCC). (2016). Synthesis report on the aggregate effect of INDCs. Sitio web: <https://unfccc.int>. (Último acceso: Enero de 2019).
- Wagner, M. (2012). Results and Comparison from the SAM Linear Fresnel Technology Performance Model: Preprint. NREL Conference Paper CP-5500-54758. <http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/54758.pdf>.
- Wagner, M.; Zhu, G. (2012). A Direct-steam Linear Fresnel Performance Model for NREL's System Advisor Model. NREL Conference Paper CP-5500-55044. <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/55044.pdf>.
- World Energy Council.(2016). World Energy scenarios. The grand transition. Reporte completo. Sitio web: <https://www.worldenergy.org>. (Último acceso: Febrero de 2019).
- Wyman O. (2015). World Energy Trilemma. Priority actions on climate change and how to balance the trilemma. World Energy Council. Reporte anual. Sitio web: <https://www.worldenergy.org>. (Último acceso: Febrero de 2019). ISBN: 978-0-946121-40-3.
- Zell E., Gasim S., Wilcox S., Katamoura S., Stoffel T., Shibli H., Engel-Cox J., Al Subie M. (2015). Assessment of solar radiation resources in Saudi Arabia. *Solar Energy* 119, 422 – 438.

## **EMISSIONS REDUCTION INTO THE LITHIUM INDUSTRY IN THE ARGENTINIAN PUNA REGION BY CONCENTRATING SOLAR TECHNOLOGIES**

**ABSTRACT:** This article aims to show a preliminary estimation on CO<sub>2</sub> reduction potential due to lithium carbonate extraction in the Argentinian Puna region. Firstly, fifteen locations were considered as potential for the design of mining projects at capacities of production previously established. Two scenarios were compared; the first one corresponds to a 100% natural-gas-fed, while the second one is designed with the integration of solar concentrating technologies. This last scenario allows determining how much CO<sub>2</sub> emissions into the atmosphere are mitigated, when the solar resource is harnessed for thermal energy production. Furthermore, the annual matrix penetration is determined, based on these kinds of solar technologies.

## **ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE OMNIBUS ELECTRICO PARA LA UNIVERSIDAD DE VILLA MARIA**

**Pierantonelli Mario<sup>1</sup>, Quintilla Tomás<sup>2</sup>**

Licenciatura en Ambiente y Energías Renovables (LAER)- Instituto de Ciencias Básicas y Aplicadas- Universidad Nacional de Villa María (UNVM)- Arturo Jauretche 1555- V. María- Cba- CP 5900  
Tel. 0353-4539106- e-mail: [mpierantonelli@unvm.edu.ar](mailto:mpierantonelli@unvm.edu.ar)

*Recibido 14/08/19, aceptado 23/10/19*

**RESUMEN.** El proyecto que se pretende llevar a cabo, se basa en estudios y desarrollos anteriores sobre móviles eléctricos que arrojan resultados satisfactorios en cuanto a consumo energético, contaminación del aire y acústica, y costos. Por lo que se pretende investigar la factibilidad de implementar un transporte público basado en estos móviles para cubrir el trayecto Campus UNVM - Terminal de ómnibus de Villa María. Para ello se consideran diferentes alternativas de trayecto, compra de rodados eléctricos que existen en el mercado, el desarrollo de prototipo de ómnibus eléctrico mediante la adaptación de un ómnibus de combustión. Una vez realizado el estudio de factibilidad, se realizará un anteproyecto para presentar a los organismos involucrados: UNVM, Municipalidad de Villa María y eventuales fabricantes o desarrolladores interesados.

**Palabras clave- bus eléctrico, transporte, sustentable, baterías de litio.**

### **INTRODUCCIÓN**

A nivel mundial, según la Agencia Internacional de Energía (AIE) el sector transporte fue el responsable del 25% en el año 2017 de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por consumo de combustible fósil (IEA, 2017). Este sector experimentó un gran incremento de las emisiones en las últimas dos décadas, el cual se debió al gran aumento del parque automotor mundial, principalmente en los países desarrollados. En Argentina, en el año 2016 según el informe de Balance Energético Nacional del Ministerio de Energía y Minería (BAN, 2018), el transporte consumió el 30% de la energía primaria del país. Esta energía provino principalmente de derivados de petróleo (86%) y gas natural (14%), y fue consumida según el informe 2016 de la AFAC por los 12.503.912 vehículos que circulan en el parque automotor del país, el 3.5% del total está compuesto por vehículos pesados (camiones y buses), teniendo este grupo un promedio de 15 años de antigüedad, siendo la antigüedad un indicador de vehículos de mayores emisiones y de baja eficiencia en la transformación del combustible en energía en comparación con vehículos nuevos (AFAC,2016).

En la actualidad, la movilidad eléctrica presenta una serie de ventajas con respecto a los vehículos con motores de combustión interna tanto, en eficiencia energética como en el objetivo de cero emisiones de contaminantes locales, además de un gran potencial en integración con energías renovables, generando la posibilidad de muy bajas emisiones en un análisis de ciclo de vida. Argentina presenta las mejores condiciones para que los vehículos eléctricos entreguen sus mayores beneficios en términos de cambio climático, ya que, la electricidad tiene un alto potencial para ser generada en gran medida con energías renovables, principalmente solar y eólica (López, 2016).

La utilización de buses eléctricos supone una reducción en el consumo de combustible pudiendo generar un importante ahorro para el Estado en la importación de combustible fósil y brindando una

---

<sup>1</sup> Ingeniero, Profesor LAER- UNVM

<sup>2</sup>Estudiante LAER- UNVM

independencia de las variables internacionales vinculadas al mercado del petróleo. La disminución del consumo traería consigo una reducción de las emisiones de GEI y de contaminantes locales como NOx (óxidos de nitrógeno) y material particulado, entre otros. Además, los motores eléctricos a diferencia de los motores a combustión no emiten ruidos al exterior, de modo que, disminuyen la contaminación sonora del sector urbano (López, 2016).

Para llevar a cabo esta investigación se tiene en cuenta la apertura de la prolongación del Boulevard España hasta el Campus de la Universidad Nacional de Villa María (UNVM) lo que beneficia al tipo de transporte en discusión haciendo el trayecto recto y más corto, con aproximadamente 5 km de recorrido desde la Terminal de Ómnibus de la ciudad hasta el Campus de la UNVM. El uso de estas tecnologías en conjunto con medidas de eficiencia energética (pesos, rendimientos) ayudará a fomentar el uso de energías renovables ya que, existe una gran sinergia con la generación de energía mediante fuentes renovables, potenciándose mutuamente los beneficios ambientales y económicos para la sociedad.

Es necesario, en orden de alcanzar la sustentabilidad, reemplazar el paradigma de movilidad urbana dependiente del combustible fósil con vehículos eléctricos, ya que éstos extraen su potencial máximo en el circuito urbano, donde las distancias son cortas, las frenadas son muy frecuentes y las velocidades relativamente bajas, logrando reducir los costos ambientales y económicos del transporte urbano y dando un paso hacia la independencia de los combustibles fósiles.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### *Diagnóstico de la situación de transporte actual en el trayecto en estudio*

En primer lugar, se realizó una recopilación y análisis de datos técnicos y de operación del medio de transporte actual a través de fuentes de información primarias (Contacto con la empresa, contacto con la Secretaría de Transporte de la ciudad, fichas técnicas de los fabricantes de buses).

Por medio de una entrevista con la empresa TRANSBUS que, ofrece servicio en el trayecto, se obtuvo: la ficha técnica de los ómnibus utilizados, cuánto combustible se consume, cuántos kilómetros recorren por vehículo por día y número de pasajeros mensuales. Se complementó con acciones de cooperación mediante entrevistas con la Municipalidad de Villa María y la Dirección de Infraestructura y Planificación de la UNVM y se obtuvieron datos de transporte e infraestructura actuales y proyectados sobre el área de estudio. Se analizaron encuestas de transporte elaboradas por proyectos de investigación del Instituto de Ciencias Sociales de la UNVM.

A partir de los datos obtenidos, se estudiaron las características de los vehículos que están en funcionamiento en el trayecto. Se resumen los resultados obtenidos en indicadores, tablas y gráficos a fines de facilitar la comprensión y la posterior comparación de los sistemas estudiados.

### *Comparación de alternativas buses eléctricos disponibles en el mercado.*

Se analizó la información obtenida a partir de fuentes primarias sobre las alternativas de ómnibus eléctricos disponibles en el mercado nacional e internacional. Debido a que existen algunos fabricantes de ómnibus eléctricos que instalarán plantas de ensamblado en el país, se evaluaron los costos de estos móviles comparados con las alternativas propuestas de acuerdo al recorrido acotado.

### *Proponer un prototipo de bus eléctrico adaptado a las necesidades del caso de estudio optimizando el tamaño de la batería.*

Para idear el prototipo de ómnibus eléctrico, se realizó una exhaustiva investigación documental sobre experiencias análogas de otras universidades y ciudades. Además, se cuenta con móviles eléctricos e instalaciones de generación distribuida fotovoltaica de proyectos de investigación realizados previamente en la Universidad Nacional de Villa María, los cuales se utilizaron como base de experimentación para la obtención inicial de datos que pueden extrapolarse a móviles de mayor tamaño. Se investigaron las distintas posibilidades de conversión de ómnibus existentes a eléctricos.

Se optimizó el diseño de la batería del prototipo con el objetivo de reducir los costos iniciales de inversión y maximizar la eficiencia total del vehículo. Esta optimización requirió un estudio de las

características del trayecto combinado con un análisis de las características del vehículo propuesto y de las baterías disponibles en el mercado.

Las dimensiones analizadas son: distancia por recorrido, paradas, cantidad de recorridos diarios, características del prototipo, cantidad de pasajeros, tipo de batería, capacidad y peso de baterías, tecnología de frenado, autonomía, entre otras. Se evaluaron las dimensiones y se optó por la solución óptima para brindar un servicio sin inconvenientes (como podría ser que se agotase la batería o que debiera estar parado mucho tiempo recargando), del menor costo posible, eficiente y amigable con el ambiente.

Se estudió la conveniencia de aplicar paneles fotovoltaicos en el techo del móvil para aumentar la autonomía cuando el sol esté disponible y para que la energía que se utiliza provenga en parte de energías renovables. Se evaluaron precios y tecnologías de estaciones de recarga comerciales, considerando la posibilidad de fabricación nacional y/o local de las mismas.

#### *Costo Ambiental de los vehículos*

Para calcular las emisiones de GEI se utilizaron factores estandarizados y métodos de cálculo del IPCC.

Para obtener las emisiones directas causadas por el vehículo se multiplicó la cantidad de combustible utilizado en el trayecto por el factor de emisión de CO<sub>2</sub> correspondiente.

Parámetro	Valor
Valor calorífico neto del combustible diésel	43 MJ/kg
Factor de emisión de CO <sub>2</sub> del combustible diésel	74,1 g CO <sub>2</sub> / MJ
Densidad del combustible diésel	0,844 kg/l
Emisión por litro	2,69 kg/l

*Tabla 1. Características del diesel*

A partir de estos datos se realizó una tabla comparativa de las emisiones de cada vehículo estudiado. Se evaluó el impacto ambiental local, teniendo en cuenta las emisiones de NO<sub>x</sub> y material particulado. Para calcular las emisiones locales se tuvo en cuenta la resolución 1464/2014 de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, que clasifica y certifica los vehículos según sus emisiones. Además, se realizó una investigación sobre los contaminantes no incluidos en la legislación como lo son los compuestos orgánicos volátiles, la contaminación del suelo producida por el desgaste de los neumáticos y en algunos casos las pequeñas cantidades de amianto liberadas por los sistemas de frenado de algunos vehículos.

#### *Evaluación del impacto del transporte propuesto en la matriz energética*

Se evaluó el impacto de la propuesta en la matriz energética tanto en energía como en potencia. Para ello se reemplazó los buses convencionales por las alternativas estudiadas y se insertaron en la matriz energética a fines de compararlos con la matriz actual y entre sí.

### **3-ANALISIS**

#### *Diagnostico situación actual*

El trayecto estudiado se encuentra en la Ciudad de Villa María, provincia de Córdoba. Comienza en la terminal de Ómnibus de la ciudad y conecta con el Campus de la Universidad Nacional de Villa María siendo una de las líneas más utilizadas en la ciudad. Para realizar este trabajo es fundamental tener en cuenta la obra de apertura de la prolongación del Bvard. España llevada a cabo por el Municipio de la Ciudad. La distancia recorrida en el trayecto, teniendo en cuenta esta prolongación, es de aproximadamente 5 km.



Figura 1. Trayecto propuesto.



Figura 2. Trayecto líneas 102,104,106.

A partir de reportes otorgados por la empresa TRANSBUS SA se obtiene la siguiente información:  
Vehículos Líneas 102, 104, 106: Agrale M. T. 12 LE

<b>Chasis</b>	Agrale M.T. 12 LE
<b>Motor</b>	Cummins ISF 3,8
<b>Nivel de emisiones</b>	Euro V
<b>Año</b>	2007 a 2012
<b>Potencia Máxima</b>	162 CV a 2200 rpm
<b>Torque Máximo</b>	600 Nm a 1700 rpm
<b>Transmisión</b>	Automática
<b>Tanque de combustible diésel</b>	170 litros
<b>Largo Total</b>	9,685 m
<b>Ancho</b>	2,445 m
<b>Peso Bruto Total</b>	12000 kg

Tabla 2. Características bus Agrale M.T. 12 LE



Figura 3. Bus de línea transbus.

A partir de tablas otorgadas por la empresa TRANSBUS se resume el siguiente cuadro.

Línea	Km Prod.	Km Enlace	Km Total	Tiemp hs:min	Pasajeros	VelocPr om (Km/h)
<b>102</b>	4767,34	990,22	5757,56	252:55	10019	18,85
<b>104</b>	4701,23	1169,96	5871,19	246:36	10903	19,004
<b>106</b>	4817,25	536,21	5353,46	251:03	10064	19,19

Tabla 3. Datos empresa transbus junio 2018

Hay que tener en cuenta que los tramos de enlace implican casi un 20% del recorrido útil promedio, esto se debe a la lejanía de los talleres donde se guardan los coches en el Parque Industrial de la ciudad, y conspira contra la sustentabilidad del esquema.

En una reunión llevada a cabo con el personal a cargo de la Empresa Municipal de Transporte Urbano de Pasajeros SEM, la cual contrata a la empresa TRANSBUS para el servicio de transporte público, se obtuvo que a partir del año 2019 la empresa no cuenta con ningún subsidio, y el valor del combustible es el valor de surtidor con un descuento para grandes clientes del 15%.

El consumo promedio de un bus diésel de 12 metros es de 2,5 km / litro variando de acuerdo al tipo de manejo de cada chofer (Grutter, 2014).

#### *Mercado de Buses Eléctricos*

Según datos publicados por la GEVO 2018, se puede observar que China concentra la mayoría de las ventas mundiales de autobuses eléctricos, que incluye buses a batería e híbridos plug in, que a pesar de un ligero descenso en las ventas en el año 2017 se estima que fueron ligeramente superiores a las 100 000 unidades, de las cuales el 85% fue de vehículos eléctricos puros.



A finales de 2017, la flota de autobuses eléctricos puros e híbridos en China alcanzó casi 370 000 unidades. Ventas acumuladas disponibles para otros países, sugieren que 2100 autobuses eléctricos adicionales están actualmente en circulación en Europa, Japón y los Estados Unidos.

La mayoría de los autobuses eléctricos vendidos hasta la fecha se han realizado por fabricantes chinos para el mercado interno. Aunque los dos fabricantes principales chinos (BYD y Yutong), también han sido activos en el mercado internacional de autobuses eléctricos. Ambas empresas producen autobuses urbanos eléctricos en una variedad de tamaños, y cada uno hace un modelo de autobús eléctrico interurbano. El más vendido fue el BYD de 12 metros urbano que tiene una capacidad de batería de alrededor de 330 kWh que le permite recorrer más de 250 km (BYD, 2018) y diferentes configuraciones están disponibles.

En Europa hay una gran variedad de fabricantes de autobuses eléctricos, como Volvo, Solaris y VDL. La diversidad de fabricantes de autobuses se traduce en una gran variedad de modelos disponibles en el mercado europeo, por ejemplo, algunas de ellas utilizando aluminio para la reducción del peso del vehículo, o reduciendo los tamaños del paquete de baterías. En los Estados Unidos, el protagonista es Proterra, fundado por un ex empleado de Tesla que se especializa exclusivamente en autobuses eléctricos. Proterra fabrica componentes del cuerpo del autobús utilizando fibra de carbono y puede entregar autobuses con hasta 440 kWh de capacidad de la batería, que equivale a 480 kilómetros de rango (GEVO, 2018).

En Latinoamérica BYD ya ha vendido varias flotas en Uruguay, Brasil, Ecuador, Colombia y Chile. Chile desde marzo del 2019 ha sumado 100 buses Yutong E12 a su flota de buses eléctricos, la cual ya contaba con 100 buses BYD K9 y uno Yutong E12 de prueba. Colocando a Chile entre los países con la flota más grande de buses eléctricos para transporte público en el mundo y la más grande de Latinoamérica. Además, la ciudad colombiana de Medellín incorporo 64 buses de la empresa BYD, dando los primeros pasos en Latinoamérica hacia una movilidad de emisiones cero.

En Argentina, la empresa BYD se encuentra en negociaciones para abrir una ensambladora, y la provincia de Mendoza adjudicó una licitación para importar 12 buses BYD y 6 estaciones de carga en conjunto con Zhongtong que aportaría 6 buses y 3 estaciones de carga. A principios de marzo de 2019, están haciendo recorridos experimentales dos colectivos en la línea Mendoza- Godoy Cruz. En mayo, luego una postergación de un año, Buenos Aires evaluará el funcionamiento de 8 colectivos eléctricos de cuatro fabricantes diferentes, 4 de ellos con baterías de carga rápida y 4 baterías de carga lenta. Las empresas son Zhongtong, Yutong, Higer, Xiamen King Long, todas procedentes de china, y los modelos que han presentado son todos de 12 m de largo.

Mercado	Diésel convencional	Eléctrico	Costo adicional eléctrico
China	\$60,000-\$90,000	\$280,000-\$350,000	420%
India	\$75,000-\$110,000	\$325,000-\$410,000	300%
Rusia	\$130,000-\$180,000	\$400,000-\$500,000	190%
América Latina	\$200,000-\$225,000	\$410,000-\$500,000	115%
Resto del Mundo	\$100,000-\$350,000	\$300,000-\$700,000	120%
Europa	\$250,000-\$350,000	\$575,000-\$680,000	110%
Norte América	\$300,000-\$400,000	\$595,000-\$690,000	85%
Promedio	<b>\$200,000</b>	<b>\$480,000</b>	<b>140%</b>

Tabla 4. Precios en USD de buses mercado internacional (frost, 2017)

En la tabla anterior, podemos observar los precios en distintos mercados de buses eléctricos y diésel, cabe destacar que por ejemplo un bus BYD chino puede valer más del doble fuera de su país de origen.

<b>Modelo</b>	E12	BYD K9G
<b>Costo</b>	USD 450 000	USD 500 000
<b>Largo</b>	12 metros	12.5 metros
<b>Ancho</b>	2.55 metros	2.55 metros
<b>Alto</b>	3.34 metros	3.44 metros
<b>Peso</b>	13000 kg	14130 kg
<b>Consumo</b>	1 kWh/km (Fuente: experiencia Chile)	1,2 kWh/km (Fuente: Experiencia Uruguay, Chile)
<b>Tipo de cuerpo</b>	Estructura monocasco de acero	Estructura monocasco de acero
<b>Motor</b>	Motor eléctrico PMSM Yutong YTM280-CV9-H único.	AC síncrono de imanes permanentes. Dos motores en rueda.
<b>Potencia del motor</b>	Pmax: 350 kW. El motor está refrigerado por agua con su propio radiador.	P max 150 kW x 2 (201 HP x 2).
<b>Torque</b>	2.400 Nm	550 Nm x 2
<b>Frenado</b>	Sistema de frenos de aire de doble circuito con frenos de disco delanteros y traseros. Sistema de frenado regenerativo. Suministro de aire del compresor de accionamiento eléctrico.	Freno de disco, freno neumático. Sistema de frenado regenerativo.
<b>Paquete de Baterías</b>	12 paquetes de baterías LFP (fosfato de hierro y litio), capacidad total de 324kWh. El sistema de gestión de la batería es exclusivo de Yutong y monitorea constantemente la temperatura, el voltaje, la corriente y la capacidad de las baterías. Cada paquete pesa 180kgs. El diseño modular de los paquetes de baterías significa que se pueden cambiar fácilmente en el futuro si hay una mejor tecnología de baterías disponible a mitad de la vida útil del vehículo.	Baterías LFP (fosfato de hierro y litio). Capacidad 324 kWh.
<b>Rango</b>	220 km	250 km
<b>Cant. de pasajeros</b>	92 (32 sentados y 60 parados)	81 (32 sentados y 49 parados)
<b>Confort</b>	Aire acondicionado, calefacción, puertos USB para pasajeros, área de silla de ruedas, entre otros.	Aire acondicionado, calefacción, silla de ruedas, entre otros.

*Tabla 5. Características buses chinos disponibles en el mercado latinoamericano*

#### *Prototipo Bus Eléctrico*

El bus eléctrico propuesto se basa en la conversión a eléctrico de un bus convencional similar a los que se encuentran circulando en el recorrido. El chasis Agrale MT 12 LE tiene 10 metros de largo y 2,45 metros de ancho, con un peso aproximado con carga completa de 12 toneladas. Cuenta con una caja de velocidades manual de 5 al frente y 1 en reversa que será utilizada para buscar relaciones que optimicen el rendimiento del motor eléctrico. La potencia del motor eléctrico necesaria estimada es de 60 kW continuos con picos de 100 KW, mínimos para un manejo austero. Se analizaron los siguientes motores disponibles en el mercado:

<b>Motor</b>	<b>ALPHA ELECTRIC APEV60/8</b>	<b>Foshan Uni Technology 80kW PMSM MDEV</b>	<b>WEG Motor Industrial</b>
<b>Procedencia</b>	China	China	Nacional
<b>Costo</b>	USD 3000 (FOB China)	5000 USD (FOB China)	5000 USD
<b>Tipo</b>	Inducción, asincrónico, velocidad variable	IMP, síncrono, velocidad variable	Inducción
<b>Voltaje nominal (V)</b>	312	540	380
<b>Potencia nominal (kW)</b>	60	80	75
<b>Potencia máxima (kW)</b>	100	123	-
<b>Velocidad nominal (RPM)</b>	1.600	1.550	1500
<b>Velocidad máxima (RPM)</b>	3.600	4500	4000
<b>Par nominal (N. m)</b>	360	500	477
<b>Par máximo (N. m)</b>	1.000	1.000	-
<b>Sistema De refrigeración</b>	Agua	Agua	Aire. Forzada
<b>Peso (Kg)</b>	140	128	500
<b>Carcasa</b>	De aluminio	De aluminio	Hierro

*Tabla 6. Motores eléctricos*

La capacidad de baterías de 60 kWh proporciona la autonomía necesaria teniendo en cuenta un consumo aproximado de 0.8 kWh/km y un sistema de cargas de oportunidad para completar todo un día de trabajo. Estas cargas se realizarían en paradas donde debido a que la cantidad de usuarios es mayor y el vehículo se encuentra detenido más tiempo, se puede aprovechar este lapso para realizar pequeñas cargas, estas paradas se dan en la UNVM y en la Terminal de ómnibus de la ciudad.

Para el sistema planteado de carga en oportunidad es necesario contar con cargadores eléctricos ubicados en los extremos del trayecto, los cuales coinciden con las paradas más largas. Además, en estos puntos se encuentran 2 instituciones públicas que cuentan con instalaciones eléctricas de mayor potencia, la terminal de ómnibus de Villa María y UNVM.

En Argentina, actualmente las empresas QEV Argentina en asociación con el grupo ABB (ASEA Brown Boveri), se encuentran en producción de cargadores rápidos para instalar en las estaciones de servicio YPF, que cuentan con una potencia de 50 kW, este cargador es muy grande para el caso de estudio, ya que en 5 minutos entregaría más energía de la que se gastó en el trayecto. Se estima que por cada trayecto recorrido el bus prototipo gastaría aproximadamente 4 kWh. Con un cargador de 32 kW que equivale a 0.53C, en 6 minutos podemos recargar 3,2 kWh que equivale al 80% de lo consumido en el recorrido, quedando un resto de 0.8 kWh que los absorbería la capacidad de baterías. El cargador propuesto se incluiría en el vehículo, esto implica un peso extra de 50 kg aproximadamente pero un ahorro en el costo del 50% con respecto a la opción de poner cargadores en los extremos del recorrido. Suponiendo que se realizan 22 vueltas diarias (el servicio que ofrece actualmente la empresa), si el servicio se inicia con la batería completamente cargada, por cada vuelta la batería gastaría 1.6 kWh dejando un déficit diario de 35,2 kWh que equivale a una profundidad de descarga cercana al 60%, que se completarían en una carga nocturna, por lo cual no se pondría en riesgo el servicio y las descargas no serían tan agresivas para la vida útil de la batería.

En cuanto a la química de las baterías de litio, se evalúan las siguientes opciones que se adaptan al sistema de estudio:

Las baterías NMC están compuestas por Litio Níquel Manganeso Cobalto ( $\text{LiNiMnCoO}_2$ ) y es uno de los sistemas de iones de litio más exitosos debido a su combinación de níquel con manganeso. El níquel es conocido por su alta energía específica pero poca estabilidad; el manganeso tiene la ventaja de tener una baja resistencia interna pero una baja energía específica, al combinarlos se logra mejorar mutuamente las fortalezas de los metales. El voltaje nominal de una celda es de 3,7 V por lo que ofrece una mayor densidad energética que las demás opciones evaluadas. Las grandes cargas causan elevaciones de temperatura peligrosas para la batería (BatteryUniversity, 2019).

Las baterías LFP- Litio hierro fosfato ( $\text{LiFePO}_4$ ) es más tolerante a las condiciones de cargas completas y se estresa menos al estar expuestas a altos voltajes por un tiempo prologado en comparación con otras composiciones de iones de litio. Posee un voltaje nominal de 3,2V por lo que la energía específica se encuentra por debajo de las baterías NMC. En cuanto a las resistencias térmica, las bajas temperaturas afectan el rendimiento, mientras que las altas reducen la vida útil de la misma. Es una batería muy segura incluso cuando se encuentra completamente cargada (BatteryUniversity, 2019).

En cuanto a las baterías LTO - Titanato de Litio ( $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ ) se conocen desde la década de 1980. El titanato de litio reemplaza al grafito en el ánodo de una batería típica de iones de litio y el material se forma en una estructura de espinela. El titanato de litio tiene un voltaje de celda nominal de 2,40 V. Esta puede cargarse rápidamente y ofrece una alta corriente de descarga de 10C, o 10 veces la capacidad nominal. Además, este tipo de baterías posee una cantidad de ciclos considerablemente mayor que las demás alternativas de litio. El titanato de litio es seguro, tiene excelentes características de descarga a baja temperatura y obtiene una capacidad del 80 por ciento a  $-30^\circ\text{C}$ . La batería LTO tiene ventajas sobre el ion de litio mezclado con cobalto convencional con ánodo de grafito al lograr una propiedad de deformación cero, sin recubrimiento de litio cuando se carga rápidamente a baja temperatura. La estabilidad térmica a alta temperatura también es mejor que otros sistemas de iones de

litio; Sin embargo, la batería es cara. Con solo 80Wh / kg en el mejor de los casos, la densidad energética es baja comparado con las alternativas estudiadas (BatteryUniversity, 2019).

Tipo	LFP	LTO	NMC
Densidad Energética	120 Wh/kg	80 Wh/kg	220 Wh/kg
Corriente de carga	1 C	1C a 5C	0,7C a 1C
Ciclo de vida	2000+	7000	2000
Capacidad Total	60 kWh	60 kWh	60 kWh
Peso total	500 kg	750 kg	273 kg
Precio Total	34800 USD	60300 USD	25200 USD

Tabla7. Baterías sistema de carga oportunidad

En el caso de no utilizar el sistema de carga en oportunidad, se utilizaría un paquete de baterías que cubra la energía total de un día de trabajo. Al poner un paquete de baterías de mayor capacidad también se aumentará el peso del vehículo considerablemente por lo que el consumo se verá afectado produciendo un aumento estimado de 0.8 kWh/km a 1 kWh/km. El consumo de un día de trabajo para este sistema se estima en 220 kWh. Teniendo en cuenta una profundidad de descarga del 70% para no atentar con la vida útil de las baterías, se necesita un paquete de baterías con una capacidad de 315 kWh. Eventualmente, al realizar ciclados más largos como ocurre en este sistema, la vida útil de la batería podría verse afectada. En este caso se descartan las baterías LTO que son más ventajosas en cargas rápidas y que tienen un peso mayor debido a la densidad energética menor comparado con las alternativas de LFP y NMC.

Tipo	LFP	NMC
Densidad Energética	120 Wh/kg	220 Wh/kg
Corriente de carga	1 C	0,7C a 1C
Capacidad Total	315 kWh	315 kWh
Ciclo de vida	2000	2000
Peso total	2625 kg	1431,81 kg
Precio Total	182700 USD	132000 USD

Tabla8. Sistema de carga áunica.

En la tabla anterior podemos ver como varía considerablemente el peso y el costo del paquete de baterías razón por la cual en un principio se descartó esta posibilidad en la planificación del prototipo.

Por otra parte, se cuenta con aproximadamente 24 metros cuadrados de techo disponible donde se colocarán paneles solares fotovoltaicos flexibles para cargar las baterías. El tamaño aproximado de un panel flexible de 170W es de 1,15m de largo por 0,81 de ancho (SUNPOWER), el espacio disponible permite colocar 18 paneles de este tipo logrando una potencia de 3 kWp.



Figura 7. Esquema techo desde arriba



Figura 8. Ejemplo Bus con techo solar.

Chasis y carrocería	0 USD (Bus usado cedido por la empresa de transporte)
Controlador Sinovo	3000 USD
Controlador Siemens	5500 USD
Controlador FOSHAN	3500 USD (FOB China)
Cargador para VE WenzhouBluesky32 kW	4200 USD (FOB China)
18 Paneles Solares SunPower 170Wp	2790 USD (FOB China)
Regulador de carga	300 USD (FOB China)
Mano de obra	5000 USD
Materiales Extra Locales	5000 USD

Tabla9. Costos adicionales asociados estimados

Para la conversión de un bus Agrale mt 12 de caja manual a eléctrico se optaría por la opción de baterías de NMC que cuentan con 2000 ciclos al 80% DOD que a razón de 5 días a la semana

equivalen a 260 ciclos anuales, pero en el caso de estudio con una profundidad del 60% se obtendrían mayor cantidad de ciclos superando los 8 años de vida útil. Si se tiene en cuenta el aporte de los 3 kWp paneles solares que con una insolación promedio anual de 5 horas equivalentes entregarían 15 kWh al día lo que representa un valor cercano al 10% del consumo diario otorgando mayor autonomía y alargando la vida útil en ese porcentaje.

En cuanto a la selección de motores, se puede utilizar el motor asíncrono industrial WEG de origen nacional con el controlador Sinovo o Siemens que pueden obtenerse de proveedores locales pero este motor tiene un peso de 500 kg que conspira contra la eficiencia del vehículo. Si se opta por el motor Foshan el peso es de 128 kg con mejores características de potencia y torque por ser un motor sincrónico de imanes permanentes fabricado especialmente para vehículos eléctricos, pero se elevarían los costos asociados ya que los precios son FOB China.

Considerando lo nombrado anteriormente más un cargador de 32 kW y la infraestructura necesaria en los establecimientos, más mano de obra, materiales del mercado local y los costos asociados al flete y a impuestos se estima un costo total aproximado a USD 100.000 que es cinco veces menor al precio de un bus BYD en Argentina aproximado a USD 500.000.

Bus	UNVM	BYD	Diésel
<b>Costo bus</b>	100000 USD	500000 USD	-
<b>Consumo</b>	0,8 kWh	1,2 kWh	2,5 km/litro
<b>Capacidad de las Baterías</b>	60 kWh	324 kWh	-
<b>Química de las Baterías</b>	NMC	LFP	-
<b>Peso del paquete de Baterías</b>	273 kg	2700 kg	-
<b>Distancia mensual recorrida</b>	4400 km	4400 km	4400 km
<b>Consumo Mensual</b>	3520 kWh	5280 kWh	1760 litros
<b>Energía Solar Generada Promedio Anual</b>	3960 kWh	-	-
<b>Vida Útil</b>	Baterías NMC 8 años+	Baterías LFP 8 años+	10 años
<b>Costo Gas Oil</b>	-	-	0,65 USD/litro
<b>Costo Energía Eléctrica (Unvm)</b>	0,057 USD/kWh	0,057 USD/kWh	-
<b>Ahorro Anual por Generación Solar</b>	225,7 USD	-	-
<b>Costo Total de Energía Anual</b>	2182 USD	3611,5 USD	13278 USD

*Tabla 10. Factibilidad económica*

Para el costo del gas oil se utiliza el valor del surtidor que es \$ 43,56 pesos argentinos (21/8/19) con un descuento para grandes consumidores del 15%, esto con un precio del dólar de \$ 57,31 (25/8/19) equivale a 0,68 USD por litro de gas oil.

En cuanto al costo de la energía eléctrica, se toma el valor del kWh promedio de la boleta de EPEC de la Universidad Nacional de Villa María del mes de Julio del 2019 que fue de \$ 3,27 pesos argentinos y equivale a 0,057 USD.

En la tabla 18 podemos observar que el ahorro anual utilizando el prototipo propuesto en el trayecto sería aproximadamente de 11000 USD. Debido a la situación de depreciación de la moneda ocurrida los costos relativos quedaron desfasados resultando de una mayor dificultad para amortizar los productos importados. Además, existe una diferencia considerable en favor de los vehículos eléctricos en los gastos de mantenimiento y en el ahorro de lubricantes que no fueron incluidos en el estudio.

## IMPACTO AMBIENTAL

En Argentina con el objetivo de reducir la contaminación en las ciudades, se adoptó, a partir de enero del 2016, la normativa europea conocida por Euro V que establece los valores máximos permitidos por los vehículos. El valor de NOx máximo permitido es de 3,6 gramos por kilómetro recorrido, de material particulado es de 0.036 gramos por kilómetro recorrido y de hidrocarburos sin quemar (HCT) de 0.828 gramos por kilómetro recorrido. En el caso de estudio los valores de emisión no fueron medidos, pero se estima que están en el límite de lo establecido por la ley ya que los vehículos tienen en algunos casos 10 años de antigüedad.

En la siguiente tabla, podemos observar la evolución de la normativa europea para transporte público. Datos en gramos por kilómetro recorrido.

Línea	Km mensuales	Litros	KG CO2 liberados	Kg NOx Max.	Gramos MP Max.
<b>102</b>	5757,56	2303	6195,07	20,7	207,2
<b>104</b>	5871,19	2348	6316,12	21,14	211,36
<b>106</b>	5353,46	2141	5759,29	19,27	192,7
<b>Promedio</b>	5660,74	2264,3	6090,95	20,38	203,79

*Tabla 11. Emisiones directas mensuales por línea*

En cuanto a las emisiones de un colectivo diésel en el trayecto propuesto, consideramos una distancia mensual de 4400 km en el cual el bus diésel con un consumo promedio de 2,5 km/litro consumiría 1760 litros de gas oíl y una tasa de emisión del gas oíl de 2,69 kg de CO2/litro emitiría a la atmosfera 4734,4 kg de CO2 mensuales.

#### *Emisiones indirectas de buses eléctricos*

Para realizar el cálculo de las emisiones de CO2 indirectas de los buses eléctricos partimos de la base de que la energía utilizada para la carga de las baterías proviene de la red eléctrica. De los informes anuales de la Secretaria de Energía de la Nación y de CAMMESA (Compañía administradora del mercado eléctrico mayorista sociedad anónima) se obtiene que la matriz energética nacional en el año 2017 estaba compuesta en un 65% por generación térmica a partir de combustibles fósiles (Fuel oíl, gas natural, gas oíl y carbón mineral). Se calcula que el rendimiento promedio de las centrales térmicas es del 44% y el factor de emisión de CO2 de la red nacional es de 0,48 kg de CO2 eq/ kWh generado. Se utiliza para el cálculo el Método Simple de la metodología ACM0002 aprobada por la junta Ejecutiva del Mecanismo para un Desarrollo Limpio que consiste en utilizar el promedio de las maquinas térmicas (CAMMESA, 2018).

A partir del sistema planeado de buses eléctricos para el trayecto estudiado, que cuenta con un servicio de lunes a viernes de 22 vueltas por día. Se puede establecer que se recorrerían mensualmente 4400 km sin contar los kilómetros de enlace. De la energía generada necesaria para cubrir esta distancia con los buses eléctricos el 65% proviene de fuentes térmicas en base a combustibles fósiles, por lo que el 35% restante no generaría emisiones.

Bus	BYD K9	Yutong	Bus Unvm
<b>Consumo kWh/km</b>	1,2	1	0,8
<b>Km mensuales recorridos</b>	4400	4400	4400
<b>Consumo Mensual kWh</b>	5280	4400	3520
<b>Energía Térmica generada. KWh (65%)</b>	3432	2860	2288
<b>Emisión de CO2 kg/mes</b>	1647,4	1372,8	1098,2

*Tabla 12. Emisiones de CO2 de los buses eléctricos*

Si comparamos los buses eléctricos con el diésel en el trayecto propuesto podemos observar como la peor de las opciones eléctricas emite aproximadamente un tercio de lo que emite el diésel y el prototipo propuesto reduce a menos de un cuarto las emisiones.

Bus	BYD K9	Yutong	Bus Unvm	Diésel
<b>Emisión de CO2 kg/mes</b>	1647,4	1372,8	1098,2	4734,4

*Tabla 13. Comparación de emisiones de buses eléctricos con el bus diesel*

## **IMPACTO EN LA RED ELECTRICA**

El impacto en la red eléctrica del sistema propuesto se puede considerar desde el punto de vista de energía o de potencia. En cuanto a la potencia, con el cargador de 32 kW incluido en el vehículo, es necesario en los extremos del trayecto y lugar de almacenamiento un punto de suministro trifásico de 380V y 80A con protecciones termo magnéticas y disyuntor diferencial. Desde el punto de vista de la red se debe prever una acometida equivalente a un consumo de una industria pequeña o edificio de 7 departamentos. Con respecto a la calidad del servicio, los rectificadores de switching poseen control

de modo de corriente incorporado que implican un factor de potencia prácticamente unitario y filtros de línea que evitan interferencias.

En relación a la energía, si la línea 104 diésel adopta el trayecto propuesto gastaría mensualmente 1760 litros de gas oíl que equivalen a 17639 kWh, con el prototipo eléctrico propuesto el gasto mensual de energía eléctrica desde la red es de 3520 kWh, que con la eficiencia promedio en generación de la red (44%) darían 8000 kWh equivalentes a 798 litros de gas oíl sin considerar las pérdidas de transmisión ni el transporte del combustible hasta los vehículos. Desde el punto de vista energético global se ahorran 962 litros de gas oíl con sus correspondientes emisiones.

## CONCLUSIONES

Desde el punto de vista ambiental, se concluye que la utilización de vehículos eléctricos para transporte público es muy favorable para la calidad de vida de la sociedad, ya que las emisiones de contaminantes locales son nulas, al mismo tiempo, las emisiones de CO<sub>2</sub> indirectas por generación de energía son menores que las producidas por un vehículo diésel equivalente. Otro de los beneficios ambientales es la reducción de la contaminación sonora, ya que los vehículos eléctricos no emiten ruidos en su funcionamiento. Puede darse un pequeño aumento de la contaminación por radiación electromagnética en las proximidades del cargador, pero el sistema deberá cumplir con los parámetros mínimos establecidos por la ley.

Desde el punto de vista técnico, considerando que en un bus eléctrico el elemento de recambio es el paquete de baterías y que el resto de las partes tienen una vida útil muy prolongada, se puede inferir que con el ahorro de 11000 USD anuales del prototipo propuesto con respecto al colectivo diésel, en menos de 3 años se puede amortizar el costo del paquete de baterías, lo cual habla en favor de la opción elegida. En cambio, con los buses eléctricos comerciales debido a la dimensión del paquete de baterías, el tiempo de amortización excede con mucho la vida útil de las mismas. Otra ventaja técnica, es que, en comparación con las alternativas del mercado, el prototipo tiene aproximadamente 2400 kg menos de peso de baterías, lo que se traduce en ahorro energético y mayor agilidad. Además, una característica positiva del modo de trabajo con pequeños ciclos de carga y descarga alrededor de un punto de equilibrio de  $\frac{3}{4} C$  es que en ese intervalo se garantiza una mayor duración de esta tecnología de baterías.

Se puede observar una diferencia de 5 a 1 en el valor inicial a favor del prototipo propuesto en este estudio, por lo que el ahorro anual significa un 11% de la inversión. En cambio, en el caso de los buses comerciales debido a su elevado precio el ahorro anual significa aproximadamente 2% del costo inicial.

Considerando un consumo total diario del prototipo propuesto de 176 kWh, para obtener un balance neto de emisiones cero a partir de la generación de energía renovable, se deberá contar con un parque solar fotovoltaico de 35 kW que ocupa aproximadamente 250 metros cuadrados, los cuales estarían disponibles en los techos de la Universidad. Este sistema de generación distribuida inyecta la energía a la red eléctrica de la institución para el autoconsumo.

Si se realizara una inversión extra de aproximadamente 70000 USD en un parque solar fotovoltaico de 35 kWp se podría obtener un balance neto de cero energías y cero emisiones, ya que alcanzaría para cubrir el consumo diario del prototipo propuesto. Esta energía sería inyectada en las instituciones asociadas al proyecto para luego realizar el balance con la energía consumida por el bus eléctrico. Este balance depende del esquema de generación distribuida adoptado, en el caso de ser Net Metering el ahorro es directo, en cambio, en el caso de la provincia de Córdoba el sistema legal es Net Billing por lo que solo en el caso de que haya simultaneidad entre la generación y el consumo se pueden descontar los costos completos de la tarifa eléctrica en este esquema de autofinanciación, siendo este el caso más probable por la magnitud de los consumos de la UNVM. Esta institución cuenta con techos disponibles suficientes para la colocación de los paneles solares por lo que estos no competirían en el uso del espacio.



Por último, están los paneles solares incluidos en el vehículo, que pueden cubrir hasta un 20% de la energía en trayectos diurnos en las mejores condiciones de insolación y el frenado regenerativo que con ajuste liviano para evitar sobre corrientes en las baterías puede ahorrar hasta un 12% según mediciones propias de trabajos anteriores. También, se puede considerar la incorporación de supercapacitores que permitan un frenado regenerativo más agresivo con mayor ahorro.

Desde el punto de vista social, al utilizar el vehículo propuesto, se obtendrá un transporte económico e inclusivo, reduciendo los costos de operación al permitir abaratar el boleto en beneficio del usuario, y, al ser este tipo de transporte amigable con el medio ambiente, en tiempos de preocupación por los efectos del cambio climático, sería noblemente aceptado por la sociedad en su conjunto.

Además, la conversión de buses convencionales a eléctricos generaría puestos de trabajo locales, promovería el reciclado y la reutilización de materiales extendiendo el ciclo de vida de los chasis con el consecuente ahorro de energía necesaria para la producción de vehículos nuevos.

## REFERENCIAS

- Battery University. 08/2019. BU-205: Types of Lithium-ion. <https://batteryuniversity.com/learn/article/typesoflithiumion>. Consulta Agosto 2019.
- International Energy Agency. CO2 Emissions from Fuel Combustion 2017. 2018
- Secretaría de Energía de la Nación. Balance Energético Nacional año 2018, revisión 2. 2019.
- Asociación de Fábricas Argentinas de Componentes, Informe flota circulante en Argentina 2016. 2017.
- Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico Sociedad Anónima. Balance Energético Anual 2018. 07/2019.
- International Energy Agency, Global EV Outlook 2018, towards cross-modal electrification. Mayo 2018.
- Frost & Sullivan, Strategic Analysis of Global Hybrid and Electric Heavy-Duty Transit Bus Market, 08/2013.
- FURMANIAK, Thomas y SCHUMANN, John. Light rail & streetcar systems how they differ; how they overlap. American Public Transportation Association APTA. Washington D.C.: LTK Engineering Services. 20 p. 2010.
- Gonzalo Márquez. Evaluación de los primeros vehículos eléctricos funcionando en el Sistema de Transporte Metropolitano
- GrueterJurg, Rendimiento real de buses híbridos y eléctricos, diciembre 2014. REPIC Platform c/o NET Nowak Energy & Technology AG Waldweg 8, CH-1717 St. Ursen.
- López Gianni, Galarza Sebastián, “Movilidad Eléctrica, oportunidades para Latinoamérica “, PNUMA, ONU, 2016.

## ELECTRIC BUS FACTIBILITY STUDY FOR THE UNIVERSITY OF VILLA MARIA

**Summary.** The project to be carried out is based on previous studies and developments on electric mobiles that yield satisfactory results in terms of energy consumption, air pollution and acoustics, and costs. Therefore, it is intended to investigate the feasibility of implementing public transport based on these mobiles to cover the route Campus UNVM - Bus Terminal of Villa María. For this they are considered different road alternatives, purchase of electric rolling that exist the market, layout of networks for trolleybuses, the development of prototype electric buses, as well as the adaptation of a combustion bus. Once the feasibility study has been carried out, a preliminary draft will be carried out to present to the agencies involved: UNVM, Municipality of Villa María and possible manufacturers or developers interested.

**Keywords-** electric bus, transport, sustainable, lithium batteries.

## **MODELADO NUMÉRICO DEL TIEMPO APLICADO A GENERACIÓN RENOVABLE: EVALUACIÓN DE CONFIGURACIONES EN EL MODELO WRF**

**Julián G. Cañellas<sup>1,2</sup>, M. Laura Mayol<sup>1,2</sup>, Elián Wolfram<sup>3,4</sup>, Facundo Orte<sup>3</sup>, A. Celeste Saulo<sup>1,5</sup>, Alejandro D. Otero<sup>2,6</sup>**

<sup>1</sup> Departamento de Ciencias de la Atmósfera, FCEyN, UBA

<sup>2</sup> Centro de Simulación Computacional para Aplicaciones Tecnológicas (CONICET)

<sup>3</sup> CEILAP-UNIDEF (CITEDEF-CONICET), Villa Martelli, Buenos Aires, Argentina

<sup>4</sup> Facultad Regional Buenos Aires, Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina

<sup>5</sup> Servicio Meteorológico Nacional

<sup>6</sup> Departamento de Energía, FI, UBA

Tel. +54-01-4899-5500 – e-mail: [jeanellas@csc.conicet.gov.ar](mailto:jeanellas@csc.conicet.gov.ar)

*Recibido 19/08/19, aceptado 24/10/19*

### **RESUMEN:**

En el marco del futuro crecimiento de la participación de la generación renovable en el sistema eléctrico argentino, es necesario estudiar la capacidad de pronóstico del recurso eólico y solar en el territorio nacional, en un horizonte temporal de algunas horas a varios días. En este trabajo se analiza la capacidad del modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) para ser aplicado a la predicción de variables asociadas a la generación renovable. Para ello, se compararon los pronósticos de WRF utilizando distintas configuraciones contra observaciones de alta calidad de cada uno de los recursos. Se reportan resultados a lo largo de dos semanas testigo y se presentan métricas del error de pronóstico. En base a estos resultados se extraen conclusiones y se proponen líneas de trabajo a futuro.

**Palabras clave:** Energías Renovables, WRF, Pronóstico, Fotovoltaica, Eólica.

### **INTRODUCCIÓN**

En la actualidad, el marco legal para el fomento de las energías renovables está dado por la ley 27.191, que propone cubrir un 20% del consumo de energía eléctrica nacional con estas fuentes a fines del 2025. Esto implicaría llegar a una potencia instalada para generación renovable de aproximadamente 10.000 MW desde los menos de 300 MW al momento de la entrada en vigencia de dicha norma. Actualmente se encuentran instalados aproximadamente 1.600 MW de generación eólica y fotovoltaica y hay adjudicados proyectos por más de 2.500 MW, correspondiendo aproximadamente 54% a energía eólica y 39% a energía solar fotovoltaica<sup>1</sup>. La incorporación de este volumen de energía supone un desafío para la administración del sistema eléctrico, por lo que se necesitan herramientas que faciliten la incorporación de mayores cantidades de energía provenientes de fuentes renovables intermitentes.

En este contexto resulta de especial interés el desarrollo de productos meteorológicos adecuados a las necesidades del mercado energético. La experiencia previa en el sector de la energía eólica ha demostrado que contar con pronósticos meteorológicos específicos es un aspecto clave de la

1

<https://public.tableau.com/profile/datosminem#!/vizhome/AdjudicacionesRenovARMINEMArgentina/AdjudicacionesRenovArArgentina>

integración exitosa del recurso al mercado energético (Lara-Fanego et al., 2012). La capacidad de pronosticar de forma más precisa la producción eólica reduce el riesgo de incertidumbre y permite un mejor planeamiento (Foley et al, 2012). En particular, modelos meteorológicos de mesoescala han sido ampliamente utilizados para pronosticar viento (Parks et al, 2011), mostrando un buen desempeño. Por otro lado, el desarrollo de modelos numéricos especializados a la producción de energía solar es reciente y, debido a la naturaleza fuertemente local de los factores determinantes de la radiación global, se realiza en grillas de alta resolución para regiones específicas (Jimenez et al., 2016). Sin embargo, el desarrollo de estos modelos es beneficioso para la industria energética, dado que la predicción numérica es el método más efectivo para los horizontes de tiempo en que se comercializa la energía en los mercados mayoristas (Haupt, 2017).

En el marco del futuro crecimiento de la participación de la generación renovable, es necesario estudiar la capacidad de pronóstico del recurso eólico y solar en Argentina, en un horizonte temporal de algunas horas a varios días. Para la predicción meteorológica operativa, el modelo Weather Research and Forecasting, WRF (Skamarock et al., 2008) es utilizado por varios centros mundiales, como el Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP) de Estados Unidos, el Centro de Previsión del Tiempo y Estudios Climáticos (CPTEC) de Brasil y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) argentino, entre otros. En este trabajo se analiza la capacidad de dicho modelo para ser aplicado a la predicción de variables asociadas a la generación renovable. Para ello, se compararán los pronósticos de WRF contra observaciones de alta calidad de cada uno de los recursos en dos ubicaciones geográficas cada una representativa de regiones con buen nivel del respectivo recurso. Para esta primera etapa de estudio, se utilizarán dos semanas testigo en las cuales se evaluará la calidad de los resultados obtenidos de WRF con distintas configuraciones. Se reportan resultados a lo largo de dichas semanas y se presentan métricas del error de pronóstico diario y semanal. Además, se pone el foco en días particulares que resultan de interés para entender las diferencias de las parametrizaciones bajo estudio.

## DATOS Y METODOLOGÍA

Las simulaciones del presente trabajo se realizaron con el modelo WRF utilizando como condiciones iniciales y de borde campos de análisis del Global Forecast System<sup>2</sup> (GFS) para todo el periodo de estudio: 18 al 25 de junio de 2017 (en adelante, invierno) y 18 al 25 de diciembre de 2017 (en adelante, verano). Ambas semanas fueron simuladas para un dominio centrado en Rawson, Chubut, y otro centrado en Villa Martelli, Buenos Aires. Todas las parametrizaciones utilizadas son iguales para cada simulación excepto los esquemas de Microfísica, Capa Límite y Capa de Superficie. Las combinaciones específicas de cada configuración se detallan en la Tabla 1. Los otros esquemas se mantuvieron constantes en todas las simulaciones y fueron:

- Radiación de onda larga y onda corta: RRTMG (Iacono et al., 2008)
- Superficie: Noah-MP (Niu et al. 2011)
- Cúmulos: Kain-Fritsch (Kain, 2004)

La selección de las opciones de configuración estuvo regida por la premisa de priorizar esquemas que, dado el costo computacional demandado, sean compatibles con una aplicación operativa. De esta forma, se seleccionaron algunos esquemas que el SMN prevé utilizar en su pronóstico operativo tanto determinístico como por ensambles. Las parametrizaciones elegidas privilegian la economía en el costo computacional sobre la precisión en la descripción, por lo que se optó por esquemas de microfísica de 1 momento (LIN y WSM6, ver Tabla 1), y esquemas de capa límite y superficie consistentes con estas.

Configuración	Microfísica	Capa Límite	Capa de Superficie
1	LIN	YSU	MM5

2 <https://nomads.ncdc.noaa.gov/data/gfsan/>

2	LIN	MYJ	NOAH
3	LIN	SH	MM5
4	WSM6	YSU	MM5
5	WSM6	MYJ	NOAH
6	WSM6	SH	MM5
LIN: Lin et al. (1983), WSM6: Hong and Lim (2006), YSU: Hong et al. (2006), MYJ: Janjic (1990), SH: Shin and Hong (2013), MM5: Jimenez et al. (2012), NOAH: Ek et al. (2003)			

*Tabla 1: Parametrizaciones específicas de cada configuración*

Estas 6 parametrizaciones se corrieron utilizando el WRF versión 3.8.1. Se realizó, además, una simulación exclusivamente para el modelado de radiación solar sobre Buenos Aires con el modelo WRF-Solar. El WRF-Solar es una versión aumentada del WRF versión 3.6 diseñada específicamente para mejorar la calidad de los pronósticos meteorológicos aplicados a la industria de la energía solar (Jimenez et al., 2016). Sus desarrollos principales incluyen una parametrización más sofisticada del efecto de los aerosoles sobre la dispersión de la radiación solar (efecto directo), así como la inclusión de los aerosoles en el modelado de la nucleación de nubes (efecto indirecto). El modelo contiene un esquema de radiación más económico en términos de cómputo que permite obtener los datos de radiación en cada paso de tiempo simulado (El WRF tradicional llama al esquema de radiación cada 30 pasos de tiempo por defecto). La configuración de este modelo fue igual al caso 1 de la Tabla 1, con la excepción de utilizar el esquema de microfísica de Thompson con representación de aerosoles (Thompson and Eidhammer, 2014).

Se diseñaron dos dominios experimentales, uno centrado en la ciudad de Buenos Aires, de donde se obtuvo la serie de radiación simulada para el punto de grilla más cercano a las instalaciones de CITEDEF en la localidad de Villa Martelli, Buenos Aires (34.556°S, 58.506°O), y otro centrado en la ciudad de Rawson, de donde se obtuvo la serie de viento simulada para el punto de grilla más cercano a la torre meteorológica del Parque Eólico Rawson (43.349°S, 65.178°O). Los dominios se muestran en la Figura 1. Las condiciones iniciales y de borde de los dominios fueron diseñadas con datos geográficos de 30 segundos de resolución en una grilla de 4x4 km con proyección Lambert, junto con campos de análisis del GFS cada 6 horas. Las simulaciones contaron con 45 niveles verticales seleccionados de forma automática por el modelo WRF. El dominio y las condiciones de borde para las corridas de WRF-Solar se definieron de manera idéntica, aunque el modelo está basado en la versión 3.6 y por lo tanto utiliza un sistema distinto de preprocesamiento.

Las variables de interés fueron contrastadas contra datos medidos en dos estaciones de superficie. Para la intensidad de viento, los datos provienen de el Parque Eólico Rawson (PER). Éste cuenta con una torre meteorológica emplazada en su esquina Noroeste, que presenta un registro histórico de mediciones, del año 2011 a la fecha, de intensidad y dirección del viento, entre otras variables. En lo que respecta a intensidad, el mástil cuenta con dos anemómetros de coperolas instalados a 50m y 80m de altura, mientras que para la dirección la veleta se encuentra a una altura cercana a los 80m. Los datos de intensidad de viento a 50 metros fueron comparados con los valores del nivel vertical más cercano generado por WRF, a 59 metros.

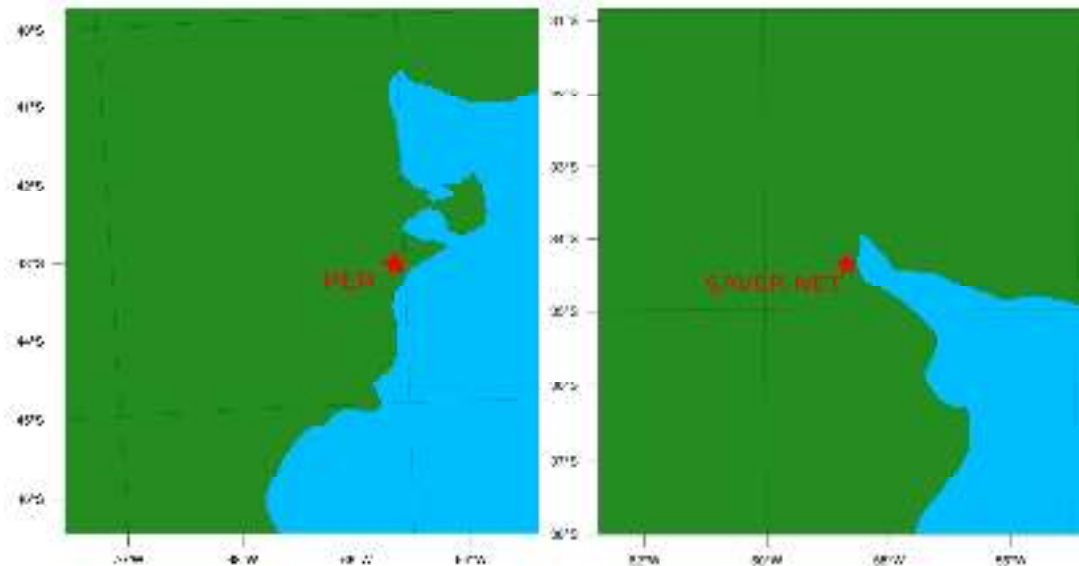


Figura 1: Dominios empleados para las simulaciones. Izquierda: Dominio centrado en Rawson, Chubut para el modelado de intensidad de viento. Derecha: Dominio centrado en Buenos Aires para el modelado de la radiación.

Por otro lado, los datos de radiación solar global horizontal en superficie fueron medidos en el nodo Villa Martelli de la red Saver-Net<sup>3</sup>, ubicado en el predio del Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa (CITEDEF). Los datos de radiación solar fueron medidos con un piranómetro Kipp&Zonen modelo CMP21. Este instrumento de banda ancha permite monitorear la radiación solar en superficie en el rango de longitud de onda de 285-2800 nm. Estos datos fueron comparados con la radiación solar global de onda corta en superficie obtenida de WRF y WRF-Solar.

Para realizar una comparación entre las distintas configuraciones analizadas, se calculó el Error Cuadrático Medio (RMSE, por sus siglas en inglés) definido como la desviación estándar del apartamiento de cada simulación con respecto a los datos observados. Esta métrica fue calculada para cada semana completa bajo estudio y para cada día por separado.

## RESULTADOS: SIMULACIÓN DE LA INTENSIDAD DE VIENTO EN RAWSON

A partir de los resultados obtenidos para las 6 configuraciones del modelo WRF definidas en la Tabla 1 sobre el dominio de Rawson, Chubut, se calculó la intensidad y dirección del viento para contrastar con los datos de la torre meteorológica del Parque Eólico Rawson. Las mediciones provienen del anemómetro instalado a 50 metros de altura, mientras que los datos de WRF corresponden al nivel de 59 metros. Los resultados para la semana de invierno se muestran en la Figura 2. Los datos y las mediciones tienen frecuencia 10-minutal. En la Figura 2 se somborean en rojo las direcciones para las cuales la torre meteorológica se encuentra en la estela de las turbinas eólicas, que perturban las mediciones. En general, se observa que existe poca diferencia entre las distintas configuraciones, siendo del orden de 0,2 m/s, mientras que las variaciones entre días distintos del error son del orden de 1 o 2 m/s. Los días en que el viento sopla con dirección este sur-este (90 -180°), como el día 24 de junio, o los días que sopla con dirección norte (0°), como el día 22, se observan los mayores errores. Estas direcciones corresponden a las situaciones donde la estela del parque afecta las mediciones de la torre meteorológica. Sin embargo, también hay días en que el viento sopla de la dirección óptima para el PER (oeste, 270°), y sin embargo existen desviaciones, como el día 18. Si se lo compara con el día 21, ambos presentan errores similares, aún cuando el día 21 existió una gran variación de la dirección y el 18 permaneció constante.

3 <http://data.savernet-satreps.org/>

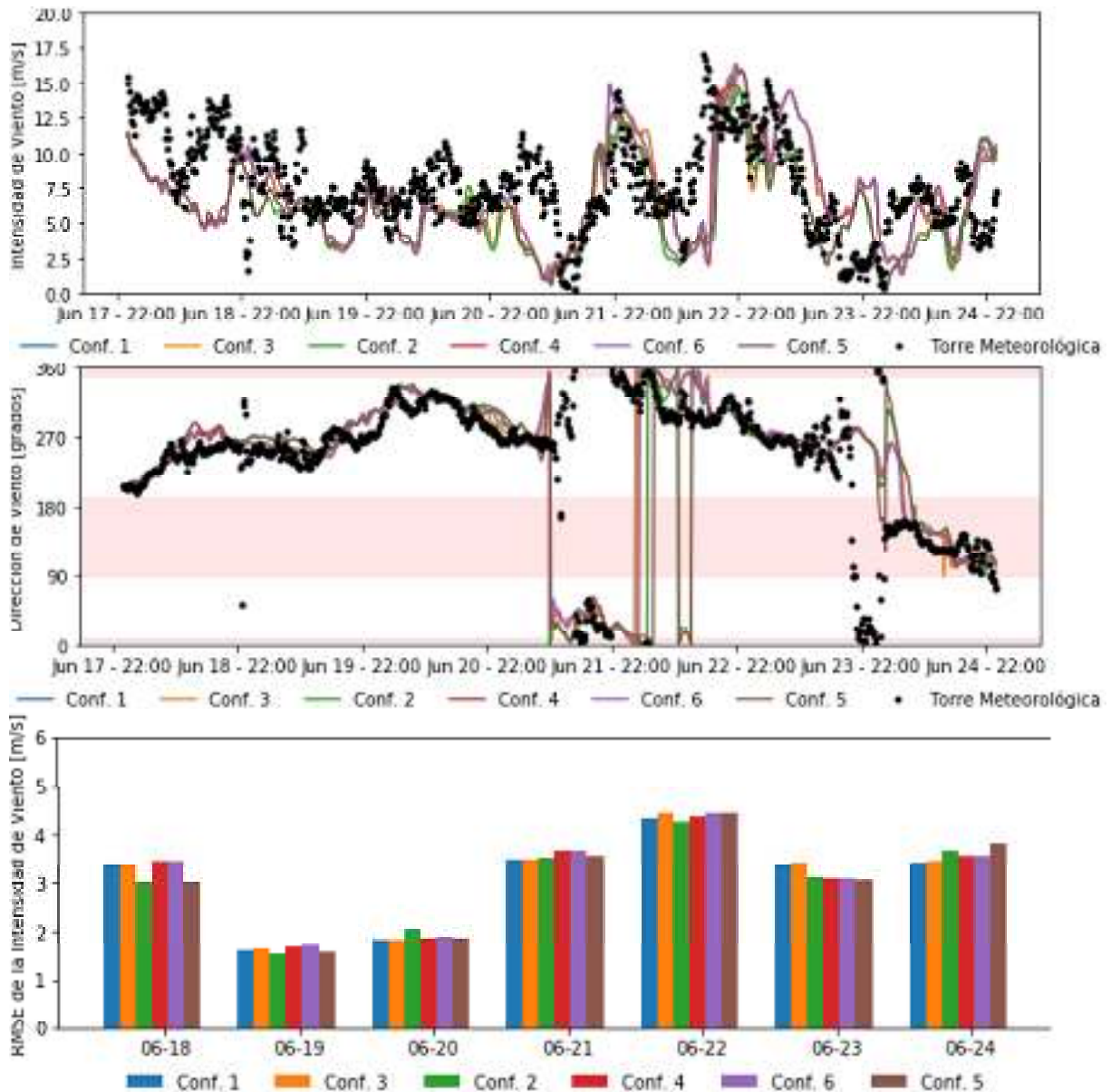


Figura 2: Arriba, intensidad de viento simulada para el punto de grilla correspondiente al PER (líneas) y datos de la torre meteorológica (puntos), para la semana del 18 al 25 de junio de 2017. Centro, dirección del viento obtenida del mismo conjunto de datos. Abajo, RMSE para las simulaciones de intensidad de viento para cada día de la semana estudiada. Horario UTC. En rojo se resaltan las direcciones para las que existe efecto estela en el parque.

Este día también muestra una marcada diferencia entre las configuraciones 2 y 5 y el resto, al menos cuando se la compara con la variación entre configuraciones de otros días.. Estas configuraciones comparten los esquemas de capa límite y superficie, MYJ y NOAH. El día 23 se ve un caso en que dos simulaciones sobreestimaron la intensidad de viento durante varias horas, en condiciones de dirección oeste constante. Estas simulaciones comparten el esquema de microfísica, LIN, y el de superficie, MM5. Algunos de estos días serán analizados en detalle más adelante.

De manera análoga, se muestran en la Figura 3 los resultados para el experimento de verano. Se observa que los dos primeros días estuvieron caracterizados por una dirección variable del viento, mientras que el resto de la semana fue constante del oeste. La intensidad promedio del viento es superior al caso de invierno y el RMSE es similar o ligeramente menor.



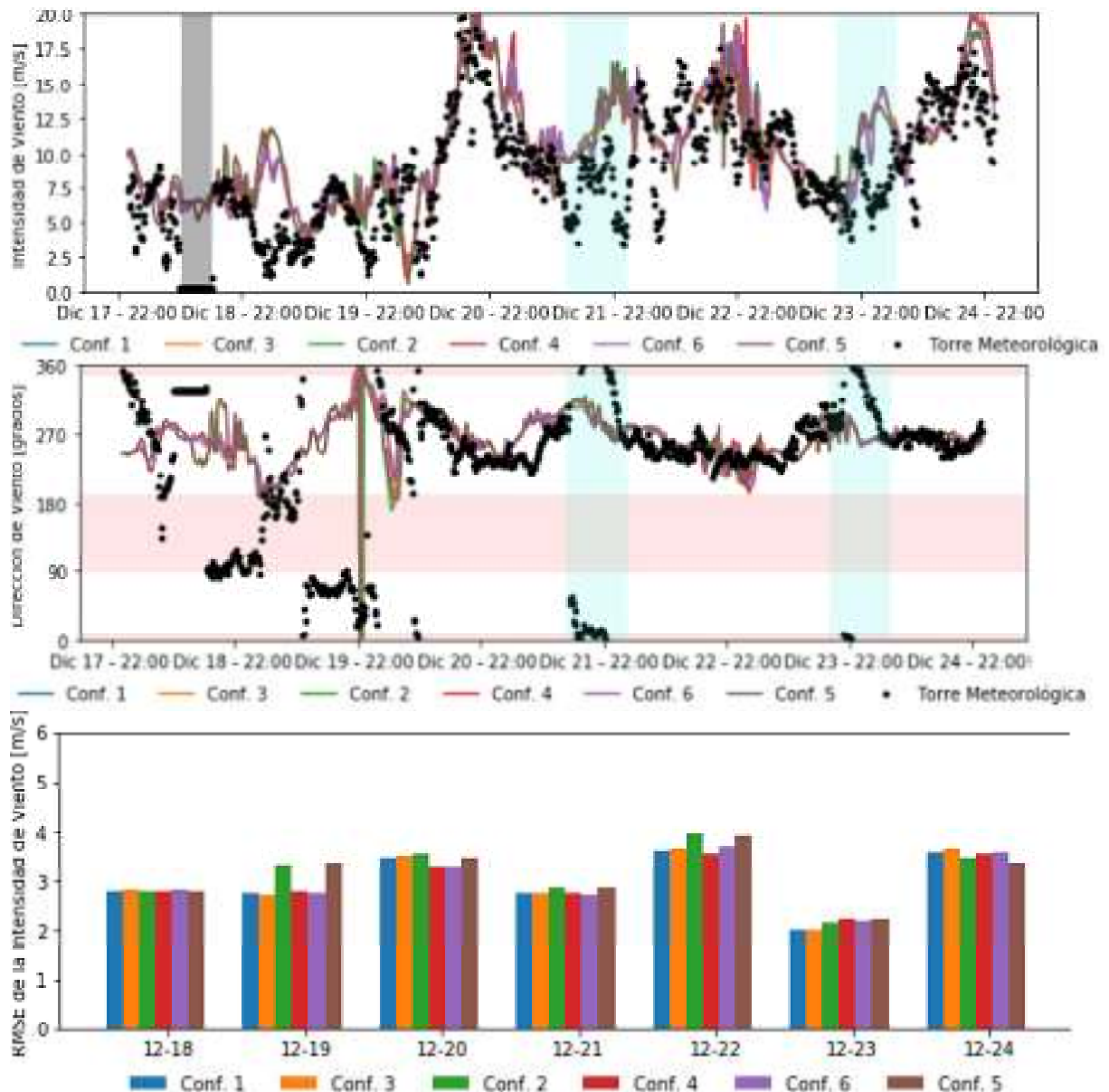


Figura 3: Arriba, intensidad de viento simulada para el punto de grilla correspondiente al PER (líneas) y datos de la torre meteorológica (puntos), para la semana del 18 al 25 de diciembre de 2017. Centro, dirección del viento. Abajo, RMSE para las simulaciones de intensidad de viento para cada día de la semana estudiada. Horario UTC. En rojo se resaltan las direcciones para las que existe efecto estela en el parque. En gris se resalta un periodo en que la Torre Meteorológica no registró datos y por ende los datos simulados fueron excluidos del cálculo de RMSE. En celeste se resaltan episodios de ráfaga (ver texto).

El día 19 se observa la mayor variación entre configuraciones, siendo los casos 2 y 5, mencionados en el párrafo anterior, los que muestran el mayor apartamiento. Este día también se caracteriza por una gran variación de la dirección. Los días 21 y 23 aproximadamente a las 22 UTC se ve un cambio brusco de la dirección asociado a un máximo local de intensidad que los modelos no anticiparon, posiblemente debido a una ráfaga generada en la capa límite.

Para cuantificar el desempeño global de las simulaciones realizadas, se muestra en la Tabla 2 el RMSE calculado para toda la semana para invierno y verano. Teniendo en cuenta que la intensidad promedio observada es 7,75 m/s para invierno y 8,5 m/s para verano, se ve que el error relativo es ligeramente menor para verano que para invierno. El RMSE promedio es 3,5 m/s para invierno y 3,2 m/s para verano, resultados similares a los informados en Zhenhua et al., 2019. Analizando ambas semanas



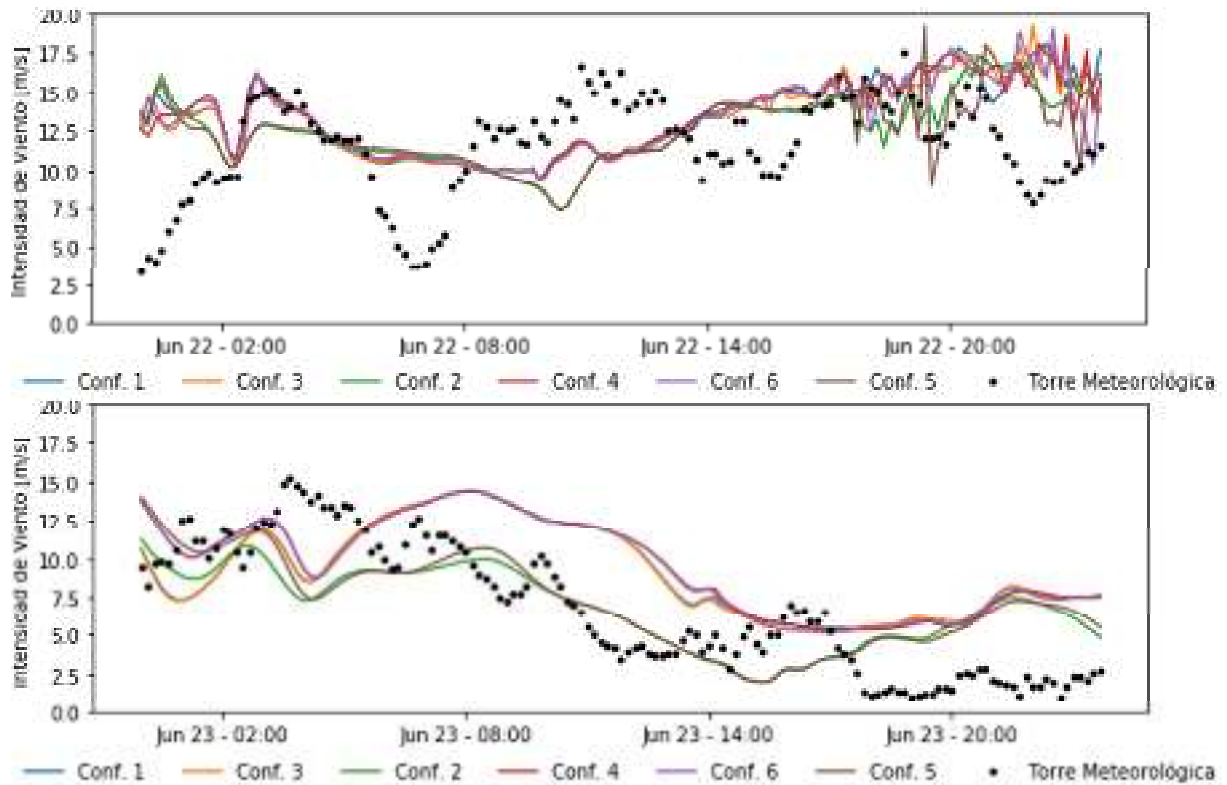


Figura 4: Arriba, detalle de la Figura 2 para el día 22 de junio. Este fue el día con mayor RMSE de los experimentos realizados. Abajo, detalle de la Figura 2 para el día 23 de junio como ejemplo de un día donde hubo gran diferencia variación entre configuraciones.

globalmente se ve que las configuraciones 2 y 5 mencionadas anteriormente se desempeñan ligeramente peor que las demás en verano, pero esto se revierte en la semana de invierno donde resultan las que menos error global presentan.

Para finalizar esta sección, se incluyen detalles de algunos días mencionados en los párrafos anteriores. En la Figura 4, arriba, se muestra el 22 de junio, el día con mayor RMSE de ambos experimentos. Los modelos predijeron una intensidad sostenida de aproximadamente 13 m/s durante el día, fallando en identificar un periodo de calma por la mañana. Durante estas horas las 6 configuraciones predicen valores similares, sin embargo hacia el final del día se observan mayores diferencias entre ellas. Durante estas horas los modelos también predijeron cambios de dirección del viento que no se observaron.

Configuración	RMSE Invierno [m/s]	RMSE Verano [m/s]
1	3,53	3,24
2	3,23	3,33
3	3,57	3,22
4	3,63	3,22
5	3,31	3,28
6	3,64	3,19

Tabla 2: RMSE de los resultados de intensidad de viento para las semanas completas.

En la Figura 4, abajo, se muestra el 23 de junio, uno de los días con mayores diferencias entre

configuraciones. En este caso se observa que todos los esquemas sobreestiman en promedio la intensidad de viento durante el día excepto las configuraciones 2 y 5, que reproducen bien los datos hasta las 19 horas aproximadamente, cuando nuevamente los resultados no varían entre modelos y todos sobreestiman la intensidad.

## **RESULTADOS: SIMULACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR EN BUENOS AIRES**

De manera similar, los resultados de las 6 configuraciones antedichas, así como aquellos del WRF-Solar, fueron utilizados para calcular la radiación global horizontal de onda corta en superficie en el dominio de Buenos Aires, para la semana de invierno y verano. Estos datos se compararon con mediciones de radiación global horizontal obtenidas del piranómetro de la red SAVER-NET ubicado en la localidad de Villa Martelli, con una frecuencia temporal de 1 minuto. La calidad de las simulaciones se cuantificó mediante el cálculo del RMSE para cada configuración, tomando sólo los datos diurnos y excluyendo los periodos cercanos a la salida y puesta del sol, dado que el piranómetro está ubicado en una zona urbana y recibe sombra de los edificios cercanos.

Se muestran en la Figura 5 los datos simulados y observados para toda la semana de invierno, así como su error medio por día. Como se puede ver, en días despejados el error es menor a  $50 \text{ W/m}^2$ , o al 10% de la radiación diaria promedio, y es independiente de la configuración empleada. En días con presencia de nubosidad, se observan casos, como el día 21 de junio, en que las simulaciones predicen ausencia de nubes pero aún así se registraron variaciones significativas de la radiación, y nuevamente este resultado es independiente de la configuración.

Así también, se observan instantes en que la radiación real es superior a la esperada en un día despejado, fenómeno debido a la reflexión del sol en nubes aisladas, que genera un efecto de concentración no representado en los modelos numéricos. Por otro lado, los días en que hubo nubosidad y fue captada por las simulaciones se observa la mayor variación entre configuraciones. El máximo de radiación diaria en un día despejado es aproximadamente  $600 \text{ W/m}^2$ . El día 23 de junio es uno de los casos con mayor variación entre modelos, observándose claramente cómo en algunos momentos predicen erróneamente cortos periodos en que la radiación es máxima. Algunos de estos días serán analizados en detalle más adelante.

En la Figura 6 se muestran los resultados para la semana de verano. El efecto de sombra que ocurre por la mañana es más evidente en este caso. Se observa que la radiación diaria es aproximadamente el doble que en invierno, llegando a  $1100 \text{ W/m}^2$ , y que la variación del error diario a lo largo de la semana es mayor. Tanto en invierno como en verano se observa que el error en días despejados es independiente de la configuración empleada y similar en valor absoluto (entre  $20$  y  $50 \text{ W/m}^2$ ). Es posible que este error sea debido a la falta de una representación adecuada de las concentraciones de aerosoles y su efecto en la dispersión de la radiación. El WRF-Solar es capaz de incorporar esta representación pero no se la utilizó para el presente estudio, dado que se puso el foco en comparar las modificaciones que este modelo contiene con respecto al cálculo de la radiación.

Por otro lado, los días nublados muestran nuevamente la mayor variación entre las configuraciones, así como el mayor RMSE. Entre los días que registran el mayor error, se diferencian días como el 22 de diciembre, en el cual hubo radiación intermitente que los modelos captan, pero carecen de precisión temporal, y días como el 19 de diciembre, en el que se observan variaciones en la radiación simulada, pero el valor real es mucho menor.

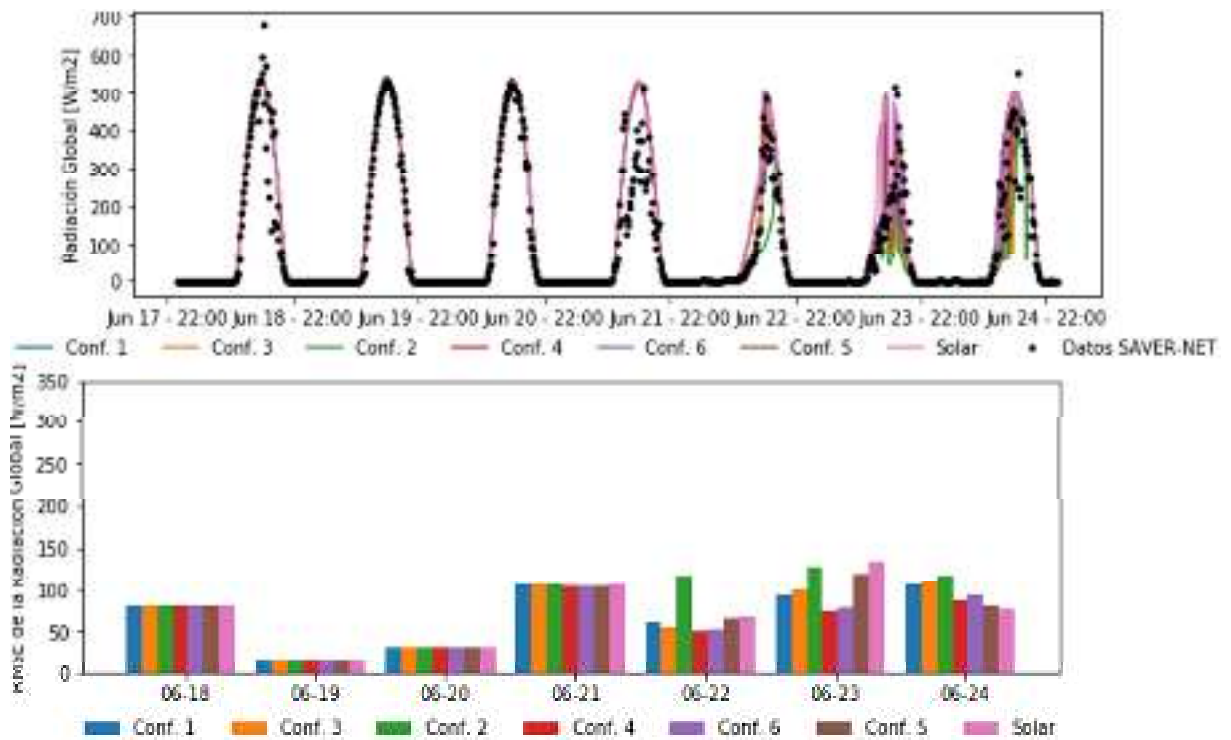


Figura 5: Arriba, radiación global en superficie para la semana del 18 al 25 de junio de 2017 calculada a partir de las 7 simulaciones realizadas sobre el dominio de Buenos Aires (líneas) y obtenidas de la red SAVER-NET (puntos). Abajo, RMSE para los datos de radiación, calculados para cada día de la semana. Horario UTC.

Los errores globales para los experimentos de invierno y verano se muestran en la Tabla 3. Teniendo en cuenta que el promedio diario de radiación solar global en plano horizontal para Buenos Aires en un día despejado de invierno es aproximadamente 400 W/m<sup>2</sup> (llegando a 700 de máximo), y para verano de 700 W/m<sup>2</sup> (1200), la Tabla 3 muestra que el error relativo se encuentra entre 25 y 35 %, valor que se encuentra dentro de lo esperable para un horizonte de pronóstico a 24 hs (Perez et al. 2013).

Configuración	RMSE Invierno [W/m <sup>2</sup> ]	RMSE Verano [W/m <sup>2</sup> ]
1	102,92	254,94
2	123,31	226,81
3	103,29	259,19
4	85,66	255,59
5	95,65	212,92
6	87,80	230,41
WRF-Solar	94,78	244,50

Tabla 3: RMSE de los resultados de radiación global calculado a partir de los datos diurnos, excluyendo las mediciones cercanas a la salida y puesta del sol (ver texto).

Como se dijo al principio de esta sección, las mayores diferencias entre las configuraciones elegidas se muestran en días nublados, y existe un error constante e independiente de las configuraciones en días despejados. Para finalizar esta sección se incluyen detalles de días puntuales que ilustran mejor estas características. En la Figura 7, arriba, se muestra el día 24 de diciembre, un caso de día despejado en el que hubo breves periodos de nubosidad durante la mañana. El error para este día es de aproximadamente 50 W/m<sup>2</sup> y fue calculado tomando los datos entre las 11 y 21:30 hs UTC, para no considerar el efecto de sombra que se observa en horas de salida y puesta del sol.

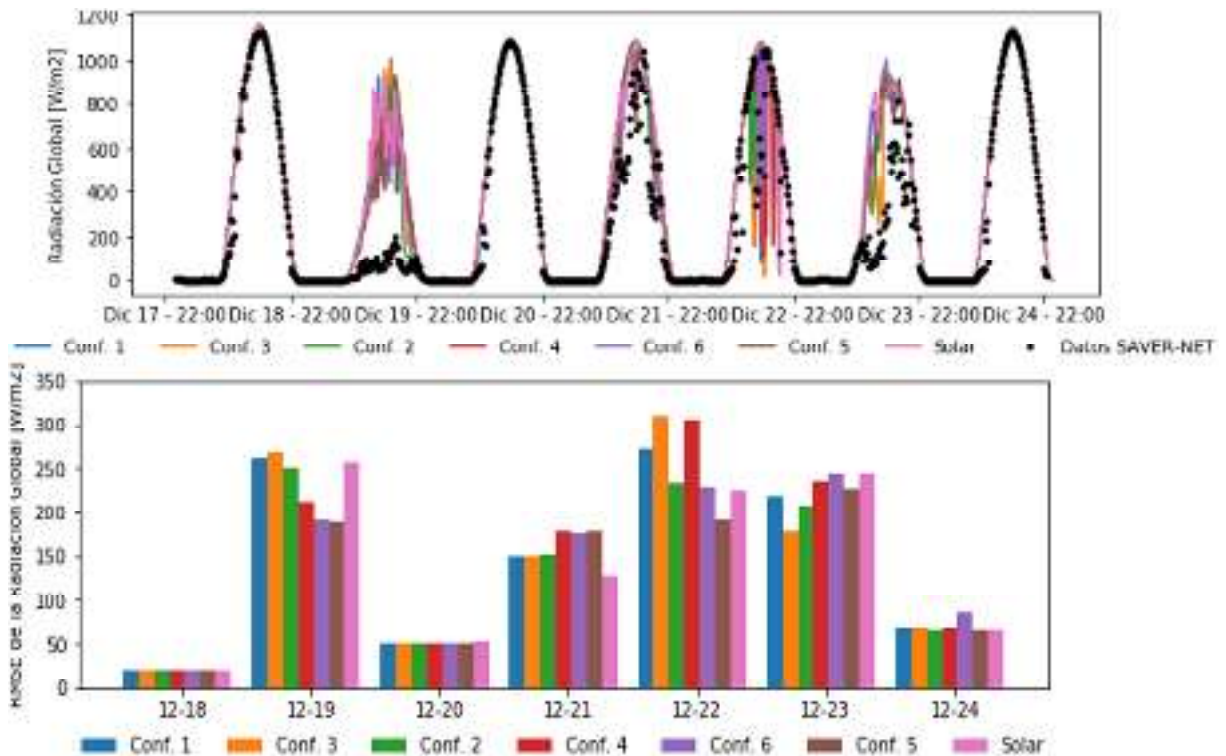


Figura 6: Arriba, radiación global en superficie para la semana del 18 al 25 de diciembre de 2017 calculada a partir de las 7 simulaciones realizadas sobre el dominio de Buenos Aires (líneas) y obtenidas de la red SAVER-NET (puntos). Abajo, RMSE para los datos de radiación, calculados para cada día de la semana. Horario UTC.

El error, entonces, se produce por una ligera sobreestimación de la radiación, sumado a un desfase temporal que parece ir incrementándose a lo largo del día. Es posible que una mejora en la descripción de los aerosoles presentes contribuya a mitigar la primer fuente de error mencionada (Ruiz-Arias et al., 2013).

En la Figura 7, centro, se ve el detalle del día 23 de junio. Hasta las 17 horas aproximadamente, se observa que todos los modelos predicen condiciones nubladas en general, pero los esquemas 2 y 5, así como el WRF-Solar, predicen periodos de claridad intermitente que no se observan. Estos esquemas ya han sido mencionados en la sección de modelado de viento por exhibir un pronóstico distinto a los otros 4. Este fenómeno podría estar relacionado con una falencia en el modelado de una capa particular de nubosidad, que algunas configuraciones logran resolver y otras no, o por la falta de consideración de ese tipo de nubosidad en los esquemas de radiación. En la Figura 7, abajo, se muestra el detalle del día 19 de diciembre, en donde se ve otro ejemplo similar. En este caso todas las configuraciones anticipan la presencia de nubosidad, pero no parecen estimar adecuadamente el impacto resultante sobre la radiación global. La red SAVER-NET, que brindó los datos del piranómetro, tiene en sus estaciones cámaras de cielo total. Esta información fue consultada para el día en cuestión, observándose que fue un día de cielo cerrado con precipitación moderada durante la tarde. Los modelos captaron la precipitación y la nubosidad adecuadamente, pero aún así sobreestimaron la radiación global en superficie.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un estudio sobre las capacidades del modelo WRF para representar variables relacionadas con la generación renovable. Para ello se compararon 6 combinaciones de configuraciones de las parametrizaciones de capa límite, capa de superficie y microfísica. Estas configuraciones se seleccionaron con la premisa de acotar el esfuerzo computacional a los requerimientos de pronóstico operativo. Además, en el caso de la radiación solar se agregó una configuración extra correspondiente a un producto diseñado específicamente para aplicaciones solares.

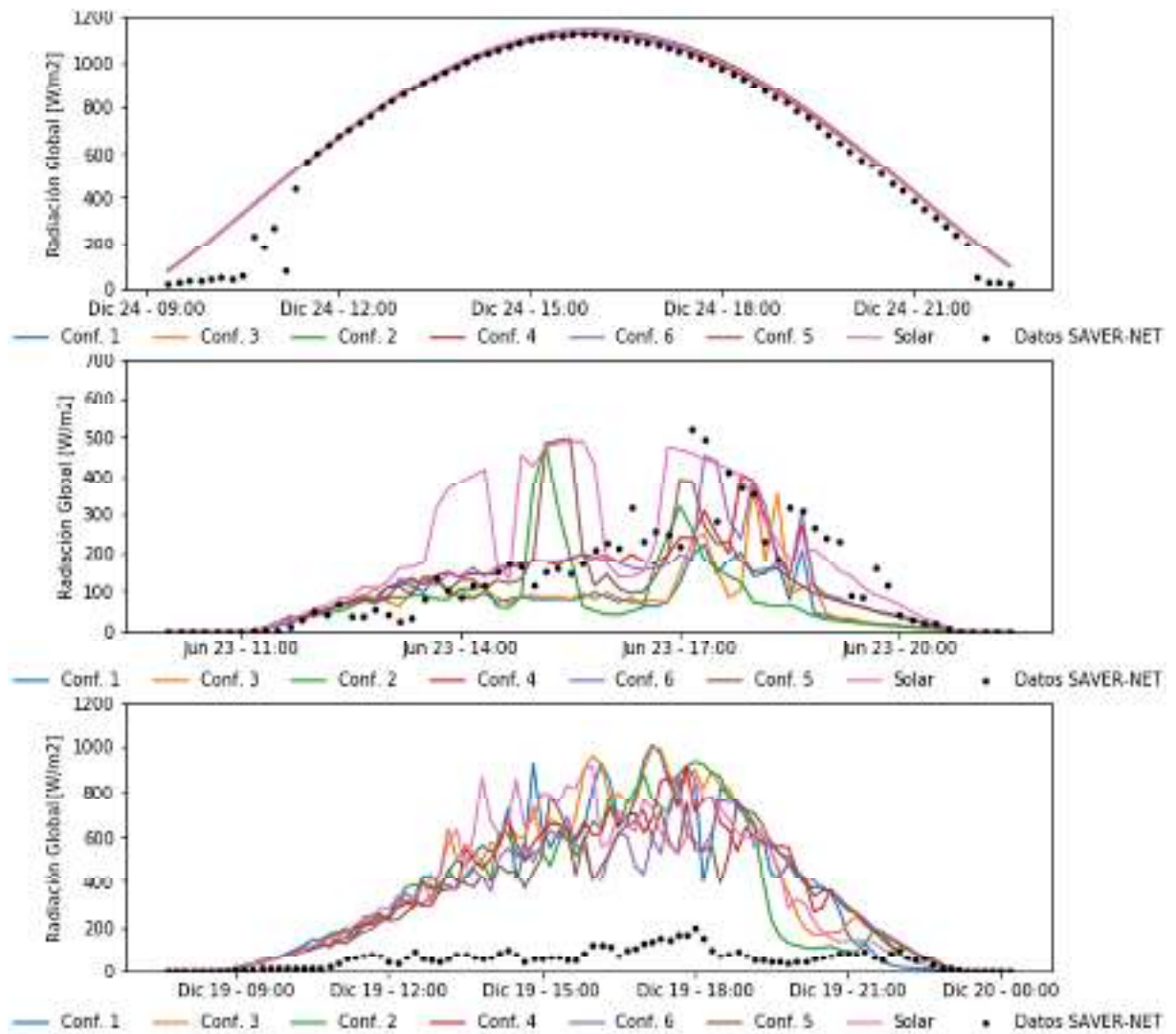


Figura 7: Arriba, detalle de la Figura 6 para el día 24 de diciembre. Ejemplo de día despejado. Centro, detalle de la Figura 5 para el día 23, ejemplo de día con gran variación entre configuraciones. Abajo, detalle de la Figura 6 para el día 19. Ejemplo de día con una sobreestimación generalizada de la radiación global.

Los resultados de las simulaciones utilizando estas configuraciones se compararon con mediciones de campo en dos localizaciones representativas de zonas de buenos recursos solares y eólicos.

En el caso eólico las distintas configuraciones muestran comportamientos similares, acompañando en general las tendencias pero produciendo errores significativos en la intensidad de viento en algunos casos. La predicción de la dirección de viento en general presenta, por el contrario, mayor grado de precisión. Esto parece indicar que el modelo representa acertadamente los fenómenos de gran escala pero resulta menos sensible a los fenómenos en la capa límite. Más allá de profundizar en un estudio más amplio, esto podría indicar la necesidad de aumentar la cantidad de niveles verticales en las capas bajas cercanas a las alturas de interés para el aprovechamiento eólico, que en este caso se dejaron librados a la selección del modelo, y trabajar en otras estrategias para mejorar las condiciones iniciales y de contorno, como por ejemplo la asimilación de datos de mediciones.

En el caso solar los errores en los resultados de días sin nubosidad dan cuenta de la necesidad de representar más precisamente el efecto de los aerosoles en la atmósfera. En el caso de los días parcial o totalmente nublados se ve la necesidad de profundizar el estudio sobre versiones más complejas de las parametrizaciones utilizadas y de trabajar sobre la parametrización que representa la interacción de la microfísica con la radiación solar.

Con respecto a las diferencias entre configuraciones, se observó en algunos de los días estudiados en



detalle tanto para radiación como para viento que los esquemas 2 y 5, que difieren en su parametrización de microfísica y comparten los esquemas MYJ y NOAH de capa límite y superficie, respectivamente, tienden a producir resultados distintos a los otros esquemas, algunas veces resultando en un RMSE más pequeño, y otras en uno más grande, por lo que si bien no se puede concluir que sean más o menos efectivos, se ha observado que pronostican valores diferentes al resto de las configuraciones para ambos recursos. Esta observación no se confirma definitivamente en las estadísticas globales para ambas semanas.

Como trabajo a futuro se plantea explorar las alternativas antes mencionadas y ampliar el estudio a períodos más extensos de tiempo y otras localizaciones que puedan tener características climáticas particulares.

## AGRADECIMIENTOS

Los datos de mediciones de la torre meteorológica del PER fueron gentilmente facilitados por GENNEIA S.A. por lo cual estamos agradecidos. Además, agradecemos el tiempo de cómputo en el clúster TUPAC otorgado por el CSC-CONICET para llevar a cabo este trabajo. Se agradece los datos de radiación solar de la red SAVER-Net (CITEDEF-SMN) utilizados en este trabajo.

## REFERENCIAS

- Ek, M. B., Mitchell K. E., Lin Y., Rogers E., Grummann P., Koren V., Gayno G., y Tarpley J. D. (2003), Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational Mesoscale Eta Model, *J. Geophys. Res.*, **108**, 8851, (DOI:10.1029/2002JD003296).
- Foley A.M; Leahy, P.G.; Marvuglia, A.; Mckeogh E.J. (2012). Current methods and advances in forecasting of wind power generation. *Renewable Energy*. 37p. p. 1-8.
- Haupt S. E. y Kosović B., "Variable Generation Power Forecasting as a Big Data Problem," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 8, no. 2, pp. 725-732, April 2017. (DOI: 10.1109/TSTE.2016.2604679).
- Hong, S., Noh, Y. y Dudhia, J. (2006), A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes, *Monthly Weather Review*, 134, 9, 2318-2341, (DOI:10.1175/MWR3199.1).
- Hong S., and Lim J., (2006), The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6). *J. Korean Meteor. Soc.* 42: 129-151.
- Iacono, M. J., Delamere, J. S., Mlawer E. J., Shephard M. W., Clough S. A. , y Collins W. D., "Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models," *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, vol. 113, no. 13, Article ID D13103, 2008. (DOI:10.1029/2008JD009944)
- Janjic, Z. I., 1990: The step-mountain coordinate: Physical package. *Mon. Wea. Rev.*, 118, 1429–1443. (DOI:10.1175/1520-0493(1990)118<1429:TSMCPP>2.0.CO;2).
- Jiménez, P. A., Dudhia, J., González-Rouco, J. F., Navarro J., Montávez, J. P. y García-Bustamante E. (2012), A Revised Scheme for the WRF Surface Layer Formulation, *Monthly Weather Review*, 140, 3, 898-918, (DOI:10.1175/MWR-D-11-00056.1).
- Jimenez, P.A., Hacker J.P. , Dudhia J., Haupt S.E., Ruiz-Arias J.A., Gueymard C.A., Thompson G., Eidhammer T. y Deng A. (2016): WRF-SOLAR, Description and Clear-Sky assessment of an augmented NWP model for solar power prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **97**, 1249–1264 (DOI:10.1175/BAMS-D-14-00279.1)
- Kain, J. S. (2004), The Kain–Fritsch Convective Parameterization: An Update. *Journal of Applied Meteorology*, 43, 1, 170-181, (DOI:10.1175/1520-450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2).
- Lara-Fanego, V., Ruiz-Arias, J. A., Pozo-Vázquez, A. D., Gueymard, C. A. y Tovar-Pescador, J. (2012): Evaluation of DNI forecast based on the WRF mesoscale atmospheric model for CPV applications. AIP Conference Proceedings, CPV-8 Conf., Toledo, Spain. (DOI:10.1063/1.4753895)
- Lin, Y.-L., Farley R. D. y Orville H. D., (1983), Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Climate Appl. Meteor.*, **22**, 1065–1092, (DOI:https://doi.org/10.1175/1520-0450(1983)022<1065:BPOTSF>2.0.CO;2).

- Niu, G. Y., Yang Z., Mitchell K. E., Chen F., Ek M. B., Barlage M., Kumar A., Manning K., Niyogi D., Rosero E., Tewari M. y Xia Y. (2011), The community Noah land surface model with multiparameterization options (NoahMP): 1. Model description and evaluation with local scale measurements, *J. Geophys. Res.*, 116, D12109, (DOI:doi.org/10.1029/2010JD015139).
- Parks, K., Wan, Y. H., Wiener, G., and Liu, Y. (2011). Wind energy forecasting: A collaboration of the National Center for Atmospheric Research (NCAR) and Xcel Energy. *Contract*, 303, 275-3000.
- Perez, R., et al. (2013), Comparison of numerical weather prediction solar irradiance forecasts in the US, Canada and Europe. *Sol. Energy*, 94, 305–326, (DOI:10.1016/j.solener.2013.05.005).
- Ruiz-Arias J. A., Dudhia J., Santos-Alamillos F. J. y Pozo-Vázquez D. (2013), Surface clear-sky shortwave radiative closure intercomparisons in the Weather Research and Forecasting model. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 9901–9913, (DOI:10.1002/jgrd.50778).
- Shin, H. H. and Hong, S.-Y. (2013), “Analysis of resolved and parameterized vertical transports in convective boundary layers at gray-zone resolutions,” *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 70, no. 10, pp. 3248–3261, (DOI:10.1175/JAS-D-12-0290.1).
- Skamarock, W.C., Klemp J., Dudhia J., Gill D.O., Barker D., Wang W. y Powers J.G. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3. 27. 3-27 (DOI:10.5065/D68S4MVH)
- Thompson G. y Eidhammer T. (2014), A Study of Aerosol Impacts on Clouds and Precipitation Development in a Large Winter Cyclone, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 71, 10, 3636-3658, (DOI:10.1175/JAS-D-13-0305.1).
- Zhenhua D., Ao J., Duan Q., Wang J., Gong W., Shen C., Gan Y. y Liu Z. (2019), Improving WRF model turbine-height wind-speed forecasting using a surrogate-based automatic optimization method, *Atmospheric Research*, Volume 226, Pages 1-16, ISSN 0169-8095, (DOI:10.1016/j.atmosres.2019.04.011).



## **COMPARACIÓN DE VALORES DE IRRADIANCIA GLOBAL MEDIDA EN SITIOS DE ALTURA EN ARGENTINA CONTRA BASES DE DATOS SATELITALES.**

**Germán Salazar<sup>1</sup>, Christian Gueymard<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>UNSa-INENCO-CONICET- Avda Bolivia 5150-A4408FVY – Salta – Salta - Argentina

<sup>2</sup>Solar Consulting Services-P.O. Box 392-Colebrook, NH 03576, Estados Unidos.

e-mail: germansalazar.ar@gmail.com

*Recibido 15/08/19, aceptado 17/10/19*

**RESUMEN:** La parte occidental de la provincia argentina de Salta cubre una de las regiones con mayor disponibilidad de recursos solares en todo el mundo, gracias en parte a su altitud y poca nubosidad. Muchos proyectos de energía solar a gran escala se están desarrollando en esa región, a pesar de que la irradiancia solar no se mide sistemáticamente en todos los sitios de interés. En este trabajo, se analiza la calidad de los datos de irradiancia horizontal global (GHI) de 1 minuto medidos durante 3–4 años en dos sitios de gran altitud en la provincia de Salta. Se aplican técnicas de filtrado de control de calidad sólidas a los datos sin procesar. También se sigue un método avanzado para obtener medios significativos por hora, día y mes a pesar de la presencia de lagunas de datos. El conjunto de datos de observación válido se utiliza para validar varias bases de datos modeladas en varias escalas temporales. Se espera que los resultados actuales disminuyan la incertidumbre de las estimaciones en la región y, por lo tanto, mejoren la bancabilidad de los proyectos solares.

**Palabras clave:** GHI, control de calidad, Argentina.

### **INTRODUCCIÓN**

Los recursos eólicos y solares son las fuentes renovables de energía más utilizadas en todo el mundo. Como en muchos otros países, el interés por desarrollar tales proyectos está creciendo rápidamente en Argentina. Su recurso solar varía enormemente en todo el país, debido a su geografía alargada, topografía compleja y múltiples zonas climáticas. Dado que el clima es un factor importante al decidir la instalación de una planta de energía solar, es importante confiar en una buena evaluación del recurso solar de todas las regiones de Argentina en función de su clima específico.

El conocimiento inexacto de la variabilidad espacio-temporales del recurso solar puede traducirse en dificultades de bancabilidad o pérdidas financieras irreparables durante la vida útil de una planta de energía solar. Desafortunadamente, Argentina, al igual que la mayoría de los otros países del mundo, no tiene una red nacional de estaciones meteorológicas que cumpla con los estándares ISO-9060, ni una base de datos de radiación medida que pueda proporcionar datos estadísticamente representativos de irradiancia solar durante largos períodos.

Los modelos de bases de datos satelitales (BDS) suelen usar imágenes satelitales geo-sincrónicas que cubren grandes regiones y pueden grabarse metódicamente durante largos períodos de tiempo. Los modelos radiativos especializados aprovechan estos datos para derivar series de tiempo largas de irradiancia horizontal global (GHI) e irradiancia normal directa (DNI) con resoluciones espaciales de 1–10 km y resoluciones temporales de 15–60 min, normalmente con precisión razonable.

Una dificultad importante es que la mayoría de los BDS no cubren América del Sur en absoluto, o solo una pequeña parte de ella. Por ejemplo, el límite sur del dominio NSRDB de NREL es  $-21^\circ$ . Por debajo de esa latitud, los únicos conjuntos de datos SDB de dominio público que se pueden obtener son mensualmente, por ejemplo, de NASA-SSE o UNEP-SWERA. Otra fuente de datos útiles de irradiancia es proporcionada por reanálisis de modelos numéricos de predicción del clima. Dichas bases de datos de reanálisis (BDR) proporcionan series temporales más largas y cubren un dominio geográfico más grande que los BDS, pero con una resolución espacio-temporal menor (por ejemplo, datos por hora en una cuadrícula de 30-60 km).

Para validar los modelos de las BDS o BDR y evaluar su incertidumbre real, las observaciones de irradiancia de superficie de alta calidad son de crucial importancia, particularmente en regiones de topografía compleja o microclimas (Sengupta et al., 2017).

El objetivo de este trabajo es mejorar la calidad general de las bases de datos de irradiancia medidas para que puedan usarse para evaluar el acuerdo en varias escalas de tiempo entre las mediciones de GHI y las estimaciones de BDS o BDR en la región de Salta. En ese proceso, se evaluaron varias bases de datos de dominio público disponibles que ofrecen una resolución temporal de hora a mes debido a su importancia en las evaluaciones de los recursos solares.

## **RECURSO SOLAR DE LA REGIÓN EN ESTUDIO.**

La parte occidental de la provincia de Salta está incluida en el "punto caliente" solar (Salazar et al, 2015) de América del Sur (Fig. 1). Que esta región reciba mucha radiación solar ha sido un hecho conocido popularmente por generaciones, pero el estudio formal de su recurso solar solo ha comenzado durante las últimas tres décadas.

El reciente interés del gobierno argentino en alentar la instalación de parques solares fotovoltaicos (300 MW cada uno) a través del programa RenovAR (<https://www.argentina.gob.ar/renovar>) ha motivado la necesidad de contar con datos confiables de radiación solar en aquellas áreas que presentan un buen potencial, especialmente en la región noroeste de Salta. En ausencia de una densa red de estaciones radiométricas, los desarrolladores solares deben confiar en datos modelados para estimar el recurso solar y con ellos preparar el diseño de sus proyectos, realizar simulaciones de energía y evaluar análisis de rendimiento / costos.

La Figura 1 muestra un mapa derivado del modelo de GHI anual para la provincia de Salta. Se aprecia un fuerte gradiente este-oeste, de  $\approx 1800 \text{ kWh/m}^2$  en el este a  $\approx 2700 \text{ kWh/m}^2$  en el oeste. El mapa ha sido desarrollado por el proyecto ESMAP del Grupo del Banco Mundial (<https://globalsolaratlas.info/>) y es de dominio público, pero solo proporciona valores medios anuales.

## **MEDICIONES Y CONTROL DE CALIDAD DE DATOS.**

Los datos medidos analizados en este trabajo provienen de dos sitios: Salta (Lat.  $-24.7^\circ$ , Long.  $-65.4^\circ$ , 1200 msnm) y El Rosal (Lat.  $-24.4^\circ$ , Long.  $-65.7^\circ$ , 3355 msnm). Estos están marcados con un cuadrado azul y blanco, respectivamente, en la Fig. 1. Para las mediciones de GHI, la estación de Salta está equipada con un piranómetro Eppley PSP, mientras que El Rosal tiene un K&Z CMP3. Ambos instrumentos están calibrados contra un K&Z CM21, que a su vez está calibrado contra los instrumentos estándar argentinos, trazables a WRR. La incertidumbre resultante en la medición de la GHI se estima en 4-5%. Los dataloggers utilizados en ambas estaciones son Campbell Scientifics CR-1000.

Las mediciones de GHI de Salta se han utilizado previamente, pero sin ningún procedimiento formal de Control de Calidad (CC), para evaluar las predicciones de la media mensual de las bases de datos SWERA y NASA-SSE (Salazar et al., 2015). Los resultados sugirieron que estas bases de datos sobreestimaron GHI en una cantidad significativa. Para evitar el mayor sesgo experimental posible, ahora se aplica una corrección a las observaciones de GHI para compensar el desplazamiento térmico de los piranómetros, ya que constituye un error sistemático que ahora está bien documentado

(Gueymard y Myers, 2009). También se aplica un procedimiento de CC, siguiendo los protocolos de tipo BSRN (Long y Shi, 2008; Ameen et al., 2018). Además, se realiza un análisis estadístico detallado para eliminar el impacto de las rupturas de datos en las estadísticas por hora, día y mes, siguiendo las mejores prácticas (Roesch et al., 2011).

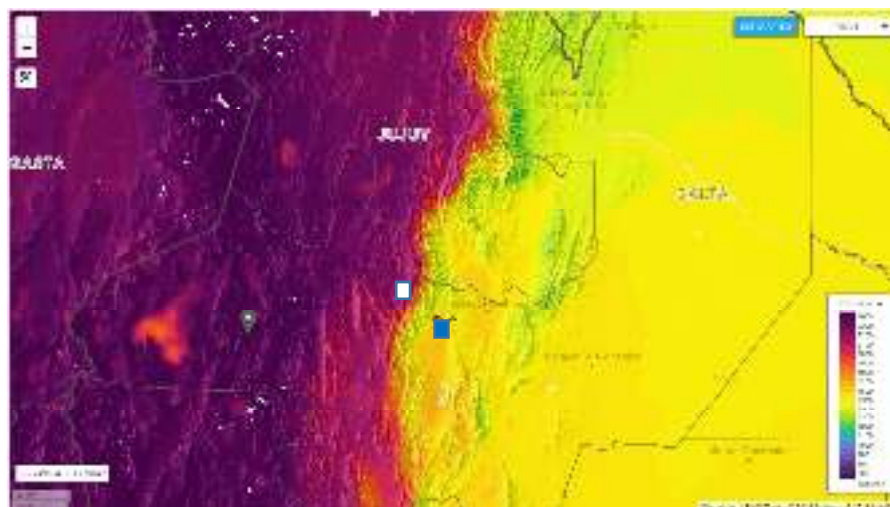


Figura 1: Distribución espacial anual de GHI para el noroeste de Argentina (Grupo del Banco Mundial-ESMAP). Se indica la frontera de la provincia de Salta. La ubicación de las dos estaciones en estudio se indica mediante cuadrados.

Para el presente estudio, se analiza una base de datos medida de tres años para la ciudad de Salta (2013-2015), así como datos que abarcan cuatro años (2013-2016) del sitio de mayor altitud de El Rosal.

Dado que no se disponen de valores medidos de DNI en ninguno de los sitios, los filtros utilizados fueron solo los de valores físicamente posibles, valores de salida y puesta de Sol, y valores de día de cielo claro. Se utilizó el método de las 4 cajas de 15 minutos de Roesch et al (2011) para el cálculo de los valores horarios, centrandolo el cálculo en cada hora hh:00.

### COMPARACIÓN CON LAS ESTIMACIONES DEL MODELO.

Las bases de datos modeladas analizadas son de dominio público y ofrecen una bibliografía que respalda sus estimaciones y describe sus modelos. Las mediciones de GHI controladas por la calidad (descritas anteriormente) se comparan con las estimaciones de varias bases de datos: UNEP-SWERA (<https://s3.amazonaws.com/openei-public/swera.zip>) , NASA-SSE (<https://power.larc.nasa.gov/>) , Meteonorm (<https://meteonorm.com/en/>) , ECMWF-CAMS (<http://www.soda-pro.com/web-services/radiation/cams-radiation-service>) y NASA-MERRA2 (<https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>) . La Tabla 1 compara la media anual de GHI extraída de estas bases de datos con los datos medidos para las dos estaciones, Salta y El Rosal. Sorprendentemente, todas las bases de datos modeladas tienden a sobreestimar GHI en Salta y subestimar en El Rosal

Estación	Medida	CAMS	MERRA2	SSE	Meteonorm	SWERA	ESMAP
Salta	(kWh/m <sup>2</sup> )	4.75	6.67	5.37	5.01	5	5.1
	(% dif.)	—	<b>5.1</b>	40.5	13.1	5.7	5.3
El Rosal	(kWh/m <sup>2</sup> )	6.87	6.67	5.33	6.05	5.45	6.4
	(% dif.)	—	-13.1	<b>-3.0</b>	-22.4	-12.0	-20.6

Tabla 1: Comparación de la media anual medida de GHI en Salta y El Rosal con resultados modelados de varias bases de datos. GHI se expresa como kWh/m<sup>2</sup> por día. La diferencia relativa porcentual (% dif.) se indica en comparación con el valor medido. Las diferencias más bajas aparecen en negrita.

Algunas de las discrepancias exceden  $\pm 20\%$ , lo cual es sustancial y puede afectar negativamente los proyectos solares. Una causa probable es la topografía compleja con cambios rápidos en la elevación, combinada con el gran tamaño de celda de la mayoría de las bases de datos. Las Figuras 2 y 3 muestran la variación mensual de GHI en los dos sitios. Solo se encuentra un acuerdo limitado entre las diferentes evaluaciones mensuales.

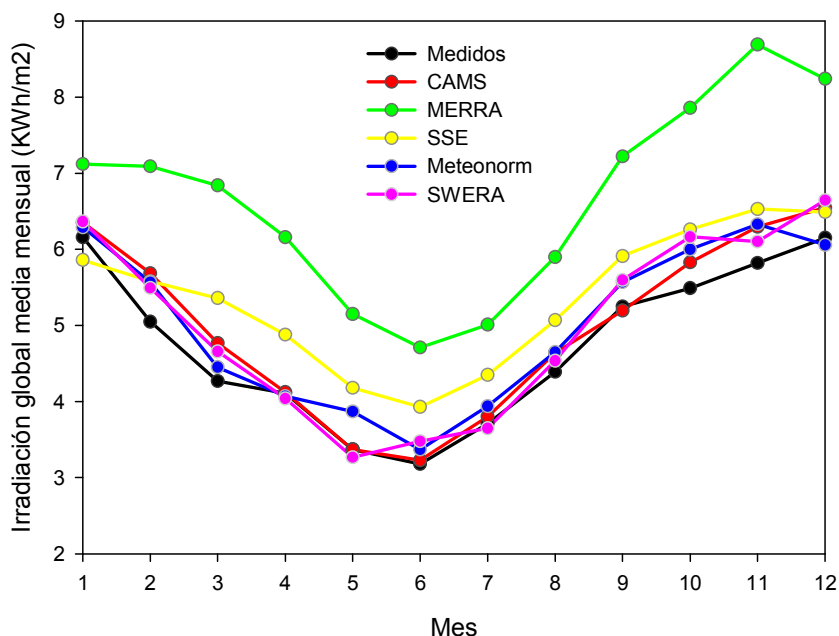


Figura 2: Mediciones de GHI media mensual en comparación con varias BDS para Salta Capital.

Para los datos de la ciudad de Salta, los resultados de los estimados de GHI pueden clasificarse de “mejores” a “peores” de la siguiente manera:

- 1) CAMS (5.1% de diferencia)
- 2) SWERA (5.3% de diferencia)
- 3) Meteornorm (5.7% de diferencia)
- 4) ESMAP (7.5% de diferencia)
- 5) SSE (13.1% de diferencia)
- 6) MERRA2 (40.5% de diferencia)

Para los datos de la ciudad de El Rosal, los resultados de los estimados de GHI se acomodan de la siguiente manera:

- 1) MERRA2 (-3% de diferencia)
- 2) ESMAP (-6.8% de diferencia)
- 3) Meteornorm (-12% de diferencia)
- 4) CAMS (-13.1% de diferencia)
- 5) SWERA (-20.6% de diferencia)
- 6) SSE (-22.4% de diferencia)

Es evidente que no existe una concordancia entre los valores de diferencia para los sitios Salta y El Rosal. La capacidad de estimar la GHI para el sitio de altura parece exceder los modelos utilizados por cada BDS. Deberá analizarse con detalle la influencia del tamaño de la celda satelital, la orografía y la altitud.

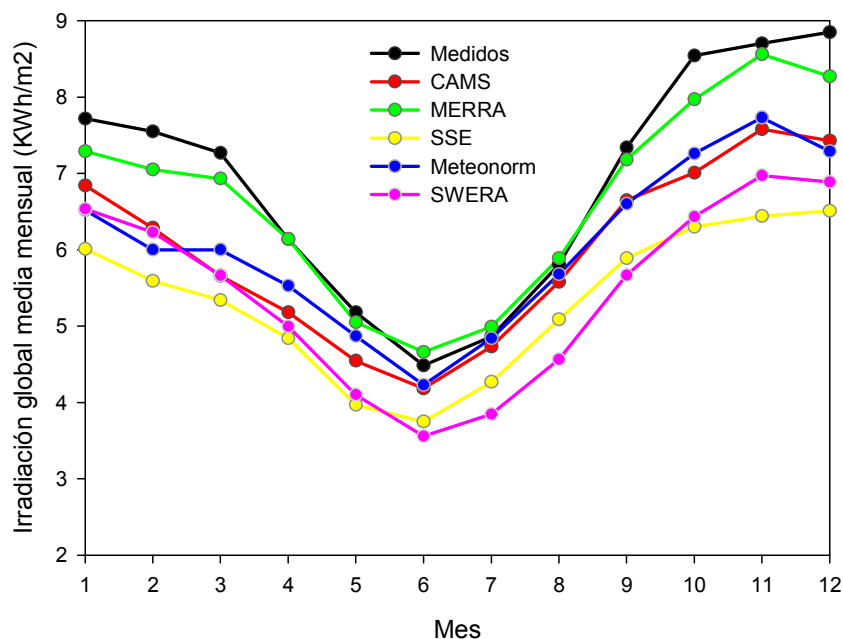


Figura 3: Mediciones de GHI media mensual en comparación con varias BDS para El Rosal.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se han obtenido valores de GHI diarios medios mensuales interanuales para dos sitios de altura en la provincia de Salta: Salta Capital (1200 msnm) y El Rosal (3350 msnm), utilizando filtros de control de calidad y a partir de datos medidos con una frecuencia de 1 minuto.

Se han comparado los valores diarios medios mensuales interanuales de 5 bases de datos satelitales disponibles en internet.

Para el caso de Salta, los valores estimados están en exceso respecto de los valores medidos, mientras que para El Rosal están siempre en defecto. Para Salta la mejor estimación es de CAMS, con un 5.1% de diferencia porcentual. La BDS con la mayor diferencia (40.5%) es MERRA2.

Para El Rosal la mejor estimación (-3%) es de MERRA2. SSE tiene la diferencia porcentual más grande, con -22.4%.

Deberá estudiarse con mayor detalle las posibles relaciones entre los valores medidos y estimados y las causas que originan esas diferencias, aunque el tamaño de celda, la altitud y la orografía aparecen como las más probables causas de ellas.

## REFERENCIAS

Ameen B., Balzter H., Jarvis C. (2018). Quality control of global horizontal irradiance estimates through BSRN, TOACs and air temperature/sunshine duration test procedures. *Climate* 6, 69.

Gueymard C. A. y Myers D. R. (2009). Evaluation of conventional and high-performance routine solar radiation measurements for improved solar resource, climatological trends, and radiative modelling. *Solar Energy* 83, 171-185.

Long C. N. y Shi Y. (2008). An automated quality assessment and control algorithm for surface radiation measurements. *The Open Atmospheric Science Journal* 2, 23-37.

Roesch A., Wild M., Ohmura A., Dutton E. G., Long C. N., Zhang T. (2011). Assessment of BSRN radiation records for the computation of monthly means. *Atmos. Meas. Tech.* 4, 339-354.

Salazar G., Checura Diaz M., Denegri M., Tiba C. (2015) Identification of potential areas to achieve stable energy production using the SWERA database: A case study of northern Chile. *Renewable Energy* 77, 208-216.

Sengupta M., Habte A., Gueymard C., Wilbert S., Renne D., Stoffel T. (2017) Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications: Second Edition. NREL/TP-5D00-68886, National Renewable Energy Lab.

## **QUALITY CONTROL OF GLOBAL IRRADIANCE MEASURED AT HIGH-ALTITUDE SITES IN ARGENTINA FOR THE VALIDATION OF MODELED SOLAR RESOURCE ESTIMATES.**

### **ABSTRACT**

The western part of the Argentine province of Salta covers one of the regions with the greatest availability of solar resource worldwide, thanks in part to its generally high elevation and low cloudiness. Many large-scale solar energy projects are being developed in that region, even though solar irradiance is not systematically measured at all sites of interest. In this work, the quality of 1-min global horizontal irradiance (GHI) data measured over 3–4 years at two high-altitude sites in the province of Salta is analyzed. Robust quality-control filtering techniques are applied to the raw data, with further corrections to compensate for the thermal offset of pyranometers. An advanced method is also followed to obtain meaningful hourly, daily, and monthly means despite the presence of data gaps. The valid observational dataset is then used to validate various modeled databases at various temporal scales. The present results are expected to lower the uncertainty of solar resource estimates over the region, and thus improve the bankability of solar projects.

**Keywords:** GHI, quality control, Argentina.

## **ESTUDO COMPARATIVO DE MODELOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO DIFUSA NO SERTÃO DA PARAÍBA, REGIÃO NORDESTE DO BRASIL**

**Diego Rodrigues<sup>1,2</sup>, Leonardo Petribú<sup>1,2</sup>, Janis Galdino<sup>1,2</sup>, Olga de C. Vilela<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (DEN-UFPE).  
Av. Prof. Luiz Freire, s/n, Recife-PE, Brasil.

<sup>2</sup>Centro de Energias Renováveis da Universidade Federal de Pernambuco (CER-UFPE).  
Av. da Arquitetura s/n, Recife-PE, Brasil.

*Recibido 14/08/19, aceptado 22/10/19*

**RESUMO:** Modelos de separação da irradiância global horizontal em irradiância difusa horizontal são importantes para o cálculo de energia produzida por sistemas de geração solar. Neste estudo, sete modelos de separação foram aplicados ao sertão da Paraíba, na Região Nordeste do Brasil. Os modelos foram divididos em modelos de um parâmetro e multiparâmetros, gerando-se para cada um a dispersão da razão difusa ( $k_d$ ) em função do índice de claridade ( $k_t$ ). O desempenho dos modelos foi avaliado por meio de análise gráfica, utilizando o diagrama de Taylor, e estatísticos como o *skill score*, raiz do erro quadrático médio, erro médio absoluto e razão entre os desvios padrão. O modelo multiparâmetro de Skartveit apresentou os melhores resultados.

**Palavras-chave:** irradiância difusa horizontal, índice de claridade, razão difusa, multiparâmetros e diagrama de Taylor.

### **INTRODUÇÃO**

A irradiância global horizontal ( $I_g$ ) e a temperatura das células são os parâmetros mais importantes para simulação da potência elétrica de saída de um módulo fotovoltaico nos projetos de geração centralizada. Todavia, para calcular a quantidade de irradiância incidente no plano inclinado, é necessário decompor a irradiância global horizontal em suas frações de irradiância direta normal ( $I_{bn}$ ) e difusa horizontal ( $I_d$ ). A modelagem da irradiância difusa – muitas vezes ausente de medições terrestres – é o grande desafio nesse cálculo, haja vista o seu comportamento estocástico.

Um dos trabalhos pioneiros na modelagem da radiação difusa foi o de Liu e Jordan (1960). Os autores propuseram uma relação para a razão difusa,  $k_d$  ( $I_d/I_g$ ), em função do índice de claridade,  $k_t$  ( $I_g/I_{oh}$ ) – aqui,  $I_{oh}$  faz menção à irradiância extraterrestre no plano horizontal. Essa modelagem da razão difusa em função de um parâmetro (índice de claridade), resultou no desenvolvimento de diferentes modelos propostos por outros autores que utilizam  $k_t$  como único parâmetro. Dentre os mais citados, Orgill e Hollands (1976), Collares-Pereira e Rabl (1979) e Erbs et al. (1982). Os modelos de um único parâmetro são também os mais utilizados comercialmente em *softwares* usuais para dimensionamento e simulação de usinas de geração fotovoltaica centralizada.

A dispersão de  $k_d$  em função de  $k_t$  gera uma nuvem de pontos que apresenta uma alta variabilidade para pequenos intervalos do índice de claridade. Uma limitação dos modelos de um parâmetro é a dificuldade em reproduzir o alto desvio padrão associado à medição da radiação difusa nesses pequenos intervalos de  $k_t$ . Uma forma de modelar essa nuvem de pontos é mediante o acréscimo de mais parâmetros na entrada dos modelos de estimativa da difusa. Autores como Skartveit e Olseth (1987) sugerem que um dos parâmetros importantes na análise é a elevação solar ( $\alpha$ ). Reindl et al. (1990) agrega, além da elevação solar, a temperatura ambiente e umidade relativa do ar. Ridley et al. (2010) sugere a elevação solar, a hora solar aparente, o índice de claridade diário e um parâmetro de persistência do índice de claridade.

O presente estudo analisa modelos de um parâmetro e multiparâmetros para separação da irradiância global horizontal em sua componente difusa. O estudo analisa os modelos aplicados a três localidades no semiárido do estado da Paraíba, Região Nordeste do Brasil, e utiliza o diagrama de Taylor (Taylor, 2001) para escolha do melhor modelo para a região. O Nordeste brasileiro apresenta a média mais elevada de radiação solar do país e concentra uma alta quantidade de projetos de geração fotovoltaica



centralizada, sendo responsável por aproximadamente 70% da geração elétrica de origem fotovoltaica no Brasil em 2017 (BEN, 2018). A decomposição da irradiância global é parte essencial do cálculo para estimativa de produção de energia de centrais fotovoltaicas. Portanto, é bastante relevante a aplicação do presente estudo para a região.

### BASE DE DADOS UTILIZADAS E PROCEDIMENTO DE QUALIDADE

Os dados utilizados compreendem medições de irradiância global horizontal ( $I_g$ ), irradiância difusa horizontal (com esferas de sombreamento) ( $I_d$ ), irradiância direta normal ( $I_{bn}$ ), velocidade do vento, direção do vento, temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica. Foram utilizados piranômetros classe 1 modelo CMP6 da Kipp&Zonen para medição de  $I_g$  e  $I_d$  (com esferas de sombreamento) e um pireliômetro classe 1 modelo CHP1 da Kipp&Zonen para medição de  $I_{bn}$ . O rastreador solar utilizado foi o Solys2 da Kipp&Zonen. As estações solarimétricas foram instaladas nos municípios de São João do Rio do Peixe, Coremas e Patos, próximos entre si, todos no estado da Paraíba. A estação foi instalada conforme requisitos da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), com sensores solarimétricos classe 1 e em local livre de obstáculos que possam causar sombreamento, apresentando, portanto, boas práticas de medições. A disponibilidade de dados é de setembro de 2012 a dezembro de 2018, sendo a medição realizada a cada segundo e armazenada no *datalogger* em médias integralizadas de minuto em minuto. Os dados foram integralizados em médias horárias de forma a serem utilizados nos modelos de estimativa da irradiância difusa, já que esses modelos foram elaborados considerando uma base horária.

A natureza estatística dos modelos aqui utilizados faz com que seus resultados sejam altamente dependentes da qualidade dos dados observacionais. A fim de eliminar os erros e incertezas na entrada dos modelos, os dados observacionais foram submetidos a um procedimento de garantia de qualidade, tal como em Petribú et al. (2017). O procedimento consiste em três blocos de testes: i) testes globais, que avaliam a série temporal como um todo, além de identificar inconformidades na data e hora de registro de medições; ii) testes físicos, que avaliam a coerência física das medições realizadas e iii) testes comparativos, que avaliam a coerência entre as medições de  $I_g$ ,  $I_{bn}$  e  $I_d$ . Os testes globais visam identificar as inconsistências no registro do instante de medição das variáveis pelo *datalogger*. Primeiramente, verifica-se o ordenamento cronológico dos registros de data e hora, ordenando (juntamente com as medições associadas) aqueles que estejam em posições cronologicamente equivocadas. Em seguida, busca-se por registros de data e hora idênticos ao longo da série temporal, eliminando aqueles que possuem igualdade em registro e diferença nas medições associadas. Caso registros idênticos possuam conjuntos de medições idênticos, mantêm-se um deles, anulando os demais. Por último, buscam-se por lacunas entre registros consecutivos na série temporal, preenchendo-as com *Not a Number (NaN)*. As Tabelas 1 e 2 apresentam um resumo dos testes físicos e comparativos. Os dados anômalos recebem *NaN*; caso um dado seja considerado suspeito em dois testes distintos, o mesmo é considerado anômalo.

Dados fora dos limites para $k_r$ , $k_d$ e $k_n$ ( $k$ ) são anômalos.	$0 < k < 1,1$	
Testes propostos pela <i>Baseline Surface Radiation Network (BSRN)</i> : os dados que desrespeitarem os limites para dados fisicamente impossíveis (i) são considerados anômalos, enquanto aqueles que desrespeitarem os limites para dados extremamente raros (ii) são considerados suspeitos. $I_{oeff}$ é a irradiância extraterrestre incidente em um plano normal.	i)	$-4 \leq I_g \leq I_{oeff} 1,5 \cos(\theta_Z)^{1,2} + 100$ $-4 \leq I_{bn} \leq I_{oeff}$ $-4 \leq I_d \leq I_{oeff} 0,95 \cos(\theta_Z)^{1,2} + 50$
	ii)	$-2 \leq I_g \leq I_{oeff} 1,2 \cos(\theta_Z)^{1,2} + 50$ $-2 \leq I_{bn} \leq I_{oeff} 0,95 \cos(\theta_Z)^{0,2} + 10$ $-2 \leq I_d \leq I_{oeff} 0,75 \cos(\theta_Z)^{1,2} + 30$
Modelo de céu claro ( <i>cc</i> ) de Rigollier et al. (2000): dados que desrespeitarem os limites são considerados dados anômalos. Foi utilizado um índice de turbidez de Link de 2,5, conforme Ruiz-Arias et al. (2010).	$I_g \leq I_{g,cc} + 1,1 I_{g,cc}$	
	$I_{bn} \leq I_{bn,cc} + 1,1 I_{bn,cc}$	
	$I_d \geq I_{d,cc} - 0,2 I_{d,cc}$	

Tabela 1: Teste físicos.

<p><i>Tracker off</i>: caso as quatro condições sejam satisfeitas no mesmo instante de tempo, o dado é considerado anômalo.</p>	$\frac{I_d > 50 \text{ W/m}^2 \text{ e } \theta_z < 75^\circ \text{ e } I_d + I_{bn} \cos(\theta_z)}{I_{g,cc}} > 0,85 \text{ e } \frac{I_d}{I_g} > 0,85$
<p>Coerência: os dados são considerados suspeitos para cada condição especificada.</p>	<p>i) <math>\left  \frac{I_d + I_{bn} \cdot \cos(\theta_z) - I_g}{I_g} \right  \leq 0,15 \text{ se } 75^\circ &lt; \theta_z &lt; 93^\circ \text{ e } I_d + I_{bn} \cos(\theta_z) &gt; 50 \text{ W/m}^2</math></p> <p>ii) <math>\left  \frac{I_d + I_{bn} \cdot \cos(\theta_z) - I_g}{I_g} \right  \leq 0,08 \text{ se } \theta_z &lt; 75^\circ \text{ e } I_d + I_{bn} \cos(\theta_z) &gt; 50 \text{ W/m}^2</math></p> <p>iii) <math>k_d &lt; 1,05 \text{ para } \theta_z &lt; 75^\circ \text{ e } I_g &gt; 50 \text{ W/m}^2</math></p> <p>iv) <math>k_d &lt; 1,1 \text{ para } 75^\circ &lt; \theta_z &lt; 93^\circ \text{ e } I_g &gt; 50 \text{ W/m}^2</math></p> <p>v) <math>k_d \geq 0,9 \text{ para } k_t &lt; 0,2</math></p> <p>vi) <math>k_d \leq 0,8 \text{ para } k_t &gt; 0,6</math></p>
<p>Envelope</p>	<p>-</p>

Tabela 2: Testes comparativos.

O teste envelope destaca uma tendência na dispersão  $k_d \times k_t$ , buscando para tal, traçar curvas envelopes para os limites superiores e inferiores da dispersão. Conforme proposto em Younes et al. (2005), o eixo do índice de claridade foi dividido em 10 intervalos, cada intervalo comportando um subconjunto da dispersão. Para cada intervalo, são calculados a média ( $\bar{k}_d$ ) e o desvio padrão ( $\sigma_{k_d}$ ) da razão difusa e são definidas barras superiores e inferiores, através dos valores de, respectivamente,  $\bar{k}_d + 2\sigma_{k_d}$  e  $\bar{k}_d - 2\sigma_{k_d}$ . Para traçar a curva envelope, aplicou-se médias móveis ao conjunto de dados formados pelas barras superiores e inferiores. A média móvel suaviza os pontos que delineam os limites superiores e inferiores. Ajusta-se, então, um polinômio de grau 8, utilizando o método dos mínimos quadrados, aos pontos resultantes da média móvel.

## METODOLOGIA

Foram selecionados três modelos de um parâmetro, o de Orgill e Hollands (1976), um dos pioneiros na modelagem do índice de claridade em diferentes intervalos, o de Erbs et al. (1982), por ser largamente utilizado em *softwares* desenvolvidos para simulações de energia solar fotovoltaica, e o de Chandrasekaran e Kumar (1994), por ter feito uma modelagem baseada em dados tropicais; e quatro multiparâmetros bastante citados na literatura, o de Reindl et al. (1990), Perez et al. (1992), Skartveit et al. (1998) e Ridley et al. (2010). Os modelos foram utilizados, em geral, na sua formulação original.

Para a estimativa da irradiância difusa, Orgill e Hollands (1976), Erbs et al. (1982) e Chandrasekaran e Kumar (1994) propõem modelos baseados em equações da razão difusa ( $k_d$ ) em função de um único parâmetro, o índice de claridade ( $k_t$ ), para diferentes intervalos de  $k_t$ . No primeiro modelo (Orgill e Hollands, 1976), foram utilizados dados de um aeroporto em Toronto, Canadá, de setembro de 1967 a agosto de 1971. A partir do agrupamento do índice de claridade em intervalos de 0,05, foi aplicada a média aos correspondentes valores da razão difusa ( $I_g/I_d$ ). Já o segundo modelo (Erbs et al., 1982) teve como base medições locais de quatro cidades dos Estados Unidos (Livermore, Raleigh, Fort Hood e Maynard), fazendo o uso de médias horárias, diárias e mensais da irradiância global horizontal. Por fim, o terceiro modelo (Chandrasekaran e Kumar, 1994) utiliza medições realizadas em Madra, na Índia (clima tropical), de 1983 a 1987, para obter as equações de  $k_d$  em função de  $k_t$ .

No modelo de Reindl et al. (1990), foram empregados dados dos Estados Unidos (Albany, Nova Iorque e Cape Canaveral, Flórida) e Europa (Copenhague, Hamburg, Valentia e Oslo). Com os dados, os autores analisaram regressões com até 28 potenciais variáveis regressoras de forma a analisar os melhores parâmetros para estimativa da razão difusa nos locais em questão. Os quatro melhores parâmetros para representar os desvios na razão horária difusa foram: o índice de claridade, a elevação solar ( $\alpha$ ), a temperatura ambiente ( $T$ , em °C) e a umidade relativa do ar ( $\phi$ , em percentual).

Maxwell (1987) modela a irradiância direta normal ( $I_{bn}$ ) utilizando equações baseadas em princípios físicos. Para a entrada do modelo, utiliza-se  $k_t$ , a massa de ar ( $AM$ ) e um limite ( $k_{nc}$ ) calculado a partir do modelo de céu claro de Bird e Hulstrom (1981) para a transmitância da irradiância direta normal,  $k_n$  ( $I_{bn}/I_{oeff}$ ) – aqui,  $I_{oeff}$  faz menção à irradiância extraterrestre incidente em um plano normal a radiação para a hora considerada. Perez et al. (1992) propuseram uma correção ao modelo de Maxwell (1987) para considerar os seguintes parâmetros que dependem de condições de insolação: o ângulo zenital ( $\theta_z$ ), um índice de claridade dependente da massa de ar ( $Kt'$ ), um índice de estabilidade ( $\Delta Kt'$ ) e a água precipitável ( $W$ ). Essa correção é feita utilizando-se um coeficiente  $X(Kt', \theta_z, W, \Delta Kt')$ , aplicado na saída do modelo de Maxwell, conforme Equação 1; o coeficiente  $X$  é obtido diretamente a partir da busca em uma matriz  $6 \times 6 \times 5 \times 7$  baseada em intervalos definidos dos parâmetros de  $X$ . As Equações de 2 a 4 apresentam as expressões para  $Kt'$  e  $\Delta Kt'$ ; os subscritos  $i+1$  e  $i-1$  da Equação 3 referem-se ao instante posterior e anterior ao índice  $i$ . Caso  $Kt'_{i+1}$  ou  $Kt'_{i-1}$  seja ausente, utiliza-se a Equação 4. Devido a não convergência do modelo de Perez et al. (1992) para valores de ângulo zenital ( $\theta_z$ ) maiores que  $85^\circ$  (valores de baixo  $k_t$ ), utilizou-se o modelo de Reindl et al. (1990) no intervalo para  $k_t < 0,3$ . Para obter a irradiância difusa, utilizou-se a relação entre as irradiâncias, conforme Equação 5 abaixo.

$$I_{bn,Perez} = I_{bn,Maxwell} X(Kt', \theta_z, W, \Delta Kt') \quad (1)$$

$$Kt' = \frac{k_t}{1,031 \exp(-1,4/(0,9 + 9,4/AM)) + 0,1} \quad (2)$$

$$\Delta Kt' = 0,5(|Kt' - Kt'_{i+1}|) + (|Kt' - Kt'_{i-1}|) \quad (3)$$

$$\Delta Kt' = |Kt' - Kt'_{i\pm 1}| \quad (4)$$

$$I_d = I_g - I_{bn} \cos \theta_z \quad (5)$$

Skartveit et al. (1998) propuseram um modelo não linear composto por extensas equações para cada um dos intervalos do índice de claridade. O modelo é baseado em três principais parâmetros: a elevação solar ( $\alpha$ , em graus), o índice de claridade ( $k_t$ ) e o índice de variabilidade horária ( $\sigma_3$ ). Os autores sugerem o parâmetro  $\sigma_3$  para indicar a presença de nuvens não homogêneas (variáveis). Esse parâmetro depende do índice de céu claro  $\rho$  (calculado a partir de  $k_t$ , conforme Equação 6), e é definido nas Equações 7 e 8, esta última utilizada nos horários de nascer e pôr-do-sol.

$$\rho = \frac{k_t}{0,83 - 0,56e^{(-0,06\alpha)}} \quad (6)$$

$$\sigma_3 = \{[(\rho - \rho_{t-1})^2 + (\rho - \rho_{t+1})^2]/2\}^{0,5} \quad (7)$$

$$\sigma_3 = |\rho - \rho_{t\pm 1}| \quad (8)$$

Na prática, como  $\sigma_3$  é calculado a partir de três valores consecutivos da série de índice de céu claro, conforme mostra a Equação 7, para cada lacuna existente nessa série, três são geradas na série de  $\sigma_3$ . Para contornar esse problema, os autores sugerem as expressões para  $\sigma_3$ , mostradas nas Equações 9 e 10, utilizadas no caso em que o parâmetro  $\sigma_3$  retorna uma lacuna.

$$\sigma_3 = 0,021 + 0,397\rho - 0,231\rho^2 - 0,13e^{\left\{-\left[\frac{(\rho-0,931)}{0,134}\right]^2\right\}^{0,834}} \quad \text{para } \rho \leq 1,04 \quad (9)$$

$$\sigma_3 = 0,12 + 0,65(\rho - 1,04) \quad \text{para } \rho \geq 1,04 \quad (10)$$

De acordo com o índice de variabilidade  $\sigma_3$ , os autores subdividem a série temporal em um período de “horas invariáveis” para o qual  $\sigma_3 \approx 0$  e “horas variáveis” para o qual  $\sigma_3 > 0$ . Para o primeiro período, são propostas equações que dependem do índice de claridade e da elevação solar. Já para o segundo período,  $\sigma_3$  indica que deve ser adicionado um termo  $\Delta$  – que depende de  $k_t$ ,  $\alpha$  e  $\sigma_3$  – às equações propostas para “horas invariáveis”, a fim de considerar os efeitos de nuvens não homogêneas. O valor de  $\sigma_3$  considerado próximo de zero foi 0,001.

Ridley et al. (2010) verificaram que os modelos propostos até então não se adequavam a regiões como a Austrália, pois foram obtidos por meio de dados dos Estados Unidos e Europa. Eles propuseram, então, um modelo não linear e multiparâmetros que, segundo os autores, pode ser usado nos

hemisférios norte e sul. O modelo engloba o índice de claridade horário ( $k_t$ ), índice de claridade diário ( $K_t$ ), a elevação solar ( $\alpha$ , em radianos), a hora solar aparente ( $HS$ ) e uma medida da persistência ( $\psi$ ) de  $k_t$  como parâmetros. O horário solar aparente deriva diretamente do cálculo do ângulo horário, sendo a hora solar aparente utilizada na unidade de horas nesse modelo. A persistência ( $\psi$ ) citada leva em conta as médias dos índices de claridade anterior e posterior a dado intervalo  $t$ , conforme mostra a Equação 11.

$$\psi = \begin{cases} \frac{k_{t-1} + k_{t+1}}{2} & \text{pôr - do - sol} < t < \text{nascido - do - sol} \\ k_{t+1} & t = \text{pôr - do - sol} \\ k_{t-1} & t = \text{nascido - do - sol} \end{cases} \quad (11)$$

De maneira similar ao cálculo de  $\sigma_3$  no trabalho de Skartveit et al. (1998), o cálculo do parâmetro da persistência ( $\psi$ ) pode resultar em mais lacunas do que as presentes na série de  $k_t$ , devido a média feita para os índices anterior e posterior. Para contornar esse problema, propõe-se uma pequena alteração na função persistência: se os dois índices (anterior e posterior a um intervalo  $t$ ) são ausentes ( $NaN$ ), a persistência recebe  $NaN$ ; contudo, se somente um dos índices anterior ou posterior for ausente, e o índice do intervalo  $t$  for um valor válido, é realizada a média entre o índice do intervalo  $t$  e o índice não ausente.

A Tabela 3 mostra as Equações propostas por cada modelo, com exceção do modelo de Skartveit et al. (1998) e Maxwell (1987), que, devido às extensas equações propostas, decidiu-se omiti-las do presente trabalho, podendo ser consultadas nos artigos citados.

Modelos	Equações
Orgill e Hollands (1976)	$k_d = 1,0 - 0,249k_t$ para $k_t < 0,35$ $k_d = 1,557 - 1,84k_t$ para $0,35 \leq k_t \leq 0,75$ $k_d = 0,177$ para $k_t > 0,75$
Chandrasekaran e Kumar (1994)	$k_d = 1,0086 - 0,178k_t$ para $k_t \leq 0,24$ $k_d = 0,9686 + 0,1325k_t + 1,4183k_t^2 - 10,1860k_t^3 + 8,3733k_t^4$ para $0,24 < k_t \leq 0,8$ $k_d = 0,197$ para $k_t > 0,8$
Erbs et al. (1982)	$k_d = 1,0 - 0,09k_t$ para $k_t \leq 0,22$ $k_d = 0,9511 - 0,1604k_t + 4,388k_t^2 - 16,638k_t^3 + 12,336k_t^4$ para $0,22 < k_t \leq 0,8$ $k_d = 0,165$ para $k_t \geq 0,8$
Perez et al. (1992), baseado no modelo de Maxwell (1987).	$W = \exp(0,07T_{dp} - 0,075)$ $T_{dp} = \frac{B_1 \left[ \ln\left(\frac{\phi}{100}\right) + \frac{A_1 T}{B_1 + T} \right]}{A_1 - \ln\left(\frac{\phi}{100}\right) - \frac{A_1 T}{B_1 + T}}$ <p style="text-align: right;"><math>A_1 = 17,625</math> e <math>B_1 = 243,04</math> °C  <math>T</math> é a temperatura ambiente em °C  e <math>\phi</math>, a umidade relativa do ar, em %</p>
Reindl et al. (1990)	$k_d = 1,000 - 0,232k_t + 0,0239\sin(\alpha) - 0,000682T_a + 0,0195\phi$ para $0 \leq k_t \leq 0,3$ e $k_d \leq 1,0$ $k_d = 1,329 - 1,716k_t + 0,267\sin(\alpha) - 0,00357T_a + 0,106\phi$ para $0,3 < k_t < 0,78$ e $k_d \leq 0,97$ e $k_d \geq 0,1$ $k_d = 0,426 - 0,256k_t + 0,267\sin(\alpha) - 0,00349T_a + 0,07344\phi$ para $0,78 \leq k_t$ e $k_d \leq 0,1$
Ridley et al. (2010)	$k_d = \frac{1}{1 + \exp(-5,38 + 6,63k_t + 0,06HS - 0,007\alpha + 1,75K_t + 1,31\psi)}$

Tabela 3: Equações propostas pelos diferentes modelos.

Para comparar os modelos, foi utilizado o diagrama de Taylor (Taylor, 2001), pois ele é uma ferramenta útil para análise estatística gráfica. Os estatísticos associados ao diagrama são o desvio padrão, a correlação e o *skill score* (SS4). No diagrama mostrado na Figura 3, o desvio padrão é

representado pela distância radial, partindo-se da origem, enquanto que a correlação é vista na posição azimutal. O *skill score* é representado pelas linhas tracejadas em vermelho, partindo-se do ponto da observação; ele indica o desempenho geral do modelo, já que leva em conta tanto a correlação quanto o desvio padrão do modelo, conforme Equação 12, onde  $r$  é o coeficiente de correlação entre o modelo e a observação e  $\sigma_m$ , o desvio do modelo.

$$SS4 = \frac{(1 + r)^4}{4 (\sigma_m + 1/\sigma_m)^2} \quad (12)$$

Utiliza-se, também, a raiz do erro quadrático médio (RMSD) normalizado pela média, o erro médio absoluto (MBE) normalizado pela média e a razão entre os desvios ( $\sigma_m/\sigma_o$ ), onde  $\sigma_o$  é o desvio da observação. A razão entre os desvios está relacionada à amplitude de variação das séries observada e modelada, enquanto que o coeficiente de correlação à estrutura de fase e frequência entre as séries.

## RESULTADOS

Todos os testes realizados no procedimento de garantia de qualidade resultaram nos percentuais apresentados na Tabela 4. Os dados não testados são aqueles com ângulo de elevação menor ou igual a  $7^\circ$ . Dados ausentes estão relacionados àqueles não adquiridos pelo sistema de aquisição de dados, em conjunto com os associados à inconformidades na data de registro. Os resultados dos testes físicos e comparativos são apresentados nos percentuais de dados anômalos para  $I_g$ ,  $I_d$  e  $I_{bn}$ . Os resultados evidenciam que os dados observacionais são de boa qualidade, haja vista que acumulam menos de 10% de lacunas (ausentes + anômalos) para a maioria dos parâmetros – a exceção da difusa para Patos, que retorna um percentual ligeiramente maior que 10%, o que, no entanto, não inviabiliza a utilização de tais dados.

Dados	São João do Rio do Peixe	Coremas	Patos
Não testados	8,33%	8,33%	8,33%
Ausentes	4,63%	3,33%	7,68%
Anômalos $I_g$	1,26%	1,41%	1,61%
Anômalos $I_d$	3,96%	4,95%	4,17%
Anômalos $I_{bn}$	1,92%	1,55%	2,37%

*Tabela 4: Resultados do procedimento de qualidade.*

As dispersões de  $k_d$  em função de  $k_t$  são apresentadas para a estação de São João do Rio do Peixe, separando os modelos de um parâmetro (Figura 1) dos multiparâmetros (Figura 2). As estações de Coremas e Patos apresentaram dispersões similares as de São João do Rio do Peixe. Pode-se observar através das Figuras 1 e 2 que a dispersão dos dados medidos (pontos em cinza) apresenta uma alta concentração de valores elevados de  $k_t$ , com correspondentes frações difusa baixas, indício de uma irradiância direta normal elevada e céu mais claro. Já para baixos valores de  $k_t$ , nota-se frações difusa elevadas, com grande concentração de dados na região  $1 < k_d < 1,1$ . A dispersão apresenta, também, uma forma peculiar na região com  $k_t < 0,4$  e  $k_d < 0,8$ , que corresponde em sua maioria aos dados com ângulos de elevação solar menores que  $7^\circ$  (horários de nascer e pôr-do-sol).

Na Figura 2, os dados observacionais estão representados pelos pontos em cinza, enquanto os modelos de Reindl et al. (1990), Perez et al. (1992), Skartveit et al. (1998) e Ridley et al. (2010), pelos pontos em rosa, laranja, verde e vermelho, respectivamente. Nos modelos multiparâmetros, alguns pontos estimados saíram fora da nuvem de pontos  $k_d \times k_t$  medida. No modelo de Skartveit et al. (1998), é observada uma maior dispersão nos pontos para  $k_t > 0,5$  devido ao termo  $\Delta(k_t, \alpha, \sigma_3)$  de variabilidade adicionado. O deslocamento apresentado no modelo de Reindl et al. (1990) para  $k_t < 0,3$  e  $k_t > 0,8$  é característico das equações propostas pelos autores para os intervalos de  $k_t$ , conforme Tabela 3. Vale salientar que a região com  $k_t > 0,58$  dos dados medidos (pontos em cinza) concentra mais de 50% dos dados observacionais para as três estações.

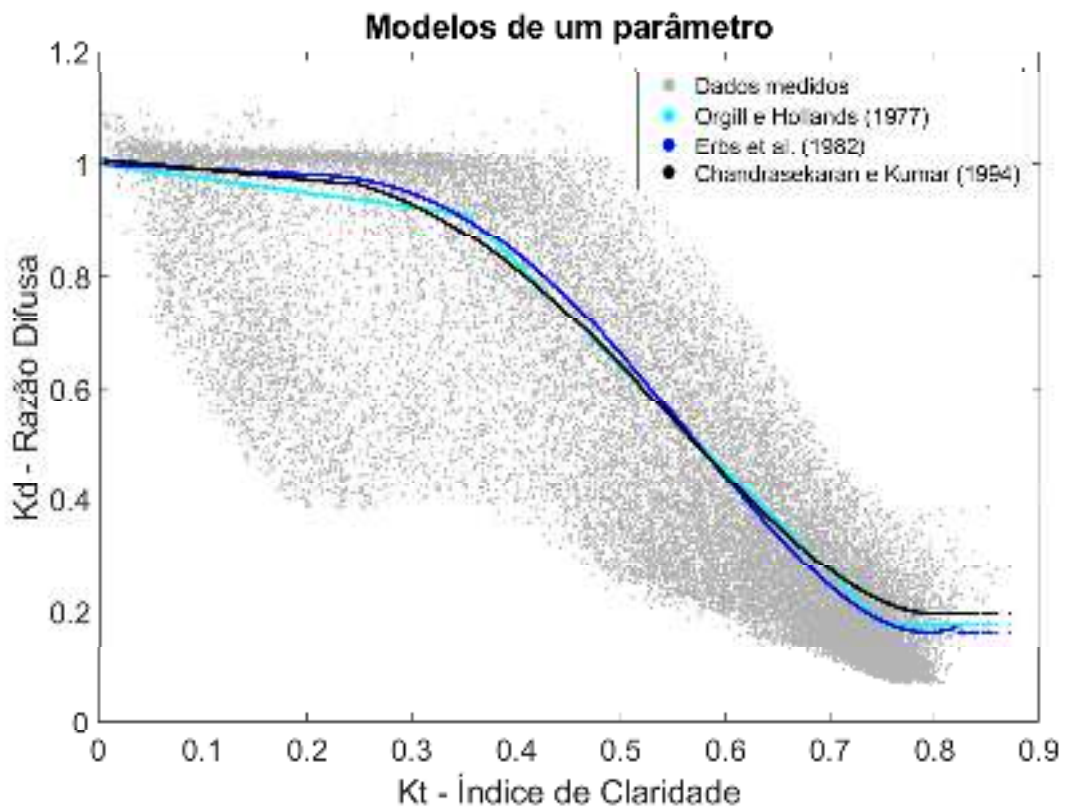


Figura 1: Estimativa da razão difusa pelos modelos de um parâmetro para São João do Rio do Peixe.

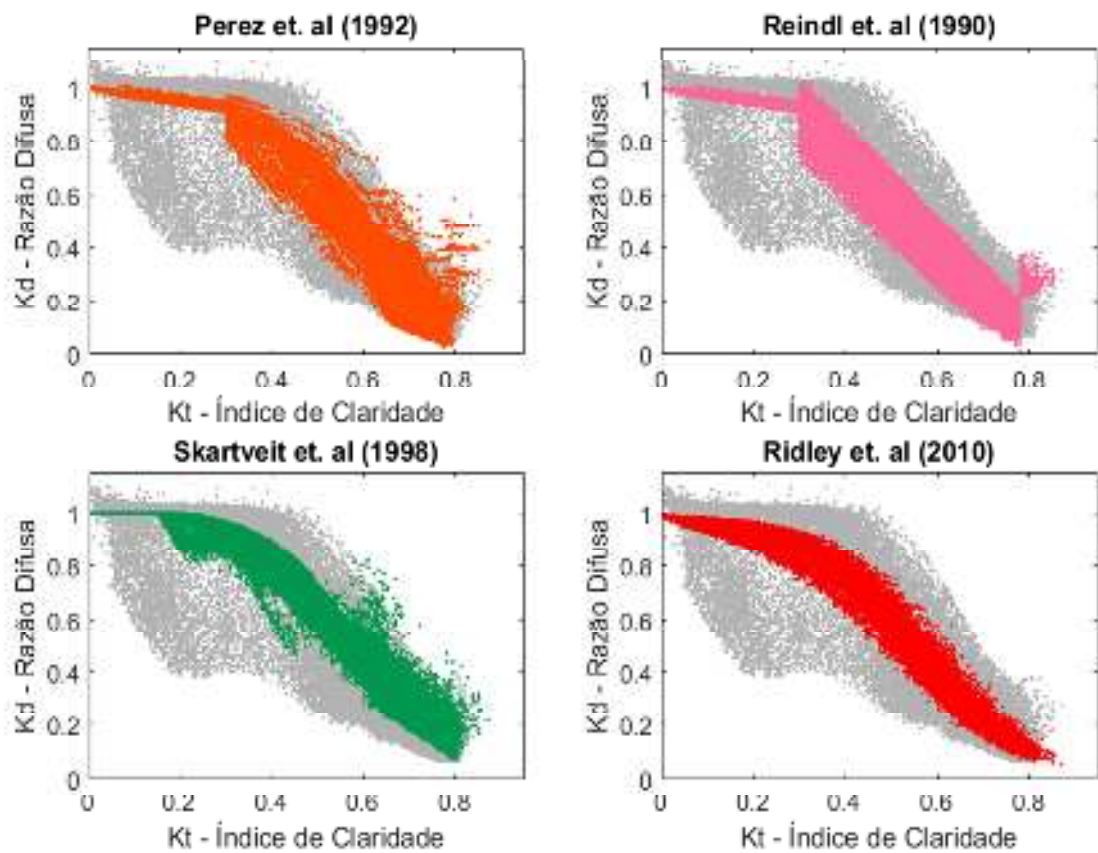


Figura 2: Estimativa da razão difusa pelos modelos multiparâmetros para São João do Rio do Peixe.

As Figuras 3, 4 e 5 apresentam os diagramas de Taylor para as séries de irradiância difusa modeladas e medida das três estações. O ponto em magenta representa a observação e a linha que parte dele representa o desvio padrão da observação. Quanto mais próximo da linha em magenta, melhor os modelos representam o desvio padrão da série de dados observacionais. Quanto mais próximo da observação, em relação a posição azimutal, maior correlação tem o modelo com as medições. As regiões R1, R2 e R3 são indicativos de desempenho dos modelos. A região R1 indica modelos com desvio padrão e correlação razoáveis; R2 representa modelos com correlações razoáveis e desvios distantes do desvio dos dados observacionais; por fim, a região R3 indica os piores modelos, com correlações muito baixas.

Os diagramas das três localidades apresentam resultados semelhantes. Os modelos de um parâmetro apresentaram resultados bastante similares entre si para as três localidades, exibindo um valor alto de correlação, porém desvio padrão distante da amostra. Dentre os modelos multiparâmetros, o de Reindl et al. (1990) tem desempenho inferior aos demais e o modelo de Ridley et al. (2010) exibiu valores de desvio padrão distantes das observações. De forma geral, o modelo de Skartveit et al. (1998) apresentou o melhor desempenho, com a melhor correlação e SS4. Isso se deve a uma boa representação da região com  $k_t > 0,58$  por esse modelo, já que essa região concentra mais da metade dos dados medidos. Para a cidade de Coremas, o modelo de Reindl et al. (1990) reproduziu melhor o desvio padrão da série observada, apesar disso, o modelo de Skartveit et al. (1998) ainda pode ser apontado como o mais representativo (considerando os demais estatísticos).

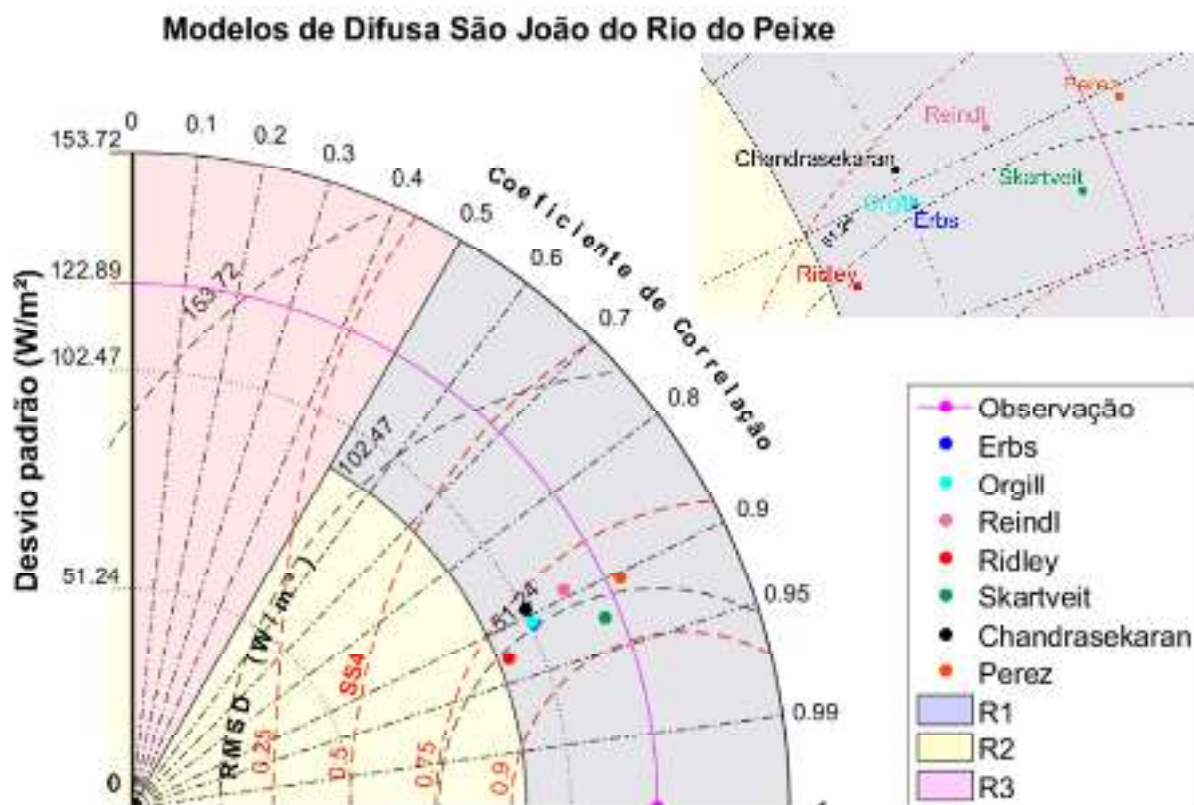


Figura 3: Diagrama de Taylor para São João do Rio do Peixe.



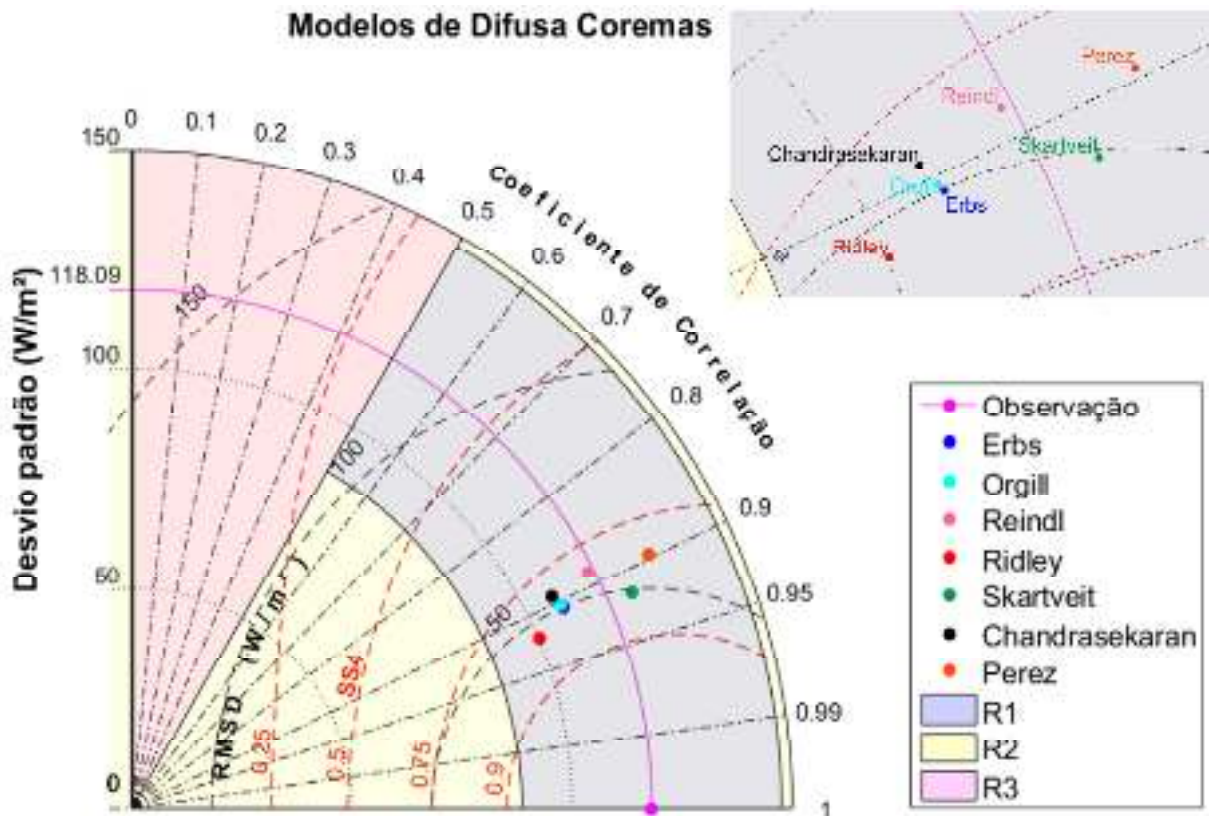


Figura 4: Diagrama de Taylor para Coremas.

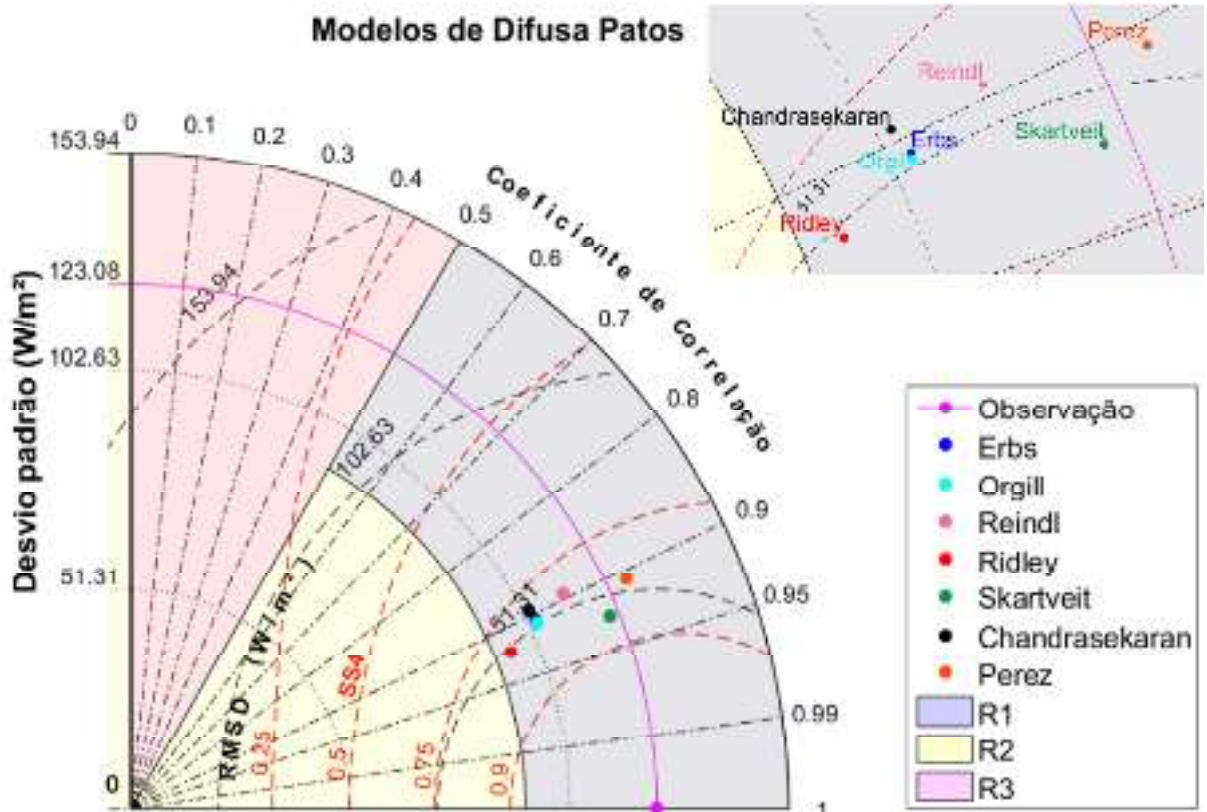


Figura 5: Diagrama de Taylor para Patos.

A Tabela 5, 6 e 7 apresentam os estatísticos analisados: o desvio padrão de todas as séries; a razão entre os desvios ( $\sigma_m/\sigma_o$ ), relacionado à amplitude de variação das séries modeladas em relação à observada; a correlação ( $r$ ), relacionada à estrutura de fase e frequência; o SS4, um índice de desempenho geral do modelo, considerando tanto a correlação quanto o desvio padrão; a raiz do erro quadrático médio (RMSD) normalizado pela média; e, por fim, o erro médio absoluto (MBE), também normalizado pela média. O modelo de Skartveit et al. (1998) apresenta melhores razão entre desvios, *skill score* e correlação (os principais estatísticos) para São João do Rio do Peixe e Patos. Para Coremas, Skartveit et al. (1998) apresenta o melhor *skill score*, mas possui um desvio maior, superestimando a série observada; ainda assim, como possui o melhor SS4, foi considerado o melhor modelo também para Coremas.

<b>São João do Rio do Peixe</b>						
Modelos	Desvio Padrão (W/m <sup>2</sup> )	$\sigma_m/\sigma_o$	$r$	SS4	RMSD (%)	MBE (%)
Observação	122,90	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00
Orgill e Hollands (1976)	103,33	0,84	0,91	0,80	0,36	-0,10
Erbs et al. (1982)	103,22	0,84	0,91	0,80	0,35	-0,07
Reindl et al. (1990)	112,99	0,92	0,89	0,80	0,37	-0,07
Perez et al. (1992)	126,16	1,03	0,90	0,82	0,37	-0,09
Chandrasekaran e Kumar (1994)	103,05	0,84	0,89	0,78	0,39	-0,13
<b>Skartveit et al. (1998)</b>	<b>119,14</b>	<b>0,97</b>	<b>0,93</b>	<b>0,86</b>	<b>0,34</b>	<b>-0,14</b>
Ridley et al. (2010)	94,84	0,77	0,93	0,81	0,34	0,08

Tabela 5: Estatísticos dos modelos para São João do Rio do Peixe.

<b>Coremas</b>						
Modelos	Desvio Padrão (W/m <sup>2</sup> )	$\sigma_m/\sigma_o$	$r$	SS4	RMSD (%)	MBE (%)
Observação	118,09	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00
Orgill e Hollands (1976)	107,78	0,91	0,90	0,81	0,36	-0,14
Erbs et al. (1982)	108,11	0,92	0,91	0,82	0,35	-0,12
Reindl et al. (1990)	116,81	0,99	0,89	0,79	0,38	-0,11
Perez et al. (1992)	130,78	1,11	0,90	0,80	0,41	-0,15
Chandrasekaran e Kumar (1994)	106,97	0,91	0,89	0,79	0,39	-0,17
<b>Skartveit et al. (1998)</b>	<b>123,69</b>	<b>1,05</b>	<b>0,92</b>	<b>0,84</b>	<b>0,38</b>	<b>-0,20</b>
Ridley et al. (2010)	100,23	0,85	0,92	0,83	0,30	0,03

Tabela 6: Estatísticos dos modelos para Coremas.

Patos						
Modelos	Desvio Padrão (W/m <sup>2</sup> )	$\sigma_m/\sigma_o$	R	SS4	RMSD (%)	MBE (%)
Observação	123,08	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00
Orgill e Hollands (1976)	104,59	0,85	0,91	0,81	0,34	-0,07
Erbs et al. (1982)	104,67	0,85	0,91	0,80	0,34	-0,05
Reindl et al. (1990)	113,11	0,92	0,90	0,80	0,35	-0,06
Perez et al. (1992)	127,72	1,04	0,91	0,82	0,36	-0,09
Chandrasekaran e Kumar (1994)	104,00	0,84	0,90	0,78	0,37	-0,11
<b>Skartveit et al. (1998)</b>	<b>120,68</b>	<b>0,98</b>	<b>0,93</b>	<b>0,86</b>	<b>0,32</b>	<b>-0,13</b>
Ridley et al. (2010)	96,26	0,78	0,92	0,81	0,33	0,10

Tabela 7: Estatísticos dos modelos para Patos.

## CONCLUSÕES

Sete modelos para estimativa da irradiância difusa foram analisados para avaliar seu desempenho no sertão da Paraíba, com objetivo de melhorar a acurácia das estimativas de produção de energia de projetos de centrais fotovoltaicas. Skartveit et al. (1998) foi o modelo que melhor descreveu a série de irradiância difusa observada nos três locais analisados. Um dos modelos para estimativa da irradiância difusa mais utilizados nos *softwares* comerciais é o de Erbs et al. (1982), que apresenta uma razão entre desvios média para os três locais de 0,87, mostrando uma diferença considerável na amplitude da série de irradiância modelada em relação a observada. O impacto de modelos que melhor descrevam a razão difusa devem ser levados em consideração nas simulações de empreendimentos fotovoltaicos, sobretudo as de geração centralizada, já que esses modelos estão diretamente ligados ao cálculo da irradiância no plano inclinado e, conseqüentemente, à potência de saída do módulo (Hofmann e Seckmeyer, 2017).

Este trabalho pode servir como uma ferramenta útil nas estimativas de produção de energia de centrais fotovoltaicas, trazendo maior acurácia à simulação quando propõe modelos, dentre os disponíveis na literatura, que melhor descrevam a radiação difusa no sertão da Paraíba. Um estudo do impacto da seleção de diferentes modelos de separação da irradiância difusa (em comparação com a radiação difusa medida) nos modelos de transposição da radiação para o plano inclinado seria um segundo passo para avaliar o real impacto dos modelos de difusa nas simulações de energia de centrais solares fotovoltaicas.

## REFERÊNCIAS

- Bird, R. E. e Hulstrom, R. L. (1981). A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces, TR-642-761, 33 pp., Solar Energy Research Institute, Golden, CO.
- Chandrasekaran, J. e Kumar, S. (1994). Hourly diffuse fraction correlation at a tropical location. *Solar Energy*, 53: 505–10.
- Collares-Pereira, M. e Rabl, A. (1979). The Average Distribution of Solar Radiation-Correlations between Diffuse and Hemispherical and between Daily and Hourly Insolation Values. *Solar Energy*, 22, 155-164.
- EPE [Empresa de Pesquisa Energética] Balanço Energético Nacional (BEN) 2018: Ano base 2017, 2018. Disponível em <<http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>> [consulta: 26 de agosto de 2019]

- Erbs, J.A.; Klein, S.A. e Duffie, J.A. (1982). Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly average global radiation. *Solar Energy*, 18, 293–302.
- Liu, B. e Jordan, R. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy* 1960, 4, 1–19.
- Hofmann, M. e Seckmeyer, G. (2017). A New Model for Estimating the Diffuse Fraction of Solar Irradiance for Photovoltaic System Simulations. *Energies*, MDPI, Open Access Journal, vol. 10(2), pages 1-21.
- Maxwell, E. L. (1987). A Quasi-Physical Model for Converting Hourly Global Horizontal to Direct Normal Insolation, Technical Report No. SERI/TR-215-3087, Golden, CO: Solar Energy Research Institute.
- Orgill, J.F. e Hollands, K.G.T. (1976). Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. *Solar Energy*, 19, 357–359.
- Petribú, L. B.; Sabino, E.; Barros, H.; Costa, A.; Barbosa, E. e Vilela, O.C. (2017). Procedimento objetivo para a garantia de qualidade de dados de radiação solar. Apresentado em XL Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente (ASADES), San Juan, Argentina.
- Perez, R. R.; Ineichen, P.; Maxwell, E. L.; Seals, R. D. e Zelenka, A. (1992). Dynamic global-to-direct irradiance conversion surface. *ASHRAE Transactions* 1992:354–69.
- Reindl, D.T.; Beckman, W.A. e Duffie, J.A. (1990). Diffuse fraction correlations. *Solar Energy*, 45, 1–7.
- Ridley, B.; Boland, J. e Laurent, P. (2010). Modelling of diffuse solar fraction with multiple predictors. *Renew. Energy* 2010, 35, 478–483.
- Rigollier, C.; Bauer, O. e Wald, L. (2000). On the clear sky model of the ESRA - European Solar Radiation Atlas with respect to the Heliosat method. *Solar Energy*, v. 68, n. 1, pp.33-48.
- Ruiz-Arias, J. A.; Alsamamra, H.; Tovar-Pescador, J. e Pozo-Vázquez, D. (2010). Proposal of a regressive model for the hourly diffuse solar radiation under all sky conditions. *Energy Conversion and Management*, v. 51, n. 5, p. 881-893.
- Skartveit, A. e Olseth, J. A. (1987). A model for the diffuse use in daily fraction of hourly global radiation. *Solar Energy* 38, 271–274.
- Skartveit, A.; Olseth, J.A. e Tuft, M.E. (1998). An hourly diffuse fraction model with correction for variability and surface albedo. *Solar Energy*, 63(3):173–83.
- Taylor, K.E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.*, 106, 7183-7192.
- Younes, S.; Claywell, R. e Muneer, T. (2005). Quality control of solar radiation data: Present status and proposed new approaches. *Energy*, v. 30, n. 9, p. 1533-1549, 2005.

## **COMPARATIVE STUDY OF MODELS FOR ESTIMATING DIFFUSE RADIATION IN THE SEMIARID OF PARAÍBA, BRAZILIAN NORTHEAST**

**ABSTRACT:** Separation models for estimating diffuse horizontal irradiance from global horizontal irradiance are important for the simulation of the energy produced by solar generation systems. In this study, seven diffuse models were applied to the semiarid of Paraíba, in the Brazilian northeast. The models were divided into those of one parameter and multi parameter, generating to each one the dispersion of diffuse fraction ( $k_d$ ) in function of the clearness index ( $k_t$ ). The performance of the models were evaluated by means of graphical analysis, using the Taylor diagram, and statistical like the skill score, root mean square error, mean bias error and standard deviation ratio. The multi parameter model of Skartveit presented the best results.

**Keywords:** diffuse horizontal irradiance, clearness index, diffuse fraction, multi parameter and Taylor diagram.

## VARIABILIDAD DE CORTO PLAZO Y VALORES EXTREMOS DE LA IRRADIANCIA SOLAR EN LA PAMPA HÚMEDA ARGENTINA

R. Aristegui<sup>1</sup>, P. Iturbide<sup>1</sup>, V. Stern<sup>1</sup>, Julián Lell<sup>1</sup>, R. Righini<sup>1</sup>  
GERSolar – INEDES (UNLu-CONICET)

Departamento de Ciencias Básicas- Universidad Nacional de Luján Tel. 02323-440241–e-mail: gersolar.unlu@gmail.com

*Recibido 19/08/19, aceptado 23/10/19*

**RESUMEN:** Se analizan los cambios abruptos de los niveles de irradiancia global solar en la zona correspondiente a la Pampa Húmeda argentina. Los datos provienen de una red de medición de 9 estaciones distribuidas en la zona. Se contabilizan los incrementos minutales que superen los 300, 400, 500 y 600 W/m<sup>2</sup>. El análisis se realiza en términos anuales y mensuales, estudiándose la caída de irradiancia porcentual que tales eventos representan. Se encontró que en la mayoría de los casos la caída representa entre el 25% y el 65% de la potencia solar disponible. También se evalúan los valores de irradiancia global que superan la existente a tope de atmósfera. Se sugieren trabajos futuros destinados a evaluar la variabilidad temporal en el desempeño de las plantas fotovoltaicas que operen en dicha zona, un factor que de no ser evaluada convenientemente puede tener consecuencias económicas indeseadas.

**Palabras clave:** radiación solar, variabilidad temporal, valores extremos, corto plazo, plantas fotovoltaicas.

### INTRODUCCIÓN

La generación de energía eléctrica mediante la instalación de plantas de paneles fotovoltaicos ha suscitado en los últimos años la atención del gobierno argentino y de inversionistas privados. Las razones para que esta tecnología resulte atractiva y prometedora en el marco del programa energético argentino no son pocas: se trata de una forma de generación limpia; cuyo costo de implementación disminuye año tras año; contando en nuestro territorio con gran potencial de expansión. Gracias a la superficie disponible para la instalación de nuevas plantas y a las características de irradiancia solar promedio en un amplio porcentaje del territorio la energía solar constituye un aporte sustentable a la diversificación de la matriz energética.

Las leyes 27191 y 27424 sancionadas en los últimos años, muestran la decisión de fomentar en nuestro país la producción centralizada de energía eléctrica y la generación distribuida; mediante la utilización de fuentes renovables. Las previsiones calculan en varios miles los MW instalados para el 2025 en el país, aunque según el informe mensual de junio 2019 de CAMMESA (CAMMESA portal web, 2019) la potencia instalada renovable alcanza actualmente el 4,9% de la total y dentro de ella la fracción solar representa un 0,8%. Por otra parte, el mismo informe indica que el 5,5% de la energía generada fue renovable en dicho período.

Sin embargo, a medida que la penetración de la energía fotovoltaica crece y que más usuarios abastecen sus necesidades a través de redes regionales con aporte de distintas tecnologías, deben considerarse variables que vayan mucho más allá de la potencia total instalada o la irradiancia media en un determinado sitio geográfico. La rentabilidad, mantenimiento y vida útil de las instalaciones son factores preponderantes que también deben ser tenidos en consideración. En tal sentido, la variabilidad temporal del recurso solar dentro de la franja horaria (y aún dentro de la franja minutil) debido al pasaje de nubes, puede tener consecuencias importantes en el rendimiento de los equipos y en la propia disponibilidad de energía que una planta fotovoltaica puede aportar al sistema interconectado, siendo necesaria su estimación para prever los posibles problemas de despacho (Osman et al., 2018).

En efecto, en el campo de la distribución de energía, una de las características más valoradas en los sistemas de generación es su estabilidad; en este sentido, la energía solar presenta dos problemas intrínsecos: el primero y más evidente es la ausencia de generación durante la noche, hecho que obliga a las plantas de generación convencional a modular su producción de forma diaria de acuerdo a la cuota de energía solar fotovoltaica presente en la matriz energética. Por otra parte, y en primer lugar por su importancia, la caída de potencia generada en las plantas fotovoltaicas puede variar en un 50% en un intervalo de 30 y 90 segundos hasta un 70% en un intervalo de 5 a 10 minutos (Lappalainen y Valkealahti, 2016). El pronóstico de tales situaciones es prácticamente imposible dada la propia dinámica de la atmósfera. Sin embargo, ya que este tipo de sucesos locales tiene peso en el rendimiento de las instalaciones fotovoltaicas (Sánchez Reinoso et al., 2012) conocer la frecuencia y las características de los sucesos de ese tipo que ocurren en una determinada zona puede brindar información suficiente como para evaluar su impacto en la energía disponible, arbitrando los medios necesarios para establecer un control adecuado de cargas en las redes públicas (Hoff y Pérez, 2010).

La variabilidad de la potencia disponible debido a pasaje de nubes obliga a las redes de distribución a contar con una porción de la potencia provista por fuentes convencionales. El porcentaje de energía convencional que debe ser previsto, en el caso de una planta fotovoltaica, depende de la estabilidad que se determine a priori para la red a la cual se inyecte energía (Rosés et al., 2017). Valores que van entre el 10% y el 15% de la potencia nominal instalada son, usualmente, empleados como variables asociadas al diseño de una planta fotovoltaica.

En este trabajo se analizan un conjunto de eventos de cambio abrupto en la irradiancia global en plano horizontal debidos a nubosidad, registrados con piranómetros termoeléctricos y fotovoltaicos en las estaciones de la Red Pampeana de la Universidad Nacional de Luján (UNLu) y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Se estudia la incidencia de saltos en la radiación en plano horizontal,

dentro del rango temporal del minuto, que sean superiores a  $300 \text{ W/m}^2$  en la región pampeana de la República Argentina. La información obtenida puede ser tenida en consideración a la hora de planificar la instalación de plantas fotovoltaicas en la región. No se conocen datos en este sentido en la zona de la Pampa Húmeda, a excepción del valor de 1342 saltos en 2017 (en la estación CEILAP de medición, Villa Martelli, Bs. As.) repartidos en el 50% de los días del año. (Wolfram et al., 2018).

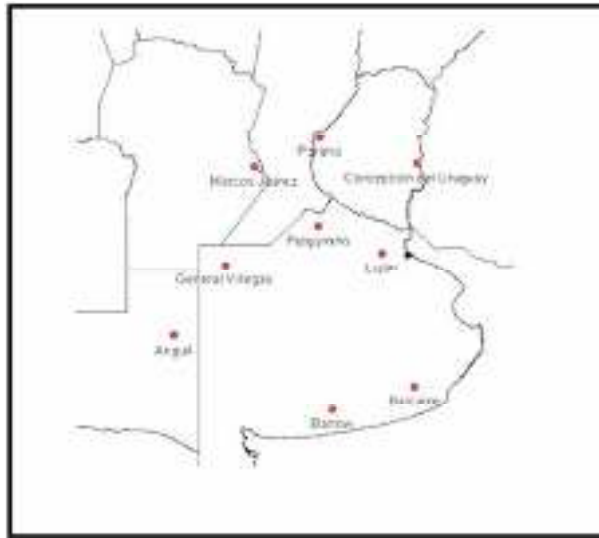
También se estudian los valores pico de irradiancia (promedio minutil) que se producen bajo ciertas condiciones de cobertura nubosa (parches de cúmulos con zonas despejadas) y que son responsables de incrementos por reflexión. Estos eventos han sido estudiados en diversas zonas encontrándose valores mayores a la constante solar (hasta alrededor de un 10%) que podrían tener relevancia en lo que concierne a efectos biológicos dañinos y al deterioro de materiales expuestos a la radiación solar (Piacentini et al., 2003, 2011).

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Se trabajó con datos de medición de irradiación global en plano horizontal tomados durante el año 2017, provenientes de nueve estaciones pertenecientes a la red pampeana que el GERSolar administra juntamente con INTA: Luján, Anguil, Balcarce, Pergamino, Paraná, Marcos Juárez, General Villegas, Concepción del Uruguay y Barrow (Figura1).

Se han utilizado datos empleados con resolución temporal minutil, medidos por piranómetros termoeléctricos y fotovoltaicos instalados en las estaciones mencionadas. Todas las estaciones cuentan con adquirentes de datos de la firma Campbell Scientific y los piranómetros son regularmente calibrados en el Laboratorio de Calibración que el GERSolar opera en el predio de la Universidad Nacional de Luján. (Righini y Aristegui, 2013).

El análisis estadístico de los datos se realizó con la herramienta Enterprise Guide de SAS (Statistical Analysis System).



*Figura 1: Ubicación de los sitios de medición de la Red Solarimétrica regional de la Pampa Húmeda*

Los valores de irradiancia fueron procesados para seleccionar aquellos valores cuya variación dentro del minuto hayan sido mayores a 300, 400, 500 W/m<sup>2</sup>, 600 y 700 W/m<sup>2</sup> en cada una de las estaciones.

En el presente trabajo se denomina “salto” a la diferencia entre el valor de irradiancia en un minuto y su valor en el siguiente, cuando dicha diferencia supera los 300 W/m<sup>2</sup>. Así, un salto de 400 W/m<sup>2</sup> significa que la irradiancia presenta una variación de 400 W/m<sup>2</sup> en ese minuto. La expresión que los define está dada por:

$$\Delta I = I_{m+1} - I_m$$

Donde  $I$  es la irradiancia solar global a nivel de la superficie terrestre en el minuto  $m$ .

Además de contabilizar los saltos de mayor amplitud en las estaciones, se descartó que se debieran a una particular respuesta del tipo de sensor, comparando las mediciones simultáneas de piranómetros termoeléctricos y sensores fotovoltaicos ubicados en las estaciones donde se encuentran disponibles ambos equipos. La correlación entre las mediciones de los mismos permitió verificar la real ocurrencia de los saltos de irradiación en plano horizontal. También se discriminó la cantidad de eventos ocurridos mensualmente, dando una perspectiva estacional en la ocurrencia de los mismos, con vistas a predecir la intermitencia de la energía disponible para el despacho a lo largo del año.

Por otra parte, se define “pico de irradiancia” como el valor de radiación solar global a nivel de la superficie terrestre que supere al correspondiente a tope de atmósfera (constante solar: 1,3672 kW/m<sup>2</sup>) (Gueymard, 2012)

En el presente trabajo se analiza la ocurrencia de valores extremos superiores a 1400 W/m<sup>2</sup> en todas las estaciones de la red durante un año.

## **RESULTADOS**

El análisis estadístico de los registros de dos sensores de diferente tecnología instalados en la misma estación mostró la correlación entre los conjuntos de datos en las estaciones y los meses para los que se tiene redundancia (3 estaciones). Como ejemplo se muestran los valores que establecen la correlación entre los datos medidos por un sensor fotovoltaico (fabricado por el Depto Solar de la Comisión Nacional de Energía Atómica –CNEA-) y un sensor piranométrico CMP11 de la firma Kipp&Zonen ambos instalados en la estación Pergamino (Tabla 1).



Los datos que se analizan a continuación corresponden al año 2017 y contemplan las 9 estaciones de la red solarimétrica. La Tabla 2 da cuenta de la cantidad de saltos de irradiancia ocurridos en cada una de las estaciones durante ese año clasificados según el valor del salto. Los saltos mostrados son aquellos en los que la energía se incrementa. Se verificó que la cantidad de saltos crecientes es equivalente a la de saltos decrecientes, contabilizándolos a lo largo de diferentes escalas temporales en distintas estaciones pertenecientes a la red. Este hecho se puede visualizar en la Figura 2 donde se muestran los saltos, crecientes y decrecientes.

	N	Media (W/m <sup>2</sup> )	Desvío estándar (W/m <sup>2</sup> )	Mínimo (W/m <sup>2</sup> )	Máximo (W/m <sup>2</sup> )
<b>Sensor fotovoltaico</b>	262080	229.80383	326.94134	0	1536
<b>Sensor piranométrico</b>	262080	226.86587	325.63282	0	1518
<b>Coefficiente de correlación de Pearson (N=262080)</b>		<b>0.99942</b>			

Tabla 1: Análisis de correlación entre los sensores piranométrico y fotovoltaico, estación Pergamino. Se consideran seis meses de medición (2018-2019).

Estación	Cantidad de saltos					Total ( $\Delta I > 300$ W/m <sup>2</sup> )	Valor salto
	300 < $\Delta I$ < 400 W/m <sup>2</sup>	400 < $\Delta I$ < 500 W/m <sup>2</sup>	500 < $\Delta I$ < 600 W/m <sup>2</sup>	600 < $\Delta I$ < 700 W/m <sup>2</sup>	$\Delta I > 700$ W/m <sup>2</sup>		Máximo $\Delta I$ (W/m <sup>2</sup> )
<b>M. Juárez</b>	713	387	289	132	74	1595	1001
<b>Luján</b>	701	376	215	112	67	1471	926
<b>Gral. Villegas</b>	559	280	174	66	15	1094	836
<b>Concepción</b>	609	360	190	87	39	1285	889
<b>Balcarce</b>	949	569	312	145	108	2083	967
<b>Pergamino</b>	671	371	216	101	48	1407	912
<b>Barrow</b>	759	401	220	82	75	1539	935
<b>Paraná</b>	709	386	211	100	52	1458	852
<b>Anguil</b>	555	310	137	65	40	1107	918
<b>Promedio</b>	691	382	218	99	57	1449	915
<b>Mín-Max</b>	555-949	280-569	174-314	65-150	15-142	1094-2083	836-1052

Tabla 2: Cantidad de saltos registrados en cada estación durante el año 2017, clasificados según el valor del salto.

La mínima cantidad de saltos se observa en Gral. Villegas, en donde se registraron 1094 saltos en todo el año, mientras que en Balcarce el registro asciende a 2083 saltos de ese tipo. En promedio, se registraron 1491 saltos por estación durante todo el año.

En todas las estaciones se verifica que los saltos pequeños se dan en mayor cantidad que los saltos “grandes”. A modo de muestra se graficó la cantidad de saltos según el valor del salto correspondiente en la estación Paraná; en dicha estación se registraron 709 saltos de entre 300 y 400 W/m<sup>2</sup> y 152 saltos mayores 600 W/m<sup>2</sup> (Figura 3). En todas las estaciones se encontró una distribución similar:

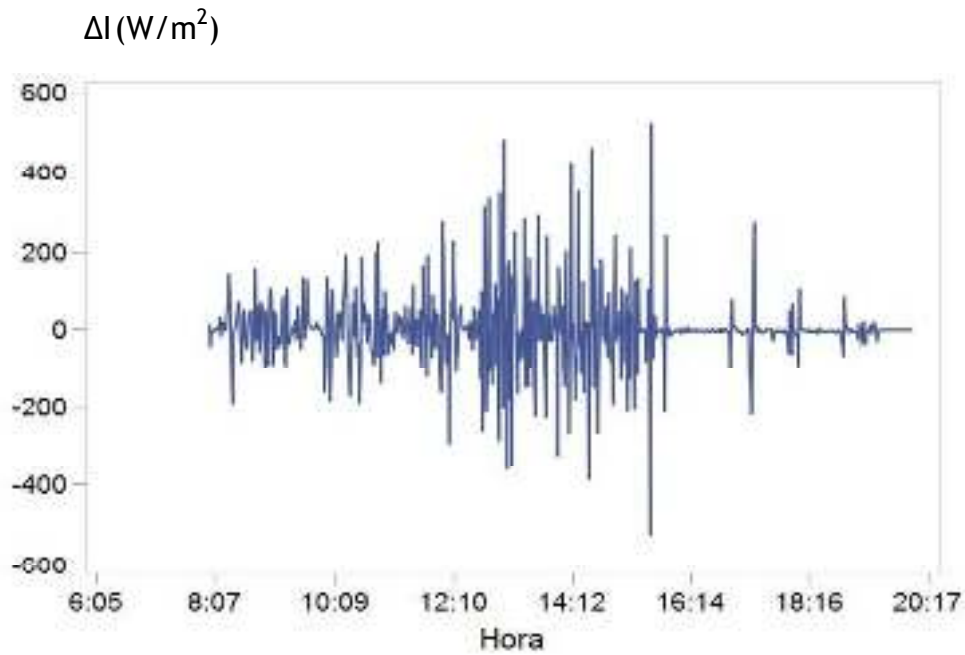


Figura 2: Saltos de irradiancia a lo largo del día 1/1/2018 en la estación Luján

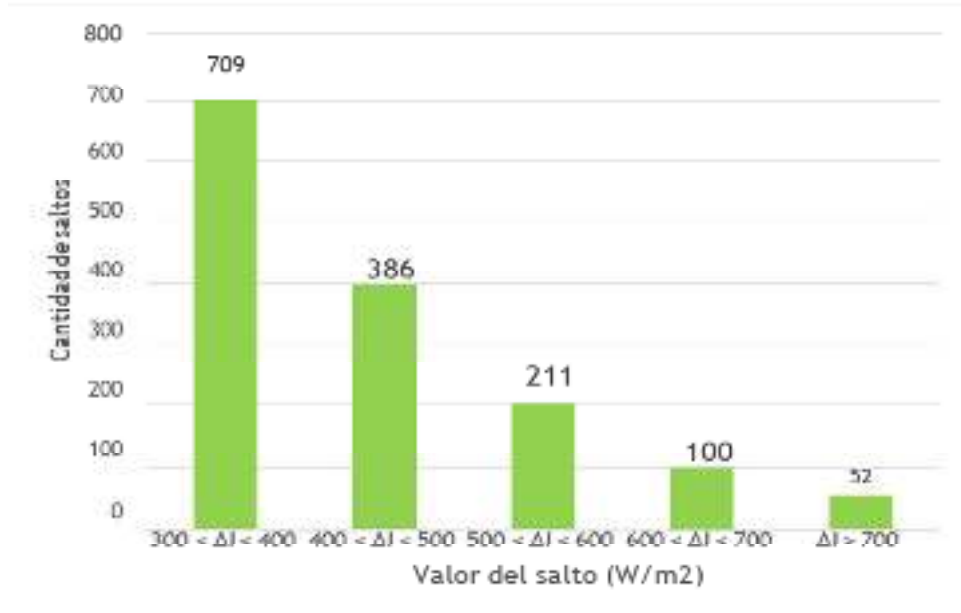


Figura 3: Cantidad de los saltos de irradiancia registrados en la estación Paraná durante el año 2017, clasificados según el valor del salto.

En la Figura 4, a la izquierda, se muestra la irradiancia minuto a minuto a lo largo de un día en particular en la estación Luján. A la derecha se ve una ampliación temporal que abarca 15 minutos. En ambas pueden apreciarse varios saltos y sus valores (algunos superiores a 500 W/m<sup>2</sup>).

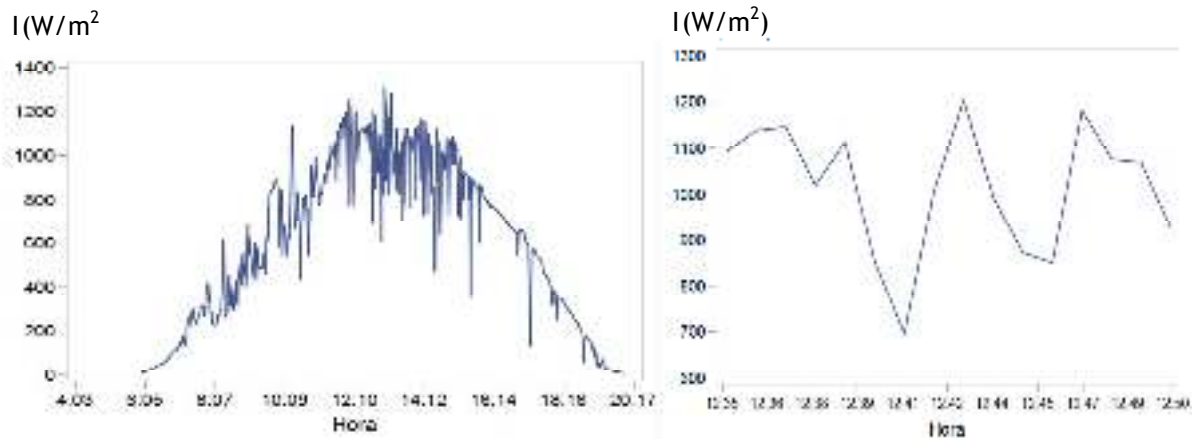


Figura 4: Izquierda: Irradiancia global medida el día 1/1/2018 en la estación Luján. Derecha: Detalle entre las 12:35hs y las 12:50hs.

Se contabilizaron la cantidad total de días con al menos un salto ( $>300 \text{ W/m}^2$ ) y el porcentaje del año que representa para cada estación, lo que se muestra en la Figura 5. En la estación Barrow durante el 32% de los días se registraron saltos, mientras que en General Villegas ocurrieron durante el 19%.

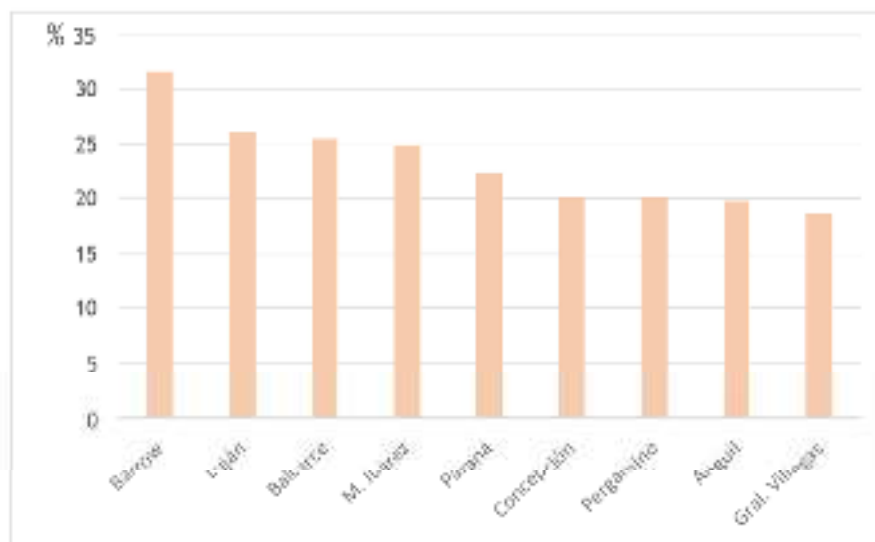


Figura 5: Porcentaje de días del año 2017 en que ocurrió al menos un salto (en la irradiancia global plano horizontal para cada estación)

Por otro lado, se buscó el día con mayor cantidad de saltos para cada estación, encontrándose los valores que se muestran en la Figura 6.

En la Figura 7 se ve la distribución de la cantidad de saltos -de más de  $500 \text{ w/m}^2$ - por día para las estaciones de Balcarce y Anguil.

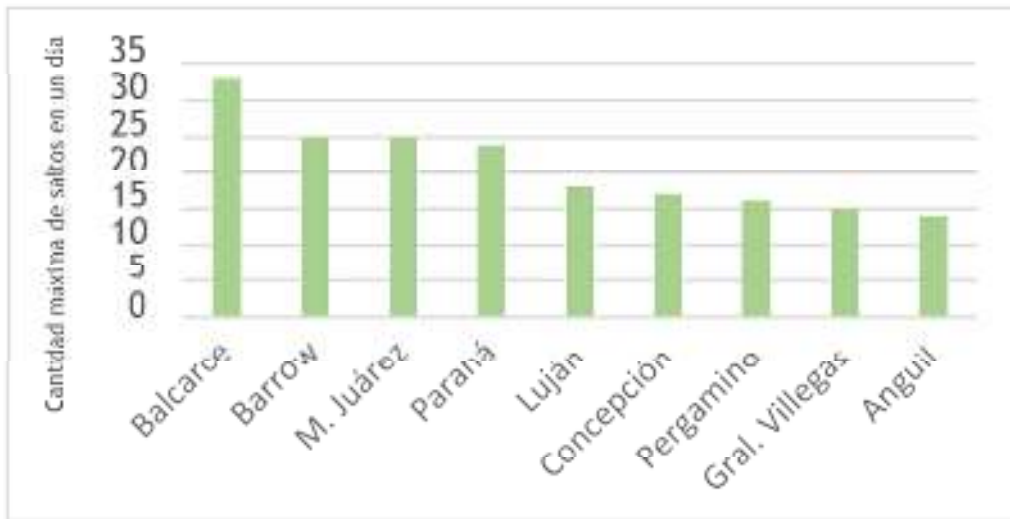


Figura 6: Cantidad máxima de saltos en un mismo día para cada estación

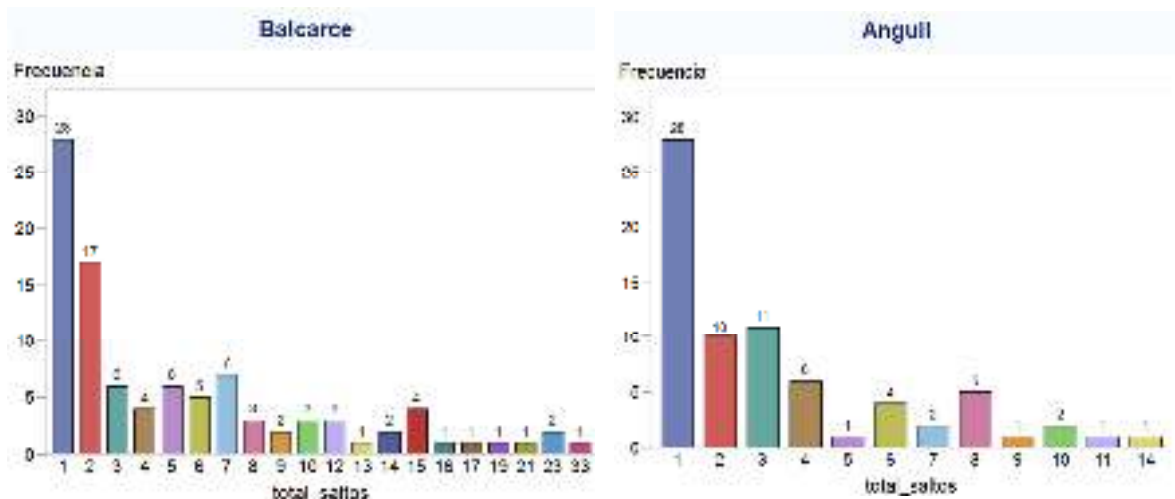


Figura 7: Distribución de la cantidad de saltos por día para las estaciones Balcarce (izquierda) y Anguil (derecha)

En Balcarce se llegaron a detectar 33 saltos en un solo día y hubo 28 días con un solo evento. En Anguil la máxima cantidad de saltos detectados en un mismo día fue de 14 y también se contabilizaron 28 días en los que hubo un solo salto.

En la Figura 8 se muestra la irradiancia promedio minatural durante el día con mayor cantidad de saltos (33) en Balcarce entre las 11 y las 15 hs. Se trató de un día con parches de nubes y zonas despejadas de cielo, durante el cual se midieron saltos de más de  $900 \text{ W/m}^2$ .



Figura 8: Irradiancia minutil ( $W/m^2$ ) entre las 11 y las 15 hs del día 4/12/2017 en la estación Balcarce

### Distribución estacional

Se analizó la ocurrencia de saltos para cada mes para cada estación y en toda la red y se encontró una marcada tendencia estacional, como puede verse en la Figura 9.

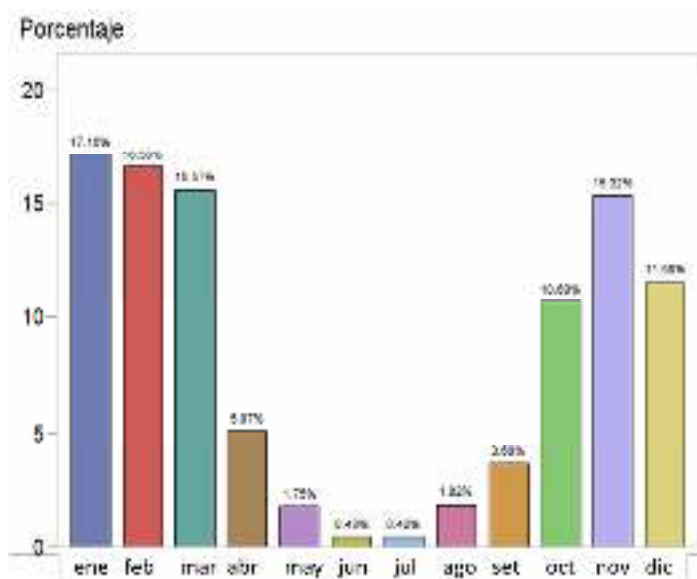


Figura 9: Porcentaje de saltos en función del mes. Se consideraron las 9 estaciones de la red.

Alrededor del 50% de los saltos ocurren durante los meses de enero, febrero y marzo, mientras que en los meses de mayo, junio y julio tiene lugar menos del 3%. En la figura anterior se muestra el porcentaje de los saltos que corresponde a cada mes. Cabe mencionar que todas las estaciones presentan una distribución semejante a la del conjunto: los saltos ocurren mayormente en los meses estivales.

### Pérdida de potencia

Más allá del valor absoluto del salto, es decir, de cuánto aumentó (o disminuyó) la potencia en un minuto, resulta interesante saber qué porcentaje de la potencia presente representa esta disminución.

Si se tiene un sistema FV que está inyectando a la red, interesa particularmente la *pérdida* de potencia generada debido a la disminución de la radiación, ya que conocer el comportamiento de la radiación en el corto plazo permite o facilita la articulación con las otras fuentes de energía que aportan a la red. Una caída de radiación solar podría implicar una desestabilización de la red, debido a la pérdida de energía inyectada a la misma por una eventual central fotovoltaica que forme parte de ella. Para evitar estas situaciones, las redes necesitan disponer de un soporte convencional de energía, el cual debe ser evaluado en función de la probabilidad de las pérdidas de potencia y de su intensidad. Una pérdida de, por ejemplo, 300 W/m<sup>2</sup> no tendrá el mismo impacto en las primeras horas del día que durante el mediodía de un día despejado. Porcentualmente la variación asociada es diferente y también su impacto en la generación esperada en una planta fotovoltaica.

Para dar cuenta de este hecho se estudió, para todos los saltos considerados, qué porcentaje representan de la irradiancia medida en el minuto anterior. En la Figura 10 se agrupan los saltos según el porcentaje de disminución que representan (con respecto al minuto anterior).

Se halló que en menos del 1 % de los eventos se produce una disminución de la irradiancia menor al 25%. El 36,56% de los saltos conllevan una caída de entre el 25% y 45% y el 49,22% de los saltos implica caídas de entre 45 y 65 %, mientras que en casi un 14% de los eventos la caída de irradiancia es más del 65% de un minuto a otro.

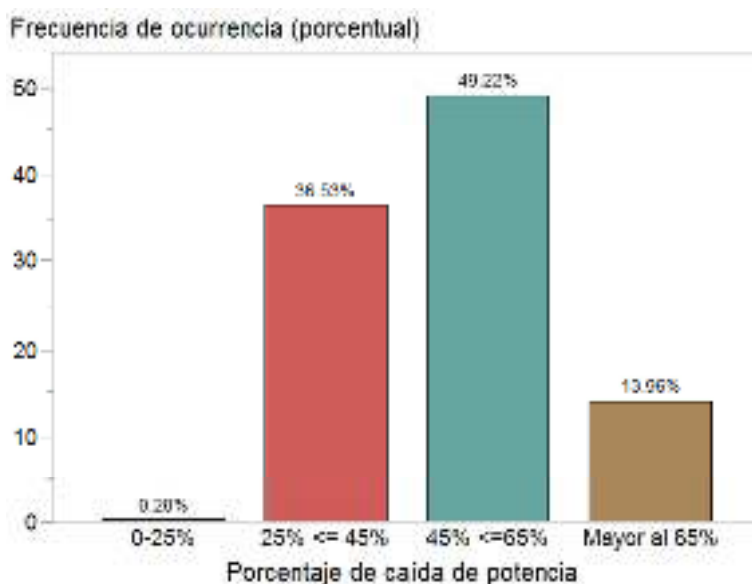


Figura 10: Porcentaje de caída de potencia en un minuto debido a caídas de irradiancia mayores a 300 W/m<sup>2</sup>

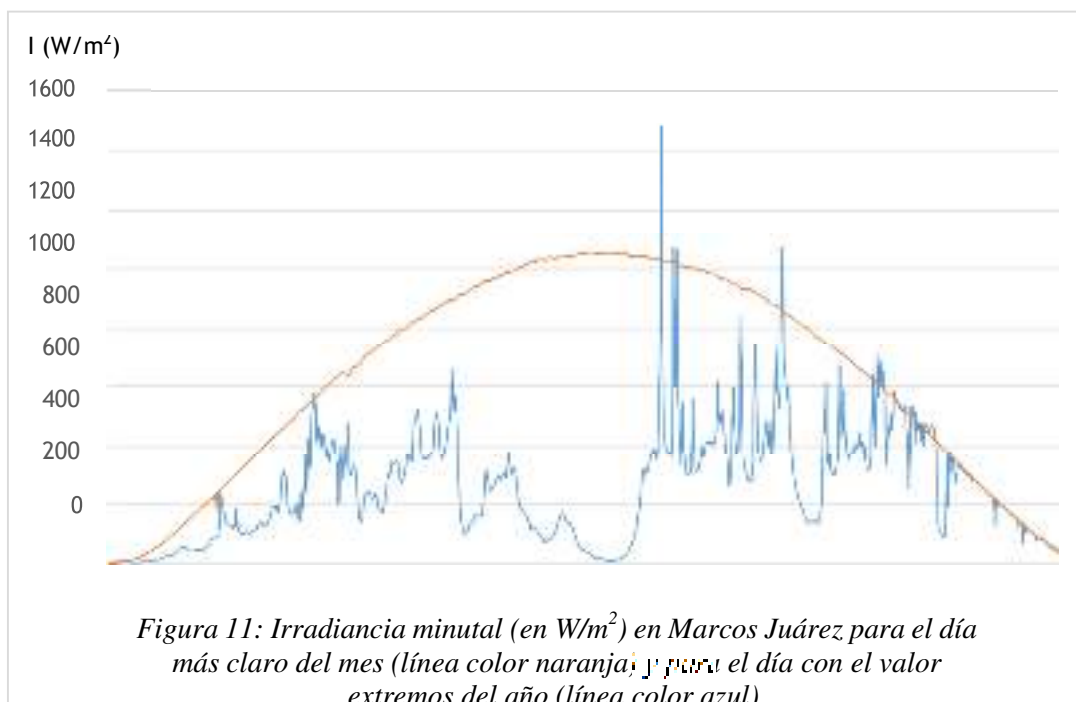
### Picos o valores extremos de irradiación

Se filtraron los valores de Irradiancia para hallar los que superasen 1400 W/m<sup>2</sup>. Se encontró una marcada diferencia en la cantidad de estos valores para algunas estaciones, como Anguil y Balcarce. Por el contrario, los valores máximos en cada estación no difieren entre sí más de un 0,08% como puede calcularse a partir de la Tabla 3.

Estación	Cantidad de picos	Máxima I W/m <sup>2</sup>
	1400 W/m <sup>2</sup> < I	
<b>M. Juárez</b>	2	<b>1483</b>
<b>Luján</b>	2	<b>1428</b>
<b>Gral. Villegas</b>	0	<b>1398</b>
<b>Concepción</b>	4	<b>1473</b>
<b>Balcarce</b>	18	<b>1467</b>
<b>Pergamino</b>	1	<b>1454</b>
<b>Barrow</b>	1	<b>1407</b>
<b>Paraná</b>	8	<b>1452</b>
<b>Anguil</b>	18	<b>1489</b>

Tabla 3. Cantidad de picos de irradiancia minotal (>1400 W/m<sup>2</sup>) y pico máximo, en el año, por estación.

Para el caso del evento más extremo encontrado en ese año en la red (Marcos Juárez, pico de 1483 W/m<sup>2</sup>) se ve en la Figura 11 la comparación entre los valores de irradiancia de ese día y los correspondientes al día más claro de ese mes en esa estación. Puede verse el incremento respecto de la irradiancia de cielo despejado en los minutos correspondientes a valores extremos.



## CONCLUSIONES

Se verificó la existencia de una importante cantidad de “saltos” de energía en la escala minotal para todas las estaciones que integran la red pampeana de medición de la radiación solar, entre 1094 y 2083 en el año analizado. Los saltos evaluados son aquellos que superan los 300 W/m<sup>2</sup>, pero también se contabilizaron hasta los superiores a 700 W/m<sup>2</sup>. Dichos saltos fueron discriminados en lo que hace al porcentaje de disminución de energía solar existente previa al salto. Se encontró que la mayoría de los



mismos presuponen una pérdida que se extiende, fundamentalmente, en el rango que va desde el 25% al 65% de la potencia solar disponible.

Respecto de la cantidad de días en el año en que ocurrió al menos un salto, el valor máximo fue de 32% de los días del año para Balcarce y el menor de 19% para General Villegas. En este porcentaje de días la eficiencia real de los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red podría verse afectada.

Se analizó la distribución anual de saltos, verificándose que los mismos son mínimos durante los meses invernales y máximos durante el período estival, en todas las estaciones de la red.

En cuanto a los valores de irradiancia global horizontal mayores a 1400 W/m<sup>2</sup>, se encontraron pocos eventos de este tipo en la mayoría de las estaciones, aunque en dos de ellas ocurrieron más de una decena en 2017.

La información presentada puede contribuir al correcto dimensionamiento de los sistemas de aprovechamiento energético que utilicen la radiación solar como fuente primaria de energía. En particular podría ser utilizada para evaluar el soporte de potencia eléctrica convencional que una red de distribución eléctrica requiere cuando una planta fotovoltaica inyecta energía en ella. Dicho soporte se necesita para evitar fluctuaciones en la red, y dimensionarlo adecuadamente resulta imprescindible para evaluar correctamente la inversión necesaria y asegurar el correcto despacho de energía en las redes públicas.

Dado que el presente análisis tiene carácter de preliminar, quedan propuestas para un próximo trabajo las siguientes acciones:

- 1) Analizar el total de la base de datos de la Red Pampeana,
- 2) Estudiar los eventos de saltos y picos en las diferentes componentes de la irradiancia solar (difusa y directa normal) en las estaciones donde el GERSolar está actualmente registrando estas variables (Luján y Barrow).
- 3) Analizar el comportamiento de la irradiancia UV medida durante estos eventos en la estación Luján.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el trabajo desinteresado de todos la/os observadora/es de INTA y UNLu que operan la red de estaciones de la Pampa Húmeda argentina, y de su coordinadora: Gabriela Arano, Marta Borda, Laura Belmonte; Lorena Carreño, Matías Cambareri. Sebastián Bazán, Matías Parquet, Hernán Sceglio, Néstor Garcarena; Gustavo Maffini,, Sebastián Muñoz, Nicolás Vaiman y Gabriela Posse.

## REFERENCIAS

- CAMMESA [en línea]. (2019) Informe mensual junio 2019. Dirección URL: <<http://www.portalweb.cammesa.com/memnet1/>> [consulta: 5 de agosto de 2019].
- Gueymard C. (2012). Solar Radiation, Introduction. Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, R.A. Meyers (Ed.), Springer.
- Lappalainen K y Valkealahti S. (2016). Effects of Irradiance Transitions on the Output Power Fluctuations of Different PV Array Configurations. IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia) Melbourne, Australia.
- Osman Y., Li J., Zhen X. y Yang A. (2018). Experimental Study of the Cloud Influence on PV Grid Connected System. Smart Grid and Renewable Energy. 9, 1-15. ISSN Online: 2151-4844 ISSN Print: 2151-481X.
- Piacentini R., Cede A. y Bárcena H. (2003). Extreme solar global and UV irradiances due to cloud effect measured near the summer solstice at the high altitude desertic plateau Puna of Atacama. Journal atmospheric Solar Terrestrial Physics. 65:727e73.

- Piacentini R., Salum G., Fraidenraich N. y Tiba Ch. (2011). Extreme total solar irradiance due to cloud enhancement at sea level of the NE Atlantic coast of Brazil. *Renewable Energy* 36, 409e412.
- Righini R. y Aristegui R. (2015). Caracterización del nuevo laboratorio de calibración del GERSolar. AVERMA, Avances en Energías Renovables y medio Ambiente. Vol. 3, pp. 11.01-11.09.
- Rosés R., Giménez M. del C., Balmaceda M. y Pontoriero D. (2017). Límite de generación fotovoltaica en sistemas eléctricos, AVERMA, Avances en Energías Renovables y medio Ambiente, Vol. 5, pp. 08.29-08.40.
- Sánchez Reinoso C., Milone D. y Buitrago R. (2012). Simulation of photovoltaic centrals under dynamic shading, *Applied Energy*, Elsevier Science. ISSN: 0306-2619.
- Wolfram E., Orte F. , Pallotta J., D'Elía R., Libertelli C., Carmona F., Luccini E., Porello N. y Ubogui J. (2018). Análisis preliminar de la tasa de cambio a corto plazo de la irradiancia solar con aplicaciones en energía fotovoltaica. AVERMA. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 22, pp 07.49-07.56.

## **ABSTRACT**

Sudden changes in solar radiation levels in the Argentine Humid Pampa area are analyzed. The data comes from a measurement network of 9 stations distributed in the area. Minute-wide increases that exceed 300 W/m<sup>2</sup>, 400 W/m<sup>2</sup>, 500 W/m<sup>2</sup>, and 600 W/m<sup>2</sup> are considered. The assessment is carried on annual and monthly basis. Falls in percentual irradiance caused by these events are studied. Global irradiance values that exceeds those at the top of the atmosphere are also evaluated. Future works are suggested to prevent the temporal variability of photovoltaic plants that operate in that area, which if not properly evaluated, they might lead to unwanted economic consequences.

Keywords: solar radiation, temporal variability, extreme values, short term, photovoltaic plants.

## **SOBRE LA COMPLETITUD DE LAS SERIES TEMPORALES DE RADIACIÓN SOLAR EN LA PAMPA HÚMEDA ARGENTINA**

**Raúl Righini<sup>1</sup>, Sergio Luza<sup>1</sup>, Darío Licata Caruso<sup>1</sup>, Rosana Aristegui<sup>1</sup>, Valeria Stern<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> GERSolar – INEDES (CONICET)

Departamento de Ciencias Básicas- Universidad Nacional de Luján

Provincia de Buenos Aires

Tel. 02323-440241–e-mail: gersolarunlu@gmail.com

*Recibido 20/08/19, aceptado 25/10/19*

**RESUMEN:** En el análisis de series temporales es común la ausencia de datos en la medición de la irradiancia solar a nivel de superficie. El presente trabajo analiza exhaustivamente la influencia de faltantes de datos diarios (entre 1 y 7 días) en el cálculo de los valores diarios promedios mensuales de la irradiación solar. Se extiende el análisis realizado para la estación Luján en un trabajo anterior a gran parte de la Pampa Húmeda argentina. Se emplean para ello datos provenientes de la red de estaciones que el GERSolar y el INTA administran en la región pampeana.

**Palabras clave:** radiación solar, completitud de series, promedios diarios mensuales.

### **INTRODUCCIÓN**

En la medición de la irradiancia solar en superficie es una constante la pérdida esporádica, en el mejor de los casos, de cierto porcentaje de datos, ya sean en base minutal, horaria, diaria u otras. Ante ello permanentemente deben tomarse decisiones respecto a las depuraciones de las bases de datos, las que dependerán del uso que vaya a hacerse de los datos.

Un valor de entrada muy utilizado en el cálculo de distintas magnitudes, dependientes de alguna manera de la irradiancia solar en superficie, es el valor diario promedio mensual de la irradiación solar en el plano horizontal.

Algunos autores aconsejan desechar los meses que presenten más de tres días de pérdidas de datos (Grossi Gallegos et al., 2016-2017). Esa decisión resultaba razonable, dado que la probabilidad de fallos era alta en lo que hace al malfuncionamiento de los equipos durante tres días consecutivos (al menos con la tecnología presente en el almacenamiento de datos hasta hace una década atrás). Esos días pueden resultar claves, elevando el error de ese promedio a niveles incompatibles con el grado de incerteza pretendido para el cálculo de los promedios diarios mensuales.

Las nuevas tecnologías aplicadas al registro y almacenamiento de la información presentan singularidades que las diferencian de las antiguas, fundamentalmente en dos aspectos: los errores presentes son menores; la probabilidad de fallos tiene mayor aleatoriedad.

Debido a que, por un lado los valores medios resultan clave para el dimensionamiento de los sistemas de aprovechamiento de la radiación solar como fuente energética; que las series deben tener en determinados sitios una gran extensión temporal para resultar representativas; y que los faltantes de datos son un problema recurrente en todas las estaciones de medición, resulta importante evaluar de manera exhaustiva cuántos días pueden perderse sin afectar dichas medias diarias mensuales significativamente.

El pasado año se presentó un trabajo (Luza et al., 2018) que analizaba los efectos de la pérdida de días de medición en el cálculo de los valores diarios medios mensuales de irradiación solar para la estación de medición de la radiación solar situada en Luján, en el campo de la UNLu.

Esa publicación evaluó la incidencia de días faltantes en el cálculo de los valores diarios medios mensuales de irradiación solar en plano horizontal a nivel de la superficie terrestre. Los resultados (obtenidos extrayendo todas las combinaciones posibles de días faltantes entre 1 y 7 en un mes) mostraron que calcular dicho valor medio en series diarias mensuales provoca desvíos promedios respecto a la media real menores al 4%. Los desvíos medios crecen con el número de días faltantes y también lo hacen los desvíos máximos. No obstante, es relevante que la probabilidad de cometer errores mayores al 5% resultó, en general, menor al 25% en casi todos los casos, aun con faltantes de 7 días de datos.

El análisis, por lo tanto, fijó procedimientos frente a datos faltantes en la Estación Luján. Pero dicho punto resulta poco representativo dentro de la amplia cobertura espacial que presenta la red que en la Pampa Húmeda argentina administra el GERSolar en conjunto con INTA.

Dicha red consta de 9 estaciones de medición en un área aproximada de 240.000 km<sup>2</sup>. La extensión del área de cobertura y la posibilidad de comportamientos diferentes de las series temporales de radiación en los distintos sitios de medición ameritan extender el análisis realizado en Luján al resto de las estaciones que conforman la red.

## **ANTECEDENTES**

El GERSolar y el INTA administran una red de medición de la radiación solar establecida, fundamentalmente, en estaciones meteorológicas de INTA. La red cuenta, en alguna de sus estaciones, con más de diez años de medición de valores de irradiación solar, habiéndose mejorado sus prestaciones durante los últimos años a través de la instalación de sensores piranométricos de calidad y adquirentes de datos que permiten integrar los niveles de irradiación una vez por minuto. Al día de hoy la red está constituida por las estaciones: Anguil, Balcarce, Luján, Pergamino, Paraná, Marcos Juárez, General Villegas, Concepción del Uruguay y Barrow, cuya ubicación se muestra en la Figura 1.

Regularmente esa red brinda información del valor diario promedio mensual, obteniéndose el mapa que lo representa a través del uso del kriging como método de interpolación en el área de cobertura de la red (<http://www.gersol.unlu.edu.ar/index.html>).

La operación sostenida de la red durante varios años (siete años en promedio) ha permitido trazar los mapas de irradiación solar preliminares correspondientes a dicha zona (Aristegui et al. 2018).

El objetivo primario de la red es adquirir datos que permitan dimensionar sistemas de aprovechamiento energético de la radiación solar y, al mismo tiempo, brindar información de interés agro-meteorológico y biológico.

Las estaciones están equipadas con piranómetros Kipp&Zonen, modelos CMP11, CMP5 y Eppley, modelo 8-48 (Black & White). Todos ellos son regularmente calibrados (cada dos años) en el Laboratorio de Calibración del GERSolar (Righini, Aristegui, 2015).

La incerteza promedio de estas mediciones se evalúa en un 5%. Dicho valor resulta plenamente aceptable para la mayoría de las aplicaciones que utilicen la energía solar como fuente primaria de energía. Los adquirentes de datos empleados son de la firma Campbell, modelos CR1000 y CR800, cuyo error asociado a la medición de voltaje resulta despreciable frente a las incertezas con que se determinan las sensibilidades de los solarímetros.

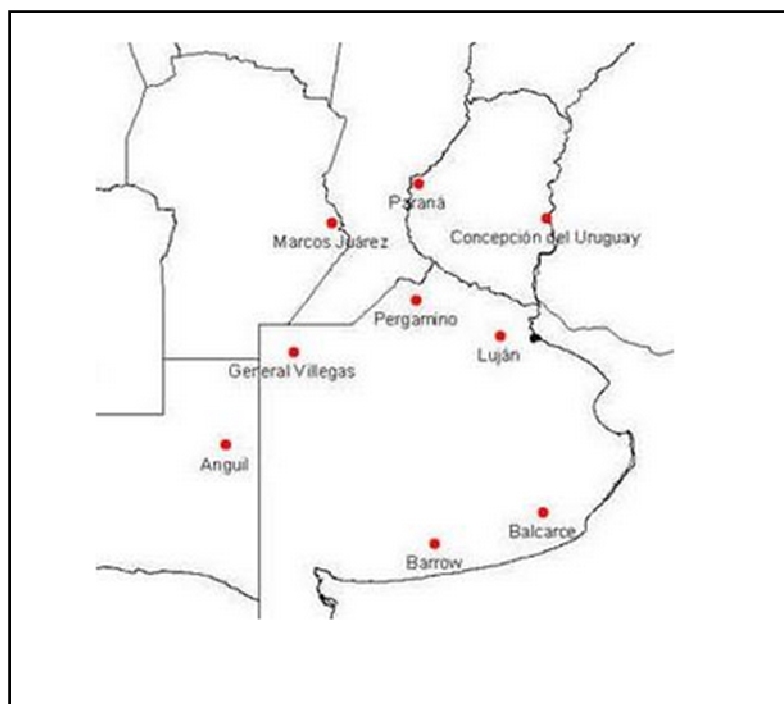


Figura 1: Ubicación de los sitios de medición de la Red Solarimétrica Regional de la Pampa Húmeda.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se trabajó con datos de medición proveniente de ocho estaciones pertenecientes a la red pampeana que el GERSolar administra juntamente con INTA: Anguil, Balcarce, Pergamino, Paraná, Marcos Juárez, General Villegas, Concepción del Uruguay y Barrow. El registro de los datos tiene en la actualidad una frecuencia minutal.

Para evaluar la influencia de la pérdida de datos se realizó idéntico procedimiento al aplicado en la estación Luján, descrito en el artículo publicado el pasado año:

- Se extrajeron una serie de días (desde uno hasta siete) en cada uno de los meses de las series completas de datos disponibles para cada estación de la red. La extracción cubrió todas las combinaciones posibles de esa cantidad de días faltantes dentro de cada mes analizado.
- El valor absoluto de la diferencia porcentual (relativa al promedio sin extracción) de los promedios sin extracción y los promedios con extracción se denominó desvío, y fue calculado para cada una de las extracciones realizadas en cada mes de datos disponibles en las estaciones. En promedio, se analizaron siete años de datos.
- También se calcularon los desvíos máximos para los distintos días faltantes en cada estación y la probabilidad de que los desvíos superasen el 5% (siempre referido a los valores diarios medios mensuales).

Los desvíos, así obtenidos, permitieron evaluar exhaustivamente las consecuencias que la pérdida de datos de una serie trae aparejada en lo que hace al cálculo de los valores diarios medios mensuales.

## RESULTADOS

En las Tablas 1 y 2 se muestran algunos de los resultados, a modo de ejemplo, considerándose no menos de 5 años de datos en cada estación.

		<b>Días extraídos</b>											
		<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
<b>Barrow</b>	1	0,53	0,79	0,76	1,20	1,08	0,89	1,11	1,03	1,14	0,93	0,81	0,56
	2	0,78	1,13	1,12	1,68	1,48	1,29	1,54	1,48	1,60	1,30	1,21	0,83
	3	0,97	1,39	1,39	2,05	1,83	1,59	1,90	1,83	1,96	1,60	1,51	1,03
	4	1,14	1,63	1,63	2,41	2,14	1,85	2,23	2,13	2,30	1,87	1,78	1,22
	5	1,30	1,86	1,85	2,74	2,43	2,10	2,53	2,42	2,62	2,13	2,02	1,39
	6	1,46	2,08	2,06	3,06	2,71	2,34	2,83	2,70	2,92	2,37	2,26	1,55
	7	1,60	2,29	2,27	3,37	2,99	2,58	3,11	2,98	3,22	2,61	2,48	1,71
<b>Marcos Juárez</b>	1	0,65	1,02	0,82	1,14	1,19	0,86	1,17	0,91	1,05	0,94	0,94	0,79
	2	0,92	1,44	1,23	1,63	1,60	1,25	1,59	1,31	1,49	1,34	1,37	1,13
	3	1,14	1,78	1,51	2,01	1,99	1,53	1,99	1,63	1,83	1,63	1,67	1,38
	4	1,35	2,09	1,75	2,35	2,33	1,80	2,31	1,93	2,13	1,91	1,95	1,62
	5	1,54	2,38	1,99	2,68	2,65	2,04	2,63	2,20	2,42	2,17	2,22	1,84
	6	1,72	2,66	2,22	2,99	2,95	2,28	2,92	2,46	2,70	2,42	2,48	2,05
	7	1,89	2,95	2,44	3,29	3,25	2,51	3,22	2,70	2,98	2,67	2,73	2,33

*Tabla 1: Desvíos medios porcentuales en función del número de días faltantes en el cálculo mensual para las estaciones de Barrow y Marcos Juárez.*

		<b>Días extraídos</b>											
		<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
<b>Gral. Villegas</b>	1	2,77	3,18	2,90	2,87	2,78	2,72	3,04	2,78	3,15	3,05	3,00	2,82
	2	5,30	6,46	4,71	5,80	5,70	5,39	6,13	5,66	6,36	5,78	5,96	5,71
	3	8,09	8,49	6,79	8,79	8,48	8,22	9,24	8,60	9,79	8,52	8,64	8,58
	4	10,31	10,34	8,94	11,42	11,38	10,93	12,42	11,58	13,43	11,05	11,36	11,47
	5	11,93	12,59	10,92	14,37	14,31	13,44	15,41	14,63	17,09	14,02	14,12	14,33
	6	13,54	15,00	12,88	17,28	17,40	16,14	18,42	17,62	20,50	16,65	16,65	17,13
	7	15,09	17,49	14,50	20,09	20,67	18,75	21,52	20,83	24,14	19,33	19,22	18,60
<b>Pergamino</b>	1	3,03	3,26	2,78	3,25	2,92	3,18	2,99	3,19	3,21	2,79	3,09	2,99
	2	5,40	4,89	5,15	6,49	5,85	6,24	6,08	6,35	6,28	5,63	5,81	5,58
	3	7,72	6,56	7,50	9,65	8,71	8,97	9,07	9,04	9,48	8,26	8,50	7,91
	4	9,94	8,39	9,81	12,93	11,70	12,16	12,06	12,01	12,95	11,27	11,15	9,77
	5	11,82	9,86	12,08	16,17	14,89	15,34	15,18	15,18	16,68	14,08	13,19	11,45
	6	13,78	11,44	13,59	19,22	18,28	18,54	17,98	18,30	19,66	17,27	15,18	13,35
	7	15,39	13,14	14,77	22,13	21,92	21,47	20,68	21,44	22,86	20,58	17,82	15,19

*Tabla 2: Desvíos máximos porcentuales en función del número de días faltantes en el cálculo mensual para las estaciones de General Villegas y Pergamino.*

Las tablas anteriores, dadas para algunas estaciones, son bastante similares para el resto de los sitios de medición de la red solarimétrica. Más allá de pequeñas variaciones locales, los promedios resultan representativos del comportamiento general.

Días extraídos		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Paraná	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,25	0,44	0,07	0,92	0,90	0,38	2,19	0,70	1,32	0,54	0,69	0,08
	3	1,76	1,40	0,54	2,25	7,16	3,05	9,47	3,04	2,81	2,57	1,55	0,58
	4	3,43	3,14	1,48	4,75	12,70	6,47	14,02	5,74	5,59	5,96	4,07	1,32
	5	4,65	5,86	3,00	8,97	17,74	9,87	19,16	8,74	9,40	9,56	7,11	2,38
	6	7,88	9,10	4,86	13,07	22,62	13,39	23,51	11,63	13,81	14,17	9,70	4,71
	7	10,48	12,14	6,91	16,80	27,11	17,44	27,66	14,79	18,05	18,30	13,12	7,33
Anguil	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,22	0,53	0,65	1,38	4,95	1,61	1,72	3,23	2,76	2,80	0,46	0,43
	3	0,44	0,98	2,14	4,90	14,66	3,28	8,16	4,94	4,73	7,07	1,23	0,89
	4	0,87	1,88	3,54	9,79	22,68	7,02	15,45	11,53	13,42	15,26	2,34	2,13
	5	1,51	3,06	6,73	14,98	28,76	13,42	20,67	18,36	18,38	20,69	3,58	3,38
	6	2,31	4,93	11,00	19,71	34,20	18,90	26,08	23,31	23,11	25,75	6,58	6,20
	7	3,20	8,47	15,49	24,39	38,88	23,20	30,68	27,76	28,20	30,56	10,34	10,30

Tabla 3: Probabilidad de que los desvíos de las medias mensuales sean mayores al 5%, en función del número de días faltantes en el cálculo mensual para las estaciones de Paraná y Anguil.

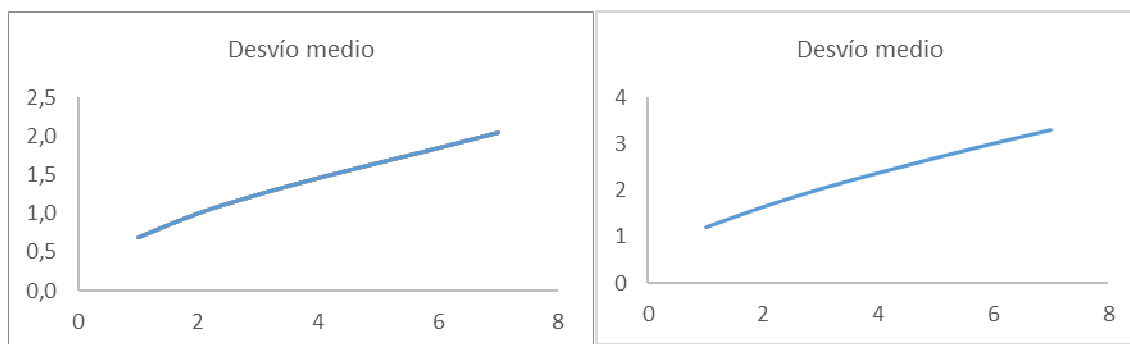


Figura 2: Desvíos medios porcentuales promedio de todas las estaciones, en función del número de días faltantes para los meses de enero (izquierda) y mayo (derecha).

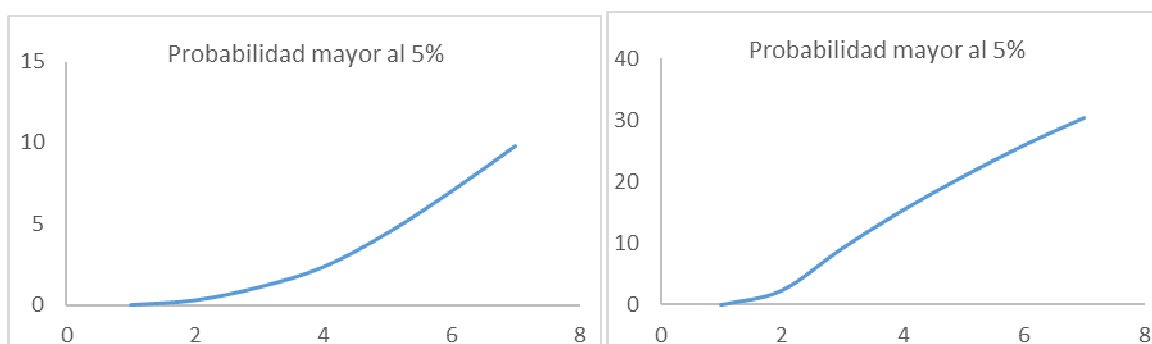


Figura 3: Probabilidad porcentual de que los valores medios difieran de los reales en un valor mayor al 5%, en función del número de días faltantes para los meses de enero (izquierda) y julio (derecha).

En general puede notarse que en ninguna estación los desvíos medios superan el 4%, aún en los meses en los que el cálculo se realiza con falta de siete días. Por supuesto que hay desvíos superiores a ese



valor (que crecen a medida que crece el número de días faltantes). Los desvíos máximos pueden ser importantes (pueden llegar al 22% para 7 días en algunas estaciones, aunque rondan el 15% con ese número de días faltantes). Pero la probabilidad de que ocurran es relativamente baja. El valor más alto de esa probabilidad se da en Marcos Juárez, durante el mes de abril, con 7 días faltantes (43,3%). En el resto de los sitios, la probabilidad de desvío mayor al 5% es sensiblemente menor. En particular durante los meses de primavera y verano, las probabilidades de desvío mayor al 5% resultan menores al 30% en todas las estaciones (en particular en los meses de verano). Las Figuras 2 y 3 muestran el comportamiento promedio general para todas las estaciones analizadas, comparando los meses extremos entre sí.

Como era de esperar, los resultados obtenidos dependen de la variabilidad de la radiación solar en cada estación. La variabilidad media está definida por el siguiente coeficiente:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{X}} \cdot 100$$

donde  $\bar{X}$  representa el valor medio de la radiación solar diaria media mensual y  $\sigma$  su desvío estándar.

Cuanto mayor sea la variabilidad, mayores serán los desvíos medios y máximos. De igual modo la función que represente la probabilidad de error mayor al 5% irá creciendo con el número de días faltantes en el cálculo de los valores diarios medios mensuales. El siguiente gráfico da cuenta de las variabilidades en cada una de las estaciones para cada mes.

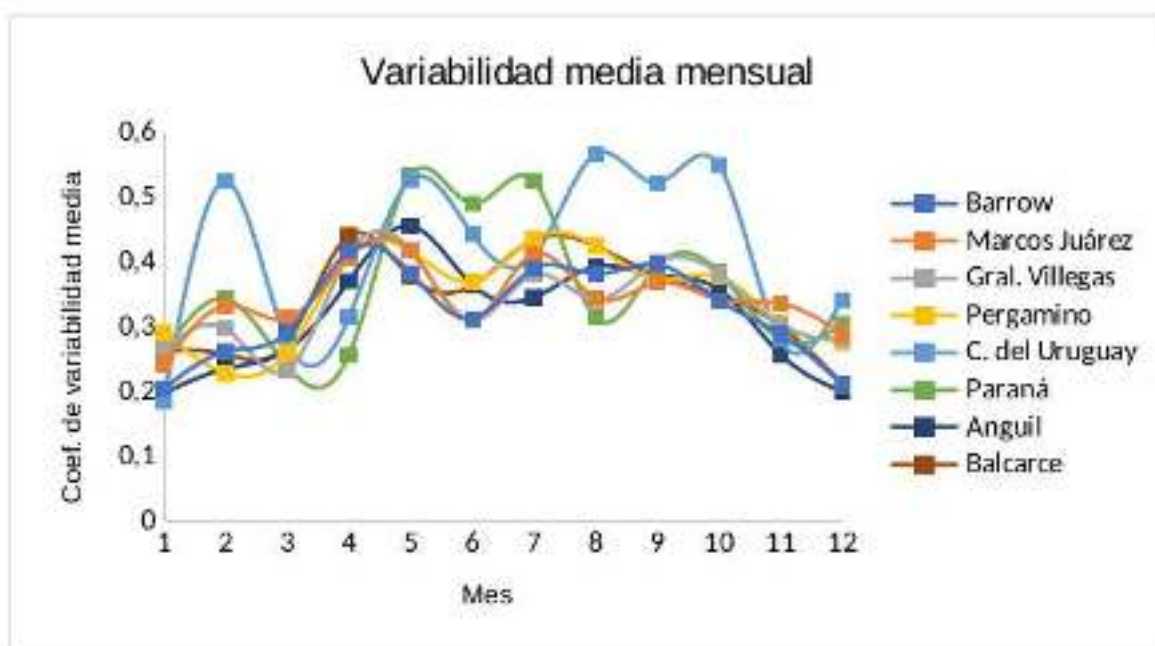


Figura 4: Coeficiente de variabilidad media para cada una de las estaciones de la red pampeana para cada mes

Puede notarse que, en general, la variabilidad tiende a crecer durante los meses invernales (los de menor irradiación solar), ya que el denominador en la ecuación que define el coeficiente de variabilidad es menor. A pesar de que algunos sitios presentan situaciones especiales debido a particularidades climáticas zonales (tal como ocurre en Concepción del Uruguay), esa tendencia se mantiene a grandes rasgos en todos los lugares donde están instaladas las estaciones de medición, tal como se observa en la Figura 4.

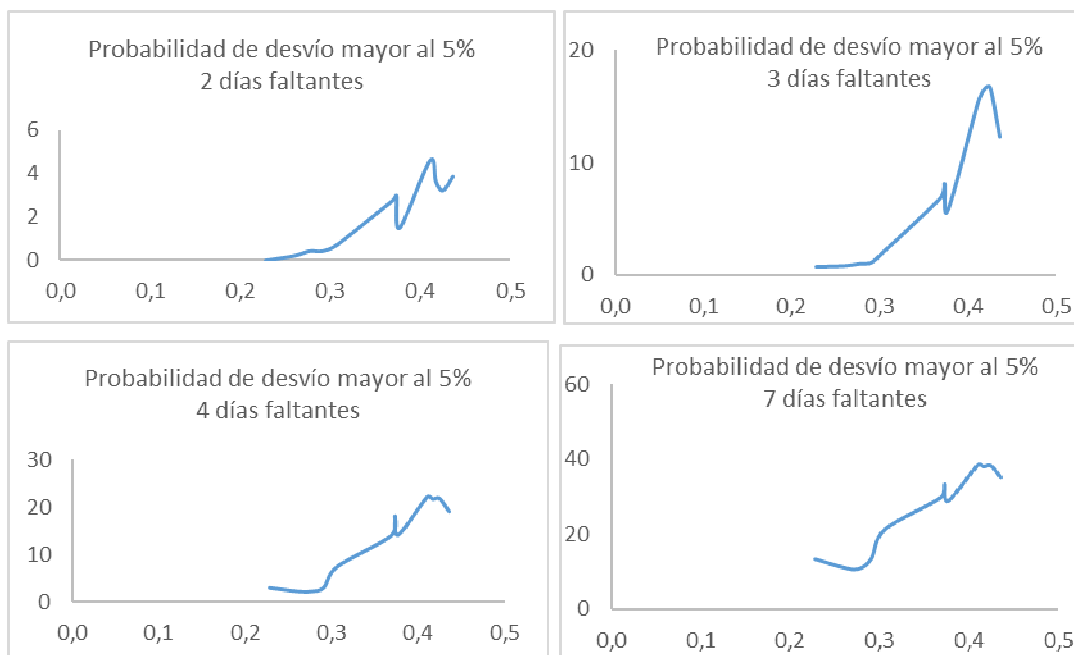


Figura 5: Probabilidad de desvío mayor al 5% en función del coeficiente de variabilidad para cada número de días faltantes. Estación Pergamino.

Esa variabilidad está relacionada con la probabilidad de calcular los valores diarios medios mensuales con un error superior al 5%. Es de esperar que la probabilidad no sólo crezca con el número de días extraídos sino también con la variabilidad de la irradiación solar. Efectivamente, esa relación creciente se da en todas las estaciones y depende del número de días faltantes. Cuando los días faltantes son pocos, la probabilidad es casi independiente de la variabilidad, pero a medida que crece el número de datos ausentes, la correlación creciente entre datos faltantes y variabilidad es más acusada y, obviamente, se hace mayor cuando el número de días faltantes es mayor. A modo de ejemplo se muestra en la Fig. 5 la relación para la estación Pergamino.

## CONCLUSIONES

Del análisis sistemático del cálculo de la radiación solar diaria media en función del número de días de datos faltantes en el cálculo del promedio, se desprende que pueden extenderse los resultados obtenidos anteriormente para Luján al resto de la Pampa Húmeda. En efecto, las estaciones de la red pampeana de medición tienen un comportamiento similar a la estación Luján ante una determinada cantidad de días faltantes para el cálculo de los valores medios. A medida que los días faltantes se incrementan, aumentan los desvíos, y si bien esos desvíos pueden alcanzar en algunos casos valores máximos importantes (pudiendo llegar al 22% para 7 días faltantes) la probabilidad de sufrir desvíos mayores al 5% resulta en general, menor al 30%, aún para un número alto de días faltantes.

Es decir que, en el peor de los casos, en la estación que presenta desvíos mayores, en la más desfavorable de las estaciones, con el más alto número de días ausentes, la probabilidad de cometer un error superior al 5% promediando sobre los datos existentes resulta menor al 43%.

Este hecho, según nuestra opinión, resulta significativo en la decisión que se tome a la hora de descartar informaciones provenientes de meses enteros en las redes de medición por ausencia de datos diarios.

En todo caso, esa decisión debe basarse en apreciaciones basadas en datos reales con estadística suficiente.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el trabajo desinteresado de todos los observadores de INTA y UNLu que operan la red de estaciones de la Pampa Húmeda argentina, y de su coordinadora Gabriela Posse: Marta Borda, Laura Belmonte; Lorena Carreño, Matías Cambareri. Sebastián Bazán, Matías Parquet, Hernán Sceglío, Néstor Garciarena; Gustavo Maffini, Sebastián Muñoz, Nicolás Vaiman y Gabriela Arano.

## REFERENCIAS

- Grossi Gallegos H. y Coquet E.: Influencia de la pérdida de datos sobre los promedios de irradiación solar global. *Revista Averma*, Vol 4, pp. 11.53-11.61 (2016).
- Grossi Gallegos, H. y Coquet, E: La pérdida de datos diarios de irradiación solar global y una evaluación sobre su influencia en los promedios mensuales. *Revista de Climatología*. Vol 17, pp: 45-57 (2017).
- Luza Regueiro S., Righini R., Bazán S. y Roldán A: Sobre la completitud de las series temporales de datos de irradiación solar en Luján, Provincia de Bs. As. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (ISSN 0329-5184)* Vol. 22, pp. 7.21-7.26 2018.
- Righini R. y Aristegui R.: Caracterización del nuevo laboratorio de calibración del GERSolar. *Avances en Energías Renovables y medio Ambiente, (ISSN 0329-5184)* Vol. 3, pp. 11.01-11.09, 2015.
- Aristegui R., Righini R., Stern V., Lell J., Bazán S.: Nuevo Atlas de Radiación Solar de la Pampa Húmeda Argentina: Resultados preliminares. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (ISSN 0329-5184)* Vol. 22, pp. 7.11-7.19 2018.

## ABOUT OF THE COMPLETENESS OF THE TEMPORARY SERIES OF SOLAR RADIATION IN THE PAMPA HÚMEDA ARGENTINA

### ABSTRACT

The absence of data in the measurement of solar irradiance at the surface level is common in the analysis of time series. The present work exhaustively analyzes the influence of missing daily data (between 1 and 7 days) in the monthly average daily values of solar irradiation calculation. The previous work for the Luján station is extended, a lot of parts of Pampa Húmeda Argentina. For this purpose, data from the network of stations that GERSolar and INTA administer in the Pampean region are used.

**Keywords:** solar radiation, series completeness, monthly daily averages

## **METODOLOGÍA PARA DETERMINAR EL POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES DE BASE SOLAR A ESCALA URBANA. CASO DE ESTUDIO: BARRIO DE FLORES – CABA**

**A. Figueira<sup>1</sup>, A. Maggi<sup>1</sup>, S. Miguel<sup>1</sup>, E. Fernandez<sup>1</sup>, D. Grosso<sup>1</sup>, L. Santamaria<sup>1</sup>**

Laboratorio Bio-Ambiental de Diseño - Facultad de Planeamiento Socio-Ambiental  
Arquitectura - Universidad de Flores.

Pedernera 288 2do piso- C.P. 1406 –Ciudad de Buenos Aires

Tel: 011 4610-9300 int: 326 e-mail: [anifigueira@gmail.com](mailto:anifigueira@gmail.com)

*Recibido 15/08/19, aceptado 18/10/19*

**RESUMEN** Se propone una metodología para aprovechar el potencial energético solar urbano para la producción de energía de base renovable. Se toma como caso de estudio el Barrio de Flores en la Ciudad de Buenos Aires. A partir del relevamiento de los usos del suelo, la forma urbana y las tipologías de las cubiertas (en planta y sección) se calculan de manera teórica las superficies disponibles para tal fin. Los resultados estiman que el barrio posee 232.945 m<sup>2</sup> de superficie útil en edificios no residenciales, recibiendo en promedio 349.418 MWh de irradiación solar global acumulada en un año. Con paneles fotovoltaicos se podría cubrir el 12% de la demanda energética de los habitantes de Flores. Este estudio podría contribuir a la planificación urbana sostenible e incorporar nuevas variables al momento de aplicar los códigos de planeamiento urbano.

**Palabras Claves:** Radiación solar, desarrollo urbano, energías renovables

### **INTRODUCCIÓN**

En nuestro país, es reciente el abordaje sobre la capacidad y planificación en la implementación de la generación y distribución de energías en base renovable. Para ello es necesario que los centros urbanos incorporen estas variables al momento de planificar y ordenar el crecimiento urbano en el territorio.

Uno de los casos recientes es el de la Provincia de Salta, que cuenta con una plataforma de cálculo de sistemas fotovoltaicos y solares térmicos denominada SiSol que surge de un Proyecto de Investigación y un convenio entre la UNSa (Universidad Nacional de Salta) y la Secretaría de Energía de Salta.

Por otra parte, las ciudades argentinas que están atravesando un crecimiento urbano, no consideran aún ampliar la red de consumo energético vinculado a los cambios que se están produciendo en la matriz energética Nacional. Por lo tanto, existe una gran oportunidad para el aprovechamiento del recurso solar para abastecer la creciente demanda.

Para acceder al potencial del aprovechamiento de los recursos de fuentes renovables aplicados a los centros urbanos, es deseable implementar medidas y políticas locales para activar la utilización solar

---

<sup>1</sup> Investigador del laboratorio Bio-ambiental de Diseño de la Facultad de Planeamiento Socio -Ambiental de la Universidad de Flores.

en las estructuras urbanas. Un ejemplo reciente es el de Uruguay que desde hace varios años ha implementado políticas para solventar el aumento de consumo energético, a pesar del crecimiento casi nulo de la población. De este modo le permite afrontar así, de manera autónoma, este incremento del consumo. Según el Informe de Medio Ambiente y Energía generado por la Dirección Nacional de Energía (DNE), la Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA) y la Agencia Española de Cooperación Internacional para el desarrollo en Uruguay (AECID), el Gobierno de Uruguay plantea como objetivo central de esta política energética la satisfacción de todas las necesidades energéticas a costo que resulten adecuados para todos los sectores sociales y que aporten competitividad al país. Mediante políticas sustentables, tanto desde el punto de vista económico, como el medioambiental, se definen lineamientos a seguir con metas a corto, medio y largo plazo.

Otra condición a tener en cuenta para aprovechar el potencial energético solar urbano real es la elaboración de un estudio y diagnóstico que derive en una serie de documentos que constituyan la “planificación solar urbana” de la zona en tratamiento, para lograr información certera sobre la radiación solar recibida en cada cubierta (techo), en cada hora del día y en cada mes del año considerando la geometría de los mismos y la forma urbana construida y planificada. Mundialmente existen pocos estudios que propongan un proyecto de este tipo. Tal es el caso para la ciudad de Valparaíso en Chile (Araya-Muñoz, et al., 2014) donde se creó un software que tiene como objetivo la estimación de dicho potencial de geometría y de orientación espacial. Este programa puede ser utilizado por las autoridades locales, urbanistas y las empresas encargadas de gestionar la energía del lugar y así promocionar la utilización de este recurso energético que no solo ordena el impacto del crecimiento urbano sobre el medio ambiente sino también se orienta a lograr la autonomía energética del sector urbano en estudio.

Por otra parte, debe tenerse en cuenta el derecho de los habitantes de acceder a la energía solar sin que esta se vea interrumpida por modificaciones edilicias futuras. Un ejemplo de protección del “derecho al sol” se propone en California en el año 1978. Ese año se sanciona la Ley de Servidumbre Solar (Solar Easement Law - secciones de código civil, 801 y 801.5) que ofrece la posibilidad de proteger el futuro acceso solar a través de una servidumbre negociada con los propietarios y vecinos. Esto significa que el damnificado recibe el derecho a la luz del sol a través de los bienes inmuebles del vecino. Se previene de esta manera pérdidas de las inversiones debido a la limitación solar, ya que las nuevas construcciones que obstaculizan la radiación de sol deben entregarles a las construcciones existentes la misma cantidad de energía que le restringen. Actualmente, según The Community Associations Institute, 34 estados de los Estados Unidos prohíben u ofrecen la posibilidad de sancionar las restricciones impuestas a los propietarios de viviendas que impidan la instalación de paneles solares y su disponibilidad asociada (Mesa et al., 2013).

## **MARCO TEÓRICO**

Con el correr del Siglo XXI, la obtención y el consumo de combustibles fósiles serán cada vez más costosos y representará un mayor riesgo desde los aspectos económicos y ambientales para los ciudadanos (Caamaño et al., 2011). Por otra parte, en las ciudades se concentra 80% de la población mundial, en donde se consume casi el 75% de la energía total y es donde se producen las mayores emisiones de CO<sub>2</sub> (Gómez, et al., 2017). La Organización de las Naciones Unidas reporta (2019) que un 90% de la población mundial tiene acceso a la energía eléctrica, pero será necesario redoblar los esfuerzos para alcanzar a aquellos que todavía no tienen acceso a ella.

Por esto, es necesario implementar políticas de Estado y normas técnicas que promuevan el desarrollo de ciudades sustentables, en donde se mitiguen los efectos adversos sobre los problemas ambientales, se construyan edificios adecuados a la eficiencia energética y se promuevan la incorporación de energías renovables.

En el año 2015 fue sancionada la Ley 27.919 modificando la Ley 26190, “Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energías Destinada a la producción de Energía Eléctrica” que determina el objetivo de lograr una contribución de las fuentes renovables de energía

hasta alcanzar el 20% del consumo de energía eléctrica nacional al 31 de diciembre 2025. Se propone también, la utilización de la norma IRAM – ISO 50001 para la implementación de sistemas de Gestión de la Energía en orden de alcanzar este 20% de maneras más acelerada.

En 2017 se promulgó la Ley de Generación distribuida de energías renovables integrada a la red eléctrica pública (Ley 27.424 bajo el Decreto 1075/2017), reglamentada por el Decreto 986/2018, donde cada consumidor tiene posibilidades de ser generador de energía eléctrica (autoconsumo) e inyectar al sistema de la red el excedente de lo producido. Así se contribuye a fijar nuevas políticas energéticas e incentivar a los usuarios a cambiar su forma de consumo. Esta norma ya comenzó a implementarse en las provincias Salta (Ley 7824), Mendoza (Ley 9084/26 de Julio 2018), San Luis (Ley N° IX-0921-2014), Neuquén (Ley 3006) y Corrientes (Ley 6428). La provincia de Santa Fe, pionera en cuestiones de inyección a la red eléctrica desde hace ya 5 años, cuenta con un marco regulatorio de inyección de energía limpia a la red eléctrica para pymes y residenciales. (Ley 12.503/ 2005, Decreto 1565/16, Decreto 1710/18, Resolución 140/2018 –Prosumidores).

Recientemente desde el Ministerio de Hacienda –Subsecretaría de Energías Renovables y Eficiencia Energética- se incentiva con mayor profundidad a las pequeñas y medianas empresas con la disposición N° 82/2019. Se instrumenta un beneficio promocional en forma de certificado de crédito fiscal para ser aplicado al pago de impuestos nacionales. Estos beneficios se otorgan según el tipo de Usuario-Generador, la tecnología utilizada, la potencia instalada. El monto de este beneficio equivale a quince pesos por unidad de potencia (15 \$/W), con un tope máximo de un millón de pesos.

Otras herramientas de apoyo y gestión de los derechos al sol, se encuentran en algunos Códigos de edificación y Planeamiento Municipales. Consisten en regulaciones para proteger sistemas solares existentes o futuros, dependiendo de los gobiernos locales, ordenanzas y códigos de construcción. A su vez cuentan con parámetros sobre el usufructo solar (acceso a luz solar sin obstrucciones de vecinos hacia una propiedad). Esto ocurre por ejemplo en Inglaterra, donde se considera al derecho al sol como un derecho adquirido, siendo que un edificio que haya recibido luz natural por más de veinte años está habilitado a impedir cualquier obstrucción que prive este derecho. (Mesa, A, et al., 2013).

Knowles (1981) ha estudiado que las densidades muy altas tendrán un efecto adverso en el acceso solar si se busca acondicionar con ganancias directas. Además, determinó un equilibrio llamado “Envoltente Solar”, evitando el eclipse de un edificio a las edificaciones vecinas durante los periodos críticos de recepción de energía del día y del año. Algunas de sus investigaciones como las realizadas en la ciudad de Los Ángeles, donde determina que edificios de entre 3 a 7 pisos, son óptimos en términos de Envoltente Solar. Estos trabajos podrían aplicarse al caso de la ciudad de Buenos Aires al tratarse de ciudades en latitudes similares (34°) y realizar un análisis comparativo al respecto. Por lo tanto, se considera importante el factor de la densidad en el estudio de acceso al Sol, junto con la forma de la envoltente, el volumen edilicio, el entorno, etc.

El Código de Planeamiento Urbano de la Ciudad de Buenos Aires menciona una única referencia al asoleamiento: plantea que cuando se construyan en una misma parcela uno o más edificios de perímetro libre, estos se deberán emplazar asegurando 3 horas de asoleamiento, al menos para la mitad de los locales de primera clase de cada unidad de vivienda durante el solsticio de invierno. (Código de Planeamiento Urbano de la CABA, Sec. 4.8.2, 2017).

Un estudio realizado para la ciudad de Buenos Aires en el 2018, plantea la creación de Macromanzanas, con el objeto de contribuir a la propuesta del Nuevo Código Urbanístico-2018 para la ciudad. En uno de los análisis sobre el crecimiento de densidad y, en consecuencia, modificación de la forma urbana y consumo energético, se plantea la posibilidad de generación de energía eléctrica y térmica aprovechando la disponibilidad solar de cubiertas de los nuevos edificios. A través de estimaciones y desarrollo de un modelo teórico, se logró proponer y alcanzar un porcentaje aceptable para la generación energía limpia para compensar el aumento de la demanda energética que se produciría a partir del crecimiento urbano. (Miguel et al., 2017).

## METODOLOGÍA

Para mitigar el impacto sobre el crecimiento urbano y promover un desarrollo sustentable, una de las medidas a considerar es el aprovechamiento extensivo de la radiación solar en áreas urbanas. Para ello, se deben estudiar distintos sectores de la ciudad en relación al acceso al sol y dimensionar el potencial solar con el objeto de obtener un diagnóstico y resultados certeros (Viegas, 2011). Se podría determinar el impacto ambiental generado por la no disponibilidad del recurso solar debido a que esta conduce a la generación de mayor consumo (Mesa et. al., 2013). El recurso solar en gran medida está condicionado por las características del entorno, la altura de las edificaciones, la separación entre volúmenes y las proporciones del espacio exterior, como también por las obstrucciones de construcciones. En altas densidades además de necesitar un buen diseño hacia el aprovechamiento solar se requiere medidas establecidas por organismos de gestión. En Argentina, estas medidas están plasmadas en los Códigos de Planeamiento Urbano y Edificación de cada ciudad.

En el caso de Buenos Aires, mientras es obligatorio asegurar el asoleamiento durante tres horas en el solsticio de invierno de la mitad de los locales de primera clase de cada vivienda no se asegura el derecho al asoleamiento por obstrucciones de construcciones linderas futuras. Por otro lado, normas nacionales de IRAM (11601/2002, 11603/1996, 11604/2001 y 11605/1996) y AADL (J20-06/1972) establecen niveles mínimos de habitabilidad térmica y lumínica recomendados, pero que no son de carácter obligatorio.

Al momento de diseñar una instalación en base a fuentes renovables, los equipos solares requieren que las sombras proyectadas por obstáculos (edificios, elementos arquitectónicos, arbolado urbano e infraestructuras) sean mínimas. Además, variables como la inclinación de instalación, dimensiones, tecnología y otros factores influyen directamente en la cantidad energía generada (Amado y Poggi, 2012). De este modo surge el desafío de la planificación solar urbana. El concepto de Envoltente Solar de Knowles puede ser aplicado a casos actuales, vinculando la superficie y volumetrías existentes con las alturas y superficies permitidas por Código de Planeamiento Urbano, de forma de encontrar situaciones favorables y desfavorables.

La agencia internacional IRENA (International Renewable Energy Agency) recomienda el aprovechamiento de las grandes áreas de envoltentes y techos para el emplazamiento de sistemas de captación de energía como complemento a medidas de eficiencia energética en edificaciones, implicando la producción de energía de forma distribuida (IRENA, 2016). En el caso de tecnologías solares fotovoltaicas o solar térmica deben considerarse aspectos de impacto urbanístico, por ello la opción es que las superficies de captación estén coplanares en la edificación; formando parte de la envoltente. (Wall et al., 2012).

Este trabajo toma una porción de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (que tiene una extensión de 20.300 Ha). El área de estudio es el barrio de Flores, de 860 Ha distribuidas en 516 manzanas. (Figura 1).



*Figura 1: Imagen del área urbana de intervención - Barrio de Flores.*



De acuerdo a un estudio preliminar de sub-zonas dentro del Barrio de Flores, se han definido tres sectores de acuerdo a la morfología urbana, los usos del suelo y en consecuencia diferentes tipologías edilicias (Figura 4):

1-Sector Norte: Comprendido entre las calles Av. Gaona al norte, Av. Tte. Gral. Donato Alvarez al este, Av. Rivadavia al sur y la calle Cuenca al Oeste: Se caracteriza por ser una zona consolidada, posee una alta densidad de uso residencial y comercial, creciendo considerablemente en las avenidas. Debido a ello carece de espacios disponible a nivel cero.

2-Sector Centro: Al Norte Av. Rivadavia, el límite al Este está compuesto por las calles Curapaligüe – Av. Directorio y Av. Carabobo, Av. Eva Perón al sur y Portela al Oeste: La particularidad de esta zona es que contiene una mixtura de densidades. Hacia el Norte hallaremos una alta densidad residencial y comercial, en la parte central una densidad media y en la franja sur, sector atravesado por la Autopista 25 de Mayo, una densidad baja.

3-Sector Sur: está delimitado por Av. Eva Perón al Norte, Av. Carabobo – Castañares al este, Av Riestra – AV. Perito Moreno y Av. Castañares al sur y Portela, Au. 25 de Mayo, Au. Pres. Cámpora: Se caracteriza por ser el menos consolidado de los tres. Está compuesto por una densidad residencial y comercial baja que va disminuyendo hacia el Sur. En la zona central hallaremos usos variados como depósitos, Terminales de Colectivos, Cementerio, Hospital, Clubs. En el Sur localizamos predios de grandes proporciones que en su gran parte carecen de uso, lo cual ofrece amplias superficies ociosas disponibles.

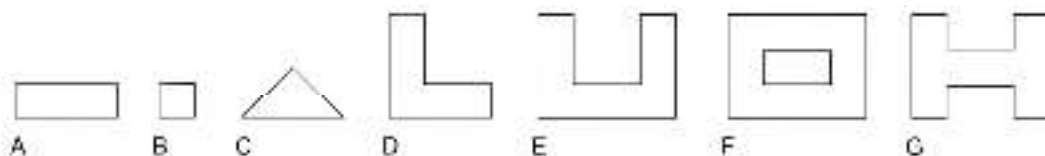
Con esta primera evaluación se ha realizado un relevamiento de los perfiles urbanos, volumetrías y particularidades de la forma urbana con el objeto de estudiar qué superficie en la zona seleccionada tendría el potencial de instalar equipamiento de generación de energía de base renovable solar y que dicha producción sea eficiente.

Dentro de las tipologías de edificio relevados hemos solo considerado edificios públicos, educativos e industriales. La selección de estas tipologías radica en que son de variadas morfologías y escalas de edificio, proponen en general un uso de abastecimiento de servicios y dependen de un solo propietario o dominio, siendo más factible de implementar un sistema de generación energético centralizado. Excluyendo de este trabajo los usos residenciales caracterizados por pertenecer a distintos propietarios, siendo así mucho más dificultoso su cálculo y puesta en práctica.

Por otra parte, se realizó un inventario de superficies disponibles y su morfología, que dará como resultado la superficie real de aprovechamiento del recurso solar para el sector de estudio dentro de la Ciudad de Buenos Aires. El relevamiento corresponde a imágenes satelitales, documentación digital e información pública del Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires actuales.

Las categorías relevadas se sintetizan en tres grupos: 1-Techos o cubiertas de edificios existentes, 2-superficies libres y ociosas (que no constituyan espacios verdes) y 3-los laterales de la Autopista 25 de Mayo que tienen sus caras expuestas al Norte.

Seguidamente, se ha desarrollado una categorización del tipo de cubierta en implantación (planta) derivada de la forma de las mismas. (Figura 2).



*Figura 2: Categorización del tipo de cubierta en implantación (planta): A: Implantación del edificio en forma rectangular, B: Implantación de tipo cuadrada, C: Implantación triangular, D: Implantación de forma de "L", E: Implantación en forma de "U", F: Implantación con patio central, G: Implantación en forma de "H", Elaboración propia.*

Por otro lado, estas mismas cubiertas relevadas, se clasificaron según su forma volumétrica (en sección) (Figura 3), de esta manera se podrá estudiar la capacidad de alojar sistemas de producción de energía y la manera de disposición en estas superficies, teniendo en cuenta además las orientaciones con respecto al sol.

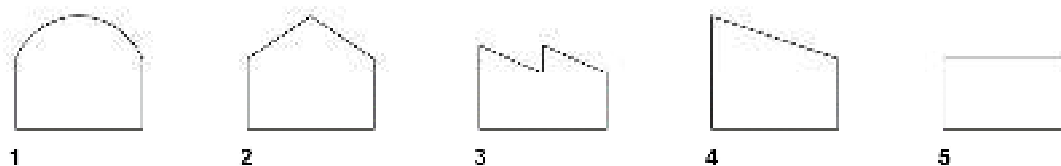


Figura 3: Categorización del tipo de cubierta según su forma volumétrica (sección): 1: Cubierta cañón, 2: Cubierta a dos aguas, 3: Cubierta shed, 4: Cubierta a un agua, 5: Cubierta plana o superficie plana disponible a nivel cero, Elaboración propia.

A continuación, se cuantifican las tipologías existentes de implantación (Tabla 1). Destacándose en un 61% las cubiertas de tipo rectangulares (A), y en segundo lugar se encuentran las cubiertas con tipología en forma de U (E). El 10% de los techos disponibles son de tipologías cuadrada (B) y el 9% de tipología con patio central (F). Y en menor proporción la tipología de forma de H (G), forma de L (D) y tipología en forma de triángulo (G), cada una poseen un 3%, 1% y 1%.

TIPO IMPLANTACIÓN	A	B	C	D	E	F	G	TOTAL
	53	9	1	1	12	8	3	87
	<b>61%</b>	<b>10%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>14%</b>	<b>9%</b>	<b>3%</b>	<b>100%</b>

Tabla 1: Porcentaje de tipo de cubierta en implantación (planta)

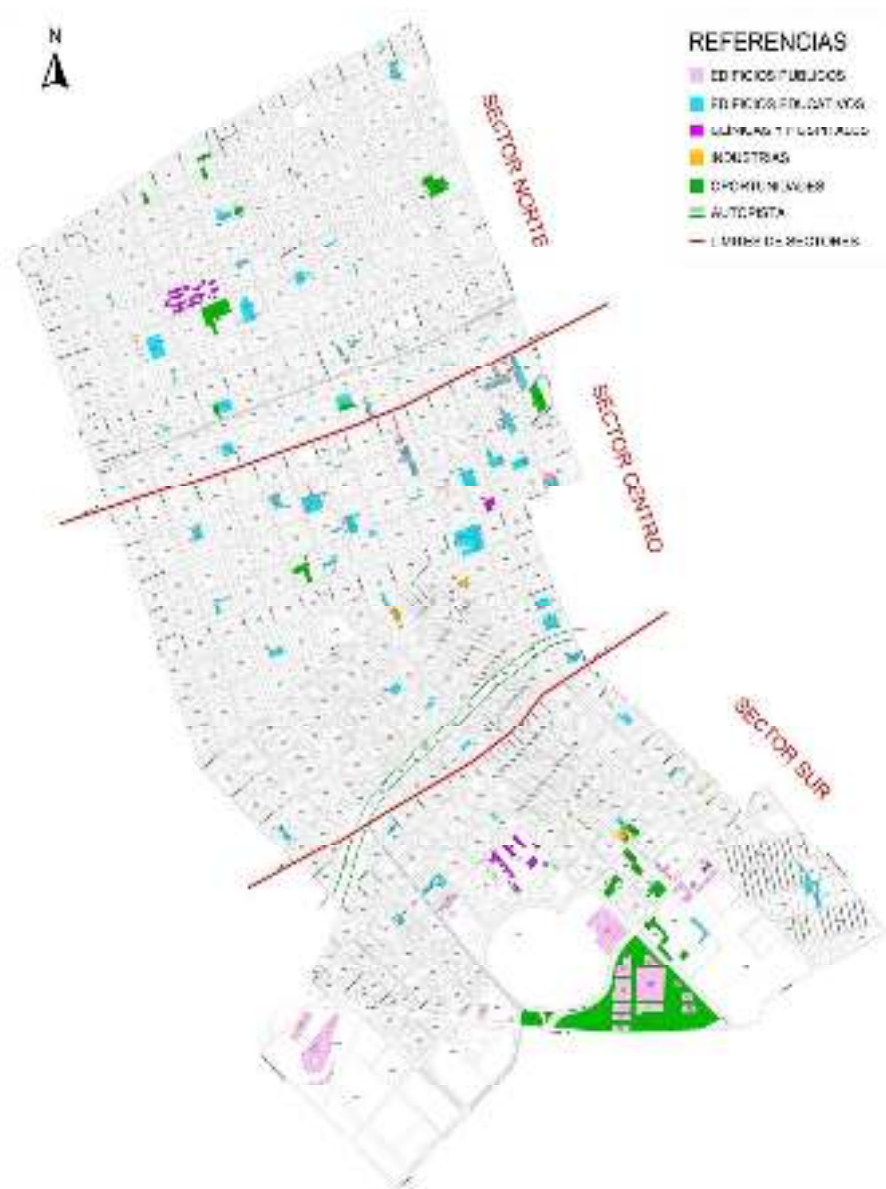
También, se evalúa qué tipos cubiertas existen en el barrio, y la de mayor proporción son las de cubierta plana (5) en un 60%. Las de menor proporción son las de cubiertas shed (3) y cubiertas a un agua (4). Las proporciones medias son las del 24 % de cubiertas tipo a dos aguas (2) y en un 10% de cubierta cañón (1).

TIPO DE CUBIERTAS	1	2	3	4	5	TOTAL
	11	26	3	4	65	109
	<b>10%</b>	<b>24%</b>	<b>3%</b>	<b>4%</b>	<b>60%</b>	<b>100%</b>

Tabla 2: Porcentaje de tipo de cubierta según su forma volumétrica (sección)

## RESULTADOS OBTENIDOS

El relevamiento arrojó como resultado que, de las 516 manzanas existentes en el barrio de Flores, 64 de ellas (el 12.40%) tienen superficies disponibles para captación solar. Siendo el 1% de uso hospitalario y clínicas, 2% de uso industrial, el 36% corresponde a terrenos libres, el 30% a edificios públicos, el 9% a lotes vacantes u ociosos y finalmente el 22% son edificios educativos. (Figura 4).



*Figura 4 – Plano del Barrio de Flores en donde se definen los 3 sectores y se vuelcan las superficies disponibles relevadas de acuerdo al uso de los edificios. Elaboración propia.*

En relación a los tres sectores en que se ha dividido el barrio de Flores, el sector Norte se caracteriza principalmente por contar con edificios escolares y sectores ociosos de oportunidad, mientras que el Sur tiene una alta concentración de superficies de terreno libre y edificios públicos. El sector Central se destaca por tener la mayor parte de cubiertas industriales. En la zona Norte y en la zona céntrica de Flores se dispone de superficies de tamaños semejantes mientras que, en la zona Sur, al ser una zona de menor densidad habitacional, existen superficies de captación solar de mayor tamaño.

Por lo tanto, si sumamos todas las superficies en planta relevadas, de acuerdo a lo analizado anteriormente, se obtiene una superficie disponible de 285.079 m<sup>2</sup>. A esto le debemos sumar 3.079 metros lineales de la autopista, duplicarse al considerar cada borde, y multiplicar por una altura de 0,992 m (dimensión de un panel solar promedio), dando como resultado una superficie útil de 6.109 m<sup>2</sup>. Entonces la superficie total disponible es de 291.188 m<sup>2</sup>.

Con el fin de obtener una superficie real estimada para la generación de energía en base solar, corresponde aplicar una reducción de un 20% a la superficie disponible debido al espacio extra que requiere el mantenimiento de los módulos y la separación entre ellos para evitar sombras (Amado y

Poggi, 2012). Por lo tanto, la superficie disponible útil para la captación solar en el barrio de Flores es de 232.945 m<sup>2</sup>.

Con el objeto de dimensionar el potencial de producción energético, y a que refiere esta superficie obtenida, tomamos como parámetro la carta de distribución anual del promedio de la irradiación solar global acumulada sobre superficie plana; que en la zona del barrio de Flores es de 1.5 MWh/m<sup>2</sup> (Grossi Gallegos y Righini, 2007). Consecuentemente, la energía aprovechable sobre la superficie disponible es de 349.417,50 MWh.

De acuerdo al estudio del consumo energético en la Ciudad de Buenos Aires desarrollado por CEDEM (Centro de Estudios para el Desarrollo Económico Metropolitano), la Dirección General de Estadística y Censos del Ministerio de Hacienda y el Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires (Informe de Resultados 736, Julio 2014), un habitante de esta ciudad consume por año 1,6 MWh; mayor al indicador promedio del país 0,9 MWh por habitante. Esto se debe a que en Buenos Aires conviven con el uso residencial permanente actividades diurnas de producción y trabajo que incrementa el consumo relativo del que habita la ciudad.

Según el CEDOM (Centro de Documental de Información y Archivo Legislativo) el Barrio de Flores posee 142.695 habitantes. Consecuentemente y considerando los índices que fueron detallados en el párrafo previo se obtiene que la demanda energética promedio del Barrio es 228.312 MWh anual.

Finalmente, y con la necesidad de abastecer la demanda eléctrica del caso de estudio se calcula la cantidad de paneles fotovoltaicos que cabrían en la superficie disponible. Teniendo en cuenta paneles de 320Wp - elegidos como ejemplo para este cálculo dentro de las opciones en mercado actual - cuya superficie es 1.94 m<sup>2</sup>, la cantidad de paneles asciende a 120.053 unidades. Luego, se consideran las horas solar pico para Buenos Aires (3,3 HSP) y el rendimiento del sistema (0,6) (Quadri, 2003) para determinar la energía generada. Entonces el valor obtenido para ésta es de aproximadamente 27.764 MWh por año. Esta energía equivale al 12% de la demanda energética residencial anual del barrio de Flores.

## **CONCLUSIONES**

Los resultados expuestos en este trabajo indican que, a partir del recorte de un área de estudio de la Ciudad de Buenos Aires, es posible generar información sistematizada del potencial que existe en la forma urbana y las superficies expuestas a la radiación solar de ser aprovechadas para la generación de energías renovables.

Por otra parte, aún falta concientizar a las autoridades, entes de aplicación de códigos locales y planificadores urbanos y a su vez mostrar herramientas simples para la verificación de este potencial energético.

También se deberían incorporar en Códigos de Planeamiento y Edificación variables de producción energética y condiciones vinculadas al “derecho al sol”, para que en un futuro se puedan proponer legislaciones al respecto y desarrollar ciudades más sostenibles.

Este trabajo es parte de un proyecto de Investigación financiado por la Secretaría de Investigación y Desarrollo de la Universidad de Flores, sobre el aprovechamiento del recurso solar para la potencial producción de energías renovables, que se encuentra en fase inicial.

Los pasos siguientes llevarán a focalizar las superficies relevadas y considerar las obstrucciones reales existentes que afectan a cada caso y la incidencia de sombras recibidas por volumetrías propias y del entorno. De este modo, se podrá sistematizar y definir con precisión el potencial de generación energético real.

## **REFERENCIAS**

- Amado, M; Poggi, F; [en línea] (2012) Towards solar urban planning: a new step for better energy performance. Energy Procedia 30, 1261-1273; Dirección URL: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1876610212016554?token=0DCCEEEACEE410DEB1DC50A6434F316AE9FBF78FCC6E18F4B5A8F991DEC66246C18EE842725627AFFD75D2D52ACCD81> [consulta: Abril 2016].
- Mesa, A; Giusso, C; Galvez, D; (2013) Potencial solar urbana: Análisis de la incidencia de los Marcos Normativos, en Ciudades de escala media Argentinas. Acta de la XXXVI Reunion de Trabajo de la Asociacion Argentina de Energias Renovables y Medio Ambiente Voll. Pp.01.125-01.132; ISBN: 978-987-29873-0-5.
- Araya -Muñoz,D; Carvajal, D; Sáez-Carreño, A; Bensaid,S; Soto-Márquez, E; (2014) Assessing the solar potential of roofs in Valparaíso -Chile” Elsevier B.V. Energy and Buildings, Vol 69, pp 62-73, ISSN: 0378-7788.
- Código del Planeamiento Urbano - Ciudad Autónoma de Buenos Aires, (2017).
- Código Técnico de Edificación (CET) (2006) Real Decreto 314/2006. – Madrid.
- Gómez, N; Higuera, E; Ferrer y Arroyo, M; [en línea] (2017) Herramientas de evaluación del potencial energético y optimización solar en el planeamiento de las áreas urbanas. Trienal de Investigación FAU UCV 2017, Caracas. ISBN: 978-980-00-2879-7. Dirección URL: [http://trienal.fau.ucv.ve/2017/publicacion/articulos/AS/extenso/TIFAU2017\\_Extenso\\_AS-03\\_NGomez.pdf](http://trienal.fau.ucv.ve/2017/publicacion/articulos/AS/extenso/TIFAU2017_Extenso_AS-03_NGomez.pdf) [consulta: Abril 2016]
- Grossi, H; Righini, R; (2007) Atlas de energía solar de la República Argentina. Argentina, APF suma.
- IRENA [en línea] (2016) Renewables Energy in Cities. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, Dirección URL: [https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA\\_RE\\_Statistics\\_2016.pdf](https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Statistics_2016.pdf) [consulta: 26 de Junio 2019]
- Knowles R.L., (1981) Sun, Rhythm and Form. The MIT Press, Massachusetts.
- Miguel, S; Mora, F; Figueira, A; Faggi A; Fernández, E; (2017) Herramientas urbanas y ambientales que contribuyen a definir el modelo de Macromanzana para Buenos Aires. Acta de la XL Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente Voll. Pp.01.125-01.132; ISBN: 978-950-605-862-3.
- Solar Easement Law [en línea] (1978) Civil Code, section 801 – 801.5 – U.S.A. Dirección URL: <http://www.statesadvancingsolar.org/policies/policy-and-regulations/solar-access-laws>. [Consulta: Enero 2018]
- Viegas, G; (2011) Desarrollo metodológico a partir de mosaicos urbanos para evaluar la eficiencia energética el aprovechamiento de la energía solar en el marco de la sustentabilidad urbana. Ambiente Construido, Porto Alegre, v11, pp. 139-155. ISSN 1678-8621
- Wall, M; Probst, M.C.M.; Roocker, M.C.; Dubois, M; Horbat, M; Jorgensen, O.B, Kappel, K; [en línea] (2012) Achieving solar energy in architecture-IEA SHC Task 41; Energy Procedia, vol.30, pp. 1250-1260, Dirección URL: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1876610212016542?token=6BBA2154E090F2203D24DF6AA8CC92A87313572C83C63BBD4F4B2D14FF6A7EC1E28D0DCE4AA286ECB13974B40877A728>
- Quadri, N; (2003) Energía Solar. Alsina. Buenos Aires, Alsina. ISBN 950-553-11-7
- Aumento de tarifas residenciales del servicio de energía eléctrica. Análisis del posible impacto en escenarios alternativos. Informe de Resultados 736 - Julio 2014 - Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires. [En línea]. Dirección URL: [https://www.estadisticaciudad.gob.ar/eyc/wp-content/uploads/2015/04/ir\\_2014\\_736.pdf](https://www.estadisticaciudad.gob.ar/eyc/wp-content/uploads/2015/04/ir_2014_736.pdf) [consulta: Junio 2019]
- Anuario Estadístico 2017- Dirección General de Estadística y Censo Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires - Ministerio de Economía y Finanzas. [En línea]. Dirección URL: [https://www.estadisticaciudad.gob.ar/eyc/wpcontent/uploads/2018/10/anuario\\_estadistico\\_2017.pdf](https://www.estadisticaciudad.gob.ar/eyc/wpcontent/uploads/2018/10/anuario_estadistico_2017.pdf). [Consulta: 26 de junio 2019]
- Sisol. Sistema de Información Solar Salta. Gobierno de la Provincia de Salta. Ministerio de Producción, Trabajo y Desarrollo Sustentable. Secretaría de Energía <http://sisol.salta.gob.ar/>
- Naciones Unidas. (2019). Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. eISBN: 978-92-1-047889-2, ISSN: 2521-6899, ISSN: 2521-6902.

IRAM 11.601, Acondicionamiento térmico de edificios – Método de cálculo, 2002. IRAM 11.603, Acondicionamiento térmico de edificios – Clasificación bioambiental de la República Argentina, 1996. IRAM 11.604, Acondicionamiento térmico de edificios – Verificaciones de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en calefacción. Coeficiente Volumétrico G de Pérdidas de calor. Cálculo y valores límites, 2002. IRAM 11.605, Acondicionamiento térmico de edificios – Condiciones de habitabilidad en edificios, 1996.  
IRAM AADL J20-06 Norma Nacional niveles de iluminancia. 1972

**METHODOLOGY TO DETERMINE THE RENEWABLE ENERGY GENERATION  
POTENTIAL, FROM SOLAR BASE TO URBAN SCALE. STUDY CASE: FLORES  
NEIGHBORHOOD - BUENOS AIRES CITY**

**ABSTRACT** A methodology to take advantage of urban solar energy potential for renewable energy production is proposed. Flores neighborhood is chosen as a study case in the City of Buenos Aires. From the survey of land use, urban form and roofs' typologies (plan and section), the available areas are estimated in a theoretical way. The results show that this area has 232.945 sqm of useful nonresidential surface and receives 349.417,50 MWh average of global solar irradiation accumulated per year. It could supply 12% of the energy demand of the residential sector of Flores. This study could contribute to sustainable urban planning and incorporate new variables when applying urban planning codes.

**Keywords:** Solar radiation, urban development, renewable energy

## **RED INTERNACIONAL EN BIOMASA Y BIOENERGIA: RESULTADOS, APRENDIZAJES Y PROPUESTA DE EVALUACION**

**Silvina M. Manrique<sup>1</sup>, Verónica Javi<sup>2</sup>, Florencia Villafañe<sup>3</sup>, Camila Binda<sup>1,4</sup>, Aien Salvo<sup>1</sup>, Silvina Ontiveros<sup>1</sup>, Beatriz Balderrama<sup>1</sup>, Ricardo Caso<sup>1</sup> y Martín Honorato<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad Nacional de Salta (UNSa). Avenida Bolivia 5150, A4408FVY Salta, Argentina. Tel: +54 387 4255424/ Fax +543874255439. Email:

[silmagda@unsa.edu.ar](mailto:silmagda@unsa.edu.ar)

<sup>2</sup>Departamento de Física, Fac. Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta. E-mail:

[veroja@gmail.com](mailto:veroja@gmail.com)

<sup>3</sup>Ministerio de Ambiente de la Provincia de Jujuy. República de Siria 150, Y4600, San Salvador de Jujuy, +543884249261. flo\_a8@hotmail.com

<sup>4</sup>Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Salta (Ciunsa), Universidad Nacional de Salta (UNSa). Avenida Bolivia 5150, A4408FVY. [camilabindag@gmail.com](mailto:camilabindag@gmail.com)

<sup>5</sup> Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agroforestal Esquel. Chacabuco 513, Esquel, Chubut, Argentina. Tel: (02945) 451558/453515. E-mail: [honorato.martin@inta.gob.ar](mailto:honorato.martin@inta.gob.ar)

*Recibido 16/08/19, aceptado 22/10/19*

**RESUMEN:** La Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural, trabaja para promover el uso y manejo eficiente de la biomasa sólida y su valorización energética térmica en el ámbito rural y urbano-marginal iberoamericano, poniendo a disposición de la Región los avances tecnológicos fundamentales que podrían aportar a la construcción de comunidades y territorios más resilientes frente al cambio climático. Como cualquier otro tipo de organización, debe dotarse de mecanismos de autoevaluación – sin excluir procesos evaluativos externos- que permitan identificar la trayectoria, redireccionar las metas y promover mejoras continuas que aseguren una cada vez mayor fluidez en la comunicación de la ciencia. En este artículo se sistematiza la experiencia del primer año de funcionamiento de la Red, y se desarrolla una propuesta metodológica que facilitará monitorear su evolución futura y evaluar el grado de impacto en la sociedad civil a la que se pretende alcanzar. La propuesta incluye aspectos evaluativos sobre la comunicación de la ciencia y trabajo colaborativo científico. El propósito último es propiciar un efecto multiplicativo en la Región, incentivando el interés en energías renovables y promoviendo el trabajo sinérgico -con base en las nuevas tecnologías de información y comunicación- para un sustentable desarrollo territorial.

**Palabras clave:** red temática, tecnologías de biomasa, sistemas bio-energéticos, auto-evaluación, comunicación científica, enfoque sistémico.

### **INTRODUCCIÓN**

#### *Importancia de biomasa y bioenergía en la realidad Iberoamericana*

En Iberoamérica, más de 21 millones de personas siguen en el 2018 sin tener acceso a la energía y la región consumirá un 80% más de energía en 2030 (IRENA, 2018). La matriz energética actual solo tiene un 25% de participación de fuentes renovables, por lo que aún queda un gran camino para sustituir la principal fuente energética que sigue siendo el petróleo (IRENA, 2018). Sin embargo, el mayor problema en Iberoamérica no es el colapso de la extracción del petróleo o la penetración de las energías renovables –ER-, sino la cantidad de personas que siguen sin tener acceso directo a servicios modernos de energía, principalmente aquellos que viven en zonas rurales. Es aquí donde la biomasa y la bioenergía cobran mayor relevancia. La lucha contra la pobreza y la desigualdad implica necesariamente enfrentar el desafío de mejorar las condiciones de vida y calidad del trabajo en el medio rural, sector en el que las actividades agrícolas y ganaderas generan el 60% de sus ingresos



(Berdegué et al., 2000). Y es precisamente en este sector, donde la existencia de biomasa sólida en sus distintas formas y grados de transformación (residuos agrícolas, pecuarios, forestales y derivados de industrias de procesamiento de dichas producciones), resulta una fortaleza. La valorización energética de biomasa sólida permitirá mejorar la calidad de vida de los ciudadanos convirtiendo residuos en recursos, obtenidos generalmente con bajo o ningún costo. Por otro lado, la quema de biomasa por incendios es una práctica común en Latinoamérica, generadora de gases efecto invernadero (GEIs), la mayor fuente de contaminación atmosférica a escala continental y principal factor de afección en familias rurales que dependen de leña y otros recursos de biomasa (López et al., 2014). La necesidad de incentivar el uso de las energías renovables, junto a tecnologías apropiadas y medidas de eficiencia energética, es algo que no escapa a ningún gobierno de la Región Iberoamericana.

#### *Realidad compleja y redes temáticas*

El establecimiento de alianzas y asociaciones con otras organizaciones con las que compartir y negociar objetivos, políticas y estrategias, abandonando estructuras tradicionales, altamente jerarquizadas, rígidas y aisladas, son una tendencia moderna (Gairín et al., 2012). Se requiere que personas, empresas, organizaciones e instituciones trabajen y aprendan en red y comunidad donde, a través de diálogos activos, se generen nuevos conocimientos y se promuevan procesos de innovación (Ceballos, 2008). Así pues, la creación de redes interinstitucionales se vislumbra como una estrategia excelente para impulsar la investigación y el desarrollo de innovaciones en el contexto iberoamericano, como una de las vías de sociabilización de conocimientos y experiencias, descentralización de la información y oportunidad de reflexión sobre las propias prácticas, todo lo cual resulta fundamental dada la complejidad inherente a los fenómenos territoriales actuales y más aún en un marco de cambio climático. El concepto de *red*, no es más que un sistema de elementos o nodos interconectados. La esencia metodológica del modelo implica una manera de actuar y trabajar, similar a una tela de araña, donde todos los involucrados son elementos de esa tela, conectados a través de una relación, nodo, o método de actuación consensuada, con propósito compartido y bases establecidas que garantizan el proceso de intervención y el éxito de la intención de la red (Vidal Ledo et al., 2011). En el trabajo colaborativo en red, las nuevas tecnologías de información y las comunicaciones (TICs) y más recientemente las nuevas herramientas que ofrece la web, juegan un rol fundamental (Jardines Méndez, 2006). Las TICs promueven nuevos espacios virtuales de intercambio, de formación, de gestión del conocimiento y estrategias de trabajo e incluso de diversión y uso del tiempo libre. Se trata de una nueva dimensión formativa que está cambiando los tradicionales medios de enseñanza en herramientas para el aprendizaje, así como la propia dinámica y comunicación del proceso (Vidal Ledo et al., 2011). Familiarizarse con estas herramientas supone un desafío importante, pero abre puertas de oportunidad antes impensadas. En los resultados de este artículo se muestran cómo se incorporaron muchas de estas nuevas herramientas de información y comunicación y los logros alcanzados a partir de su utilización.

#### *Conformación de una Red Iberoamericana en Biomasa y Bioenergía*

En el marco del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), las redes temáticas son asociaciones de grupos de investigación y desarrollo (I+D) de entidades públicas o privadas y empresas de los países miembros del Programa, cuyas actividades científicas o tecnológicas están relacionadas dentro de un ámbito común de interés. Tienen como objetivo principal el intercambio de conocimientos entre grupos de I+D y la potenciación de la cooperación como método de trabajo (CYTED, 2019). Dentro de este Programa, ha nacido “ReBiBiR (T): la Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural”, conformada por universidades, centros de investigación, entidades de la administración pública y empresas, que sincronizan esfuerzos para la innovación científica y el desarrollo tecnológico, como base para la promoción de “sistemas bioenergéticos” (SBEs) integralmente más sustentables a nivel territorial. Dada la escasa participación de esta fuente renovable en las matrices energéticas de los países de Iberoamérica, sumado a la alta potencialidad de los recursos existentes, el nacimiento de esta Red encuentra particular importancia. Como cualquier otro tipo de organización, ReBiBiR debe dotarse de mecanismos de autoevaluación, que no excluyan procesos de evaluación externa, y que permitan identificar posibles disfunciones, facilitar los procesos de toma de decisiones y promover mejoras continuas que aseguren una efectiva comunicación de la ciencia (Gairín et al., 2012). Los procesos evaluativos que propone ReBiBiR, parten de un modelo de evaluación orientada hacia la mejora: verificar el grado de desarrollo, detectar

cómo conviene mejorar, introducir los cambios pertinentes y reorientar el rumbo. El reto es, sin duda, aumentar su impacto y llegada al medio, hacia los diferentes sectores sociales (académicos, educativos, empresariales, sociedad civil) a fin de que los logros alcanzados puedan ser compartidos, profundizados y/o re-aplicados -con un ajuste flexible a la realidad en la cual buscan ser implementados-. Por tanto, el objetivo de este trabajo es, por un lado, sistematizar la experiencia de trabajo de ReBiBiR en su primer año de vida, describiendo el enfoque, las bases de partida y los primeros resultados logrados. Por otro lado, se propone y desarrolla un mecanismo creativo de autoevaluación de la Red, pero que puede resultar de aplicación a cualquier otra organización o estrategia organizativa existente. La propuesta incluye aspectos evaluativos sobre a) la comunicación de la ciencia y b) trabajo colaborativo científico, y fue aplicada a ReBiBiR. Se observa la validez del esquema metodológico propuesto y se define el punto de partida de la Red, a fin de posibilitar el monitoreo de su movimiento en los años subsiguientes. El entendimiento común de ReBiBiR es que la ciencia es comunicación y que la ciencia es colaboración. Desde ambas perspectivas, se busca poner a disposición los aprendizajes logrados a fin de resultar una experiencia motivadora de trabajo en nuevas redes, que generen un movimiento multiplicativo en la promoción de fuentes renovables de energía y en general, de la Agenda inclusiva mundial de los Objetivos de Desarrollo Sustentable (PNUD, 2015).

### **PUNTOS DE PARTIDA DE REBIBIR**

#### *Objetivos, enfoque y elementos distintivos*

ReBiBiR (T) está integrada por 15 grupos de 9 países de Iberoamérica: Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Cuba, España, Paraguay y Perú, con alrededor de 100 participantes entre investigadores y técnicos (<http://www.cytmed.org/content/719rt0587-integrantes>). El periodo inicial de la Red bajo la cobertura de CYTED es de 4 años, con proyección a continuar con nuevo financiamiento. El objetivo general que se persigue es promover el uso y manejo eficiente de la biomasa sólida y su valorización energética térmica en el ámbito rural (AR) y urbano-marginal (UM) iberoamericano, poniendo a disposición de la Región los avances tecnológicos fundamentales que podrían aportar a la construcción sinérgica de comunidades y territorios más sustentables y resilientes frente al cambio climático. Como objetivos específicos se plantean:

- Gestionar la información y conocimiento generados en la Región para el manejo eficiente de recursos de biomasa sólida para bioenergía con fines térmicos en AR-UM, que puedan ser utilizados como insumos para la implementación de SBEs exitosos en Iberoamérica.
- Analizar y difundir desarrollos tecnológicos de la región (de producto, proceso o de organización-TPPO-), para manejo, acondicionamiento y/o generación de energía térmica desde biomasa sólida en AR-UM, incluyendo escala doméstica, comunitaria y pequeñas industrias de procesamiento de recursos biomásicos sólidos, observando resultados de adopción en el terreno, re-aplicabilidad y permanencia;
- Identificar mejores prácticas para la implementación de SBEs, desde una perspectiva holística de abordaje, e incluyendo asimismo aportes a nivel de manejo de recursos; manejo de tecnologías; mecanismos de participación y transferencia (MPT); políticas, marcos institucionales y esquemas de financiamiento (PIEF).
- Potenciar el capital natural, humano y tecnológico de Iberoamérica, mediante la identificación de líneas futuras de trabajo conjunto y mecanismos y esquemas de intercambio y difusión, que permitan lograr un movimiento sinérgico en la promoción del uso y valorización de biomasa con fines térmicos y construcción de comunidades y territorios más sustentables.

Esta Red propone realizar aportes desde un enfoque sistémico, que parte del reconocimiento de que las tecnologías no son autónomas, externas, ni independientes de su contexto social. Por tanto, el desarrollo tecnológico es fruto de la interacción constante entre aspectos técnicos y sociales, resultando una unidad compleja o sistema socio-técnico que incluye materiales, artefactos, energía, agentes que la transforman, aspectos organizativos, el ámbito de los valores y de la cultura (Thomas et al., 2012). Se incluyen por tanto en la Agenda de Trabajo a las tecnologías TPPO (fenómenos, herramientas, instrumentos, máquinas, organizaciones, técnicas, sistemas, habilidades, métodos, procedimientos, rutinas, etc.) que pueden aportar al desarrollo de SBEs más sustentables. Por ello el acrónimo que nos identifica incluye una (T) que pretende destacar la importancia de las tecnologías en el trabajo de la Red -desde el enfoque mencionado-, pero la deja silenciosa al ser incluida entre

paréntesis, facilitando su pronunciación y memoria de identidad. La Tabla 1 resume elementos distintivos que orientan el trabajo de la Red.

Recursos	Aplicación	Sector
Biomasa sólida (con o sin transformación)	Fines térmicos o aplicaciones combinadas	Áreas rurales o urbano-marginales
Escala	Procesos	Actores
Doméstica, comunitaria, pequeñas industrias	Físico-mecánicos, termo-químicos, químicos	Investigadores, técnicos, empresarios, autoridades, comunidades, estudiantes

Tabla 1. Elementos que definen el foco de trabajo de ReBiBiR.

Los SBEs o también llamadas “cadenas bio-energéticas” (CBEs), entendidas como las diferentes cadenas de aprovechamiento de recursos de biomasa que pueden desarrollarse en los territorios, involucran una serie de eslabones que van desde la producción del recurso, al procesamiento, gestión y aplicación del mismo (Manrique, 2017), por lo que cualquier aporte en dichos eslabones son puntos de interés para ReBiBiR (T). El punto de partida para el abordaje de las CBEs, es el reconocimiento de su complejidad, diversidad y especificidad en cada contexto territorial particular en el cual se despliegan.

### Estrategia metodológica y organizativa

Los aportes de la Red se organizan en cuatro pilares temáticos (Fig.1) que construyen las CBEs y que tienen que ver con las áreas en que cada Grupo de la Red tiene experiencia:

I. Recursos: metodologías, herramientas, procedimientos vinculados con relevamiento de biomasa sólida; cuantificación de existencias; caracterización físico-química; estimación de potencial bio-energético; criterios de restricción de uso de biomasa.



Figura 1. Esquema conceptual y metodológico del enfoque de la Red. Se observan los 4 pilares que constituyen el esqueleto desde el cual ReBiBiR realiza sus aportes a la Región.

II. Tecnologías: desarrollos tecnológicos o innovaciones para acondicionamiento de biomasa (secado, densificación, otros) y para aprovechamiento energético térmico (para cocción, calefacción, agua caliente, calor de proceso); procesos de conversión (combustión, gasificación, pirólisis, otros); relevamiento de tipos de productos (calderas, parrillas, pequeños reactores); esquemas de construcción; técnicas de estimación de rendimientos; procedimientos de diseño; rutinas y modelos de simulación y otros para escala doméstica y pequeñas industrias.

III. Mecanismos de participación y transferencia (MPT): identificación de técnicas y estrategias participativas exitosas para la puesta en marcha de CBEs rurales; esquemas de inclusión; enfoques de equidad de género; mecanismos de accesibilidad y apropiación; experiencias de adaptabilidad al usuario y contexto territorial.

IV. Políticas, marcos institucionales y esquemas de financiamiento (PEF): marcos normativos, mecanismos de promoción e inclusión; figuras cooperativas y asociativas; ordenamientos institucionales; pautas de integración vertical y horizontal.

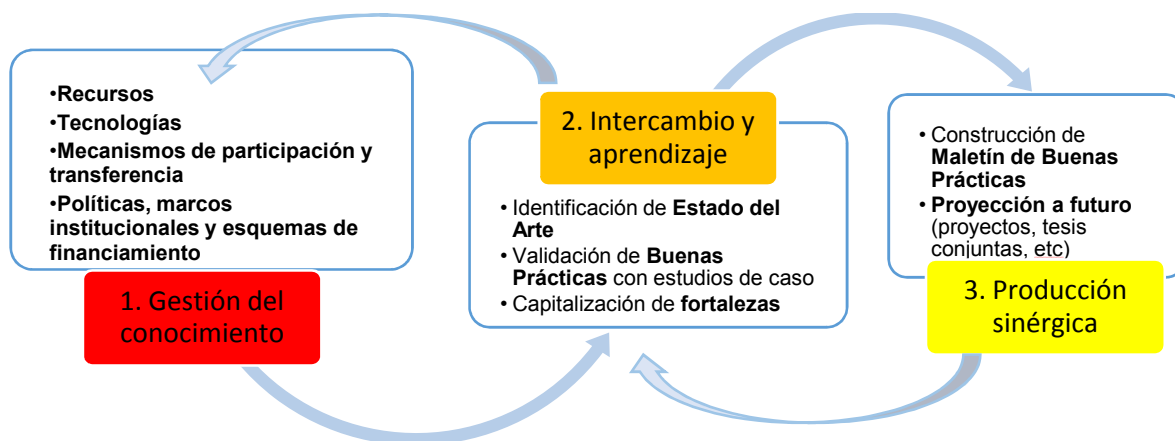


Figura 2. Esquema metodológico de la Red.

La Red despliega su trabajo en tres etapas que se retroalimentan de manera permanente y que se muestran en la Fig.2. Desde el enfoque multidisciplinar y know-how de cada uno de los miembros, se trabajará de manera continua en la construcción de un Maletín de Buenas Prácticas ( $M_{BP}$ ) en TPPO, que promueva soluciones acordes para las necesidades de la población rural y contribuya a la creación de oportunidades en aquellas zonas más desfavorecidas. Se promueve un marco normativo e institucional favorecedor de la igualdad de acceso a las soluciones propuestas y al manejo de sus recursos.

### PROPUESTA DE AUTO-EVALUACION DE LA RED

Los mecanismos de evaluación propuestos se configuran en tres niveles. Los dos primeros niveles, tienen que ver con el propósito de **comunicación de la ciencia** (en el primer caso, si bien será una herramienta de verificación del Programa CYTED, a su vez implica que ciertas actividades científico-técnicas serán desarrolladas). El tercer nivel tiene que ver, en cambio con lograr un **trabajo colaborativo y una verdadera sinergia científica**. Ellos son:

- Primer nivel (PNE). Hacia el Programa CYTED. Es el organismo que promueve y financia el funcionamiento de la Red y por tanto, definimos hitos de cumplimiento que puedan ser fácilmente verificables.
- Segundo nivel (SNE). Hacia la comunidad iberoamericana.
- Tercer nivel (TNE). Hacia adentro de la Red.

#### *Primer nivel de evaluación del funcionamiento de la Red*

Los indicadores de monitoreo propuestos se pueden clasificar en 2 grupos: a) los de *acción* y b) los de *producción*. Para el primer grupo, se definieron los hitos fundamentales a cumplir durante el primer cuatrienio de la Red. Para el segundo grupo se considerarán sub-indicadores graduales y finales. Los de producción gradual incluirán: i) el número de publicaciones escritas (artículos, libros, capítulos, comentarios), ii) el nº de publicaciones orales (congresos, charlas, jornadas), iii) nº de actividades de formación y capacitación realizadas (dentro y fuera de la Red). Para evaluar el avance, fue necesario definir un umbral del potencial alcanzable en 4 años, lo cual se realizó en base a una consulta individual a cada uno de los grupos. Los de producción final consistirán en: desarrollo y evolución de la plataforma web, con todos los elementos delineados a lo largo de esta propuesta y el  $M_{BP}$ . Este último quedará disponible en la Plataforma, junto al listado de los grupos y organizaciones relevadas a lo largo del desarrollo de la Red.

#### *Segundo nivel de evaluación del funcionamiento de la Red*

Desde el punto de vista de su influencia en el medio, el interés no está puesto en ganar popularidad u obtener reconocimiento particular con una marca, sino por el fin último perseguido que es lograr que otros actores y sectores de Iberoamérica puedan apropiarse de las herramientas del  $M_{BP}$  que se irá construyendo a lo largo de los años: es decir, lograr la comunicación efectiva de la ciencia. Por tanto, el hecho de que más personas conozcan el perfil de ReBiBiR, implicará un impacto cada vez mayor en esta difusión del conocimiento y tecnologías seleccionadas. En este sentido, nuestra propuesta se

sustentó en definir un punto de partida de nuestro *perfil público*, desde dos estrategias. La primera, analizando nuestra página web mediante el empleo de herramientas web que nos permitirán mejorar nuestra influencia en la comunidad virtual y por tanto, en actores y sectores vinculados a SBES iberoamericanos. Las herramientas de análisis fueron:

- Nibbler: permite evaluar accesibilidad, experiencia de usuario, marketing y tecnologías.
- Hubspot grader: permite evaluar rendimiento, optimización móvil, optimización SEO (Search Engine Optimization, o proceso de mejorar la visibilidad de un sitio web en los diferentes buscadores) y seguridad del sitio web.
- Woorank: permite evaluar SEO, móvil, usabilidad, tecnologías, errores de rastreo, redes sociales, presencia local, visitantes.

La segunda estrategia se basó en la construcción de un Índice de Imagen Pública (IIP) (Tabla 2) a partir del estudio de tres indicadores. Se definió un rango de medición de cada uno de ellos, pero la propuesta para años subsiguientes es verificar las tendencias y re-dimensionar la escala si resultara necesario. La escala propuesta se estandarizó asignando los valores 0, 5 y 10, según si los resultados se encontraron en el nivel de difusión (básico), de impacto (intermedio) o de multiplicación. Estos 3 indicadores fueron combinados dentro del IIP (Ecuación 1), pudiendo sumar un total máximo de 30 puntos, y multiplicándolo por 100, para llevarlo a una escala de fácil interpretación. Los indicadores fueron:

- I1. Conocimiento de la red por parte del público: nº de visitas al sitio web o canales sociales (Wordpress, Youtube, Facebook). La escala de evaluación fue 0-50/ 51-250/ >250 visitas.
- I2. Número de consultas desde miembros externos a la Red. Consultas o contactos de interesados a los correos electrónicos o telefónicos. Escala: 0-10/11-50/>50 contactos.
- I3. Número de asistentes a los webinarios/capacitaciones/talleres. Registro de inscripciones en GoToWebinar. Escala: 0-10/11-50/>50 interesados.

Índice de Imagen Pública (IIP)	Ec	Índice de Sinergia y Colaboración (ISC)	Ec
$IIP(\%) = \sum \left( \frac{I1 + I2 + I3}{30} \right) \times 100$	(1)	$ISC(\%) = \sum \left( \frac{C1 + C2 + C3 + C4 + C5}{50} \right) \times 100$	(2)

Tabla 2. Índices propuestos para el segundo (izquierda) y tercer nivel de evaluación (derecha)

#### Tercer nivel de evaluación del funcionamiento de la Red

La evaluación en este caso, apunta hacia adentro de la Red. Una red implica necesariamente la existencia de las 5 C, que consideramos clave para un exitoso trabajo en equipo (Gavilán, 2009):

- Coordinación: trabajar de manera coordinada requiere realizar acuerdos que permitan sumar conocimiento y lograr consensos que enriquezcan a la comunidad iberoamericana.
- Complementariedad: trabajar en forma complementaria significa reconocer que cada integrante es experto en determinados saberes y prácticas y que todos son necesarios para poder dar respuestas integralmente valiosas en los territorios.
- Comunicación: la circulación de la información, la comunicación abierta entre todos los integrantes del equipo y el resguardo de los espacios de encuentro para garantizarla, es esencial para poder coordinar las distintas actuaciones individuales.
- Compromiso: el compromiso de los integrantes de un equipo para con la tarea, es un indicador de su participación en la definición de la tarea común, de la valorización mutua de los saberes y la confianza en las prácticas que realiza cada uno para lograr el objetivo de la Red.
- Confianza: la confianza entre los integrantes y en sus habilidades, basada en los acuerdos compartidos y sostenida en la mirada conjunta de la tarea a realizar, es esencial para alcanzar los objetivos y es fácil observarla en la centralidad que la tarea tiene para sus integrantes por oposición al protagonismo de las individualidades.

Sobre esa base, se definió un Índice de Sinergia y Colaboración (ISC) (Tabla 2), construido a partir de los siguientes indicadores:

- C1. Coordinación. Número de proyectos generados de manera coordinada en la red. Proyectos en donde participan por lo menos 2 grupos de la red. Escala: 1-3/4-10/>10 proyectos conjuntos.

- C2. Complementariedad. Número de publicaciones conjuntas o derivadas del trabajo en red (artículos de divulgación científica-técnica, eventos, informes, ponencias orales, posters). Escala: 1-10/ 11-30/>30 publicaciones conjuntas.
- C3. Compromiso. Número de tesis-becas grado/postgrado conjuntas. Tesis donde participan por lo menos 2 miembros de distintos grupos de la red. 1-3/4-10/>10 tesis, becas, pasantías conjuntas.
- C4. Comunicación. Número de socios que asisten a las actividades presenciales y virtuales de la Red, siendo 15= 100%. Escala 1-4/5-9/10-15.
- C5. Confianza. Este indicador no representa una sola dimensión sino que resulta de la combinación de varios factores: i) evaluación desde los miembros sobre el funcionamiento de la red; ii) identificación clara de los grupos y sus responsables por parte del resto del equipo; iii) percepción personal de pertenencia a la Red; iv) disposición de cada grupo para incorporar otros grupos a su proyecto y/o viceversa; v) percepción de evolución futura de la red. En este caso, el I5 no será estimado en esta instancia, sino al cerrar el primer año completo de trabajo de la Red, mediante una consulta individual a los integrantes. Se asigna valor 0.

## RESULTADOS

### Primer nivel de evaluación del funcionamiento de la Red (PNE)

Se definieron los indicadores de seguimiento para el subgrupo “indicadores de acción” que se resumen con una asignación temporal mediante un diagrama de Gantt en la Fig.3. Los dos primeros hitos han sido cumplidos y el tercero se cumplimentará al cerrar el evento de Encuentro de la Red, durante el mes de noviembre de 2019.

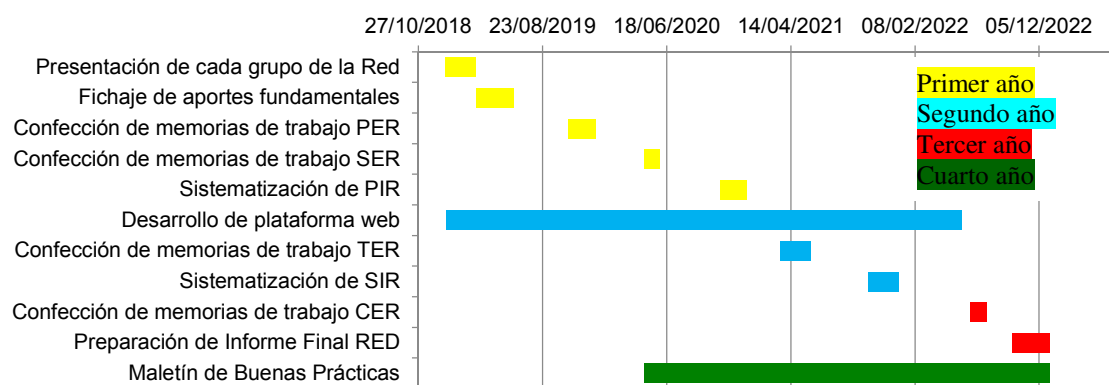


Figura 3. Hitos a cumplir delante de CYTED. Donde: PER, SER, TER, CER: primer, segundo, tercer y cuarto encuentro de la Red, respectivamente; PIR y SIR: primer y segundo intercambio científico-técnico de la Red.

Los indicadores de seguimiento del subgrupo “indicadores de producción” quedaron definidos de la manera que se resume en la Tabla 3. Los resultados se procesarán al finalizar el primer año.

Indicador	Descripción	Potencial (Nº)
Nº publicaciones escritas	Artículos/posters	50
	Libros/capítulos libro	12
Nº publicaciones orales	Congresos/simposios	40
	Charlas/seminarios/jornadas	39
Nº Personas capacitadas	Tesistas/investigadores/técnicos y otros	350
Nº de actividades capacitación realizadas	Cursos/ entrenamientos	50

Tabla 3. Indicadores de producción consensuados en la Red y meta proyectada.

### Segundo nivel de evaluación del funcionamiento de la Red

#### Paso 1. Identidad.

Desde el punto de vista de la inserción de ReBiBiR en el contexto multimedial iberoamericano, el primer paso necesario fue lograr la identidad de los miembros con sus objetivos e imagen corporativa. Una vez lograda la imagen de la Red (Tabla 4) y su Manual de Identidad, se avanzó en la construcción de la página web oficial (<http://www.cyted.org/es/rebibir>) como así, en una página anexa para agregar



información complementaria (<https://redrebibir.wordpress.com>). En paralelo, se habilitó un canal en YouTube y página de Facebook: “Red ReBiBiR” y una cuenta de correo electrónico: [redrebibir@gmail.com](mailto:redrebibir@gmail.com). Se habilitó un grupo en Skype “Red ReBiBiR” y un grupo en Whatsapp, a fin de lograr canales de comunicación amplios, ágiles y veloces.









Icono	Colores	Significado
	 色: 绿色 图: 叶子 字: 红, 生物, 农村 形: 三叶	Hojas= símbolo de biomasa Cantidad de hojas= una por cada sigla (Re=red; Bi= biomasa; BiR= bioenergía rural)
	 色: 黄色 图: 闪电 字: 能源 形: 闪电	Símbolo de energía= apaisado y con forma de Iberoamérica (se agrega España)
	 色: 红色 图: 字母 T 字: 重要 形: 字母 T	Letra T en el centro, su posición central denota su importancia en la imagen del logo, como así, hace alusión a las tecnologías de biomasa
		Variantes del logo en color, figura lineal y escala de grises

Tabla 4. Descripción del logotipo de la Red y sus elementos.

## Paso 2. Lanzamiento de la Red.

Mientras se avanzó con el posicionamiento de la Red hacia afuera, se trabajó en paralelo hacia adentro, a fin de definir un punto de partida común. Para esto, se realizó un lanzamiento interno el día 12 de febrero de 2019, vía Skype, donde cada representante de grupo pudo presentarse y conocer al resto de los miembros de la Red. Asistieron al evento 11 de 15 grupos de la Red.

## Paso 3. Entrevistas individuales.

Luego del lanzamiento se trabajó mediante entrevistas personales, durante todo el mes de febrero del 2019, en fechas consensuadas con cada uno de los participantes. Las entrevistas duraron entre 20 y 40 minutos y se realizaron por la plataforma Skype. El principal objetivo fue propiciar una presentación más cercana, dando lugar a que cada socio se exprese. Se consultó sobre: i) propuestas de organización de la Red; ii) sugerencias para la página web y la identidad de la Red; iii) interés en abrir un canal de difusión de las actividades de los grupos hacia los demás; iv) propuestas de entregables; v) temáticas de interés para webinaris; vi) posibilidad de ofrecer/participar de los intercambios científico-técnicos de la Red; vii) revisión de integrantes del equipo; viii) otros temas abiertos. Los comentarios, sugerencias, propuestas, realizados por los miembros de la Red durante las entrevistas, constituyeron líneas orientadoras de las actividades desarrolladas durante el año. Solo uno de los grupos no pudo ser contactado.

## Paso 4. Capitalizando conocimientos y experiencias. Principales resultados.

A la fecha, se han logrado los siguientes resultados:

**Membresía.** Una membresía visual, donde se publica la información de contacto de los grupos y puede ser consultada libremente en <https://redrebibir.wordpress.com/grupos-integrantes/>.

**Entregables.** Elaboración de dos Entregables para el Programa CYTED: IS-1 conteniendo toda la información de la identidad de los Grupos de la Red, en un documento en extenso (50 pág); y el IS-2 con solo un fichaje de dichos grupos, resaltando los principales aportes a la Red y sus fortalezas (20 pág) (ver <http://www.cytod.org/es/biblioteca-proyecto/10590.>).

**Acuerdos.** Se han logrado dos acuerdos hasta el momento:

**FFLA.** Acuerdo de Trabajo con la Fundación Futuro Latinoamericano (FFLA) a través de la M.Sc. Patricia Velasco, Coordinadora del Programa de Diálogo y Capacidades frente al cambio climático, agua y energía (<https://www.ffla.net/>), con sede en Quito, Ecuador.

**ASADES.** Acuerdo con la Asociación Argentina de Energías Renovables (ASADES) para la realización del Primer Encuentro Presencial de ReBiBiR, durante los días de la XLII Reunión de Trabajo de la Asociación en Jujuy. En esta oportunidad, ReBiBiR ha comprometido tres tipos de participaciones: una Conferencia Plenaria, una Mesa Panel denominada “Recursos, Tecnologías,



Transferencia y Políticas: una mirada de múltiples perspectivas y dimensiones a los sistemas de bioenergía”; y un Taller de dos días, siendo la Primer Parte: “Identificando el rol de la biomasa en la sustentabilidad territorial Iberoamericana” y la Segunda Parte: “Conectando y fortaleciendo territorios: sinergias, redes y emprendimientos en sistemas de biomasa y bioenergía”.

**Webinarios.** Se han dictado 4 webinarios o ciclo de charlas técnicas breves (Fig. 4), por la plataforma GoToWebinar, facilitada por FFLA, las grabaciones pueden verse por el canal *Red Rebibir* desde la Plataforma YouTube (<https://www.youtube.com/channel/UC5raHe3WwUCVyn1DjrCCC3Q>). Son:

**Webinario 1.** “Estimación del potencial energético de biomasa residual agrícola a pequeña escala: caso Colombia” (desde Colombia, a cargo de Prof. Dr. Quelbis Quintero Bertel, el 21/05/2019<sup>1</sup>);

**Webinario 2.** “Utilización de los ciclos ORC con fines duales (térmicos y eléctricos) para aprovechamiento de biomasa” (desde España, a cargo del M.Sc. Javier Calviño Polo, el 28/06/2019);

**Webinario 3.** “Caracterización física y química del bambú (*Guadua angustifolia*) para posibles usos energéticos” (desde Perú, a cargo de M.Sc. Mary Flor Césare Coral, el 24/07/2019);

**Webinario 4.** “Instalación y operación de un gasificador de biomasa de pequeña escala en el sur de Chile” (desde Chile, a cargo del Prof. Dr. Humberto Vidal Gutiérrez, el 21/08/2019).



Figura 4. Cantidad de “vistas” de los videos en la Plataforma de Youtube.

**Publicaciones.** Una publicación en el VIII Simposio Iberoamericano en Ingeniería de Residuos en Asunción, Paraguay, que será presentado entre el 17 y 18 de setiembre del 2019, titulada *La biomasa como amalgama estratégica en el entramado iberoamericano: el caso de ReBiR (T)*.

**Proyectos.** Se han presentado de manera conjunta (aval/participación) tres proyectos este año:

**Chile.** Proyecto “Valorización Energética de Aceites de Pescado de bajo valor agregado a través de la producción de biodiésel con biocatalizadores obtenidos localmente”, presentado por el grupo CERE de la Universidad de Magallanes al Concurso IdeA I+D 2019 de FONDEF- CONICYT, Chile. Adjudicado bajo Res N° 7806/2019, el 05 de agosto de 2019. Periodo de ejecución 2 años. <http://www.aqua.cl/2019/08/21/desarrollan-proyecto-para-obtener-biodiesel-a-partir-de-aceite-de-pescado/> (consulta: 22/08/2019).

**España.** Proyecto “Reactor Catalítico Automatizado para Estudios Valorización Termoquímica Sostenible”, presentado por el grupo CIEMAT a la convocatoria 2019 de concesión de ayudas para la Adquisición de Equipamiento Científico-Técnico, correspondientes al Subprograma Estatal de Infraestructuras de Investigación y Equipamiento Científico-Técnico, del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. En trámite de evaluación.

**Argentina.** Proyecto: “Rural bioenergy systems: Building tools and strategies for planning and sustainable use of biomass for energy purposes in Latin America”, presentado por los grupos IESCT e INENCO a la Convocatoria Pérez-Guerrero Trust Fund for South-South Cooperation 2019. En trámite de evaluación.

**Documentos de la Red.** Actualmente, los grupos se encuentran trabajando en la elaboración de cuatro Documentos de la Red (uno por cada pilar temático), que tienen que ver con las líneas en las que ReBiR centra su esfuerzo. El objetivo de los documentos es relevar el punto de partida de las CBEs en la región desde múltiples perspectivas de análisis. Se busca identificar avances, fortalezas y dificultades a ser superadas. La instancia de exposición de lo trabajado en los Documentos (Mesa Panel) durante el evento de ASADES, permitirá socializar los contenidos logrados, como así dar pie a la discusión de las líneas de proyectos e intercambios sobre las cuales se trabajará en años venideros, definiendo claramente una Hoja de Ruta a seguir. Cada documento es coordinado por un Editor encargado del mismo (de diferentes grupos de la Red) y de cada documento participan entre 3 y 7 grupos, algunos de los cuales realizarán aportes múltiples.

<sup>1</sup> Este primer webinar se realizó desde Plataforma YouTube.

## Paso 5. Evaluación de página web y estimación de IPP

No fue posible evaluar el sitio alojado en la web de Cyted por tratarse de un sitio interno, pero sí sobre la página construida en Wordpress. Los resultados de las herramientas web se detallan a continuación (Fig.5). En cuanto al IIP, fue igual a 33,3% con una participación diferente de cada indicador (Fig. 6.)



Nibbler

Hubspot Grader

Woorank

Figura 5. Resultados reportados por las herramientas web para el sitio de ReBiBiR (T).

- a) Reporte Nibbler: puntaje total de 7.4/10. Prioridades principales para la mejora del sitio web:
- compartir el contenido con los botones de los medios sociales en los artículos y páginas del sitio web. La cantidad de actividad social que un sitio web debe tener depende en gran medida del tipo de sitio, su público objetivo y el tiempo que ha estado en funcionamiento.
  - Para aparecer adelante en los resultados de los motores de búsqueda, se debe construir enlaces como una forma de construir un ranking de búsqueda. Sin embargo, se debe tener precaución ya que los enlaces entrantes que son obviamente artificiales pueden ser detectados por los motores de búsqueda y podrían tener un efecto adverso.
  - Registrarse en una página de Facebook y asegurarse de que esté vinculada al sitio, o si ya existe una, asegurarse de que sea pública.

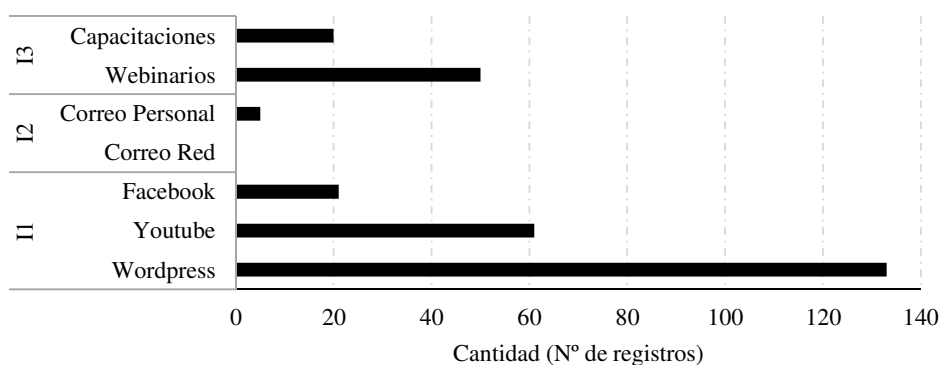
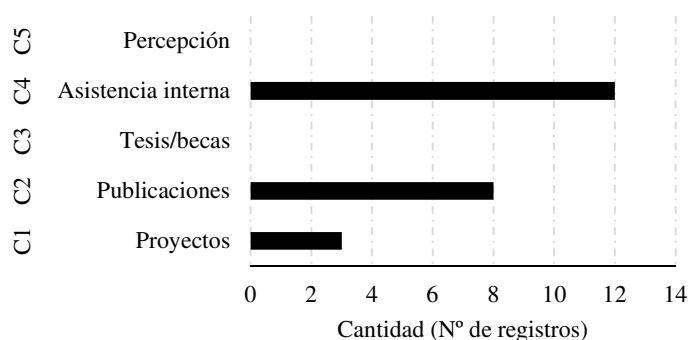


Figura 6. Indicadores que integran el IIP (Índice de Imagen Pública) para ReBiBiR (primer año). Wordpress: 15/04 al 15/08/2019. Youtube: contabiliza vistas a los videos webinarios. Webinarios: registra n° inscripciones a los 4 eventos. Capacitaciones: solo incluye curso impartido via moodle <http://moodlexa.unsa.edu.ar/course/view.php?id=283>. Facebook: contactos periodo mayo/julio.

- b) Reporte de Hubspot Grader: puntaje total 82/100. Prioridades principales para la mejora del sitio:
- Rendimiento. Bloqueo de renderización. Eliminar o diferir elementos javascript o CSS que interfieren con el contenido en la mitad superior de la página.
  - SEO. Títulos de página: reducir los títulos de página a 70 caracteres de longitud, e incluir palabras clave una vez.
  - Metadescripción: reducir las metadescripciones a 300 caracteres de longitud e incluir palabras clave una vez.
- c) Reporte de Woorank: puntaje total 56/100. Recomendaciones:
- Configurar las redirecciones del dominio desde versiones no originales de la página principal.
  - Optimizar los títulos de sus páginas.
  - Optimizar las Meta-Descripciones.

### *Tercer nivel de evaluación del funcionamiento de la Red*

La estimación del ISC dio como resultado un valor de 20%, fundamentalmente influido por la asistencia interna de los miembros del equipo a las actividades virtuales (valor sumatorio final) (Fig.7).



*Figura 7. Indicadores que integran el ISC (Índice de Sinergia y Colaboración) para ReBiBiR (inicio).*

La evaluación de las 5C deberá seguir siendo profundizada y se contará al final del primer año con información valiosa, comentarios y opiniones que sin duda constituirán insumos de interés para trabajar en la auto-evaluación del desempeño global de la Red a lo largo de los años venideros. La “confianza” será uno de los indicadores clave de aseguramiento de éxito en el cumplimiento del propósito de la Red y su impacto territorial.

### **REFLEXIONES FINALES**

En este artículo se sistematiza la experiencia del primer año de funcionamiento de la Red, desarrollando una propuesta metodológica que facilitará monitorear la evolución futura de la misma y evaluar el grado de impacto en la sociedad civil a la que se pretende alcanzar. La propuesta incluye aspectos sobre la comunicación de la ciencia y sobre trabajo colaborativo científico. La evaluación del funcionamiento e impacto de una red temática tecnológica, ReBiBiR, es una meta exigente. Sin embargo, los resultados del primer año de trabajo son más que satisfactorios en ambos aspectos, donde el esfuerzo se ha concentrado en: i) intercambio y aprendizaje y ii) gestión del conocimiento. Los auspiciosos resultados logrados en este breve tiempo hacen visionar una producción sinérgica interesante para la Región, sentando bases para futuros proyectos en bioenergía.

Desde la perspectiva de la comunicación de la ciencia, el uso de TICs ha introducido un factor dinamizador al intercambio, incorporando numerosas herramientas a las actividades de la Red: plataformas Skype Grupal, YouTube, GotoWebinar, Moodle, Dropbox, Wordpress, Facebook, Canva y otros. Las mismas han facilitado realizar capacitación a distancia, difusión de conocimiento, intercambio de información, eventos de grupo, análisis de página Web y diseño novedoso de documentos. Los grupos familiarizados con algunas de las TICs aportan experiencia y apoyan su uso innovador por parte de otros miembros de la Red. Desde la perspectiva de trabajo colaborativo, al interior del equipo local salteño se sostiene un ritmo que motiva por un lado y que prepara a su vez a la próxima instancia de encuentro. La formación profesional específica en biomasa aporta calidad y permite una síntesis conceptual creciente. La interdisciplina abre a miradas más amplias en el campo de las ER, que acerca a ReBiBiR (T) a anteriores experiencias de la Cooperación Iberoamericana. El trabajo colaborativo entre pares, se refleja en las múltiples instancias de participación, en entregables y documentos, webinarios, proyectos compartidos, participación en eventos, y numerosas instancias de comunicación electrónica que han enriquecido las bases de ReBiBiR.

ReBiBiR avanza. El gran valor añadido que presenta ReBiBiR, a diferencia de otras redes propuestas que no llegan a obtener resultados óptimos, es que estas últimas no abarcan toda la cadena de valor de la biomasa y sus diferentes aspectos: recursos, tecnología, transferencia y políticas. Esta Red tiene una visión globalizada y de múltiples perspectivas, favoreciendo la consecución de los objetivos definidos. El enfoque comunicacional está presente y sostiene el entendimiento común de ReBiBiR: la ciencia es comunicación y colaboración. Desde ambas perspectivas, se busca poner a disposición los aprendizajes logrados a fin de resultar una experiencia motivadora de trabajo en nuevas redes, que

generen un movimiento multiplicativo en la promoción de fuentes renovables de energía y en general, de la Agenda inclusiva mundial de los Objetivos de Desarrollo Sustentable.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Programa CYTED (Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo) por el financiamiento N°719RT0587 que hace posible el funcionamiento de la Red. Y a cada uno de los Grupos que pertenecen a la misma, por su entusiasmo y esfuerzo invaluable que consolidan un entretejido sólido y en permanente expansión.

## REFERENCIAS

- Berdegú J.A., Reardon T., Escobar G. (2000). Empleo e Ingreso Rurales No Agrícolas en América Latina y el Caribe. Conferencia "Development of the Rural Economy and Poverty Reduction in Latin America and the Caribbean," New Orleans, Louisiana, March 24. <http://siteresources.worldbank.org/DEC/Resources/empleoEIngresoRuralesNoAgricolas.pdf> [consulta: 05 de agosto de 2019].
- BID (Banco Interamericano de Desarrollo). (2016). Base de datos en energía. <http://iadb.org/en/topics/energy/energy-database> [consulta: 13 de agosto de 2019].
- Ceballos F. (2019). 10 razones para trabajar en red. Telecentre.org. IDRC. [http://cmap.javeriana.edu.co/servlet/SBReadResourceServlet?rid=1219334049927\\_706529672\\_114315](http://cmap.javeriana.edu.co/servlet/SBReadResourceServlet?rid=1219334049927_706529672_114315). [consulta: 22 de agosto de 2019].
- CYTED (Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo). (2019). Instrumentos del Programa. <http://www.cytmed.org/es> [consulta: 22 de agosto de 2019].
- Gairín J., Rodríguez-Gómez D., Muñoz J.L. (2012). Evaluar el funcionamiento de una red. La red de apoyo a la gestión educativa, RedAGE. Revista Iberoamericana de Educación N° 58 (3), 1-12. ISSN: 1681-5653.
- Gavilán E. (2009). Tu equipo, el Equipo de Atención Primaria. Curso de Introducción a la Medicina Familiar y Comunitaria. <https://slideplayer.es/slide/10556460/> [consulta: 10 de agosto de 2019].
- IRENA (International Renewable Energy Agency). (2018). Renewable energy capacity statistics. ISBN: 978-92-9260-057-0. Abu Dhabi.
- Jardines Méndez J.B. (20016). Educación en red más que educación a distancia. Experiencias de las universidades médicas cubanas. Educ Med Super 20(2).
- Lopez M, Mongilardi N, Checkley W. (2014). Enfermedad pulmonar obstructiva crónica por exposición al humo de biomasa. Rev Peru Med Exp Salud Publica 31(1):94-9.
- Manrique, S.M. (2017). Biomasa con fines energéticos: recursos, potencialidad y cambio climático. Ed. Universidad Tecnológica Nacional (edUTecNe). Bs As. Argentina. ISBN 978-987-1896-41-7. 220 pág.
- PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). (2015). <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>[consulta: 21 de agosto de 2019].
- Thomas H., Santos G. y Fressoli M. (2012). Relaciones entre Tecnología, Desarrollo y Democracia: nueve estudios sobre dinámicas de exclusión / inclusión social. MINCyT, Buenos Aires. ISBN 978 -987 - 1632 - 10-7.
- Vidal Ledo M., Vialart Vidal M.N., Hernández García L., Meilán Andricaín, A. (2011). Working in network. Educ Med Super 25, 3, 1-16. ISSN 0864-2141.

## INTERNATIONAL NETWORK IN BIOMASS AND BIOENERGY: RESULTS, LESSONS LEARNED AND EVALUATION PROPOSAL

### ABSTRACT

The Ibero-American Network of Biomass and Rural Bioenergy Technologies works to promote the efficient use and management of solid biomass and its thermal energy valorization in the Ibero-American rural and urban-marginal areas, making available to the Region the fundamental technological advances that could contribute to the construction of communities and territories more resilient to climate change. Like any other type of organization, it must have self-evaluation mechanisms that do not exclude external evaluation processes, and that make it possible to identify the trajectory, redirect the goals and promote continuous improvements that ensure ever greater fluidity in the communication of science. This article systematizes the experience of the first year of operation of the Network, developing a methodological proposal that will facilitate the monitoring of its future evolution and evaluate the degree of impact on civil society to which it is intended to achieve. The proposal includes evaluative aspects on science communication and scientific collaborative work. Our ultimate purpose is to propitiate a multiplicative effect in the Region, encouraging interest in

renewable energies and promoting synergic work - based on new information and communication technologies - for a sustainable territorial development.

**Keywords:** thematic network, biomass technologies, bio-energy systems, self-evaluation, scientific communication, systemic approach.

## **EVALUACION DE LA DEMANDA DE ENERGÍA TÉRMICA DE USUARIOS RESIDENCIALES EN EL PEÑÓN – CATAMARCA, PARA TRANSFERENCIA DE CALENTADORES SOLARES DE AGUA**

**C. Ramos Caro<sup>1,2</sup>, Y. Perdiguero Samaja<sup>2</sup>, A. Iriarte<sup>1</sup>, A. Arrieta<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Catamarca  
M. Quiroga N° 93, 4700 – Catamarca, Argentina.

<sup>2</sup>Ministerio de Servicios Públicos – Gobierno de Catamarca  
Tel: 0383-154625603 e-mail: ramoscarola1362@gmail.com

*Recibido 19/08/19, aceptado 24/10/19*

**RESUMEN:** El presente trabajo muestra el relevamiento, estudio exploratorio y análisis de la situación energética de los pobladores residenciales de la localidad El Peñón (Puna catamarqueña), para el calentamiento de agua. Para ello se tomaron diversas fuentes (entrevistas, encuestas, visitas de campo, etc.), que indagan sobre la demanda de energía, cantidad de familias, hábitos, medios para calentamiento de agua, uso de leña, flora del lugar apta para leña, conocimiento y predisposición a la tecnología de termotanques solares, entre los más importantes. La situación de pobreza energética, por una disponibilidad limitada de energía eléctrica, y la problemática de la obtención de la leña como recurso energético, condicionan la calidad de vida de los habitantes. Este análisis sentará las bases para la definición de una estrategia sustentable que permita la satisfacción de la demanda de energía térmica en los usuarios residenciales.

**Palabras clave:** Energía, usuarios residenciales, Puna, termotanques solares

### **INTRODUCCIÓN**

La provincia de Catamarca posee una importante extensión geográfica, en la que áreas de valles y bolsones alternan con cordones montañosos. La localidad de El Peñón donde se efectuó el trabajo, se ubica en el departamento Antofagasta de la Sierra, y se encuentra en la Ecoregión de la Puna catamarqueña en su totalidad. Este departamento es el de mayor superficie de la provincia y no pertenece al Sistema Argentino de Interconexión SADI, por lo que, el abastecimiento de energía eléctrica se produce con diferentes fuentes de generación.

En El Peñón, la fuente del sistema de generación es diesel (grupos generadores), con un servicio de 7 horas diarias. También posee un sistema de distribución en baja tensión, y abastece en la actualidad a 125 usuarios (residenciales, institucionales y comerciales/productivos). La localidad tampoco cuenta con red de gas natural, de hecho en la provincia sólo algunos departamentos tienen este servicio.

Ante el contexto antes señalado, de disponibilidad limitada de energía eléctrica y leña en la zona, plantean una situación de pobreza energética en los pobladores, tanto eléctrica como térmica.

En la actualidad se encuentra en trámite el financiamiento para el sistema de generación con energía fotovoltaica centralizada con reserva fría (apoyo de generación diesel).

Este artículo centrará su estudio en la demanda térmica de pobladores residenciales de El Peñón, para iniciar el proceso de formulación del proyecto/licitación para la instalación de calentadores solares de agua especiales para regiones con muy bajas temperaturas ambiente invernal.

### **CARACTERÍSTICAS DE LA POBLACIÓN Y SU CONTEXTO**

Antofagasta de la Sierra posee una superficie de 28.097 km<sup>2</sup>, y es el de menor densidad poblacional en la provincia. Está localizado en el norte de Catamarca, a 605 kilómetros de la ciudad Capital. Se encuentra a una altura promedio de 3.700 m.s.n.m. Limita al norte con la provincia de Salta y al este con Chile. Su clima es árido andino puneño. Integra el Área Regional Puna, esta región es desértica de altura, colindante a la Cordillera de los Andes. En la misma se conserva un importante paisaje cultural y natural. En cuanto al clima, es andino puneño, frío y seco, con temperaturas menores a 0° C, de modo que los inviernos son muy fríos y los veranos templados, es el característico “desierto de altura” escasas lluvias y una gran amplitud térmica, es decir con gran diferencia de temperaturas entre día y la noche. Las escasas lluvias y las bajas temperaturas condicionan la actividad productiva y la recuperación vegetal. (Atlas de Catamarca, 2019)

El suelo de Antofagasta es arenoso-pedregoso, lo que sumado a las inclemencias climáticas, solo posibilita la permanencia de plantas xerófilas, en cuanto su aspecto biológico, adaptadas a la altura y sequía; psamófilas, adaptadas a suelos arenosos; y halófilas, a suelos salinos. En cuanto a la fauna la especie más característica es la vicuña, con presencia además de llamas, guanacos, zorro colorado y plateado, chinchilla, etc. Entre las aves encontramos flamenco rosado, pato silvestre, suri, cóndor y bandurrias. (Atlas de Catamarca, 2019)

Los distritos catastrales son tres: Antofagasta de la Sierra, El Peñón y Los Nacimientos. La localidad de El Peñón, se sitúa entre 67° 15' 54" W 26° 28' 41" S, y está ubicada en la región norte de la Provincia de Catamarca, correspondiente al Departamento Antofagasta de la Sierra. Está ubicada a 3.397 msnm, dista de la capital Catamarqueña 534 kilómetros.

Las vías de comunicación hacia la localidad de El Peñón son: la Ruta Provincial N° 43, y está situada a 65 Km de la Villa de Antofagasta de la Sierra, que es la Cabecera departamental. Hacia el sur la Ruta N° 43 conecta con las poblaciones de Barranca Larga y Villa Vil (pertenecientes al Departamento Belén), Figura 1.



*Figura 1 Ubicación Geográfica de El Peñón (Antofagasta de la Sierra)  
Fuente: Atlas de Catamarca, 2019.*



El Peñón, según datos del Censo 2010, es de 263 habitantes. Lo que representa un incremento del 17% frente a los 224 habitantes del censo anterior (Censo 2001, INDEC).

La localidad cuenta con una Escuela Primaria y Secundaria además de un Jardín de Infantes, delegación Municipal, destacamento policial, posta sanitaria y un club. Existe además una Hostería Municipal, con 8 (ocho) habitaciones. En la Figura 2 puede apreciarse la plaza y una de las calles principales. La población se abastece de agua potable a través de un sistema por gravedad.



*Figura 2: Vista de la plaza de El Peñón*

#### *Actividades productivas*

El departamento Antofagasta de la Sierra, posee una economía basada en la ganadería, de la que se obtienen cueros y lanas, materias primas para la actividad textil artesanal. Dicha actividad es bastante frecuente en los pobladores del lugar. Dadas las condiciones climáticas, propias de la región, la actividad agrícola comercial no es relevante. Se cultivan alfalfa, algunas hortalizas y otros productos de subsistencia de ciclo vegetativo muy corto. En cuanto a la actividad minera, ésta se hace presente en el departamento a través del Proyecto de Litio en el Salar del Hombre Muerto. (Gobierno de Catamarca, 2011)

#### *Sistema Energético y Demanda actual*

Antofagasta de la Sierra no pertenece al Sistema Argentino de Interconexión, por cuestiones técnico económicas, relacionadas con la distancia a las redes de distribución. Los asentamientos poblacionales más importantes son la Villa de Antofagasta de la Sierra, El Peñón, Antofalla y Los Nacimientos, éstos poseen sistemas de generación centralizada a partir de grupos térmicos diesel y redes de distribución con media y/o baja tensión.

La localidad de El Peñón, posee un grupo generador diesel de 330 kVA que opera 7 horas diarias, todo el año. También conforman el sistema, redes de baja tensión. La operación también está a cargo de la distribuidora. (EC SAPEM, 2019)

En período estival la cantidad total de usuarios llega a 125, distribuidos en instituciones, comerciales/productivos y residenciales. Se incorpora además a la demanda, el alumbrado público e iluminación de la plaza principal.

Los consumos energéticos de la población, se han ido incrementando con el correr de los años. La cantidad de usuarios desde el año 2012 al presente año creció en un 25%. También en la cantidad total de kWh de generación por año se visualiza un aumento notable (Figura 3).

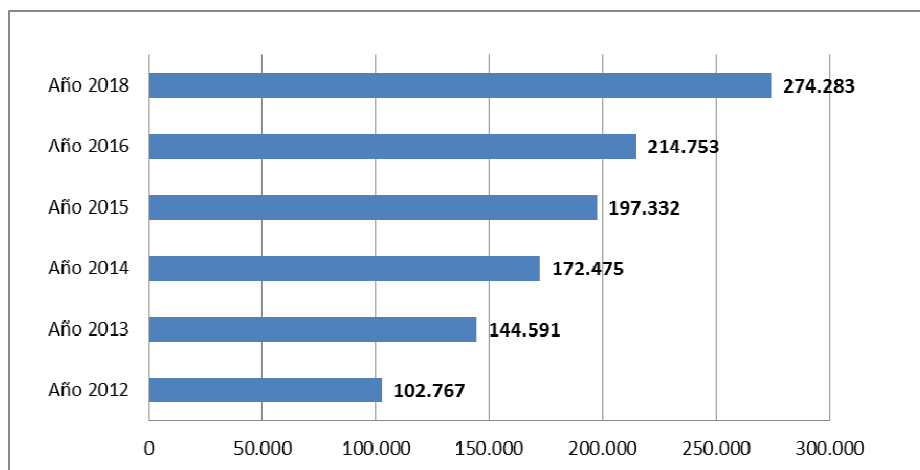


Figura 3: Generación Anual El Peñón (kWh). Datos provenientes del Ministerio de Servicios Públicos

## MATERIALES Y MÉTODO

Para realizar este estudio de demanda energética, se decidió elaborar una encuesta orientativa a modo de estudio preliminar de la demanda, la misma estuvo destinada a los usuarios residenciales, teniendo en cuenta, la cantidad de habitantes por hogar y las actividades cotidianas en donde utilizan energía térmica. Se consideró el calentamiento de agua como una actividad principal, además de los diferentes métodos de conversión: energía eléctrica, biomasa, gas, energía solar térmica, etc. (Neuman, 2016). El análisis presente considera las diferentes opciones de calentamiento de agua, y los usos asociados, que poseen los pobladores de El Peñón.

Se efectuaron encuestas a los jefes de familia de la localidad para realizar los relevamientos de hábitos y medios de calentamiento de agua. El estudio exploratorio se realizó sobre una muestra superior al 20% de los usuarios residenciales de la localidad (20 encuestas). Para el análisis se incluyeron los ítems: cantidad de integrantes del hogar, destino de uso del agua caliente, medios de calentamiento de agua, uso de leña, conocimiento de termotanques solares (beneficios, inconvenientes y aceptación).

También se realizaron entrevistas a autoridades municipales, para obtener detalles de las costumbres (pertinentes al proyecto) de los pobladores, tanto de permanencia en el lugar durante el invierno como de accesibilidad a los medios para calentar agua.

Se efectuaron visitas de campo en la zona, para determinar la flora existente con factibilidad de uso para leña.

Los datos y relevamientos corresponden al mes de octubre del 2018.

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

### Entrevistas

Según datos relevados in situ, la cantidad de familias asciende a 95 en verano. En la entrevista al delegado municipal, éste expresa que en los meses de junio y julio, aproximadamente 25 familias no permanecen en el pueblo, y migran a otras localidades cercanas, principalmente con destino al departamento Belén, que está ubicado a una distancia aprox. de 200 km de El Peñón. Cabe destacar que las escuelas de El Peñón pertenecen a periodo especial (agosto – mayo). También comentó que la Municipalidad efectúa una donación de leña a las familias de la localidad a comienzos del invierno, en virtud de los costos asumidos por los pobladores para calentamiento de agua, calefacción, cocción de alimentos, etc. Por otro lado, señaló que la leña se comercializa a través de un camión que proviene de la ciudad de Belén, una vez al mes aproximadamente.

### *Visitas de campo*

La leña es uno de los recursos energéticos más consumidos por el hombre, debido a su inmediata disponibilidad y a su gran capacidad calorífica. Es muy utilizada en zonas donde el clima frío es preponderante en la mayor parte del año con temperaturas bajo cero en épocas invernales; esta situación obliga a que la mayoría de las actividades cotidianas tengan que estar calefaccionadas, y la leña resulta una forma económica cuando la posibilidad de extracción es cercana e inmediata.

Un recurso es *renovable*, cuando su regeneración es a corto plazo y supera a la cantidad consumida, de esta manera, se conserva la disponibilidad del mismo. En cambio, cuando el uso o extracción del recurso es superior a su capacidad de regeneración o crecimiento natural en el medio que se encuentra, se dice que el recurso *no es renovable* de manera natural, por lo tanto, podemos llegar a provocar su extinción a escala local, forzando el tener que buscarlo en diferentes lugares cada vez más alejados para su extracción ocasionando la escasez del recurso hasta llegar a una posible extinción. Este es el caso de la Localidad de El Peñón, en donde la leña es indispensable en todas las actividades de la vida cotidiana.

En las zonas aledañas al asentamiento poblacional se encontraron diferentes especies vegetales que los habitantes usan frecuentemente como leña (información que se corroboró en las encuestas): Tola (*Baccharis incarum*), Añagua (*Adesmia horridiuscula*), Cuerno (*Adesmia nanolignea*), Tramontana (*Ephedra multiflora*), Álamo *Populus sp*, Lazarillo, Rica rica o Coré *Acantholippia hastulata*. Algunas de estas especies son de gran interés medicinal por las propiedades antibióticas que poseen, debido a que actúan sobre bacterias patógenas humanas multirresistentes a antibióticos comerciales. Además, al estar expuestas a una elevada radiación ultravioleta, producen compuestos foto protectores que podrían usarse en aplicaciones en cosmética para elaborar pantallas solares, y antioxidantes depurando radicales libres. El uso de estas plantas medicinales puede crear o incentivar la economía regional. “*Es posible generar trabajo genuino para la gente del lugar a través de la recolección de esas especies, o desarrollar un proyecto más ambicioso a futuro, como una planta elaboradora de medicamentos, que involucre a toda la comunidad*” explicó Myriam Arias, Farmacéutica e integrante de equipo de investigación de Conicet. (Orlandi, 2013)

Las especies anteriormente nombradas, se utilizaron con una mayor frecuencia a la que se fueron recuperando de forma natural, debido a la lenta evolución del sustrato por las condiciones climáticas y topográficas del lugar (Morlans, 1995). Por lo tanto, la tasa de regeneración fue disminuyendo paulatinamente hasta su casi desaparición en El Peñón y en zonas aledañas. Esta situación, condiciona en la actualidad a los pobladores, a recorrer más de 30 km de distancia para poder hallarlas y extraerlas para leña.

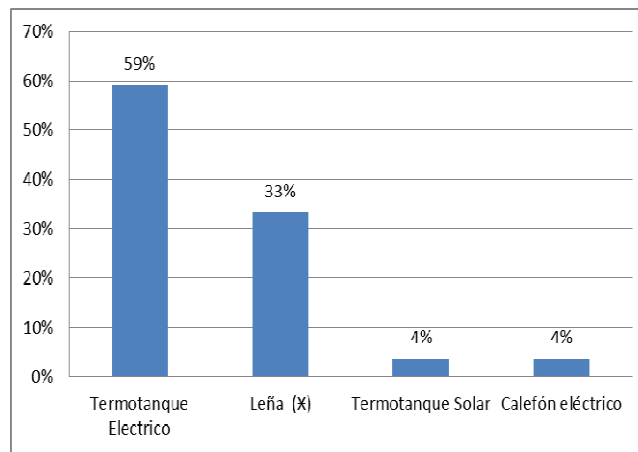
### *Encuestas realizadas*

Las encuestas fueron discriminadas en diferentes temáticas, y arrojaron los siguientes resultados:

*Cantidad de hogares*: los resultados de las encuestas, en relación a la conformación de los hogares, evidencian lo siguiente:

- Las familias del total de hogares encuestados están conformadas de la siguiente manera: 35% mujeres, 31% hombres y 34 % niños (12% varones y 22% niñas).

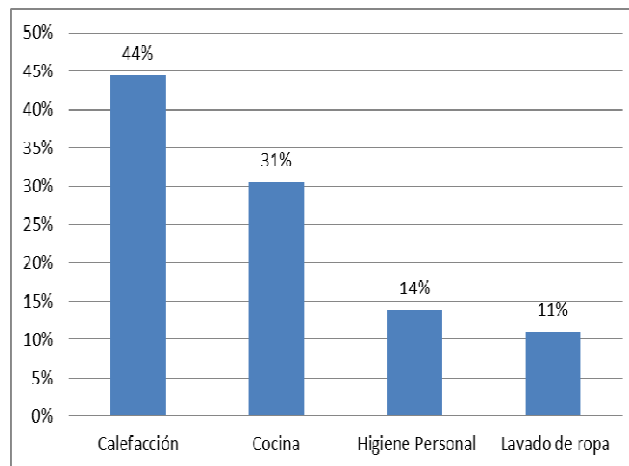
*Medios para calentar el agua*: en los medios más comunes para este fin, se encuentra en primer lugar el termotanque eléctrico (59%) y en segundo lugar la leña, con un 33%. Mientras que, en los de menor frecuencia de uso, se ubican al termotanque solar y al calefón eléctrico (con un 4% cada uno). Ver Figura 4. Esta última alternativa (calefón eléctrico) junto al termotanque eléctrico, elevan el uso de la energía eléctrica, valor porcentual del 63%.



*Figura 4 Medios para calentamiento de agua*

Si se considera la cantidad total de usuarios residenciales (95 usuarios) y los porcentajes obtenidos en las encuestas (59% uso de termotanques eléctricos y 4% utilización de calefón eléctrico), se podría estimar el consumo de energía eléctrica para el calentamiento de agua. Para ello se toma como referencia el consumo de un termotanque eléctrico en una hora por día, se calcula 1,5 kWh/día de energía necesaria en cada familia que posea este equipo para el calentamiento de agua. Mientras que un calefón eléctrico consume un valor promedio de 0,8 kWh. Estos valores nos dan un resultado de 31.392 kWh/año consumidos para calentamiento de agua de usuarios residenciales. Este consumo, es promedio, y podrá variar por la cantidad de usuarios y los requerimientos de consumo de las familias.

*Uso de leña:* se puede observar en la Figura 5, que el 56 % de la leña que se quema, es para calentar agua de uso en actividades cotidianas: 31% para cocinar, 14% para higiene personal y 11% para lavar ropa; y que el porcentaje restante es para calefacción de los hogares (44%). La implementación de otro medio para calentar agua, Figura 4, podría incidir en la quema total de leña del hogar.



*Figura 5 Destino del uso de leña*

Además, es importante tener en cuenta la posibilidad de estimar la cantidad de leña que se utiliza en cada domicilio, debido a la escasa información sobre la forma de medirlo y su uso como combustible sólido, ya que la leña que se encuentra próxima a las familias es cortada y usada inmediatamente (Sarmiento, M y Velez, S; 2008). A este interrogante, solo el 55% de las personas encuestadas podían tener una respuesta estimativa.

Para la estimación de cantidades de leña consumida, se unificaron criterios entre kilogramos e importe de venta en pesos (\$) para consumo, ya que no todos los encuestados podían determinar la cantidad en kilogramos utilizados. Según lo encuestado, el 55 % de las personas que podían estimar la cantidad de

leña que empleaban, respondieron que gastan aproximadamente entre \$800 - \$1.000 mensuales para su adquisición, las siguientes categorías se reparten de la manera siguiente: 18% en la categoría \$300 - \$500/ Anual, otro 18% para \$1.500 - \$4.000/ Anual y por último un 9% para valores cercanos a \$30.000/ Anual. Tales valores se muestran en la Figura 6.

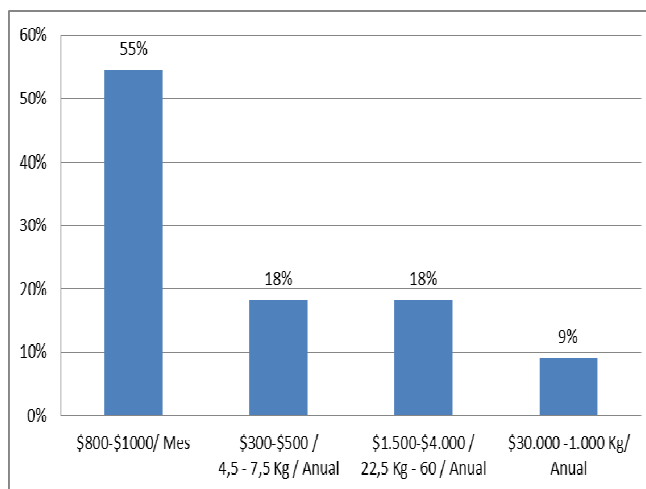


Figura 6 Uso de leña en pesos (\$)

Según lo expresado por los habitantes, la leña que se quema propia de la zona, es de las especies observadas en las visitas de campo, y otra parte es comprada cuando existe la posibilidad, debido a que el abastecimiento de leña no es frecuente por diferentes razones, ya sean económicas o por falta de abastecimiento como consecuencia de las distancias que deben recorrer y las inclemencias climáticas del lugar.

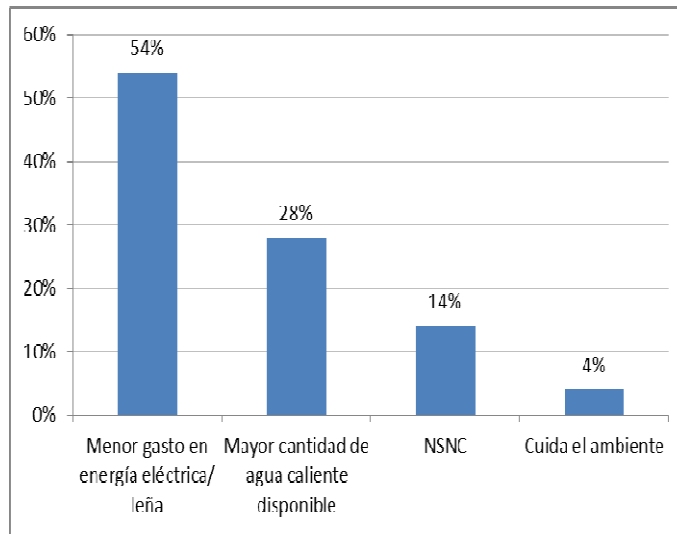
*Conocimiento del uso de termotanques solares:* considerado el uso de termotanques solares como una alternativa para calentamiento de agua en la localidad, en las encuestas se analizó el conocimiento de este tipo de equipos (además de beneficios e inconvenientes) y la disposición a la adopción de esta tecnología en caso de existencia de algún tipo de beneficio por parte del Estado Provincial/ Nacional.

Un dato importante a tener en cuenta para la elección de alguna tipología en particular de termotanques solares, es la calidad del agua que posee El Peñón. Según datos de la Dirección de Laboratorio perteneciente a la Subsecretaría de Planificación de los Recursos Hídricos de la provincia de Catamarca, el agua es de excelente calidad, de baja alcalinidad en cuanto a la formación de carbonatos y escasa dureza, cumpliendo los requisitos de agua potable del Código Alimentario Argentino.

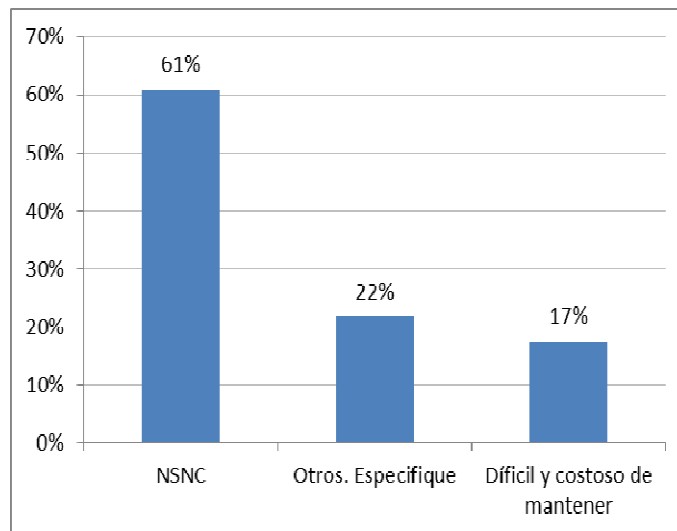
En las encuestas realizadas a los pobladores, se obtuvieron los siguientes resultados:

- El 75% de los encuestados manifestó conocimiento sobre termotanques solares. La mayoría desconoce el principio de funcionamiento, pero al existir hospedajes en la villa que poseen estos equipos, pudieron verlos (termotanques de tubo de vacío).
- En relación a los beneficios observados del termotanque solar, los resultados se repartieron de la siguiente manera: el 54% corresponde a “Menor gasto en energía eléctrica/ leña”, el 28% a “Mayor cantidad de agua caliente disponible”, el 14% “No sabe/ No contesta” y por último con un 4% “Cuidado del ambiente”. Ver Figura 7.
- En cuanto a los inconvenientes visualizados, los valores obtenidos fueron: el 61% “No sabe/ No contesta”, el 22% “Otros” (inversión inicial) y el 17% “Es difícil y costoso de mantener”. Tales valores son representados en la Figura 8.

- La predisposición a la adopción de la tecnología, con algún tipo de beneficio por parte del Estado, fue del 100%.



*Figura 7 Conocimiento de las ventajas del uso de Termotanques solares*



*Figura 8 Conocimiento de las desventajas en el uso de Termotanques solares*

## CONCLUSIONES

El sistema eléctrico actual (alimentado por grupos diesel) no abastece a los pobladores de El Peñón con las necesidades manifiestas de conservación de alimentos (uso de heladeras/freezers) y de disponibilidad energética para el resto de los consumos. Por eso es necesaria la incorporación de un sistema de generación sustentable que provea a la población, energía eléctrica las 24 horas.

El principal medio de calentamiento de agua para usos cotidianos en las viviendas, es a través de artefactos eléctricos (termotanques y calefones), esto manifestado por el 63% de los encuestados. Lo que provoca una recarga del sistema eléctrico actual. Según lo estimado, el total de kWh consumidos en calentamiento de agua para usuarios residenciales, representan un porcentaje mayor al 11% del consumo total anual del sistema eléctrico (año 2018).

El segundo medio elegido para calentar agua es la leña, con un 33%. De acuerdo a las condiciones fitogeográficas del lugar, y por tratarse de la segunda opción para calentar agua, se efectuó un especial análisis sobre el uso de leña.

En este se detectó que el 66% de la cantidad de lo que se quema es para calentar agua de uso cotidiano (cocina, higiene personal y lavado de ropa).

Uno de los medios para calentar agua y calefaccionarse que tienen los habitantes de El Peñón es por medio de la leña, el 66% de la cantidad de lo que se quema es para calentar agua de uso cotidiano (cocina, higiene personal y lavado de ropa); en el caso de no ocupar leña, lo hacen por medio de artefactos eléctricos como ser Termotanque y/o calefón eléctrico en un 63% de los casos, implicando una recarga en el sistema eléctrico, ya que al no poseer electricidad las 24 hs, estos porcentajes de uso de la leña se incrementarán de acuerdo con el crecimiento poblacional y sus consumos asociados.

La leña que se quema en su mayoría proviene de plantas nativas, las cuales cada vez se regeneran menos por la gran demanda para su uso, esto obliga a los habitantes de El Peñón a recorrer grandes distancias para encontrarlas, lo que evidencia la gran presión que ejerce el hombre sobre la vegetación. Estas especies poseen diferentes propiedades medicinales antibióticas y su uso intensivo para la quema, provoca su paulatina extinción. Por lo tanto, encontrar otro modo de calentar agua para uso cotidiano, beneficiaría a que disminuya la presión de extinción en un 56% sobre la vegetación nativa facilitando su regeneración y recuperación. Además, considerando el uso medicinal que posee la vegetación autóctona, evitar la presión de extinción sobre estas, favorece a la posibilidad del desarrollo de una economía regional.

El 75% de los encuestados manifestó conocimiento sobre termotanques solares. El principal beneficio identificado corresponde a “Menor gasto en energía eléctrica/ leña”, con un 54%. En cuanto a la predisposición a la adopción de la tecnología, con algún tipo de beneficio por parte del Estado, ésta fue del 100%. Por otro lado, los valores de alcalinidad de agua potable de la localidad, no condicionarían la adopción de alguna tipología particular de colector solar, en el caso de incorporarse este tipo de equipos.

En el contexto estudiado, de utilización superior al 60% de termotanques/calefones eléctricos en un sistema eléctrico de disponibilidad limitada, así como la dificultad, y sus costos asociados, de los pobladores para abastecerse de leña, es necesaria la incorporación de medios alternativos para calentamiento de agua. El uso de calentadores solares, surge como una opción sustentable que la población encuestada manifestó estar de acuerdo en su adopción.



## REFERENCIAS

- Atlas de Catamarca, (2019). Departamentos, Antofagasta de la Sierra <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/verNorma.do?id=21841>
- Gobierno de Catamarca (2011). Informe de Avance II Plan Estratégico Territorial de la Provincia de Catamarca <https://www.enre.gov.ar/web/web.nsf/Consumo?OpenPage>
- Instituto de Estadísticas y Censo INDEC, (2001) - Resultados provinciales Catamarca, Antofagasta de la Sierra, El Peñón. [https://www.indec.gob.ar/micro\\_sitios/webcenso/censo2001s2\\_2/ampliada\\_index.asp?mode=10](https://www.indec.gob.ar/micro_sitios/webcenso/censo2001s2_2/ampliada_index.asp?mode=10)
- Instituto de Estadísticas y Censo INDEC, (2010) - Censo Nacional de Población, Hogares y Vivienda 2010 Catamarca, Antofagasta de la Sierra. <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-CensoProvincia-3-6-10-028-2010>
- Ley N°18284 , (19699) Código Alimentario Argentino Normas para Producción, Elaboración y circulación de Alimentos para Consumo Humano en Todo el País. <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/verNorma.do?id=21841>
- Morlans, María Cristina, (1995) Regiones Naturales de Catamarca Provincias Geológicas y Provincias Fitogeográficas Área Ecología - Editorial Científica Universitaria - Universidad Nacional de Catamarca ISSN: 1852-3013 <http://editorial.unca.edu.ar/Publicacione%20on%20line/Ecologia/imagenes/pdf/006-fitogeografia-catamarca.pdf>
- Neuman L., 2016 Cocinas solares. Fundamentos y aplicaciones, Editorial Marcombo.
- Orlandi Daniela, 2013 Poderosas propiedades antibióticas en plantas de la Puna y los Valles Calchaqués Dirección de Medios y Comunicación Institucional, Argentina Investiga. [http://argentinainvestiga.edu.ar/noticia.php?titulo=poderosas\\_propiedades\\_antibioticas\\_en\\_plantas\\_de\\_la\\_puna\\_y\\_los\\_valles\\_calchaquies&id=1963](http://argentinainvestiga.edu.ar/noticia.php?titulo=poderosas_propiedades_antibioticas_en_plantas_de_la_puna_y_los_valles_calchaquies&id=1963)
- Sarmiento, Miguel; Velez, Silvia; (2008) Características del Suministro de Leña al Mercado Energético Domestico en la Ciudad de Santiago del Estero, Argentina, Boletín del CIDEU 5:125-133 ISSN 1885-5237.

## ABSTRACT

The present work shows the poll, exploratory study and analysis of the energetic situation of the residential citizen of the town El Peñón (Puna catamarqueña), for water heating. For this survey, various sources were taken (interviews, surveys, field visits, etc.), which inquire about the demand of energy, numbers of families, habits, ways for water heating, use of firewood, flora of the place suitable for firewood knowledge and predisposition to solar heater technology, among the most important. The situation of energy poverty, due to a limited availability of electricity, and the problem of obtaining firewood as an energy resource, determine the quality of life of the inhabitants. This analysis will lay the foundations for the definition of a sustainable strategy that allows the satisfaction of the demand for thermal energy in residential users.

**Keywords:** Energy, residential users, Puna, solar heater.

## **EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE GESTIÓN DE ACTIVOS APLICADOS A LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS FLOTANTES**

**Charles U. M. Carmona<sup>1</sup>, Tarcisio S. Bacelar<sup>2</sup> Elielza M. Barbosa<sup>3</sup> and Olga C. Vilela<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Federal University of Pernambuco (Brazil)

<sup>2</sup> Federal University of Pernambuco (Brazil)

<sup>3</sup> Federal University of Pernambuco (Brazil)

<sup>4</sup> Federal University of Pernambuco (Brazil)

Tel. 55(81)21268368 e-mail: charles.carmona@ufpe.br

*Recibido 20/08/19, aceptado 24/10/19*

### **RESUMEN:**

Este artículo examina algunas metodologías de soporte de gestión de activos que consideran proyectos de energía fotovoltaica flotante. El análisis se vuelve importante considerando que existe una tendencia a aumentar las inversiones en los próximos años en este segmento y se necesitan mecanismos que ayuden en la toma de decisiones para mantener el valor de los activos. En este sentido, se proponen cuatro métodos de evaluación: análisis SWOT, proceso de jerarquía analítica (AHP), diagrama de radar y una metodología basada en la medición del riesgo operativo. La matriz energética brasileña está diversificada y la generación de electricidad depende de la energía hidroeléctrica y los combustibles fósiles, por lo que es importante realizar inversiones en energía flotante fotovoltaica como una nueva forma de energía renovable. El estudio sugiere que es posible utilizar las metodologías propuestas y que se puede examinar un conjunto importante de variables para la gestión de activos.

**Palabras clave:** Energía renovable, Gestión de activos, Sistema fotovoltaico flotante, Soporte de decisiones, Sobradinho-Brasil.

### **INTRODUCCIÓN**

El uso de la energía solar para la generación de energía ha aumentado constantemente su participación en la matriz energética mundial y ya se presenta hoy como la fuente de energía de más rápido crecimiento, como lo destaca el Renewables Global Status Report, informe de la Agencia Internacional de Energía Renovable (Irena, 2017). Este rápido crecimiento trae consigo una cantidad sustancial de nuevos procedimientos de inversión y problemas de evaluación de proyectos. Debido a su historial relativamente corto como industria autónoma, existen pocos estudios en literatura académica previa sobre el costo de capital de las empresas de energía renovable (Donovan y Nuñez, 2010).

En 2016, Brasil tenía una potencia fotovoltaica instalada de aproximadamente 150 MW, que correspondía a aproximadamente el 0.1% de la matriz energética brasileña. Según el EPE National Energy Balance (2018), en 2017, la participación de la energía solar en la matriz eléctrica fue del 0,13%. Con un rápido crecimiento, en 2019 Brasil alcanzó más de 2 GW de energía solar instalada, lo que representa el 1.27% de su matriz energética según el Banco de Información de Generación GRANDE de ANEEL (2019).

La experiencia adquirida en el país con respecto a las instalaciones fotovoltaicas, tanto técnicas como comerciales, ha permitido establecer un entorno favorable a la aparición de propuestas innovadoras, como la generación fotovoltaica en agua.

La decisión de invertir en plantas fotovoltaicas flotantes (UFF) debe profundizarse aún más desde el punto de vista de la gestión de activos corporativos, teniendo en cuenta que la operación conjunta (UFF, HPP) con plantas hidroeléctricas permite una inversión económicamente atractiva dada su

complementariedad y su participación. de recursos. misma infraestructura aprovechando cualquier inactividad en la red de drenaje de la energía producida por el complejo.

La energía fotovoltaica flotante (UFF) en depósitos hidroeléctricos se ha propuesto como una alternativa ventajosa a los sistemas en tierra debido a la posibilidad de aumentar la eficiencia al reducir la temperatura, así como a las ventajas económicas de los costos de adquisición de terrenos evitados, una instalación más rápida. y obtener una licencia ambiental, ahorrando agua mediante la reducción de la evaporación, entre otros. La instalación propuesta de plantas fotovoltaicas flotantes en depósitos supone que las ganancias de las ventajas mencionadas anteriormente pueden compensar los costos adicionales con flotadores, anclajes, sellado, cableado de agua y vida útil reducida del equipo.

El objetivo principal de la investigación es asesorar a la alta gerencia de una compañía de energía sobre la decisión de invertir en un proyecto de planta solar flotante y, de ser así, cómo administrar los activos o el patrimonio adquirido por la compañía.

## **REVISIÓN DE LITERATURA**

La planta fotovoltaica flotante es una de las formas de generar energía renovable utilizando energía solar mediante placas para capturar la energía y transformarla en electrones casi instantáneamente.

Brasil es un país que actualmente produce energía renovable de bajo costo a través de sus represas hidroeléctricas, que, además de ser duraderas, no tienen un alto costo de mantenimiento.

Según Terra e Coelho (2005, p.192), "a pesar de todas estas ventajas, es importante recordar que los complejos hidroeléctricos (plantas de energía, represas, etc.) siempre alteran el paisaje y pueden causar impactos ambientales y otros problemas como Gran deforestación. , con daños a la flora y fauna que inundan áreas verdes, aumento de la evaporación y humedad relativa, entre otros. "

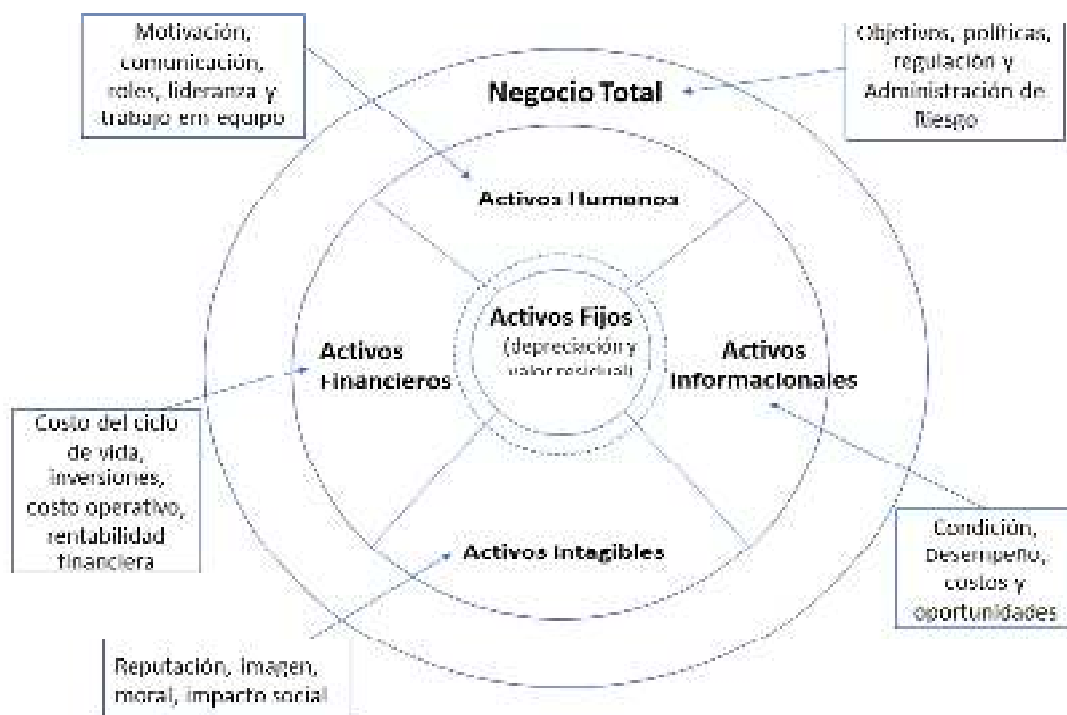
Brasil tiene ventajas para instalar plantas fotovoltaicas flotantes en todo el territorio, tenemos varias plantas hidroeléctricas, muchos ríos y lagos con presas cableadas para distribuir energía, que requieren solo estudios ambientales y recursos para la instalación y monitoreo de estas plantas.

Uno de los ejemplos más destacados en los medios de comunicación por ser la planta flotante más grande de Brasil fue la instalación en la Planta Hidroeléctrica Sobradinho / BA, que tiene la capacidad de generar 1 megavatio de energía y se completó en diciembre de 2018.

Actualmente hay proyectos de desarrollo liderados por grupos de investigación y alineados con las principales compañías de energía del país que están diseñando y desarrollando nuevas plantas solares flotantes para aumentar la capacidad de producción de energía renovable de Brasil.

## **DEFINICIÓN DE GESTIÓN DE ACTIVOS**

La gestión de activos consiste en buenas prácticas que pueden ser utilizadas por las organizaciones en su proceso de control de activos y que buscan lograr un resultado deseado y sostenible. Ver Figura 1.



**Figura 1: Gestión de Activos**

El proyecto que estamos analizando se considera un activo financiero porque genera flujo de efectivo con el tiempo, presenta riesgos financieros y operativos, y también es un activo a largo plazo que implica un compromiso de recursos.

Administrar todo el ciclo de vida del proyecto implica planificar adquisiciones, recibir activos y determinar el valor residual o la eliminación.

De hecho, la parte de nuestro proyecto se centrará en la vida de los activos financieros, específicamente, ya que estamos considerando el proyecto de investigación y desarrollo con componentes de incertidumbre que permiten una optimización de los recursos, especialmente el costo y los criterios para la inversión en activos, en comparación con otros proyectos de energía renovable que puede llevar a cabo el contratista.

La gestión de activos comprende un análisis sistémico e integrado de los activos bajo análisis, centrado en el proyecto que se analiza. La Figura 2 presenta la secuencia de gestión de activos:

<p><b>1) Objetivos y Planes de Gestión de Activos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Objetivo de la gestión de activos;</li> <li>• Planes de Gestión de activos;</li> <li>• Plan de contingencia.</li> </ul>	<p><b>3) Implementación de Planes de Gestión de activos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Actividades del ciclo de vida de los activos.</li> </ul>
<p><b>2) Controles de Gestión de Activos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estructura, Autoridades, responsabilidades;</li> <li>• Gestión de riesgo;</li> <li>• Legalidad, impuestos y otras condiciones</li> </ul>	<p><b>4) Evaluación de desempeño y Mejorías</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Control de desempeño;</li> <li>• auditoría;</li> <li>• Acciones de mejoría.</li> </ul>

**Figura 2. Proceso o Ciclo de Gestión de Activos**

## TIPOS DE METODOLOGÍAS DE GESTIÓN DE ACTIVOS

Las metodologías que estamos considerando para el análisis del proyecto son:

### a. Análisis SWOT

Herramienta que evalúa la competitividad de la empresa según cuatro variables: fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas. Según Kotler (2012), es necesario que las empresas controlen las variables macro ambientales (análisis de oportunidades y amenazas) y micro ambientales (análisis de fortalezas y debilidades). El principio de aplicación del análisis SWOT es la verificación cruzada de la información recopilada sobre oportunidades externas y amenazas que comparan la misión, visión y valores de la compañía con las fortalezas y debilidades de la compañía (Chiavenato y Shapiro, 2009).

Las fortalezas son las variables internas que la empresa tiene para generar una ventaja competitiva y aumentar sus recursos.

Las debilidades son los puntos más vulnerables de la compañía en comparación con los competidores.

Las oportunidades son la información proveniente del mercado que es capturada por el gerente y puede ser utilizada en el desarrollo e innovación de la empresa.

Las amenazas son fuerzas externas, actuales o futuras, que la empresa debe minimizar o evitar para controlar sus efectos.

La intersección entre estas cuatro variables proporciona información sobre las áreas donde la empresa puede desarrollar ventajas competitivas, ya sea en interiores o exteriores. respaldado por el análisis de indicadores financieros y de costos; lo que nos permite identificar las ventajas y desventajas del proyecto analizado, así como las variables relevantes que rodean el proyecto y externas al entorno del contratista.

Las fortalezas y debilidades por considerar pueden ser del entorno interno de la empresa, son los factores que la entidad puede tener control y actuar directamente, como la calificación de su personal. Las oportunidades y amenazas pueden provenir del mercado extranjero, y la gerencia debe tener esta percepción y prever los pasos para posicionarse mejor.

En el siguiente ejemplo, tenemos una fortaleza o debilidad de la compañía que podría ser una oportunidad o una amenaza: regular el sector eléctrico es un desafío, pero si una compañía tiene profesionales calificados en esta área, pueden ver una oportunidad o una amenaza. Más rápido. Desde esta percepción, pueden planificar y ejecutar la idea, adelantándose a un competidor. Los aspectos que se consideran relevantes en este punto de la investigación son los siguientes:

<b>Fortalezas de la empresa / proyecto:</b>	<b>Debilidades de la empresa:</b>
- Capacidad financiera de la empresa y el proyecto;	- Insuficiente capital / cuota de crédito
- Marca fuerte y reconocida	- Mala imagen de la empresa
- Excelente organización interna de la empresa.	- Falta de experiencia emprendedora
- Alta calidad de los servicios prestados	- Gestión inconsistente
- servicio al cliente impecable	- Rentabilidad por debajo del promedio
- Bajos costos de operación	- Concepto pobre de mercado
	- Poco conocimiento del mercado
<b>Oportunidades del entorno empresarial:</b>	<b>Amenazas del entorno empresarial:</b>
- Ambiente político y económico satisfactorio.	- Dificultades para obtener crédito y financiación.
- Oferta de crédito y financiación.	- Interés elevado e intercambio inestable.
- Crecimiento de la economía nacional y mundial.	- Alta incertidumbre en aspectos regulatorios
- Instalaciones gubernamentales para nuevos negocios	- Perspectiva de aumento de impuestos

**Tabla 1. Indicadores potenciales por considerar en el análisis SWOT**

### b) Análisis llamado Proceso de Jerarquía Analítica (AHP)

Cuál es un método para ayudar a las personas a tomar decisiones más complejas. Ayuda a determinar la decisión correcta y a elegir y justificar su elección en comparación con otras alternativas de inversión, teniendo como determinantes los criterios para las comparativas. El análisis lo realizan personas que desarrollan un modelo que subdivide el problema principal a resolver en problemas menores basados en la jerarquía de criterios ponderados por preferencia. Leandro Meyer (2003) afirma que simplificar la medición es la mejor alternativa, argumentando que todas las mediciones son imperfectas y que uno debe buscar una manera de medir lo que realmente importa, lo que lleva a un plan de acción más eficiente. AHP es ventajoso para comparaciones cualitativas versus cuantitativas, ya que busca la alternativa que mejor satisfaga el conjunto total de objetivos.

Determinar las mejores alternativas de inversión implica analizar algunas variables relevantes: desde obtener los permisos de construcción necesarios, autorizaciones, negociar con diferentes partes interesadas, cumplir con regulaciones legales complejas, hasta resolver los problemas técnicos asociados con la construcción y la distribución del edificio. energía generada Todo el proceso implica altos costos de ingeniería.

Según Ahmad y Tahar (2013) y Wu y Geng (2014), los criterios utilizados como las variables más relevantes del sistema son: Recursos (disponibilidad diaria de radiación solar), Eficiencia, Economía o Costo-Beneficio, Riesgo social (o impacto social) y del Medio ambiente.

### c) Gráfico de radar (Diagramas de araña)

En este tipo de análisis, un cierto número de variables se consideran relevantes, por ejemplo, en la siguiente tabla se evalúan 25 elementos. El analista evaluará con el tiempo las variaciones en cada una de las variables que asocian un cierto peso que varía de 1 a 5, por ejemplo 1 significará deficiente y el valor máximo 5, excelente. En cada medición se considera el grado de variación / innovación de las variables. SEBRAE desarrolla los trabajos que utilizan el diagrama de radar para analizar el grado de innovación de los proyectos.



Figura 3. Variables de diagnóstico para la gestión de activos de la empresa

### d) Metodología de gestión de riesgos operativos

Esta última metodología presentada es dirigida a mitigar los impactos en el patrimonio del proyecto.

Hay diferentes técnicas que se pueden incluir en esta sección para mostrar alternativas rentables basadas en niveles de bajo riesgo, retrasos y plazos de entrega. Por ejemplo: probabilidad vs. impacto de la matriz.

En general, el riesgo tiende a reducir el valor de los proyectos y la capacidad de la gerencia para alcanzar sus objetivos, en muchos casos esta disminución es significativa. La gerencia busca limitar esta reducción para aumentar el valor del proyecto a través de objetivos operativos: eficiencia (gestión de pérdidas esperadas), gestión de cambios (evitar pérdidas inesperadas) y control interno (evitar pérdidas catastróficas). La Figura 4 a continuación da un ejemplo de una matriz de probabilidad versus impacto y sus criterios de decisión.

<b>Probabilidad / Impacto</b>	<b>Muy bajo</b>	<b>Bajo</b>	<b>Moderado</b>	<b>Alto</b>	<b>Muy Alto</b>
<b>Muy bajo</b>	1	2	3	4	5
<b>Bajo</b>	2	4	6	8	10
<b>Moderado</b>	3	6	9	12	15
<b>Alto</b>	4	8	12	16	20
<b>Muy Alto</b>	5	10	15	20	25

Para la definición de prioridades baja, media y alta, generalmente se utiliza el siguiente rango teórico:

<b>Nivel de Prioridad</b>	<b>Intervalo</b>
Bajo	1-5
Medio	6-14
Alto	15-25

**Figura 4. Análisis de Probabilidad versus Impacto**

## CONCLUSIONES

En los días actuales, el Brasil presenta un entorno favorable para el desarrollo de propuestas innovadoras en el campo de la energía fotovoltaica, las iniciativas han tenido éxito, sin embargo, las aplicaciones de toma de decisiones pueden ser un desafío. A pesar de que las metodologías propuestas en este documento para el análisis de proyectos son técnicamente factibles y económicamente viables como se informó en otros estudios sobre el tema.

## REFERENCIAS

- ABESCO- Brazilian Association of Energy Conservation Services Companies. Sao Paulo-SP. Disponible en: <www.abesco.com.br>.
- ABRADEE - Brazilian Association of Electricity Distributors. Brasilia DF. Disponible en: <www.abradee.com.br>.
- ABREU, V. B. Analysis of the economic and financial viability of wind energy in the light of the new context of the electricity sector. 2008. Dissertation (Master) - Economics Course, Federal University of Pernambuco, Recife, 2008.



ABSOLAR - Brazilian Association of Photovoltaic Solar Energy. Sao Paulo-SP. Available at: <<http://www.absolar.org.br/>>.

AHMAD S. and TAHAR R.M. (2014), *Renewable Energy*. 63, 458-466.

ANEEL National Agency of Electric Energy. BIG - Generation Information Bank. 2019.

ANEEL National Agency of Electric Energy. Normative Resolution No. 481, of April 17, 2012.Changes Normative Resolution 77.

ANEEL National Agency of Electric Energy. Distribution Procedures Electric Energy in the National Electric System - PRODIST. Module 3 - Access to the Distribution System.Rev.7. Brasilia, DF, 2017.

BRAZILIAN CENTRAL BANK. Minutes of the 216th meeting of COPOM. Available at: <<http://www.bcb.gov.br/?COPOM216/>>. Access on 08ago2018.

BORDEAUX-REGO, Ricardo et al. Economic and financial viability of projects. Rio de Janeiro: FGV, 2006

BREALEY, R.A; MYERSS. W; ALLEN F. Principles of Corporate Finance, 10th ed. NewYork: McGraw-Hill, 2011.

BUDEL, D. Economic viability of photovoltaic systems in homes. 2017. Undergraduate work - Engineering Course, Federal University of Santa Maria, Santa Maria / RS, 2017.

CAMLOFFSKI, R. Investment analysis and financial viability of companies. Sao Paulo: Atlas, 2014.

CASAROTTO FILHO, Nelson.; KOPITTKE, Bruno Hartmut. Investment analysis: Financial mathematics, economic engineering, decision making, business strategy 8.ed. Sao Paulo: Atlas, 1998.

CHIAVENATO, I.; SAPIRO, Aaron. Strategic Planning: Fundamentals and Applications. Rio de Janeiro. Elsevier, 2009.

DASGUPTA, A.K. and PEARCE, D. (1972), *Cost Benefit Analysis: Theory and Practice*, Macmillan, London.

DAYS, Pablo Ribeiro. Characterization and recycling of photovoltaic module materials (solar panels). 2015. Master's dissertation - Engineering Course, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

DONOVAN, C. - Nuñez, L. (2012) Figuring out what's fair: The cost of equity capital to renew energy in emerging markets. *Energy Policy*, Vol. 40, 49–56.

DRAKE, P.P .Capital budgeting techniques. James Madison University, 2008.

EPE National Energy Balance Energy Research Company, 2018. Available at: <<http://epe.gov.br/en/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>>. Accessed on: 10/04/2019

GREENPEACE., *Energy Revolution: Towards Clean Development*, 2013.

KARASAWA, William Kasumasa. Economic and Financial Feasibility Analysis of a Photovoltaic Power Generation Project. 2015. Undergraduate Monograph - Engineering Course, University of São Paulo, São Paulo, 2015.

KNAPP, K. E.; JESTER, T. L. An Empirical Perspective on the Energy Payback Time for Photovoltaic Modules. In: SOLAR CONFERENCE, 2000, Madison, Wisconsin. LORENZO, E. Solar Electricity - Ingeniería de Los Photovoltaic Systems. 1. Ed. Madrid: Polytechnic University of Madrid - Institute of Solar Energy, 1994. MANKIW, G. Introduction to the Economy.5. Ed. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

NAKABAYASHI, Renny. Photovoltaic microgeneration in Brazil: current conditions and future perspectives. 2014. 58 f. Master Thesis - Institute of Energy and Environment, USP, São Paulo, 2014.

NETO, M. R. B.; CARVALHO, P., *Electric Power Generation: fundamentals*. 1. Ed. – São Paulo: Erica, 2012.

ROSSAROLA, Adriane. Economic and financial analysis of solar energy investment and externalities: Case study of an industrial company in Santa Catarina. 2016. Final paper of the Economics course, Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

RÜTHER, R. Photovoltaic solar buildings: the potential of photovoltaic solar generation integrated with urban buildings and connected to the public electricity grid in Brazil. 1st ed. Florianópolis: UFSC / LABSOLAR, 2004.

SILVA, Diva Martins Rosa. Application of AHP Method for Industrial Project Evaluation. 2007. 36-49 f. Master Thesis - Postgraduate Program in Industrial Engineering, PUC-RJ, Rio de Janeiro, 2007. Available at: <<https://web.tecgraf.puc-rio.br/press/publication/RosaSilva2007/RosaeSilva2007.pdf>>. Accessed on: March 26,2019.

- SOUZA, A.; CLEMENTE, A., Financial Decisions and Investment Analysis: Fundamentals, Techniques and Applications. St. Paul: Atlas S.A., 1997.
- TOLMASQUIM, M. T.; New Model of the Brazilian Electric Sector. 2 ed. Rio de Janeiro: Synergia Publisher, 2015.
- TUNDISI, H. S. F.; Energy uses alternatives for the 21st century. 16. ed. Sao Paulo: Current, 2013.
- VARIAN, H. R. Microeconomics - A modern approach. Translation of the 8th edition ed. [S.l.] Elsevier, 2012.
- VILLALVA, M. G. Photovoltaic Solar Energy; Concepts and Applications. 2 ed. Sao Paulo: Erica, 2016.
- WU Y. and GENG S. (2014). Multi-criteria decision making on selection of solar-wind hybrid Power Station Location: A Case of China. Energy Convers. Manag. 81, 527-533.
- ZILLES, R.; MACEDO, W. N.; GALHARDO, M. A. B.; OLIVEIRA, S. H. F.; Photovoltaic systems connected to the grid. 1st reprint 2015. São Paulo: Text Workshop, 2012.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Desarrollo Científico Tecnológico (CNPq) y a la Universidad Federal de Pernambuco (UFPE) por su apoyo a lo largo de la investigación.

## **ASSESSMENT OF ASSET MANAGEMENT METHODS APPLIED TO FLOATING PHOTOVOLTAIC SYSTEMS**

### **ABSTRACT**

This article examines some asset management support methodologies considering floating photovoltaic power projects. The analysis becomes important considering that there is a tendency to increase investments in the next years in this segment and mechanisms that help in decision making to maintain the value of assets are needed.

In this sense, four assessment methods are proposed: SWOT analysis, Analytic Hierarchy Process (AHP), Radar Chart and a methodology based on operational risk measurement.

The Brazilian energy matrix is diversified, and electricity generation depends on hydropower and fossil fuels, making it important to make investments in photovoltaic floating energy as a new form of renewable energy.

The study suggests that it is possible to use the proposed methodologies and that an important set of variables for asset management can be examined.

**Keywords:** Renewal energy, Asset management, Floating PV system, Decision support, Brazil.

---