

## **ANÁLISIS DEL PRIMER AÑO DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A LA RED EN BASE MARAMBIO, ANTARTIDA.**

**J. A. Garcia<sup>1,2</sup>, O. Romanelli<sup>1,2</sup>, J. Fernandez Vazquez<sup>1</sup>, H. Socolovsky<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Departamento Energía Solar, Centro Atómico Constituyentes,  
Comisión Nacional de Energía Atómica (DES-CAC-CNEA)  
Av. General Paz 1499, 1650 San Martín, Provincia de Buenos Aires, Argentina.

<sup>2</sup>Universidad Nacional de San Martín (UNSAM)  
Tel. 011-48396757 – e-mail: jgarcia@tandar.cnea.gov.ar

*Recibido 24/07/17, aceptado 26/09/17*

**RESUMEN:** En el marco del proyecto IRESUD, en diciembre de 2014 se instaló un sistema fotovoltaico de 1,92 kWp conectado a la red eléctrica de 220 V de la Base Marambio, Antártida. En el presente trabajo se analiza el recurso solar del lugar y se muestran los resultados del primer año de generación de la instalación. Finalmente se compara el funcionamiento de la instalación con una instalación de similares características situada en la ciudad de Buenos Aires. En base a estos análisis y comparación se concluye que la utilización de este tipo de tecnologías en las bases antárticas es altamente factible, pero que se requiere combinarla con otras fuentes de generación renovables en los meses invernales.

**Palabras clave:** sistema fotovoltaico, conexión a red, generación distribuida, Antártida.

### **INTRODUCCION**

El proyecto “Interconexión de sistemas fotovoltaicos a la red eléctrica en ambientes urbanos”, parcialmente subsidiado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva (Proyecto FITS N° 0008/2010) fue ejecutado desde fines de 2011 hasta fines de 2015. El objetivo principal de este proyecto era introducir en el país tecnologías asociadas con la interconexión a la red eléctrica, en áreas urbanas y periurbanas, de sistemas solares fotovoltaicos (FV) distribuidos, contemplando para ello cuestiones técnicas, económicas, legales y regulatorias. Para su ejecución, se creó el Convenio Asociativo Público-Privado IRESUD conformado por dos organismos públicos, la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y la Universidad Nacional de San Martín (UNSAM), y 5 empresas privadas: Aldar S.A., Edenor S.A., Eurotec S.R.L., Q-Max S.R.L. y Tyco S.A.

Asimismo, el proyecto cuenta con el apoyo del Ente Nacional Regulador de la Electricidad (ENRE) y la Secretaría de Energía de la Nación. Participaron también desde un comienzo la Universidad de Buenos Aires (Facultad de Ingeniería), Universidad Nacional de Luján, Universidad Nacional de La Plata y Universidad Tecnológica Nacional (Regionales Buenos Aires y Mendoza) y la Universidad Nacional del Nordeste. Posteriormente se sumaron otras universidades y organismos sumando un total de 34 instituciones, entre los que se encuentra Fuerza Aérea Argentina.

Como parte del proyecto se previó el diseño, instalación y operación de sistemas FV piloto en viviendas de interés social y edificios públicos y privados, entre otros (Eyras et al., 2016). La generación de energía en forma distribuida y dentro de los mismos centros de consumo implica un importante ahorro en transporte de la misma y sus costos, permitiendo a su vez disminuir el quemado de combustibles fósiles, y, por consiguiente, las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (Eyras, 2014)

Una de estas instalaciones pilotos fue realizada en la Base Antártica Marambio (figura 1) en conjunto con la Dirección General de Investigación y Desarrollo (DGID) de la Fuerza Aérea Argentina. La DGID es la encargada de llevar adelante el Plan de Apoyo a la Actividad Antártica y llevar a cabo las acciones necesarias para, según dicta Protocolo al Tratado Antártico sobre Protección del Medio Ambiente (STA, 1991), disminuir todo lo posible el impacto del hombre en el continente Antártico.

La implementación de un sistema de generación eléctrica a partir de fuentes renovables permitirá disminuir el impacto ambiental. En la actualidad gran parte de la producción eléctrica en Base Marambio se realiza mediante generadores diésel que son alimentados con Gasoil Antártico (GOA),

una mezcla entre gasoil convencional con JP1 y otros aditivos anticongelantes para hacerle frente a las bajas temperaturas del ambiente. La usina tiene una capacidad instalada de hasta 1000 kW (cuatro grupos electrógenos marca Caterpillar).

El consumo de la base 200 kW por hora promedio, con mayor demanda en meses invernales (300 kW aproximadamente) y menor en meses estivales. El consumo anual de energía es de aproximadamente 1.750 MWh que equivalen a un consumo de aproximadamente 900.000 litros anuales de GOA.

Además, el GOA es llevado desde el continente americano al antártico mediante barcos, operación que demanda gran cantidad de recursos y un gran esfuerzo de coordinación de logística, afectación de personal y medios aéreos (helicópteros) para su descarga.



Figura 1. Fotografía del sistema fotovoltaico instalado en la Base Marambio.

## RECURSO SOLAR EN LA BASE MARAMBIO

La Base Marambio (la mayor base que posee la República Argentina en la Antártida) está ubicada en una meseta a 200 metros de altura sobre el nivel del mar de la Isla Marambio. La isla tiene catorce kilómetros de longitud y ocho kilómetros de ancho, ubicada sobre el Mar de Weddell a  $64^{\circ}14'$  de latitud sur y  $56^{\circ}43'$  de longitud oeste, a una distancia de 3.600 kilómetros de Buenos Aires y 2.800 kilómetros del Polo Sur.

Debido a su ubicación, apenas por encima del Círculo Polar Antártico ( $66^{\circ} 33' 46''$ ), las condiciones de insolación en la base varían enormemente entre diferentes épocas del año. En la Figura 2 se muestran los ángulos de elevación solar en función del ángulo azimutal para los meses de enero a junio (los meses restantes tienen igual comportamiento dependiendo de la estación del año correspondiente) (Rekioua y Matagne, 2012; Sunearthtools, 2017).

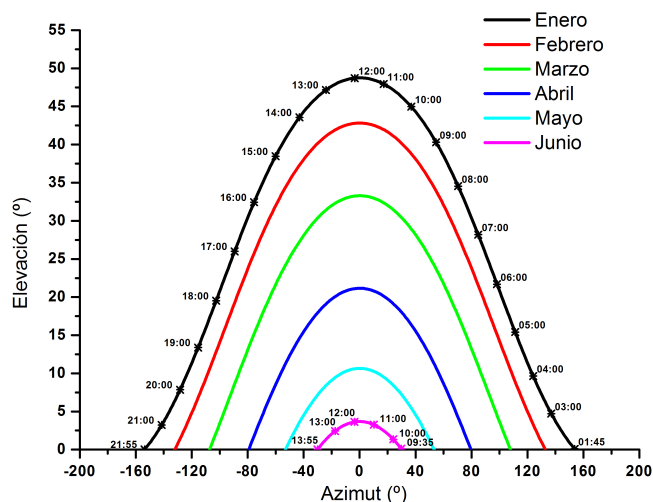


Figura 2. Trayectoria solar en la Base Marambio para diferentes meses del año.

Como se observa en la figura 2, la diferencia entre los meses de invierno y verano es extrema, dando días de 20 horas de sol en verano y de solo 4 horas en invierno. Es importante remarcar que la elevación solar en meses invernales no supera los  $10^\circ$ . Las consecuencias de estas diferencias pueden observarse en la radiación global recibida en plano horizontal. En la figura 3A, se muestra una medición real de este valor para los meses de enero a junio. Los valores fueron medidos con un piranómetro Kipp & Zonen del servicio meteorológico nacional cada 1 minuto. En las figuras 3B y 3C, se muestran en detalle una serie de días típicos del mes de enero (figura 3B) en comparación con los del mes de junio (figura 3C). En la medición, en función del tiempo, de la radiación global sobre plano horizontal se observa la diferencia no solo de intensidad, sino también de la cantidad de horas de luz diaria entre los diferentes meses mostrados.

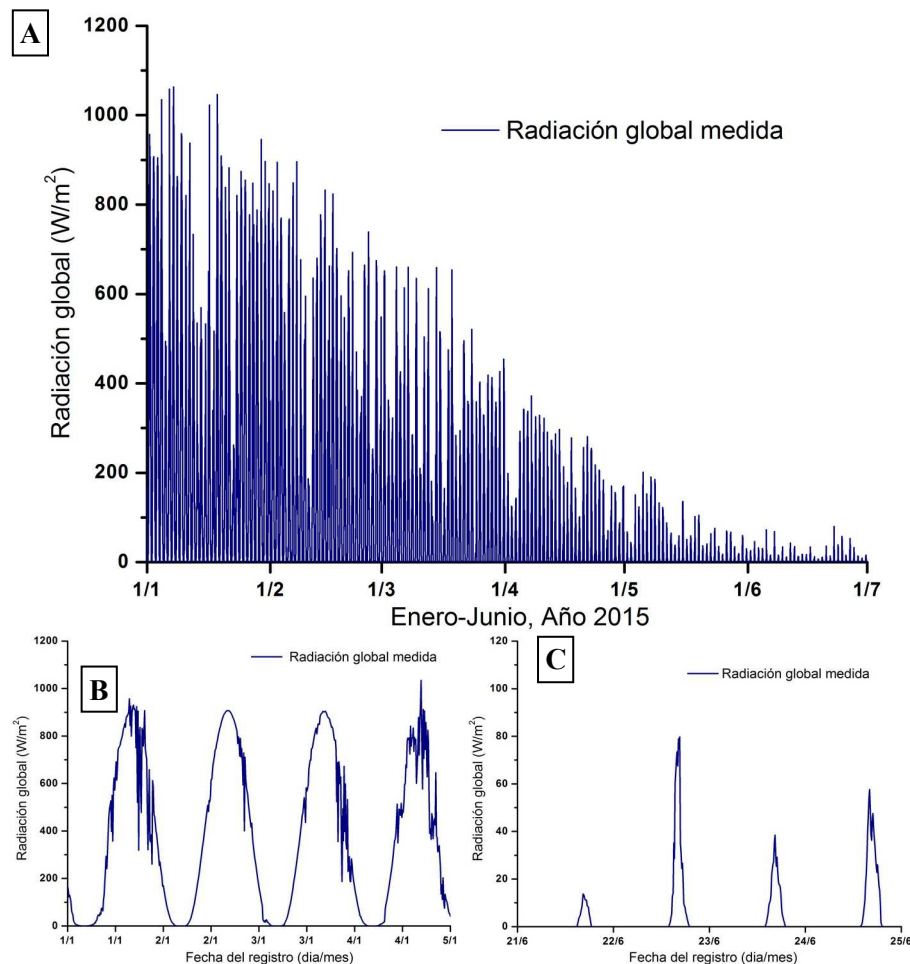


Figura 3.A: Radiación global medida en plano horizontal entre los meses de enero y junio, B: detalle de la Radiación global medida en plano horizontal par algunos días del mes de enero, C: detalle de la Radiación global medida en plano horizontal par algunos días del mes de junio (notar el cambio de escala de B a C).

Para calcular la energía anual total recibida en plano horizontal es necesario integrar en dicho periodo la radiación global medida en plano horizontal. A partir de las mediciones mostradas anteriormente se calculó, mediante integración numérica, un valor de  $982 \text{ kWh/m}^2\text{-año}$  de energía recibida en plano horizontal durante todo el año 2015.

## LA INSTALACION Y SUS CARACTERISTICAS

La instalación piloto de la Base Marambio se ubicó en el techo de la *Terminal Aérea de Pasajeros y Carga* debido, principalmente, a su ubicación, orientación y fácil acceso. Cabe aclarar que se descartó la confección e instalación de una estructura específica para los paneles debido a las condiciones climáticas imperantes hacen muy difícil realizar trabajos complejos en el lugar. Sumado a esto

debemos mencionar que, dado el ajustado cronograma de la base en meses estivales, el tiempo destinado para completar la instalación era escaso.

La terminal aérea, al ser un edificio preexistente, no posee la orientación óptima respecto del norte, para la instalación de paneles FV, siendo la desviación de aproximadamente 30° hacia el oeste (figura 4). Por el mismo motivo la inclinación de los paneles tampoco es la óptima (Grossi y Righini, 2012), siendo ésta la misma que la inclinación original del techo de 27°.

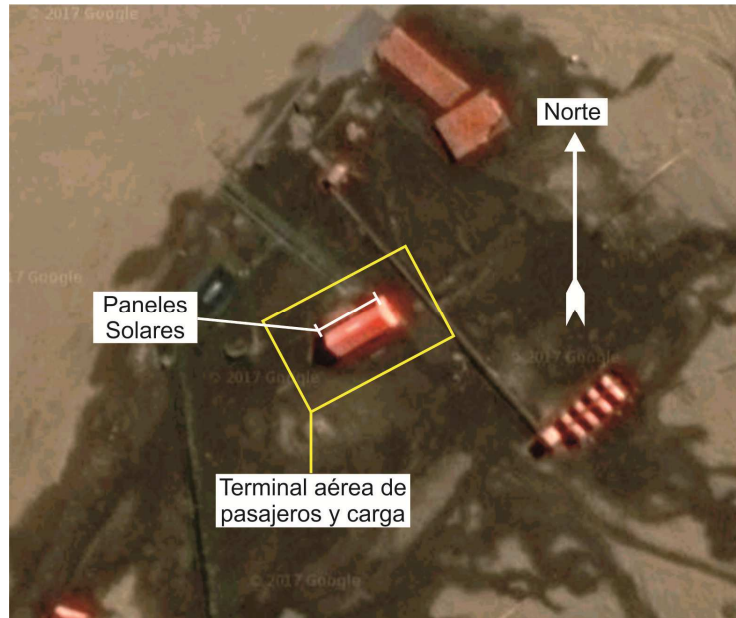


Figura 4: Imagen satelital de la instalación y su disposición respecto del norte (Google, 2017)

El sistema instalado está compuesto por 8 módulos FV *Solar World Poly SW240* de 240 Wp, totalizando una potencia de 1,92 kWp y está conectado a la red eléctrica de la base mediante un inversor de tensión *Sirio modelo 1500* de 1,5 kW, que inyecta energía en la red eléctrica de 220 V. Entre el sistema fotovoltaico y la red se colocó un medidor de energía monofásico para contabilizar la energía provista por el sistema. En la figura 5 se puede observar el esquema de conexión de la instalación y las diferentes protecciones e interruptores que posee.

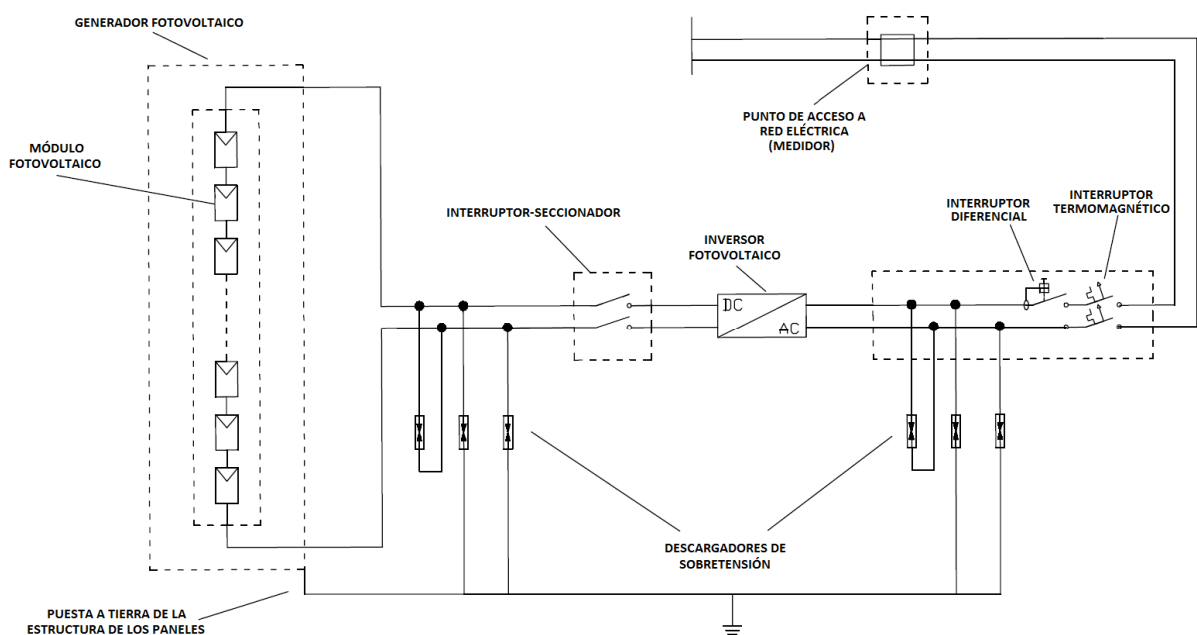


Figura 5: Esquema unifilar de la conexión del sistema FV a la red eléctrica de la base.

El sistema se montó y conectó por primera vez el 10 de diciembre del 2014 cuando personal de la CNEA y la DGID viajó especialmente para su instalación y puesta en marcha, y entró en funcionamiento regular en enero del año 2015 sin presentar mayores inconvenientes hasta el momento.

## GENERACION ANUAL DE LA INSTALACION

Para evaluar el funcionamiento de la instalación se registró regularmente la energía suministrada por el sistema (contabilizada por el medidor). En la figura 6 se muestra el perfil de energía acumulada inyectada a la red a lo largo del año 2015, siendo la contribución total a lo largo de ese año de 1720 kWh. Se observa que durante un período de cuatro meses, desde el 21 de Abril al 21 de Agosto aproximadamente, casi no inyecta energía. En ese período el sistema proporciona menos de 0,5 kWh de energía por día a la red, generando solo el 2,1% del total la energía generada en el año.

Este fenómeno es consistente con el análisis de la trayectoria solar y radiación incidente mostrado en la sección “Recurso solar en la base Marambio”, ya que no sólo en esos meses hay pocas horas de sol, sino que el ángulo de elevación del sol es menor a los 10°. Debido a esto, la incidencia directa de sol sobre los paneles es casi nula, siendo posible que la generación sólo se dé por la radiación difusa y el albedo (Wiscombe y Warren, 1980; Grossi y Righini, 2012).

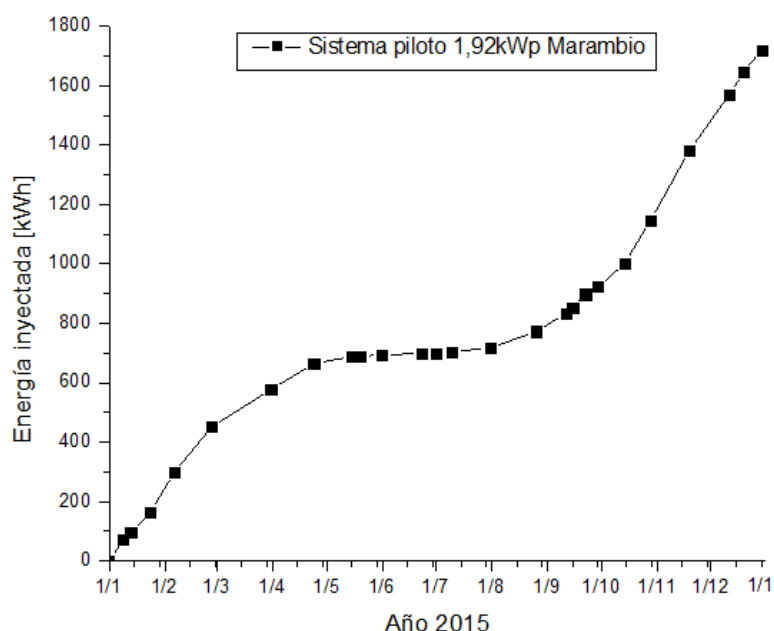


Figura 6. Perfil de generación de energía eléctrica a lo largo del año 2015. En la integral anual el valor de energía inyectada fue de 1720kWh.

Además de las características de la radiación solar incidente sobre los paneles fotovoltaicos, debemos tener en cuenta la acumulación de nieve sobre los paneles, ya que las temperaturas predominantes en la base generan nevadas regulares durante casi todo el año (SMN, 2017). En la figura 7 se observa esta situación, luego de la nevada y en ausencia de viento, la nieve permanece sobre los paneles solares debido a las bajas temperaturas. Es importante aclarar que aún con una capa de nieve de algunos centímetros, los paneles siguen funcionando y generando energía. Sin embargo no se tienen datos suficientes para analizar más profundamente este fenómeno y decir cuantitativamente el porcentaje de reducción de generación respecto a los paneles con misma radiación solar incidente pero sin nieve acumulada (Andrews et al., 2013).



Figura 7. Fotografía del sistema fotovoltaico instalado en la Base Marambio luego de una nevada. Se destaca que a pesar de la nieve depositada el sistema estaba entregando energía a la red.

## ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO

Las características únicas de la instalación y las condiciones climáticas predominantes en el lugar (nevadas regulares) para este tipo de instalaciones impiden estimar, de forma directa, si la energía inyectada a la red por el sistema es un valor “aceptable” desde el punto de vista económico y logístico. Esto hace muy difícil definir si es conveniente o no el uso de esta tecnología para proveer energía eléctrica a las bases antárticas.

Para caracterizar las prestaciones del sistema analizado se lo comparó con una instalación solar de características similares ubicada en la ciudad de Buenos Aires. Dicha instalación también cuenta con 8 paneles de 240 Wp, totalizando una potencia de 1,92 kWp y está conectada a la red eléctrica del lugar mediante un inversor de tensión de 1,5 kW. Es importante aclarar que la instalación utilizada para la comparación está orientada perfectamente al norte, y cuenta con una inclinación igual a la latitud del emplazamiento (34°).

En la tabla 1 se comparan datos de radiación solar y generación para las instalaciones de Marambio y de Buenos Aires. Los valores de radiación solar de Buenos Aires se obtuvieron de la tabla de radiación solar Argentina de Righini y Grossi, (2011).

	<b>Base Marambio</b>	<b>Buenos Aires</b>
Radiación solar anual plano horizontal (kWh/m <sup>2</sup> -año)	982	1550
Energía inyectada a la red (kWh-año)	1720	2600

Tabla 1. Comparación de valores de radiación solar y energía inyectada entre Buenos Aires y Base Marambio.

De la tabla se desprende en primera instancia que existe una buena relación entre la energía inyectada y la radiación solar anual para ambos casos. Se observa que dicha relación es un 4,5% mayor para el caso de la instalación de Marambio. Sin embargo debemos tener en cuenta que las orientaciones de ambas instalaciones no son iguales ni óptimas, por lo que la comparación no es directa. Si bien la instalación de Buenos Aires no se encuentra en el ángulo óptimo, de 27°, para generación anual (Grossi y Righini, 2012), sí se encuentra en un ángulo cercano y la diferencia de radiación anual entre ambos ángulos es de aproximadamente un 8%, mientras que en la instalación bajo estudio el ángulo es de aproximadamente de 37° menor al óptimo (tomando como óptimo el ángulo igual a la latitud), siendo mucho mayor en este caso la diferencia de radiación solar anual entre el plano horizontal y el ángulo óptimo, pudiendo superar el 40% (Grossi y Righini, 2012).

Como en nuestro caso no podemos saber exactamente cuál sería la ganancia de radiación al utilizar el plano óptimo, consideraremos el cálculo estándar geométrico de pérdida de generación en una instalación por diferencia al ángulo óptimo (HE5. 2006; Ioannou et al., 2014). Considerado como

ángulos óptimos los calculados por Grossi y Righini (2012) tendremos una pérdida de tan solo el 0,6% en la instalación de Buenos Aires, pero del orden del 20% en Marambio (teniendo en cuenta también la desviación respecto del norte). Según el modelo, en condiciones óptimas la instalación de Base Marambio hubiese generado en el año 2015 aproximadamente 2150 kWh/m<sup>2</sup>-año y la de Buenos Aires 2616 kWh/m<sup>2</sup>-año.

En este caso la relación entre la energía inyectada y la radiación solar anual para ambos, luego de las correcciones, difiere casi un 30%. Esta diferencia posiblemente sea debida el aumento de la eficiencia al disminuir la temperatura de los paneles solares (Dubey et al., 2013; Ramakrishnan, 1988), ya que la temperatura media anual en la base Marambio es de aproximadamente -8,5°C (SMN, 2017). Además es muy importante la contribución del albedo (Ramakrishnan, 1988), que no fue tomada en cuenta en el modelo utilizado para la comparación.

## CONCLUSIONES.

Se ha evaluado el desempeño del sistema fotovoltaico conectado a red en Base Marambio luego de un año de servicio continuo. La misma generó un 66% de la energía que produciría una instalación de similar potencia en la ciudad de Buenos Aires. Sin embargo, esta relación de producción no es directa pues ambas instalaciones no poseen inclinación y dirección óptimas para el lugar de emplazamiento, por lo que se corrigió el valor de producción por el modelo de pérdidas geométricas y la relación de producción entre ambas instalaciones sube al 82%, siendo la radicación en plano horizontal en la base Marambio de aproximadamente 37% menos que en Buenos Aires. Éste es un valor alentador con vistas al aprovechamiento de la energía solar en las bases antárticas de latitudes similares a la de Marambio. Sin embargo cabe aclarar que el sistema prácticamente no genera energía durante 4 meses (época invernal) por lo que debe ser complementado con otro método de generación renovable para, en conjunto, reemplazar la generación convencional.

Por otro lado se observa una diferencia en relación al rendimiento a favor de la instalación de Marambio, que si bien no es concluyente por las deficiencias del modelo, sea, posiblemente, producida por la diferencia entre las temperaturas de operación de las celdas solares en ambos sitios sumados al efecto del albedo en Marambio. Se proyecta trabajar en un futuro sobre estos temas.

## REFERENCIAS

- Andrews R., Pollard A., Pearce J. (2013). The effects of snowfall on solar photovoltaic performance. *Solar Energy Vol 92*, pp. 84-97, 2013.
- Dubey S., Sarvaiya J., Seshadri B. (2013). Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World – A Review. *Energy Procedia Vol. 33*, pp. 311 – 321, 2013.
- Eyras I. (2014). Edificios generadores, edificios usinas. En O. Paris, *Eco-Arquitectura*. Córdoba: I+P.
- Eyras I., Durán J., Parisi F., Eyras R., Álvarez M. (2016). Proyecto IRESUD: Primeros Ejemplos de Energía Solar Fotovoltaica Integrada a la Arquitectura (BIPV) en el país. *Acta de la XXXIX Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 4*, pp. 13.01-13.10, 2016.
- Google (2017). <https://www.google.com.ar/maps/place/Base+Marambio>.
- Grossi Gallegos H. y Righini R. (2012), Ángulo Óptimo Para Planos Colectores de Energía Solar Integrados a Edificios. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 16*. Pp. 04.01-04.07, 2012.
- HE5 (2006), Contribución fotovoltaica mínima de energía eléctrica, Documento Básico sobre el ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación, España, pp. 8-9, 2006.
- Ioannou K., Stefanakis N., Boudouvis A. (2014). Design optimization of residential grid-connected photovoltaics on rooftops. *Energy and Buildings Vol. 76*, pp. 588-596, 2014.
- Ramakrishnan K. (1988). Experiments on Harnessing Non-Conventional Energy Sources in Antarctica. *Fifth Indian Expedition to Antarctica, Scientific Report, Department of Ocean Development, Technical Publication Vol. 5*, pp. 445-453, 1988.

- Rekioua D. y Matagne E. (2012). Optimization of Photovoltaic Power Systems, pp. 31-38. Springer-Verlag London, 2012.
- Righini R. y Grossi Gallegos H. (2011) Mapa de energía solar colectada anualmente por un plano inclinado un ángulo óptimo en la República Argentina. En Actas del Cuarto Congreso Nacional – Tercero Iberoamericano sobre Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía – HYFUSEN 2011 11-161.
- SMN (2017). <http://www.smn.gov.ar/?mod=antar&id=4>.
- STA (1991). Protocolo al Tratado Antártico sobre Protección del Medio Ambiente. Secretaria del tratado Antártico [https://www.ats.aq/documents/recatt/Att006\\_s.pdf](https://www.ats.aq/documents/recatt/Att006_s.pdf)
- Sunearthtools (2017). [https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos\\_sun.php#chartC](https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php#chartC)
- Wiscombe W., y Warren S. (1980). A model for the spectral albedo of snow. I: Pure snow. Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 12, pp. 2712-2733, 1980.

## **ABSTRACT**

Within the framework of the IRESUD Project, a new 1.92 kWp photovoltaic system was installed in December 2014, connected to the 220V electric network at Marambio Base, Antartida. This paper analyses the solar resources at that location and shows the results of the first year of electricity generation from this installation. Finally, we compare the working of this installation to that of one with similar characteristics in the city of Buenos Aires. Based on this analysis and comparison, we conclude that the use of this kind of technology in Antarctic bases is highly feasible, but that it needs to be combined with other renewable sources during the winter months.

**Keywords:** Photovoltaic system, grid connection, distributed generation, Antarctica.