

DETERMINACIÓN DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MÁXIMA ANUAL DE FUENTES FOTOVOLTAICAS DE 30KW EN LA PROVINCIA DE SALTA: CÁLCULO DEL ÁNGULO ÓPTIMO UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO

Roberto F. Farfán¹, Carlos A. Cadena², Alejandro Hernandez²

1 INENCO (CONICET)-, Facultad de Ingeniería, U.N.Sa. Avda. Bolivia 5150 – Salta, Argentina.

2 INENCO (CONICET)-, Facultad de Ciencias Exactas, U.N.Sa. Avda. Bolivia 5150 – Salta, Argentina.
farfan.roberto.f@gmail.com

Recibido 12/08/16, aceptado 09/10/16

RESUMEN: El trabajo tiene como objetivo calcular la energía eléctrica máxima que puede generar una instalación fotovoltaica de 30KW en la provincia de Salta para cada mes del año, optimizando el ángulo de inclinación de los paneles. Para este cálculo se utilizan más de 300.000 datos de temperatura y radiación mediante los cuales pueden obtenerse de forma indirecta la energía que genera una instalación fotovoltaica. Para la optimización se implementaron algoritmos genéticos, utilizando como “función objetivo” la energía generada por la instalación anualmente y como variable a optimizar se determinó el ángulo de inclinación. El cálculo se dividió en dos partes, en el primer se determinó un ángulo óptimo fijo para todo un año, seguidamente doce ángulos óptimos, uno para cada mes. Como consecuencia de los cálculos realizados se obtiene la energía que es capaz de inyectar a la red una instalación fotovoltaica de uso residencial, enmarcado en la ley N°7824 de balance neto en la provincia de Salta.

Palabras clave: fotovoltaico, algoritmo genético, energía solar, ley 7824

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 el por aumento del precio del petróleo, cobra importancia el concepto de generación distribuida, sobre todo si los sistemas de generación utilizan energías renovables. Entre los sistemas de energías renovables más desarrollados en los últimos años, se encuentran los sistemas fotovoltaicos (FVs). Estos sistemas convierten la energía de la radiación solar en energía eléctrica por medio de celdas fotovoltaicas. Estas celdas se montan en una placa y se conectan entre sí formando un módulo FV. La corriente continua (CC) generada por un conjunto de módulos FVs, luego de convertirse en corriente alterna (AC) por medio de un inversor, puede ser consumida por cargas locales o puede inyectarse a la red de energía convencional.

En la provincia de Salta se encuentra en vigencia la ley N° 7824, conocida como de balance neto. Esta ley define Grupo de Generación de Fuentes de Energías Renovables (GGER) a las fuentes generadoras de energías que se conectan en paralelo a la red de baja tensión trifásica y utiliza como su principal recurso una fuente renovable. Las GGER pueden utilizar diferentes recursos para la generación y el precio del KWh está especificado de acuerdo al tipo de generación, pudiendo ser esta, por medio de equipos de energía solar fotovoltaica, equipos eólicos, de biomasa o equipos de energía hidráulica. Al igual que las legislaciones de otros países, las GGER se dividen en dos grupo: usuarios residenciales (hasta 30KW) o bien usuarios industriales o productivos (hasta 100KW).

La energía que puede generar una GGER utilizando paneles fotovoltaicos depende de características técnicas de los módulos FVs, de la irradiancia y temperatura del lugar, también depende de la superficie de montaje y el diseño del sistema asociado a la misma, relacionado con la orientación, inclinación y la distancia al punto de conexión. En base a datos de irradiancia y temperatura ambiente del lugar, puede obtenerse la potencia de una instalación fotovoltaica, por lo tanto, se puede determinar la rentabilidad de la misma. Es por ello que para un proyecto de generación de energía solar FV es fundamental conocer, además de la disponibilidad del recurso solar, información sobre parámetros meteorológicos. Esta información es fundamental para saber cuál es la energía que puede aprovecharse a lo largo del año o en una determinada época.

En el trabajo se busca determinar la Energía que puede inyectarse a la red. Para ello se utilizan más de 300.000 datos de temperatura y radiación mediante los cuales se obtiene de forma indirecta la energía que genera una GGER de uso residencial en Salta Capital. Este cálculo se encara planteando un problema de optimización, el cual se resuelve utilizando algoritmos genéticos. En el cálculo se puede determinar el ángulo de inclinación de los paneles FV óptimo para Salta Capital y como consecuencia de esto, la energía generada. La implementación de esta potente herramienta computacional se debe a que este tipo de algoritmos se suelen implementar en problemas de optimización multiobjetivos y en problemas con múltiples máximos o mínimos (Bakhshi et al., 2014).

MODELO DE PANEL FOTOVOLTAICO

El panel FV constituye la principal fuente de energía de una instalación fotovoltaica y es el resultado de asociar un conjunto de celdas fotovoltaicas en serie y paralelo. En la Figura 1 se observa el modelo que se utiliza para representar un modulo FV en condiciones de iluminación, el mismo también puede utilizarse para representar una celda fotovoltaica o un conjunto de módulos (Duffie and Beckman, 1991; Villalva et al., 2009).

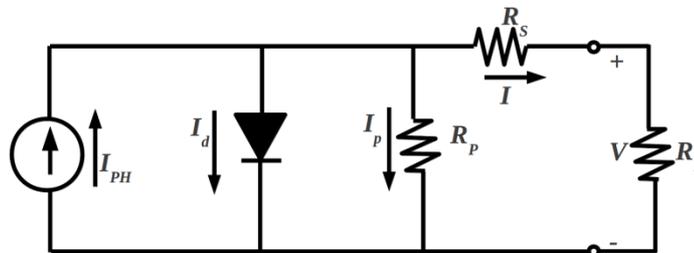


Figura 1. Modelo de panel fotovoltaico.

En el gráfico se identifica la diferencia de potencial entre los bornes del modulo con la variable V y la corriente que entrega el mismo con la variable I. Las magnitudes involucradas en la Figura 1 se relacionan por medio de la expresión 1 (Remus Teodorescu y Rodriguez, 2007; Villalva et al., 2009).

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{V + IR_s}{n_s V_t}\right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (1)$$

$$V_t = \frac{nKT}{q} \quad (2)$$

I_{ph} = Corriente fotogenerada.

I_0 = Corriente de saturación inversa.

V_t = Voltaje térmico dado por la expresión (2).

n_s = Número de celdas fotovoltaicas conectadas en serie en el panel.

R_s = Resistencia serie.

R_p = Resistencia paralelo.

T= temperatura de celda.
 K = Constante de Boltzmann.
 q = carga del electrón.
 n = factor de idealidad del diodo.

La determinación de la tensión y la corriente por medio de la expresión (1) es importante, ya que esta información permite el cálculo de la potencia generada por los paneles FV. La expresión (1) suele resolverse mediante algoritmos iterativos, los cuales determinan los diferentes valores de tensión y corriente que forman la curva IV del conjunto. Para cada valor de irradiancia y temperatura de celda se encuentra una curva I-V definida. Emplear la expresión (1) para determinar la potencia de los paneles FV es una tarea laboriosa, ya que deben conocerse los valores de los diferentes parámetros descriptos, y trabajar con las expresiones que permiten determinar la variación de cada uno respecto a la irradiancia y temperatura. Un ejemplo de variación, es la corriente fotogenerada (I_{ph}), descrita en la expresión (3).

$$I_{ph} = (I_{phn} + K_1(T - T_n)) \frac{G}{G_n} \quad (3)$$

T_n =temperatura de condición estándar (298°K).
 I_{phn} = corriente fotogenerada a 1000W/m² y a T_n .
 K_1 = coeficiente corriente de cortocircuito temperatura (A/°K).
 G_n = 1000 W/m².

En el trabajo se decidió determinar la máxima potencia en función de la irradiancia y la temperatura de celda. Esto se realiza en base a la medida de la radiación que llega al plano del conjunto de paneles. Por otro lado, la temperatura de celda no es una variable que generalmente se determina de una medida directa, es por ello que se recurre a diferentes métodos para determinarla. Una medida indirecta de la temperatura de celda puede realizarse por medio de un balance térmico, un cálculo que necesita el planteo de un sistemas de ecuaciones con un gran número de variables (Tina y Scrofani, 2008; Sopian et al., 1996). Una solución más practica con buena aproximación se encuentra en la utilización de ecuaciones empíricas como la que se observa en la expresión (4) (Almonacid, 2009).

$$T_c = T_m + \frac{G}{G_n} \Delta T \quad (4)$$

En donde T_m indica la temperatura de panel en su superficie posterior en grados centígrados, y ΔT es la temperatura entre el vidrio del panel y el Tedlar®, generalmente para este último se utiliza 3 °C. En la bibliografía pueden encontrarse aproximadamente alrededor de 30 métodos para determinar la potencia máxima de un conjunto de paneles FV por medio de la temperatura y la irradiancia. Entre los diferentes métodos encontramos el que utiliza Yang et al. (2000).

$$P_{FV} = (\alpha T_c + \beta) G \quad (5)$$

En donde α es el coeficiente de temperatura y β un coeficiente de calibración. Otra aproximación de la temperatura de celda es la que se observa en la expresión (6) (Duffie and Beckman, 1991).

$$T_c = T_a + \frac{G \tau \alpha}{U_L} \left(1 - \frac{\eta_c}{\tau \alpha}\right) \quad (6)$$

Donde T_a es la temperatura ambiente, τ es la transmitancia de la cobertura sobre la celda, α es la fracción de radiación absorbida por la cubierta, η_c es la eficiencia de la celda y U_L es un coeficiente de

perdida por convección y radiación. Se observa que la expresión (6) tiene mayor complejidad a la (4), sin embargo en la bibliografía se aprecia una simplificación al agregar la temperatura del módulo.

ALGORITMO GENÉTICO

La Computación Evolutiva (CE) pretende simular un proceso progresivo en una computadora (Sánchez Reinoso et al., 2011). La CE se aplica en problemas de búsqueda, optimización y aprendizaje de máquina, donde las soluciones son difíciles de hallar por medio de técnicas convencionales (Bakhshi et al., 2014). En su estructura se observa ciertas características como:

- Las soluciones potenciales al problema están representadas por una población.
- Se define una función evaluación u objetivo que juega el papel del ambiente.
- Se definen operadores genéticos, y estos son los encargados de alterar la composición de la descendencia.
- Esta población evoluciona en el tiempo en función de la evaluación y los operadores genéticos.
- Esta evolución termina al obtenerse la mejor solución.

Los algoritmos genéticos se enmarcan dentro de la CE. El algoritmo genético, al inicializar la población, evalúa la población existente y le asigna un valor de aptitud a cada individuo de la población. En base a la evaluación, se realiza un proceso de selección en la población, ejecutándose los operadores genéticos en el o los individuos seleccionados. Se inserta los nuevos individuos formando una población nueva y se reemplaza la población existente con una nueva, hasta cumplir el criterio de terminación (Sánchez Reinoso et al., 2011).

METODOLOGÍA IMPLEMENTADA

En el trabajo se busca calcular la generación de energía de una planta FV de 30KW, (como las que permite instalar la ley N°7824 de la provincia de Salta). Los 30KW es la potencia que puede generar un conjunto de paneles bajo las siguientes condiciones: radiación de 1000W/m^2 , temperatura de celda de 25°C y masa de aire (A.M.) igual a 1,5, condiciones en la que difícilmente puedan trabajar los paneles fotovoltaicos. Es por ello que es necesario incorporar a los cálculos, datos de radiación y temperatura para obtener de forma indirecta la potencia real del conjunto de paneles. Por otro lado, la generación de energía no solo depende del recurso solar y la temperatura de celda, sino también del ángulo de inclinación de los paneles. En diferentes trabajos se calcula el ángulo óptimo, ya que este permite generar la mayor cantidad de energía anual (Bakhshi et al., 2014). En este artículo el objetivo no solo es determinar el ángulo óptimo, sino también un ángulo óptimo para cada mes del año. Este cálculo tiene como consecuencia saber cuánta energía produce una instalación FV de 30KW en los diferentes meses y por lo tanto en el año. Por otro lado, se observa como mejora la producción de energía si se modifica el ángulo de inclinación a uno óptimo para cada mes. En la figura 2 se observa un diagrama de flujo del algoritmo utilizado para el cálculo.

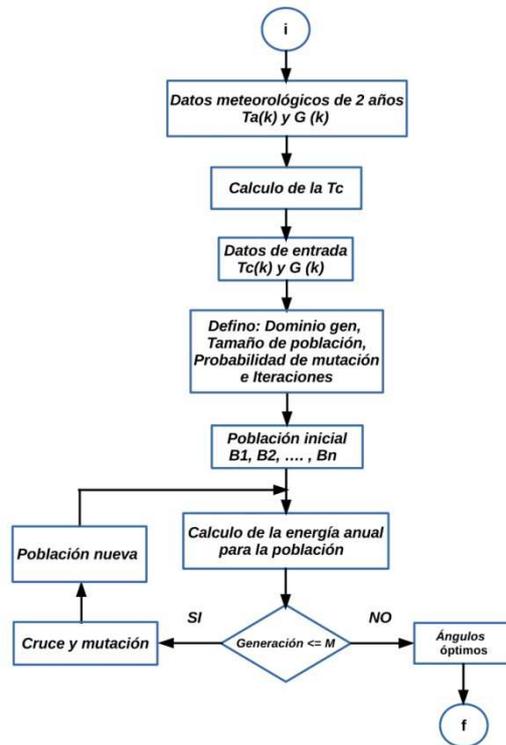


Figura 2. Diagrama de flujo del algoritmo implementado.

Una característica importante del cálculo es que se determina el ángulo óptimo de una instalación FV en base a la radiación y temperatura, las dos variables características del lugar y que afectan de forma directa en la generación de energía.

GENERACIÓN DE ENERGÍA OPTIMIZANDO EL ÁNGULO DE INCLINACIÓN

Para este cálculo se utilizan dos años de medidas de radiación solar y temperatura ambiente medidas cada cinco minutos. En base a estos más de 300.000 pares de datos se realiza el cálculo de la potencia fotovoltaica, ya que con la temperatura ambiente y la radiación puede obtenerse una medida indirecta de la temperatura de celda. Esta información en conjunto con la radiación permite una estimación de la potencia generada por un conjunto de paneles fotovoltaicos de acuerdo con la expresión (5). Para el cálculo de la temperatura de celda se utilizó la expresión (6). El cociente $\tau\alpha/U_L$, se aproximó a $(T_{cNOCT} - T_a)/G_{NOCT}$ (Duffie y Beckman, 1991). NOCT se refiere a la temperatura de celda bajo una condición nominal, definiéndose una temperatura ambiente $T_a=20^\circ\text{C}$, y una radiación $G_{NOCT}=800\text{W/m}^2$ (Duffie and Beckman, 1991). Para este trabajo se mantuvo una T_{cNOCT} constante, utilizándose para los cálculos 48°C . Para observar si la aproximación es adecuada, en el trabajo se realizó una comparación entre la temperatura de celda determinada por la expresión (4) y (6). En la figura 3 se observa la medida indirecta de la temperatura de celda implementando la expresión (4) en un día de medida (T_c) y su aproximación utilizando la expresión (6). Para la medida de T_c se utilizó un sensor de temperatura LM335 para determinar la temperatura de módulo (T_m) y la radiación del plano de panel con un sensor FV calibrado.

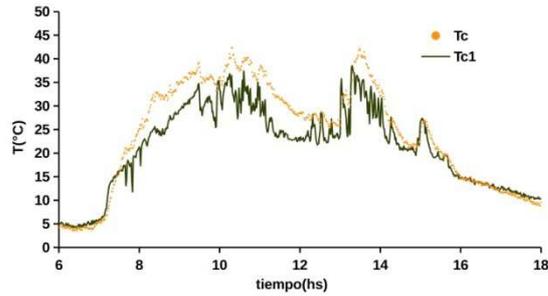


Figura 3. Temperatura de celda medida de forma indirecta (T_c) y su aproximación (T_{c1}).

El algoritmo calcula la energía generada por una GGER en base a la potencia que genera el conjunto de paneles fotovoltaicos, modelado por la expresión 5. Si bien se podría utilizar un modelo de panel más complejo, se decidió implementar este último ya que el tiempo de ejecución del algoritmo es elevado. El algoritmo implementa la mayor cantidad de tiempo en el cálculo de energía, ya que trabaja con muchos datos. El cálculo del punto de máxima potencia utilizando por ejemplo el modelo descrito por la expresión (1), aumentaría el tiempo de ejecución de forma innecesaria, ya que el algoritmo debería buscar por métodos iterativos el punto de máxima potencia para cada valor de irradiancia y temperatura. Por otro, la determinación de la potencia por medio de la expresión (5) se obtiene de forma directa, la cual se implementó en otros trabajos (Farfán y Cadena, 2014). En las figuras 4 y 5 se observa parte de los datos de radiación y temperatura utilizados para realizar el cálculo del ángulo óptimo anual y para cada mes en Salta Capital.

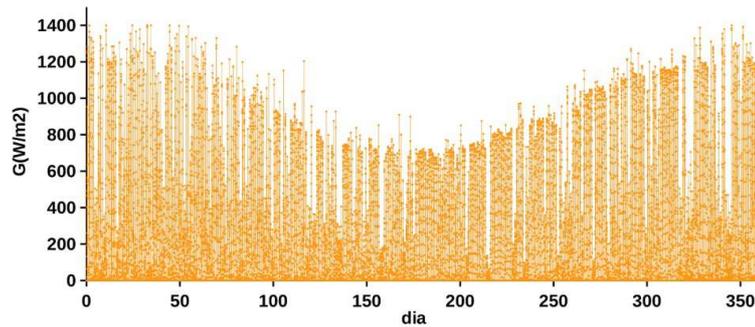


Figura 4. Datos de irradiancia a lo largo del año sobre superficie horizontal.

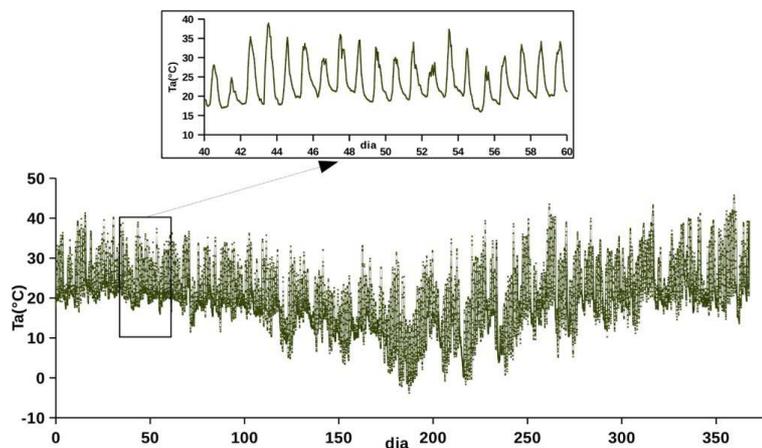


Figura 5. Datos de temperatura ambiente lo largo del año.

En el trabajo se determinó primero la irradiancia directa, restando el porcentaje de irradiancia difusa determinado por el software GEOSOL, calculado para cada mes en Salta Capital. Es por ello que se observan valores altos de irradiancia en la figura 4.

El trabajo se divide en dos partes: el cálculo del ángulo óptimo fijo para todo el año y el ángulo óptimo para cada mes del año. Para la implementar el algoritmo genético se utilizó el programa R, utilizándose la “Liberia Genalg” (LibG) para trabajar con algoritmo genético. Para el cálculo del ángulo óptimo fijo el algoritmo utilizó una población de 200 ángulos, se definió la mutación en 0,001, se trabajó en un entorno entre 23° a 28° y se utilizaron 40 iteraciones. Para el cálculo del ángulo óptimo para cada mes (esto significa el cálculo de doce ángulos óptimos), se utilizó una población de 200 ángulos para cada variable a optimizar, se definió la mutación en 0,001, se trabajo en un entorno entre 15° a 60° y se trabajó con 40 iteraciones. La función objetivo utilizada en ambos cálculos es la inversa de la generación de energía anual, esto es porque en la optimización se busca obtener el máximo de energía anual de una planta FV de 30KW y la LibG busca el mínimo del problema.

En a figura 6 y 7 se observa cómo evoluciona la población en cada iteración. En el grafico se especifican dos variables, “mean” y “best”, que indican el promedio del valor objetivo y el mejor valor objetivo respecto de la población vigente en ese momento.

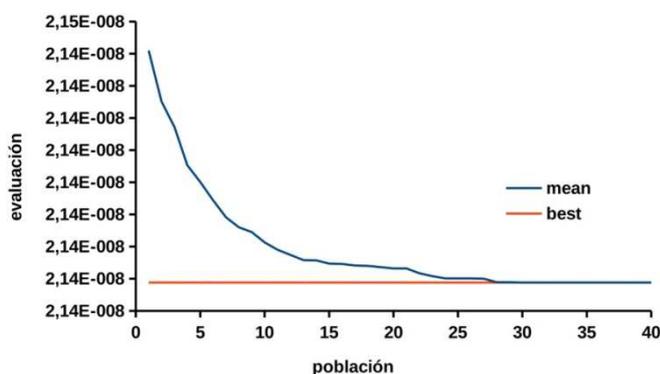


Figura 6. Evolución de la población en cada iteración al buscar el ángulo óptimo fijo anual.

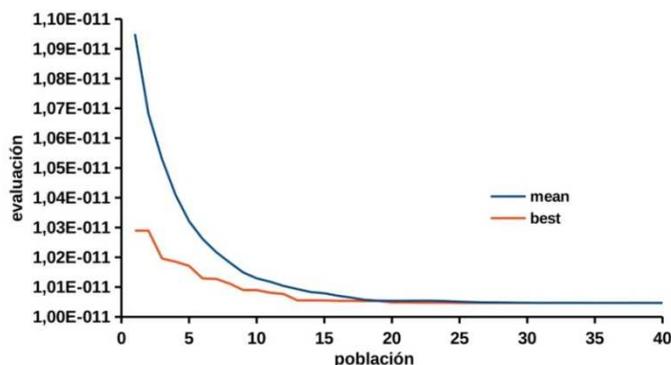


Figura 7. Evolución de la población en cada iteración al buscar el ángulo óptimo para cada mes.

Como resultado final al cálculo del problema de optimización, se determinaron los ángulos que se observan en la tabla 1.

Ángulo optimo	°
Fijo	25,75
Enero	26,90
Febrero	39,08
Marzo	45,27
Abril	47,27
Mayo	43,92
Junio	34,31
Julio	18,04
Agosto	17,23
Septiembre	16,80
Octubre	15,65
Noviembre	15,81
Diciembre	17,34

Tabla 1. Ángulos obtenidos al finalizar la optimización.

ENERGÍA GENERADA POR UNA GGER

El cálculo de los ángulos óptimos tiene como consecuencia determinar cuánta energía puede inyectar a la red una GGER utilizando paneles FV en Salta Capital. En base a los cálculos realizados, se realizan simulaciones de estas instalaciones de 30KW y se determina el promedio en los dos años de la energía generada cada mes. En el siguiente grafico se observa la simulación de la generación de potencia de una instalación fotovoltaica de 30KW, para los primeros 15 días del enero, utilizando un eficiencia de inversor contante de 0,97.

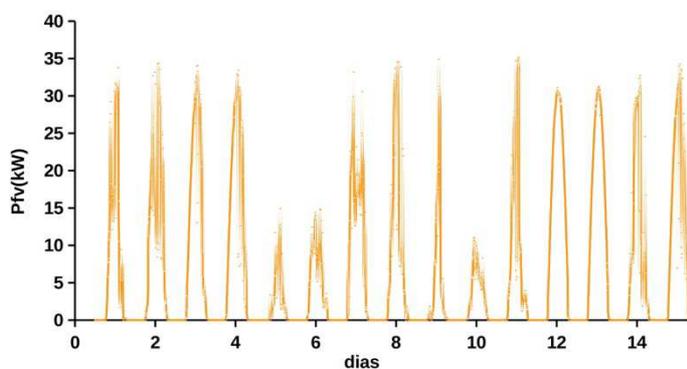


Figura 8. Potencia Fv generada los primeros 15 días del mes de enero.

De acuerdo a los cálculos realizados, en la figura 9 se observa cuanta energía puede genera una GEER de 30KW de fotovoltaico en los diferentes mese del año en Salta Capital. En esta figura se grafica la energía generada por la instalación con ángulo de inclinación fija (ángulo de inclinación fijo optimo) y móvil (variando el ángulo de inclinación por el ángulo optimo de cada mes).

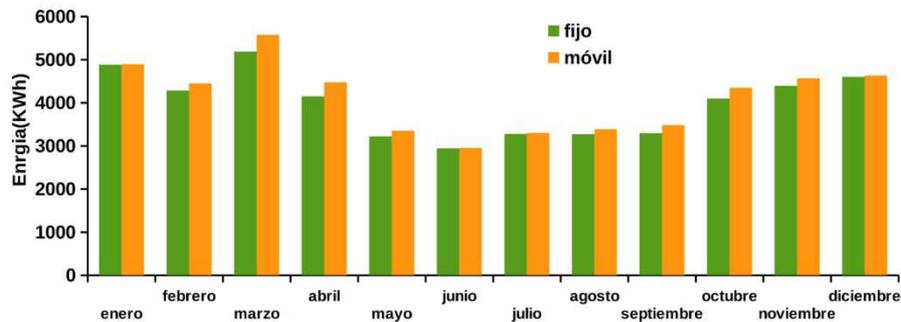


Figura 9. Energía generada por una GGER de 30KW de fotovoltaico con ángulo óptimo fijo y móvil.

Se puede observar que el mes de mayor generación de energía es el mes de marzo, con 5184,8 KWh para un ángulo óptimo fijo y 5575,3 KWh para un ángulo óptimo móvil. Por otro lado, el mes de menor generación de energía es el mes de junio, con 2942,5 KWh para un ángulo óptimo fijo y 2951,5 KWh para un ángulo óptimo móvil.

Se obtiene que la generación de energía mensual promediada en un año para una instalación con ángulo óptimo fijo es de 3965,8 KWh, mientras que para un ángulo óptimo móvil de 4117,1 KWh. Es importante remarcar que la generación total anual, utilizando ángulo móvil mejora en alrededor de un 4%, en comparación con el ángulo óptimo fijo. Teniendo en cuenta el precio del KWh de energía FV actual, este 4% representa una ganancia alrededor de \$9000 (pesos argentinos) al año.

CONCLUSIONES

En el trabajo se realizó por medio de algoritmos de optimización, el cálculo del ángulo óptimo fijo y móvil para instalaciones GGER FV para Salta Capital. Una de las consecuencias más importantes, es que se pudo determinar la cantidad de energía mensual generada por una instalación FV de 30 KW. El cálculo realizado no solo tiene en cuenta la irradiancia, sino también una aproximación de la temperatura de celda. Los cálculos realizados muestran los ángulos óptimos para cada mes y el ángulo óptimo fijo para todo el año. También se observa el cálculo de la energía generada para ambas situaciones y se observa una mejora del 4% en la generación anual. Los usuarios de este tipo de instalaciones deberán evaluar si las ganancias obtenidas al variar el ángulo compensan la complejidad de variar la inclinación de los paneles mes a mes. Sin embargo, la alternativa de la inclinación de los paneles FV fijo en un ángulo óptimo de 25,75°, es una solución simple y se encuentra validada por más de 300.000 datos de irradiancia y temperatura de Salta Capital. Como trabajo futuro se está planteando mejorar el modelo de irradiancia que llega a los paneles FV y se espera trabajar con la rentabilidad de una instalación de esta magnitud en el mismo lugar.

BIBLIOGRAFIA

Almonacid F., Rus C., Hontoria L., Fuentes M., Nofuentes G., 2009. Characterisation of Si-crystalline PV modules by artificial neural networks, Renewable Energy 34, 941–949.

Bakhshi Reza, Sadeh Javad, Mosaddegh Hamid-Reza, 2014. Optimal economic designing of grid-connected photovoltaic systems with multiple inverters using linear and nonlinear module models based on Genetic Algorithm Renewable Energy 72, 386e394

Duffie, J.A., Beckman, W.A., 1991. Solar Engineering of Thermal Processes, second ed. John Wiley & Sons Inc., New York.

- Farfán R.F., Cadena C.A., 2014. Desarrollo de un sistema predictivo de potencia fotovoltaica para su utilización en sistemas híbridos, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 18, pp.11.33-11.42, 2014.
- Remus Teodorescu, D.S., Rodriguez, P., 2007. PV panel model based on datasheet values. *IEEE International Symposium on*, 2392-2396.
- Sánchez Reinoso C.R., Cutrera M., Battioni M., Milone D.H. y Buitrago R.H., 2011. Modelado de la generación fotovoltaica en función de variables climáticas mediante técnicas de inteligencia artificial, *HYFUSEN 2011*.
- Sopian K., Yigit K. S., Liu H. T., Kaka S., Veziroglu T. N., 1996. Performance analysis of photovoltaic thermal air heaters. *Energy Convers. Mgmt* Vol. 37, No. 11, pp. 1657-1670.
- Tina, G.M., Scrofani, S., 2008. Electrical and Thermal Model for PV Module Temperature Evaluation . *The 14th IEEE Mediterranean*, 585- 590.
- Villalva, M. G., Gazoli, J. R., Ruppert F., E., 2009. Modeling and circuit – based simulation of photovoltaic arrays. *Brazilian Journal of Power Electronics*, 14, 35-45.
- Yang Hongxing, Jie Ji John Burnett, 2000. Simple approach to cooling load component calculation through PV walls, *Energy and Buildings* 31, 285–290.

Abstract: The study aims to calculate the maximum power that can generate a 30KW photovoltaic system in the province of Salta for each month of the year, optimizing the angle of inclination of the panels. For this calculation 300,000 and radiation temperature data which can be obtained by indirectly the energy generated by a photovoltaic system are used. Genetic algorithms for optimization were implemented, using as "objective function" the power generated by the installation as a variable annually and optimize the tilt angle was determined. The calculation is divided into two parts, the first a fixed optimum angle for a year, then twelve optimum angles, one for each month was determined. As a result of energy calculations that can feed into the grid a photovoltaic system for residential use, framed in law No. 7824 net balance in the province of Salta is obtained.