

ENERGÍA EFECTIVA GENERADA POR MÓDULOS FOTOVOLTAICOS BAJO CONDICIONES NATURALES

C.R. Sanchez Reinoso^{1,2,3}, M. Cutrera², M. Battioni², G. Risso², D.H. Milone¹, R.H. Buitrago²

¹Centro de Investigación en Señales, Sistemas e Inteligencia Computacional (SINC) – Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral - CONICET, Ciudad Universitaria UNL, 3000 Santa Fe, csanchezreinoso@santafe-conicet.gov.ar

²Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química (INTEC), Universidad Nacional del Litoral - CONICET, Guemes 3450, 3000 Santa Fe, rbuitre@intec.unl.edu.ar

³Centro de Diseño y Optimización de Sistemas (DOS) – Facultad de Tecnología y Cs. Aplicadas, Universidad Nacional de Catamarca, 4700 Catamarca.

RESUMEN: La eficiencia efectiva de los módulos fotovoltaicos montados a la intemperie difiere significativamente del dato de eficiencia que puede disponerse a priori de sus hojas técnicas, incluso tampoco es constante. Se midió durante un periodo la energía generada por tres módulos fotovoltaicos de silicio monocristalino, amorfo y policristalino montados a 30 ° respecto al plano horizontal, conjuntamente con la radiación y variables climáticas. Se modeló la función energía generada mediante técnicas de inteligencia computacional para los distintos materiales. Las funciones solución encontradas independientemente muestran una forma común en los materiales estudiados pero difieren en las constantes del modelo. Estos resultados permiten obtener la energía generada en función de datos usualmente disponibles para distintos tipos de módulos en condiciones reales de operación.

Palabras clave: energía solar, módulos fotovoltaicos, energía generada.

INTRODUCCIÓN

La eficiencia de conversión de la energía solar en energía eléctrica en una celda solar tiene para el caso de una celda monojuntura de silicio un límite teórico de 25 %. En la Universidad de New South Wales, Australia, lograron desarrollar una celda con 24,4 % de eficiencia, valor que corresponde a una radiación tipo AM1.5 y condiciones estándares de temperatura. Los módulos fotovoltaicos comerciales construidos por celdas solares con eficiencias individuales entre 15 y 20 % presentan bajo condiciones estándares de iluminación, y producto de las combinaciones serie-paralelo, conversiones entre 14 y 18 % respectivamente. Cuando estos módulos son montados en sistemas fotovoltaicos a la intemperie, su temperatura de trabajo difiere de las condiciones estándar y también la radiación solar incidente, tanto en distribución espectral como en intensidad. Ambas, la radiación solar y la temperatura, dependen del lugar, el clima y la época del año, determinando directamente la energía eléctrica efectiva que pueden generar los módulos.

Al evaluar el rendimiento de un sistema fotovoltaico el problema crece en complejidad debido a las resistencias serie y paralelo que se presentan por diferencias entre las características eléctricas de los módulos, las formas de conexionado, el sistema de seguimiento de máxima potencia del inversor o controlador de carga, etc. (De Bernardes et al., 2008; Sánchez Reinoso et al., 2010). Se ha encontrado también, que es importante el ángulo de montaje de los módulos y su relación con las condiciones climáticas y la ubicación geográfica (Li et al., 2007; Ertekin et al., 2008; Mehleri et al., 2010; Chang, 2010).

En este trabajo estudiamos la energía generada por módulos individuales de diferentes tecnologías durante un periodo de aproximadamente tres meses, monitoreando las variables climáticas, curvas I-V y radiación. El objetivo en una primera etapa es establecer un modelo preliminar de la energía generada efectiva en condiciones reales de operación y que puedan ser aplicables a módulos basados en diferentes tecnologías fotovoltaicas.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En el paraje El Pozo de la ciudad de Santa Fe (31° 42' S), sobre un rack ubicado en el predio del Campo de la Universidad Nacional del Litoral, se instalaron tres módulos fotovoltaicos con un ángulo de inclinación respecto al plano horizontal de 30°. Dichos módulos son de silicio monocristalino (SOLARTEC M75 - 42 Wp), silicio amorfo (UNISOLAR - 32 Wp) y policristalino (KYOCERA - 60 Wp). Mediante un sistema de adquisición de datos diseñado en nuestro laboratorio se midió cada 5 minutos la corriente de corto circuito I_{cc}, el voltaje de circuito abierto V_{oc}, la temperatura de los módulos, y tres curvas I-V de cada uno de ellos a las 10, 14 y 16 horas. Estas mediciones se realizaron sin interrupciones desde abril a junio del año 2012. La radiación solar global se midió simultáneamente en el plano horizontal y a 30° con dos solarímetros Kipp & Zonen CM 6.

La energía generada por los módulos se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$E_g (\text{Wh}) = FF \cdot I_{cc} \cdot V_{oc} \cdot t \quad (1)$$

donde FF es el Factor de Llenado de los módulos calculado diariamente a partir de las curvas $I-V$ medidas, y t es el intervalo de tiempo entre mediciones en este caso 5 minutos.

La eficiencia de conversión está dada por:

$$\eta(\%) = (E_g / G \cdot A \cdot t) \cdot 100 \quad (2)$$

donde G es la radiación solar global incidente sobre el plano del panel en W/m^2 , A es el área de los módulos en m^2 , y t el intervalo de tiempo entre mediciones en horas.

MODELO EVOLUTIVO

Programación genética

Una de las principales variantes de las técnicas evolutivas es la Programación genética (PG). Fue propuesta por Cramer y Koza de manera independiente. Ellos sugirieron una estructura de árbol para representar un programa en un genoma (Koza, 1992).

Los individuos en la PG son programas de computadora estructurados jerárquicamente. Dichos individuos se forman mediante conjuntos de términos y funciones, los cuales actúan como primitivas que sirven de base para la construcción de programas. El conjunto de términos se compone de las variables o constantes que sirven como argumentos de las funciones. Los términos son considerados como hojas en la estructura de árbol. El conjunto de funciones está compuesto por los operadores aritméticos, los operadores binarios o funciones de dominio específico, y en el árbol se les conoce como nodos de tipo función (Banzhaf et al., 1998; Koza, 1998; Koza, 1999).

Modelo en función de datos climáticos

Disponiendo de un conjunto de parámetros del clima y con mediciones de energía generada de los módulos, se buscaron relaciones que permitieran estimar la energía generada por una instalación fotovoltaica en la ciudad de Santa Fe, empleando datos meteorológicos. Como los datos generalmente no se relacionan en forma lineal y presentan típicamente cierta dispersión, una alternativa aplicable son las redes neuronales. Sin embargo, dicha técnica solo permite obtener un modelo de caja negra. En este trabajo se pretende obtener un modelo explícito de las variables medidas por lo que se opta por emplear métodos de computación evolutiva.

Se emplea el siguiente algoritmo:

- Inicializar la población.
- Evaluar los programas en la población existente y asignar un valor de aptitud a cada individuo.
- Hasta que la nueva población no sea completada:
 - Seleccionar uno o varios individuos en la población aplicando un proceso de selección.
 - Ejecutar los operadores genéticos en el o los individuos seleccionados de la población.
 - Insertar a los nuevos individuos en la nueva población.
- Reemplazar la población existente con la nueva población, hasta cumplir el criterio de terminación.

El método de selección usado está basado en el de selección mediante ordenamiento. Para la mutación se selecciona un nodo al azar y el subárbol es cambiado por uno nuevo generado aleatoriamente. El operador de cruce se realiza mediante los siguientes pasos:

- Seleccionar dos individuos como padres.
- Seleccionar aleatoriamente un subárbol o segmento de instrucciones.
- Intercambiar los subárboles o segmentos de código entre los dos padres.

RESULTADOS

Modelo de energía generada

Durante 2010 y 2011, (Sánchez Reinoso et al., 2011), estudiaron cuatro módulos cristalinos montados a diferentes ángulos. La ecuación encontrada que presentaba un mejor desempeño tenía un R^2 de 0.9 y coeficiente de correlación de 0.95, resultó en una expresión compleja (Ec. 3) donde la energía generada se calculaba en función de la radiación global, la radiación difusa, la temperatura ambiente y el ángulo de montaje (Sánchez Reinoso et al., 2011).

Los parámetros empleados en la búsqueda de dicha solución fueron un tamaño de población=250, probabilidad de cruce=0.4, probabilidad de mutación=0.2 y la ecuación obtenida es

$$E_g = 0.476R_g^{0.918} - 1.84 \alpha \text{sen}(-0.00331R_g) - T_a (0.00104R_{dif} \alpha)^{0.443} - R_g^{0.502} \text{sen}(\alpha) \quad (3)$$

donde R_g es la radiación global en W/m^2 , R_{dif} es la radiación difusa en W/m^2 , α es el ángulo de montaje de los módulos, T_a es la temperatura ambiente en $^{\circ}C$; E_g es la energía generada en Wh , y los coeficientes fueron redondeados a tres cifras decimales.

Es de notar que existen variables presentes en la solución presentada que no son medidas habitualmente tales como la radiación difusa que es más directa en la representación de la transparencia de la atmósfera que la humedad relativa, que tampoco participa en la mejor solución. Si bien la Ec. 3 tiene validez para todo el año es necesario tener presente que fue entrenada con datos de módulos de silicio monocristalino por lo que es necesario incorporar datos de otros materiales si se requiere un modelo más general. En las subsecciones siguientes se abordará la inclusión de otros materiales en el modelo pero bajo un mismo ángulo y realizando mejoras en el algoritmo evolutivo de optimización que permitan el empleo de coeficientes enteros y probabilidad de mutación adaptativa.

Eficiencia efectiva a lo largo del año

Las mediciones de la eficiencia efectiva de conversión para un módulo de silicio monocristalino con ángulo de inclinación 0° y correspondientes a un año de medición se muestra en la Fig. 1. En el eje de abscisas se representa la densidad de energía solar diaria acumulada la cual es proporcional a la radiación. Se observa que la eficiencia de conversión presenta un comportamiento no lineal donde para las bajas radiaciones (correspondientes a valores de densidad energética menores a 3 kWh/m^2) es muy baja y crece con el aumento de la intensidad, consiguiendo un estado estacionario donde se encuentra el óptimo de eficiencia efectiva con radiaciones correspondientes a densidades energéticas entre 3 y 5 kWh/m^2 . Luego, la eficiencia efectiva presenta una leve disminución para altas radiaciones que puede explicarse en parte por el aumento en la temperatura de operación del módulo. Todas las mediciones de la eficiencia de conversión del módulo que se realizaron en campo, son menores a 12% , que es la eficiencia medida para este módulo bajo condiciones estándares de radiación y temperatura ($AM1.5$ y $25^{\circ}C$). Siendo las condiciones estándar más óptimas debido la temperatura en condiciones reales es normalmente mayor para ese alto nivel de radiación, el cuál tampoco es tan común. Estos resultados muestran cómo difiere el comportamiento y magnitud de la eficiencia efectiva medida en campo de la medida en condiciones estándar.

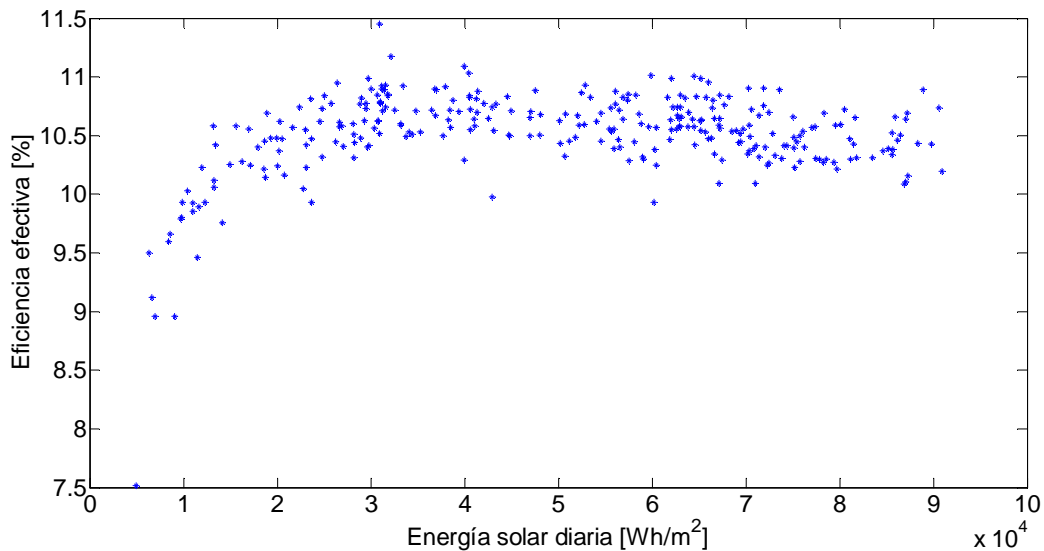


Figura 1: Eficiencia efectiva de un módulo en posición horizontal en función de la energía solar diaria

Energía efectiva generada por distintos materiales semiconductores

Se realizaron simulaciones mediante algoritmos de programación genética para intentar obtener una expresión de la energía generada en función de variables climáticas, la radiación horizontal, radiación en el plano del generador y la eficiencia efectiva, que fueron medidas en campo entre los meses de abril y junio del 2012. Se entrenaron los modelos para tres módulos diferentes instalados a 30° , uno de silicio monocristalino y los restantes de silicio amorfo y policristalino respectivamente. La población de soluciones obtenida presenta casi en su totalidad el uso de las variables radiación en el plano del generador y eficiencia efectiva. El algoritmo descarta automáticamente las variables climáticas por no tener un efecto significativo en la disminución del error lo cual puede explicarse por una eficaz captura de la información de las variables climáticas por parte de la eficiencia efectiva. Parte de este fenómeno se pudo observar también en la Fig. 1. Además, las expresiones obtenidas no sólo presentan términos independientes que incluyen las variables eficiencia efectiva y radiación en el plano del generador por separado, sino que también incluyen un término de interacción entre ellas.

Respecto a las pocas ecuaciones que emplean alguna variable climática se encuentra la temperatura, más precisamente aparecen relaciones entre la temperatura del módulo (T_m) y la temperatura ambiente (T_a), más que las variables por separado. Esto indica que la información aportada por este factor es mayor que las de cada una individualmente. Esto podría deberse a que por un lado T_m entrega específicamente la temperatura sobre el material e incluye también algo de los efectos climáticos por lo que resulta y es más preciso que T_a a los fines de predecir la energía generada. Sin embargo, T_a entrega información

sobre la velocidad de disipación del calor del material y por lo tanto sobre la dinámica de T_m . Lo que debe considerarse además es que usualmente la temperatura del módulo no es un dato disponible.

Los resultados muestran que la eficiencia efectiva de los módulos es clave en la determinación de la energía generada efectiva o real de los módulos en campo. Sin embargo, no es un dato que se conoce a priori por lo que se procedió a buscar ecuaciones solución para los distintos materiales que permitan calcular su eficiencia efectiva en función de variables medidas en condiciones reales y que podrían disponerse en bases de datos existentes.

Si bien se entrenó de manera independiente para cada material se encontró la misma forma de la ecuación para modelar el comportamiento de la energía generada efectiva de los módulos. Las expresiones encontradas tienen un R^2 de alrededor de 0.87 y error menor al 10% y su forma es

$$E(Wh) = (C1+G) / (C2+Ta) \quad (4)$$

donde G es la radiación en el plano del generador, Ta es la temperatura ambiente y $C1$ y $C2$ coeficientes que dependen del material.

Los coeficientes aproximados para el silicio monocristalino son 60 para $C1$ y 300 para $C2$ mientras que para el amorfo un $C1$ de 80 y un $C2$ de 500. Para el caso del policristalino se obtuvo un $C1=120$ y $C2=260$.

La Ec. 2 puede ordenarse de la siguiente manera:

$$E = (G/Ta+C2) + (C1/Ta+C2) \quad (5)$$

El primer término representa los efectos de la relación de la radiación y la temperatura sobre la energía generada. Dados los coeficientes obtenidos se observa que a igualdad de radiación y temperatura, dicho término muestra que la eficiencia del módulo de silicio amorfo tiene menor eficiencia efectiva en valor absoluto. Sin embargo, también muestra que su menor pendiente hace que la energía efectiva disminuya menos que para el caso del monocristalino y policristalino ante un aumento de la temperatura. Por otro lado, el segundo término representa el efecto de la temperatura sobre la energía generada. Considerando los coeficientes aproximados esto conduce a la observación de que dicho término es más pequeño en el caso del silicio amorfo que en de los otros materiales, lo que indicaría un menor impacto de la temperatura sobre la energía generada. Además, los términos correspondientes para el caso del silicio monocristalino y policristalino están más cercanos entre sí, por lo que es de suponer que presentan comportamientos más similares en lo referido a la temperatura.

Se observa además que la Ec. 3 empleada para encontrar la energía generada en función del ángulo y variables climáticas requiere para esa tarea una estructura más compleja que la de la Ec. 5 y una variable generalmente no medida como la radiación difusa. Según se observó en los entrenamientos la inclusión del ángulo es la que conduce a soluciones de mayor complejidad. De hecho la Ec. 5 tiene un buen desempeño para diferentes materiales mediante una función sencilla.

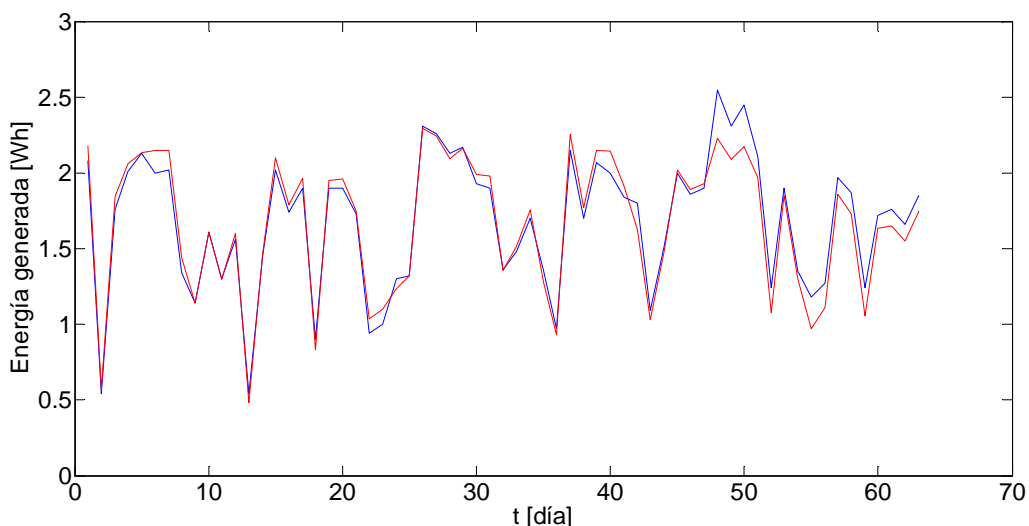


Figura 2: Energía generada por el módulo monocristalino en función de los días. En rojo se muestra la curva entregada por el modelo y en azul la correspondiente a los datos medidos.

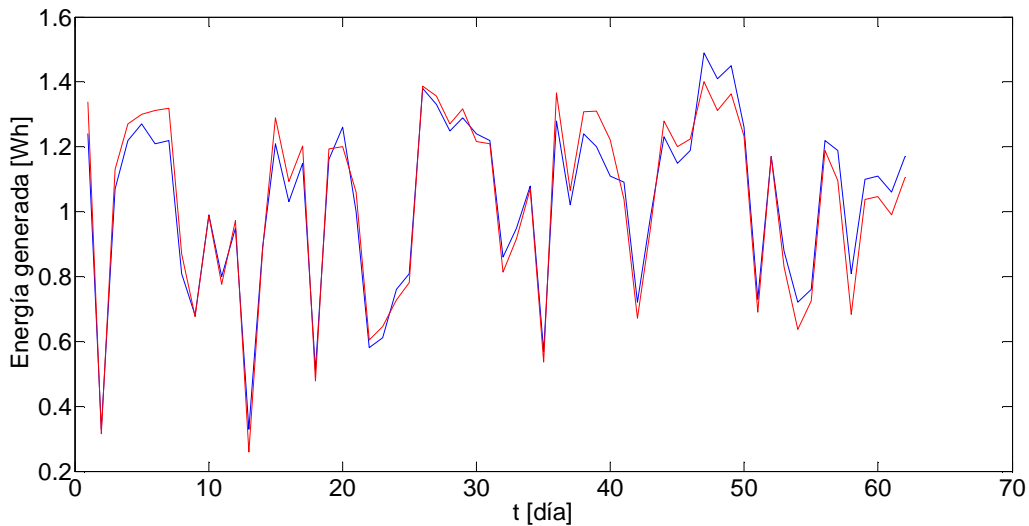


Figura 3: Energía generada por el módulo de silicio amorfo en función de los días. En rojo se muestra la curva entregada por el modelo y en azul la correspondiente a los datos medidos.

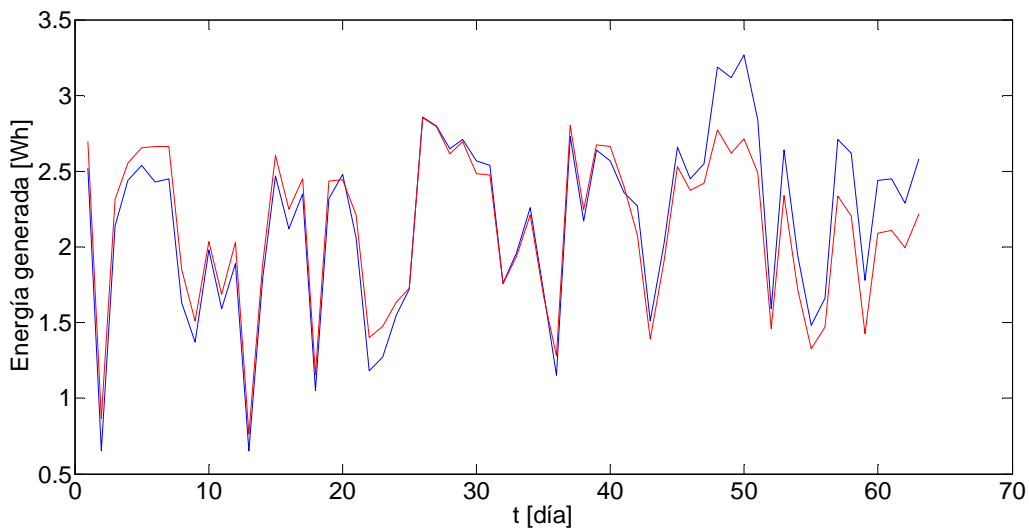


Figura 4: Energía generada generada por el módulo de silicio policristalino en función de los días. En rojo se muestra la curva entregada por el modelo y en azul la correspondiente a los datos medidos.

En las Fig. 2 a 4 se presentan las curvas de energía generada efectiva medidas y también las obtenidas mediante el modelo. Se puede observar un adecuado comportamiento del modelo. El modelo obtenido permite realizar una buena predicción de la energía generada efectivamente en condiciones reales de operación a la intemperie por módulos fotovoltaicos de tres materiales diferentes: silicio monocristalino, silicio amorfo y silicio policristalino.

CONCLUSIONES

Los resultados encontrados utilizando programación genética para encontrar correlaciones entre parámetros de módulos fotovoltaicos y la radiación solar conjuntamente con datos climáticos se muestran muy promisorios. El modelo de energía efectiva generada muestra un buen desempeño. Las soluciones encontradas independientemente para los materiales fotovoltaicos silicio monocristalino, amorfo y policristalino presentan aspectos comunes en cuanto a la forma de la ecuación pero difieren en los coeficientes. Mediante el análisis de la influencia de dichos coeficientes en el modelo se observó una menor dependencia de la temperatura por parte del silicio amorfo pero también menores valores de eficiencia efectiva. La expresión encontrada hace posible que mediante una única ecuación se pueda encontrar la energía que efectivamente generaría un módulo fotovoltaico en condiciones reales de operación para el caso de los tres materiales anteriormente mencionados. Se tiene planeado reentrenar el modelo al disponer de mayor cantidad de datos medidos intentando cubrir todo el ciclo solar y poder captar la información ocurrida a lo largo del año. Por otro lado, resulta oportuno mencionar que la metodología propuesta realiza una selección automática del modelo mediante un doble criterio dado por el error y la

complejidad. En trabajos futuros se incorporará una última etapa de selección manual de la solución basada en criterios físicos.

REFERENCIAS

- Banzhaf W., Nordin P., Keller R., Francone F. (1998). Genetic programming an introduction. In *On the Automatic Evolution of Computer Programs and Its Applications*. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, California, USA.
- Chang Y.P. (2010) Optimal the tilt angles for photovoltaic modules in Taiwan. *Electrical Power and Energy Systems* 32, 956-964.
- De Bernardez L.S., Battioni M., Cutrera M., Risso G., Buitrago R.H. y García N.O. (2008). Determinación del ángulo óptimo de inclinación para la instalación de módulos fotovoltaicos mediante el uso de redes neurales. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 12, 4, 9-14.
- Ertekin C., Evrendilek F. and Kulcu R. (2008) Modeling Spatio-Temporal Dynamics of Optimum Tilt Angles for Solar Collectors in Turkey. *Sensors*, 8, 2913-2931.
- Li D.H.W. and Lam T.N.T. (2007). Determining the Optimum Tilt Angle and Orientation for Solar Energy Collection Based on Measured Solar Radiance Data. *International Journal of Photoenergy* Article ID 85402, 9, 10, 1155.
- Koza J. R. (1992). *Genetic Programming. On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Koza J. R. (1998). *Genetic Programming II. Automatic Discovery of Reusable Programs*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Koza J. R. (1999). *Genetic Programming III. Darwinian Invention and Problem Solving*. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, California, USA.
- Mehleri E.D., Zervas P.L., Sarimveis H. , Palyvos J.A. and Markatos N.C. (2010). Determination of the optimal tilt angle and orientation for solar photovoltaic arrays. *Renewable Energy* 35, 2468-2475.
- Sánchez Reinoso C., Milone D.H. y Buitrago R.H. (2010). Efficiency study of different photovoltaic plant connection schemes under dynamic Shading. *International Journal of Hydrogen Energy* 35, 5838-5843.
- Sánchez Reinoso C., Cutrera M., Battioni M., Risso G., Milone D.H. y Buitrago R.H. (2011). Predicción de propiedades de celdas solares y módulos fotovoltaicos por métodos de inteligencia artificial. XXXIV Reunión de Trabajo de Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente, 33-40.
- Shu N., Kameda N., Kishida Y. and Sonoda H.(2006). Experimental and Theoretical Study on the Optimal Tilt Angle of Photovoltaic Panels. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering* 5, 2, 399-405.
- Zhao J., Wang A., and Green M.(1998). 19.8 % efficient honeycomb textured multicrystalline and 24.4 % monocrystalline silicon solar cells. *Applied Physics Letters* 73, 14, 1991-1993.

ABSTRACT

The effective efficiency of the PV modules under natural conditions differ significantly from efficiency data that may be available a priori from their datasheets. Moreover, this efficiency is not constant. It was measured the output energy of photovoltaic modules of the type monocrystalline, polycrystalline and amorphous silicon, mounted at 30 ° to the horizontal plane. In addition, it were measured the climatic data and radiation. It was modeled a function of generated energy using intelligence computational techniques for the different materials. The found functions show a common structure in the studied materials but differ on the equation constants of the model. These results allow to estimate the energy generated on the basis of data available for different types of modules in real operating conditions.

Keywords: solar energy, photovoltaic modules, generated energy.