

## **DETERMINACION DEL ANGULO OPTIMO DE INCLINACIÓN PARA LA INSTALACION DE MODULOS FOTOVOLTAICOS MEDIANTE EL USO DE REDES NEURALES**

**L.S. De Bernardes<sup>1</sup>, M. Battioni<sup>2</sup>, M. Cutrera<sup>2</sup>, G. Risso<sup>3</sup>, R.H. Buitrago<sup>2,3</sup>, N.O. Garcia<sup>1</sup>,**

(1) Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH), Universidad Nacional del Litoral, Campo Universitario, El Pozo, 3000 Santa Fe. Tel 0342-457-5244/46. E-mail : ldeberna@pilar-ciudad.com.ar.

(2) Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química (INTEC), Universidad Nacional del Litoral – CONICET, Güemes 3450, 3000 Santa Fe. Tel/Fax: 0342-455-9174/77, E-mail: rbuitre@intec.unl.edu.ar.

(3) Departamento de Física, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Litoral, Sgo. Del Estero 2829, 3000 Santa Fe. Tel.:0342-457-1164. E-mail: rbuitre@intec.unl.edu.ar.

**RESUMEN:** Mediante el uso de redes neurales se calculó el ángulo óptimo y la energía mensual generada por módulos fotovoltaicos a partir de parámetros del clima. Se tomaron datos durante un año de la radiación incidente en el plano de los módulos y su temperatura de trabajo. De dos centrales meteorológicas cercanas, se tomaron los datos diarios de Heliofanía, temperatura, humedad relativa ambiente, presión atmosférica y velocidad del viento. Con fines comparativos se utilizaron datos publicados por la NASA. Se logró una buena estimación de la energía generada por los módulos, su dependencia con el ángulo de inclinación y su temperatura máxima de trabajo. Los resultados hallados permiten afirmar que, aún sin datos de la radiación solar directa y difusa, se puede evaluar la energía eléctrica que puede ser generada por una instalación fotovoltaica y definir el ángulo óptimo de instalación de los paneles respecto de la horizontal.

**Palabras clave:** redes neurales, parámetros del clima, módulos fotovoltaicos y ángulo óptimo

### **INTRODUCCIÓN**

Al proyectar una instalación solar fotovoltaica, uno de los objetivos fundamentales es la optimización de la energía eléctrica generada aprovechando el recurso solar, lo cual significa utilizar el máximo posible de radiación incidente. Cuando la superficie de los módulos forma un cierto ángulo respecto de la horizontal, la radiación que recibe puede considerarse integrada por tres componentes: directa, difusa y reflejada por el terreno. Debido a la variación del ángulo del sol al cenit, se produce un cambio importante en la radiación solar incidente sobre los módulos a lo largo del día y del año dependiendo del ángulo en el que se ubican. En principio, la alternativa que optimiza la energía generada implica que los módulos tengan la posibilidad de efectuar un seguimiento del sol para que su superficie reciba siempre la mayor insolación. Un sistema de este tipo es costoso, consume parte de la energía generada y requiere de mantenimiento, por lo que en general se intenta colocar los módulos en un ángulo fijo que permita el máximo aprovechamiento de la radiación solar en un dado período. Si la instalación está conectada a la red, con la posibilidad de entregar o recibir energía dependiendo de la disponibilidad y demanda, es preferible ubicar los módulos en un ángulo que haga máxima la generación a lo largo de todo el año. En cambio si la instalación no está conectada a la red se debe definir el ángulo más apropiado para cubrir la demanda en todo momento, lo que en la mayoría de los casos implica optimizar la posición para el período invernal.

Si sólo se tuviera la componente directa de la radiación solar, la ubicación óptima sería aquella en la que el módulo forma un ángulo de 90° respecto de la radiación incidente. En días sin nubes, se tiene también radiación difusa, que además no es isotrópica ya que existe una componente circunsolar, y por lo tanto el ángulo óptimo no es necesariamente perpendicular a la radiación incidente. En días nublados el apartamiento puede ser aún mayor, ya que la componente difusa aumenta respecto de la directa y el ángulo óptimo se acerca a la horizontal.

Varios trabajos publicados plantean diferentes métodos para encontrar el ángulo óptimo para una ubicación particular. Naihong et al. (2006) han utilizado mediciones de radiación global y difusa para calcular la energía generada y comparan los resultados con mediciones realizadas sobre paneles ubicados en diferentes ángulos respecto a la horizontal en la localidad de Fukuoka, Japón. Ertekin et al. (2008) se basaron en mediciones de radiación global para diferentes ciudades de Turquía y utilizaron el método de Liu y Jordan (1960) y un modelo empírico para estimar la radiación difusa. Li and Lam (2007) utilizaron una aproximación numérica para calcular la radiación solar sobre planos inclinados integrando la distribución de radiancia, o flujo radiante por unidad de superficie y de ángulo sólido, para la ciudad de Hong Kong.

### **MEDICIONES, MODELO UTILIZADO Y RESULTADOS**

En este trabajo se efectuaron mediciones de la energía generada por paneles solares policristalinos Kyocera de 50 y 60 Wp y monocristalinos Siemens de 48 Wp instalados en el predio de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas en la ciudad de Santa Fe. Los paneles se instalaron a nivel del suelo sobre cobertura vegetal, orientados en dirección Norte y no recibían en ningún momento sombra de árboles o edificios cercanos. El ángulo respecto del plano horizontal se fijó haciendo que la superficie de los paneles fuera perpendicular a la dirección de los rayos solares a mediodía del 22 de julio y se modificó para llevarlos a la misma posición relativa respecto al sol el día 22 de diciembre. De esta forma los paneles recibieron la máxima

insolación a mediodía en los días mencionados, correspondientes a invierno y verano respectivamente. Los valores de energía generada se obtuvieron por integración de los datos tomados cada 10 minutos de la tensión de circuito abierto y la corriente de cortocircuito de los paneles y se multiplicó su producto por el factor de llenado (fill factor) de cada panel. La temperatura máxima de los paneles se midió mediante termocuplas colocadas en la cara posterior. La energía radiante a nivel de superficie se midió con un solarímetro Kipp y Zonen instalado en el plano de los paneles y varios datos meteorológicos como temperatura, humedad relativa ambiente, presión atmosférica, nubosidad y velocidad del viento fueron registrados por una estación meteorológica ubicada en el lugar. Se tomaron datos diarios entre el 1° de junio de 2006 y el 31 de mayo de 2007. Además se obtuvieron datos diarios de heliofania para la ciudad de Sauce Viejo, distante 17 km de Santa Fe, medidos por el Servicio Meteorológico Nacional

Dado que se contaba con un conjunto de parámetros del clima y con mediciones de energía generada y energía incidente en el plano de los módulos, se buscaron correlaciones que permitieran estimar la energía generada por una instalación fotovoltaica conociendo su posición geográfica y los datos meteorológicos normalmente disponibles. Como los datos no correlacionan normalmente en forma lineal y presentan típicamente cierta dispersión, una alternativa aplicable son las redes neurales (De Bernardez et al., 2007; Elminir et al., 2001; Tymvios et al., 2005; López et al., 2005; Serrano et al., 2006; Mellit et al. 2005; Hontoria et al., 2005). Se diseñó una red tipo Perceptron Multicapa utilizando el software NuMap desarrollado por Image Processing and Neural Networks Lab (IPNNL) de la Universidad de Texas en Arlington. Este tipo de redes se entrenan modificando los factores de peso mediante un algoritmo de propagación hacia atrás hasta que se alcanza un dado criterio de convergencia. En la Fig. 1 se representa esquemáticamente el modelo utilizado.

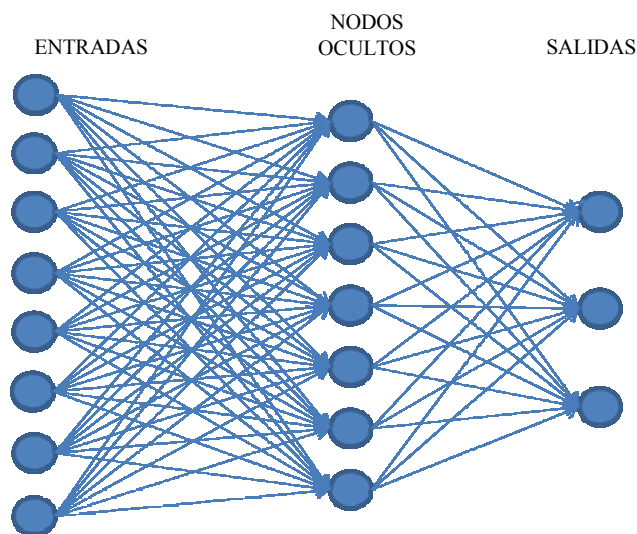


Figura 1. Representación esquemática de red neural utilizada

### Correlaciones a partir de datos de heliofania

Como primera etapa se utilizó la red neural para encontrar correlaciones entre los valores de heliofania y algunos parámetros del clima la energía generada por un panel KS50 de Kyocera, cuya potencia nominal es 50Wp. Los datos de entrada utilizados fueron los valores diarios de:

- Heliofania [horas]
- Angulo mínimo diario del sol al cenit [grados]
- Angulo del sol al panel [grados]
- Duración del día [horas]
- Temperatura máxima ambiente [C]
- Humedad relativa ambiente mínima [%]
- Presión atmosférica mínima [hPa]
- Velocidad del viento [km/h]

Los datos de salida fueron los valores diarios de:

- Energía generada por los módulos fotovoltaicos [Wh]
- Eficiencia de los módulos [%]
- Temperatura máxima de los módulos [C]

El mínimo ángulo solar al cenit se calculó siguiendo a Hartmann (1994)

Se utilizaron 7 nodos ocultos en la red, porque en este caso se obtenía el menor error cuadrático medio de los resultados. Una vez entrenada la red y con el objetivo de validar el procedimiento, se calcularon los valores de energía generada, eficiencia y temperatura máxima de cada panel para un conjunto de datos que no fueron originalmente utilizados para el entrenamiento y que corresponden a un 20 % de los datos totales. Se utilizaron datos independientes para efectuar la validación de los

resultados y en la Fig. 2 se comparan los valores medidos de energía generada por el panel KS50 con los calculados con la red neural para ese conjunto de datos. Como puede verse, los resultados obtenidos con la red neural son razonablemente cercanos a los medidos.

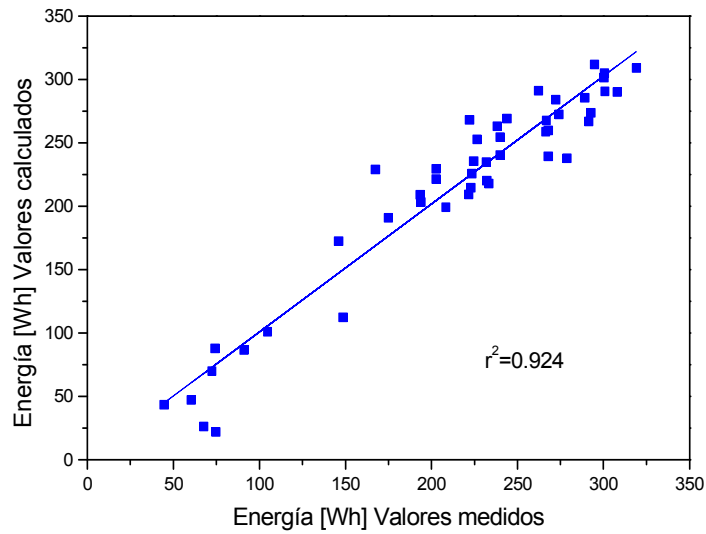


Figura 2. Energía diaria generada por un panel KS50. Comparación de los valores medidos con los obtenidos de la red neural

En la figura 3 se presentan los valores calculados de temperatura máxima del panel en función de los valores de temperatura máxima medidos mostrando también buena correlación de los datos.

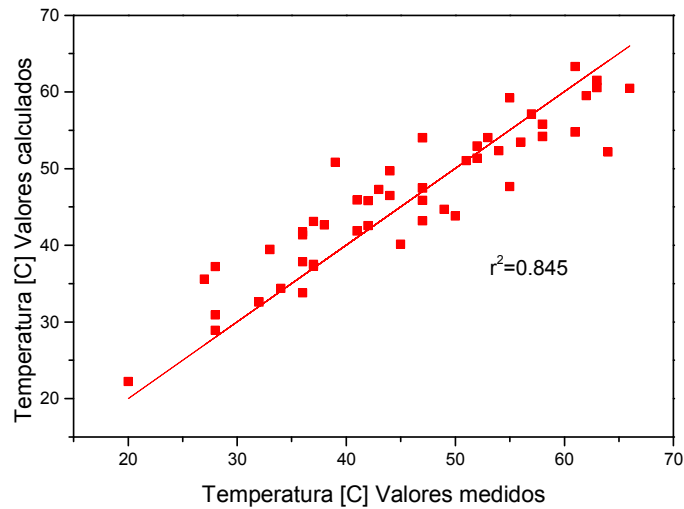


Figura 3. Temperatura máxima del módulo KS50. Comparación de los valores medidos con los obtenidos de la red neural

En la Tabla 1 se presentan además los valores promedio para todo el periodo de las mediciones de energía generada, eficiencia y temperatura máxima del panel, correspondientes a los datos de validación. Éstos se comparan con los promedios de los valores calculados con la red neural. Como puede verse en la tabla los valores medidos y calculados son muy cercanos, ya que difieren en no más del 2%.

	Medidos	Calculados	Diferencia %
Energía generada [Wh]	209.0	213.2	2.0
Eficiencia [%]	12.03	12.02	0.1
Temperatura máxima del panel [C]	45.6	46.3	1.5

Tabla 1. Promedio de los valores diarios medidos y calculados por la red neural de energía generada, eficiencia y temperatura máxima de un panel KS50.

### Determinación del ángulo óptimo del panel

Habiendo mostrado la capacidad de las redes neurales para estimar la energía generada conociendo el ángulo mínimo del sol al cenit y la duración del día, los que dependen de la fecha y la ubicación geográfica-, y parámetros del clima como la temperatura, humedad, presión atmosférica y velocidad del viento, se analizó la posibilidad de utilizar el mismo recurso para obtener el ángulo óptimo para la ubicación de los paneles a fin de generar la máxima energía eléctrica aprovechable. Para poder determinar entonces la variación de energía generada con el ángulo del panel respecto al plano horizontal se utilizaron los datos reales medidos de los parámetros de entrada para cada día del año pero se varió el ángulo del sol al panel calculándolo para diferentes ángulos del panel respecto a la horizontal. Se utilizó la siguiente expresión:

$$\beta = |\theta - \alpha|$$

Siendo:  $\beta$  el ángulo del sol al panel,  $\theta$  el ángulo del sol al cenit y  $\alpha$  el ángulo del panel respecto a la horizontal.

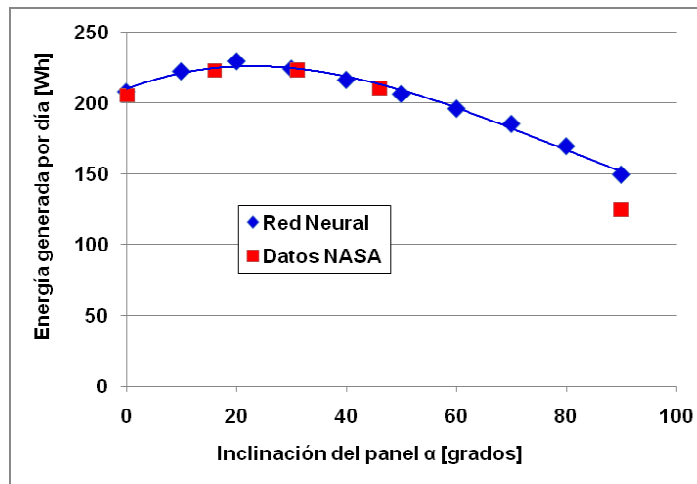


Figura 4: Promedio anual de los valores diarios de energía generada para diferentes ángulos. Comparación de los resultados obtenidos utilizando la red neural con los datos de la NASA.

Se calculó mediante la red neural entrenada con los datos iniciales, la energía generada promedio anual para diferentes ángulos del panel respecto a la horizontal. Con fines comparativos se utilizaron los valores de energía incidente que reporta la National Aeronautics and Space Administration (NASA) en su sitio web (NASA 2008). En este sitio es posible elegir un lugar geográfico y para ese lugar se pueden obtener, entre otros, los datos de la radiación solar incidente, tanto directa como difusa, para diferentes ángulos, así como el ángulo que hace máxima la energía incidente. Los valores se presentan como promedios mensuales y de todo un año y se basan en observaciones satelitales efectuadas en los últimos 22 años, el error estimado en los valores es de 6% a 12%, dependiendo de cuán cerca esté la estación de referencia terrestre, del lugar en estudio. A partir de los datos de energía incidente para diferentes ángulos reportados por la NASA para la ubicación geográfica correspondiente a la ciudad de Santa Fe y considerando la superficie útil del panel KS50 y su eficiencia promedio, que es del 12%, se calculó la energía generada por el panel para distintos ángulos. En la figura 4 se presenta la comparación de los resultados de energía generada calculados por la red neural, la línea continua es solo una guía visual, usando los datos iniciales medidos y los de la NASA. Como puede verse en la figura, a pesar de haber utilizado no sólo métodos totalmente distintos sino datos de diferentes períodos, los resultados obtenidos son muy consistentes entre sí. Además, el ángulo óptimo anual, es decir aquel que hace máxima la energía generada a lo largo del año, es de aproximadamente 23 grados según los valores obtenidos de la red neural y 28 grados según los informados por la NASA (NASA 2008). En ambos casos el ángulo óptimo anual respecto al plano horizontal, es inferior a la latitud del lugar, a diferencia del usualmente utilizado en el montaje de módulos, que es la latitud más 11 grados.

Debido a la variación del ángulo del sol al cenit a lo largo del año, el ángulo óptimo también varía y se lo puede estimar con el mismo procedimiento pero utilizando los promedios mensuales de energía generada en lugar de los promedios anuales. Se calcularon con la red neural los valores de energía generada correspondientes a los meses de mayo, agosto, noviembre y febrero para diferentes ángulos del panel respecto a la horizontal. Los resultados se presentan en la figura 5.

También con fines comparativos se obtuvieron del sitio web de NASA (NASA 2008) los valores de energía incidente para los mismos meses y diferentes ángulos, los que se presentan en la figura 6. Como puede verse en las figuras 5 y 6 nuevamente los resultados son consistentes, las líneas continuas son solo una guía visual, mostrando que para ambos conjuntos de datos en los meses de primavera-verano el ángulo óptimo es menor a los 20 grados, mientras que en otoño-invierno es de aproximadamente 50 grados. La diferencia en el comportamiento mostrado por nuestros datos en la figura 5 para el mes de Agosto, respecto a los de la NASA en la figura 6, es de esperar dado que los datos procesados por la red neural corresponden a un año, en cambio los promedios mensuales reportados por la NASA, son el resultado de 22 años de medición.

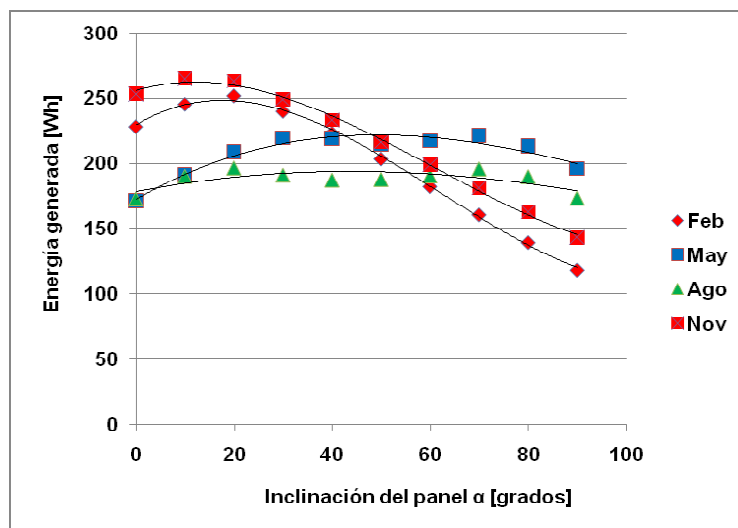


Figura 5: Promedio mensual de los valores diarios de energía generada en función del ángulo del panel respecto a la horizontal para cuatro diferentes meses. Resultados de la red neural

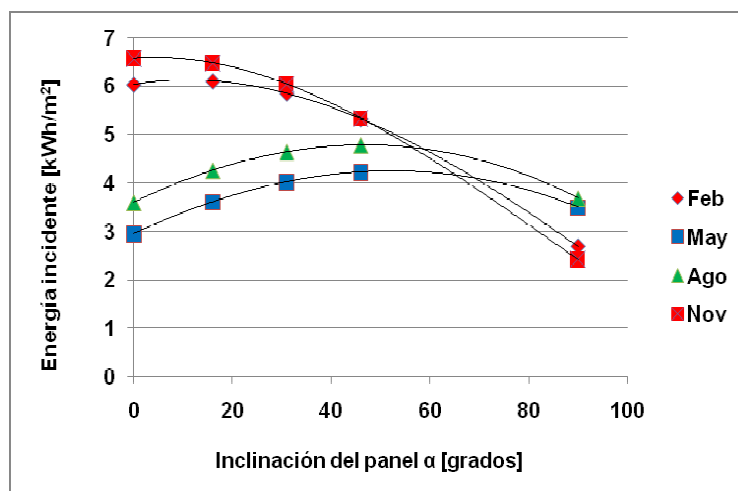


Figura 6: Promedio mensual de los valores diarios de energía incidente sobre una superficie en función del ángulo respecto a la horizontal para cuatro diferentes meses. Datos de la NASA

## CONCLUSIONES

Con la utilización de una red neural se logró encontrar una buena estimación de la energía generada, la eficiencia y la temperatura máxima de trabajo en paneles fotovoltaicos, con una incertidumbre menor al 2%, conociendo su ubicación geográfica, la heliofania y parámetros del clima como temperatura, humedad relativa ambiente, presión atmosférica y velocidad del viento, datos generalmente suministrados por las múltiples estaciones del Servicio Meteorológico Nacional. Los resultados hallados permiten afirmar que, aún cuando los datos de la radiación solar directa y difusa no sean conocidos, las redes neurales pueden utilizarse para evaluar a priori la disponibilidad del recurso solar y la energía eléctrica que puede ser generada por una instalación fotovoltaica y también definir el ángulo óptimo de instalación de los paneles respecto de la horizontal.

## REFERENCIAS

- De Bernardes L.S., Battioni M., Cutrera, M., Riso G., Garcia N.O. y Buitrago, R.H. (2007) Estimación de la energía generada por paneles fotovoltaicos a partir de parámetros climáticos mediante el uso de redes neurales. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 11, 41.
- Elminir K.H., Alamjam J., Ali U.R. and Benda V. (2001), Estimation of Solar Radiations Incident on a Photovoltaic Solar Module using Neural networks, *XXVI, ASR 2001 Seminar, Instruments and Control*, Ostrava, April 2001
- 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
- Hartmann D.L, (1994), *Global Physical Climatology*, Academic Press
- Hontoria L., Aguilera J. and Zufiria P. (2005), A new approach for sizing stand alone photovoltaic systems based in neural networks. *Solar Energy*, 78, 313

- 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 pages  
doi:10.1155/2007/85402
- Liu, B.Y.H.; Jordan, R.C. (1960) The interrelationship and characteristics and distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, 4, 1-10.
- López G., Batlles F.J. and Tovar-Pescador J. (2005), Selection of input parameters to model direct solar irradiance by using artificial neural networks. *Energy* 30, 1675-1684
- Mellit A., Benghanem M., Hadj Arab A. and Guessoum A. (2005). A simplified model for generating sequences of global solar radiation data for isolated sites: Using artificial neural network and a library of Markov transition matrices approach. *Solar Energy* 79, 469
- Naihong S, Nobuhiro K., Yasumitsu K. and Hirotora S. (2006) Experimental and Theoretical Study on the Optimal Tilt Angle of Photovoltaic Panels  
*Journal of Asian Architecture and Building Engineering* JAABE 5, no.2, 399
- NASA 2008, National Aeronautics and Space Administration Surface meteorology and Solar Energy,  
<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
- Serrano A.I. et al. (2006). Meteorological Time Series Reconstruction via Artificial Neural Network. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 8, 00879
- Tymvios F.S., Jacovides C.P., Michaelides S.C. and Scouteli C. (2005). Comparative study of Angström's and artificial neural networks' methodologies in estimating global solar radiation. *Solar Energy* 78, 752

## ABSTRACT

Neural networks were used to calculate the optimum tilt angle and the energy generated by photovoltaic modules from climatic parameters. Incident energy on the module plane, generated electric energy and module work temperature were measured along a full year. Heliophany, Temperature, ambient relative humidity, atmospheric pressure and wind speed data were obtained from two meteorological stations nearby. Data published by NASA for the same period were also used for comparison purposes. A very good estimation of the energy generated by modules and its maximum work temperature was obtained. According to our findings, even though direct and diffuse solar radiation data are unknown, neural network may be used not only for an a priori evaluation of solar resource availability and electric energy generation, but also to define the optimum tilt angle of the photovoltaic installation

**Keywords:** neural networks, climatic parameters, photovoltaic modules and optimum tilt angle