

## **CORRELACIONES ENTRE LA RADIACIÓN SOLAR, SUS COMPONENTES, EL ÁNGULO DE MONTAJE Y LA GENERACIÓN DE LOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

**M.Cutrerá<sup>1</sup>, M.Battioni<sup>2</sup>, G.Risso<sup>3</sup>, R.H.Buitrago<sup>4</sup>**

CONICET – UNL. Güemes 3450 – 3000 Santa Fe

TE/Fax: 54-342-4559190 e-mail: [rbuitre@intec.unl.edu.ar](mailto:rbuitre@intec.unl.edu.ar)

Facultad de Ingeniería Química – UNL Sgo. Del Estero 2829 – 3000 Santa Fe

**RESUMEN:** Se midió durante un año la energía generada por cuatro módulos fotovoltaicos de 42 Wp montados a diferentes ángulos respecto al plano horizontal, y las radiaciones difusa y global. Se calculó la generación de energía mensual y anual, encontrándose los ángulos óptimos mensuales y anuales para máxima generación de energía. Se analizó la composición de la radiación en función de las características del clima y su incidencia en la eficiencia de conversión de los módulos.

**Palabras clave:** energía solar, ángulo óptimo, 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 %. (Zhao et al., 1998) de 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 combinaciones serie- paralelo de celdas solares con eficiencias entre 15 y 17 % presentan, bajo condiciones estándares de iluminación, conversiones entre 14 y 16 % 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 composición 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 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 Bernardez 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 con distintos ángulos de montaje, durante todo un año, monitoreando su temperatura, curvas IV, y midiendo la radiación directa y difusa. El objetivo en una primera etapa es establecer para la ubicación geográfica de la ciudad de Santa Fe, cuál es el ángulo óptimo de montaje de los módulos para una generación máxima durante todo el año, qué porcentaje de radiación difusa y directa componen la global sobre el plano horizontal, y determinar su correlación con la eficiencia de conversión de los módulos.

En una segunda etapa, mediante el uso de redes neurales, se estudiará la relación de estos parámetros con datos climáticos tales como humedad relativa, temperatura del medio ambiente, turbidez atmosférica, velocidad de vientos, grado de nubosidad, etc

### **MEDICIONES Y CALCULOS**

Sobre un rack ubicado en el predio del Campo de la Universidad Nacional del Litoral, en el paraje El Pozo de la ciudad de Santa Fe, cuya latitud es 31° 42' S, montamos 4 Módulos SOLARTEC de 42 Wp con los siguientes ángulos de inclinación respecto al plano horizontal : 0, 24, 36 y 58 grados. 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 IV de cada uno de ellos a las 10, 14 y 16 horas. Estas mediciones se realizaron sin interrupciones durante todo un año desde julio del 2009 a julio del 2010. Simultáneamente con dos solarímetros Kipp & Zonen CM 6 se midió, en el plano horizontal, la radiación solar global, y la difusa, en este último caso se usó un aro provisto por Kipp & Zonen, montado de forma que proyecte sombra sobre el detector, cuya posición se corrige semanalmente de acuerdo al corrimiento del ángulo del sol respecto al horizonte. Se efectuaron las correcciones de la radiación difusa medida, conforme a lo indicado en el manual del solarímetro para el aro de sombra CM 11/121.

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 IV medidas, y t es el intervalo de tiempo entre mediciones en este caso 5 minutos.

La eficiencia de conversión esta dada por :

$$\eta(\%) = (E_g / \text{Rad. A. t}) \cdot 100 \quad (2)$$

Donde Rad es la radiación solar global incidente sobre el plano del panel en  $\text{W/m}^2$ , en el caso de este artículo se usaron los datos del instalado a  $0^\circ$ , A es el área de los módulos en  $\text{m}^2$ , y t el intervalo de tiempo entre mediciones en horas.

## RESULTADOS:

En la figura 1 se muestra en ordenadas la energía eléctrica generada por mes por cada módulo en función de los meses del año. Se puede observar para el mes de julio una fuerte diferencia entre la energía generada por el módulo horizontal y los montados a  $36^\circ$  y  $58^\circ$  grados, no así entre estos dos últimos. Debido a la posición del sol en esa época del año, los rayos solares llegan prácticamente perpendiculares al módulo cuya inclinación es  $58^\circ$ , situación teóricamente más favorable para la generación de energía. Como discutiremos mas adelante, la composición de la radiación en directa y difusa, explica la similar generación del Módulo a  $36^\circ$  respecto al de  $58^\circ$ . De igual modo vemos en esta figura que en los meses de verano el módulo horizontal es el que mas energía genera.

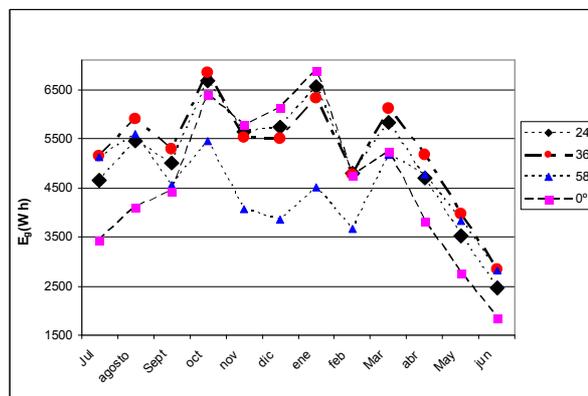


Figura 1: Energía Eléctrica Generada (Wh) por mes por cada módulo en función de los meses del año

En la figura 2 se muestra en ordenadas la energía generada en forma acumulativa mes a mes, por los diferentes módulos hasta completar un año de generación. Se puede observar que el módulo montado a  $36^\circ$  grados, es el que genera acumulativamente más energía, seguido por el de  $24^\circ$  grados, resultando similares los de  $0^\circ$  y  $58^\circ$  grados.

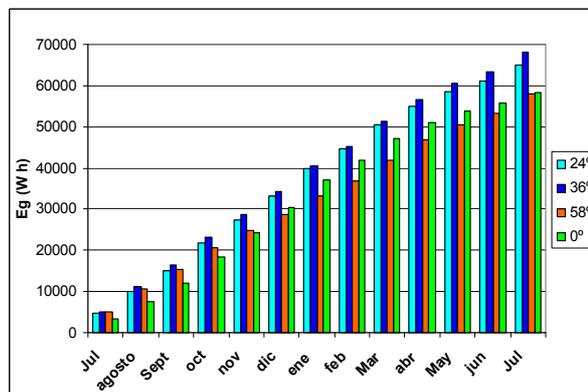


Figura 2: Energía Eléctrica Generada (Wh), acumulada mes a mes, para cada ángulo de montaje de los módulos.

Estos resultados se muestran en la figura 3, donde en ordenadas se grafica la energía generada por los módulos en un año, y en abscisas el valor del ángulo de inclinación de los mismos. Interpolando con un polinomio de segundo grado los puntos experimentales, se obtiene una curva con un máximo en  $29^\circ$ . Este valor es el ángulo óptimo calculado para las instalaciones fotovoltaicas que se desee que generen durante todo un año la mayor cantidad de energía eléctrica, si están instaladas en la ciudad de Santa Fe. Dicho ángulo, coincide con el informado por la NASA en su página Eosweb (Eosweb, 2010).

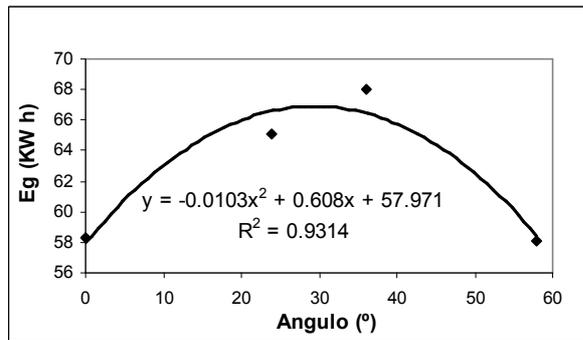


Figura 3: Energía Eléctrica Generada (Wh), en el año, en función del ángulo de montaje de los módulos.

Si tomamos las energías generadas para cada mes individualmente se obtienen curvas como las que se muestran en la figura 4 para los meses de enero, marzo y julio, de la cual se puede ver que el máximo de la curva de interpolación se corre de 0 a 58 grados, es decir que el ángulo óptimo cambia mes a mes correspondiéndose aproximadamente con el de incidencia normal de la radiación directa sobre la superficie de los módulos.

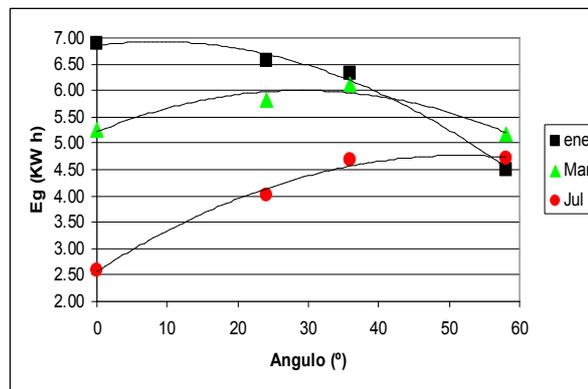


Figura 4: Energía Eléctrica Generada (Wh) mensual, en función del ángulo de montaje de los módulos.

En la figura 5 se presentan los ángulos óptimos calculados para todos los meses del año. Vemos que la variación se corresponde claramente con las estaciones del año. Este tipo de comportamiento ha sido informado por otros investigadores siendo la variación anual del ángulo óptimo muy diferente dependiendo no solo de la latitud sino también del tipo de clima. (Shu et al., 2006)

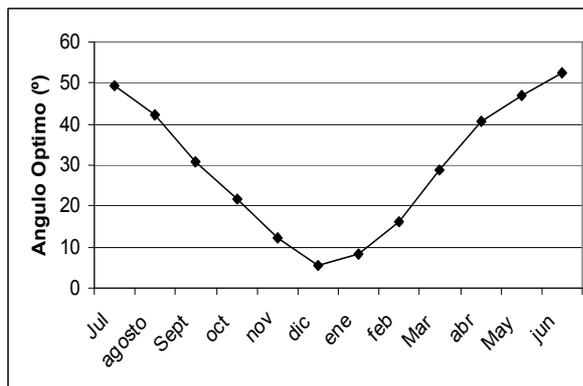


Figura 5: Ángulo óptimo de montaje de los módulos para cada mes del año.

El efecto del clima se ve primariamente en dos variables, la composición de la radiación y la temperatura del módulo. En este trabajo se midió separadamente la radiación difusa y la global sobre el plano horizontal, calculando la componente directa por diferencias entre la global y la difusa.

En la figura 6 se muestra la composición de la energía solar mensual que recibe la ciudad de Santa Fe, indicándose en el gráfico de barras la magnitud de la componente difusa y directa. Podemos apreciar que la componente difusa es importante todos los meses y mayor a un 30 % en promedio.

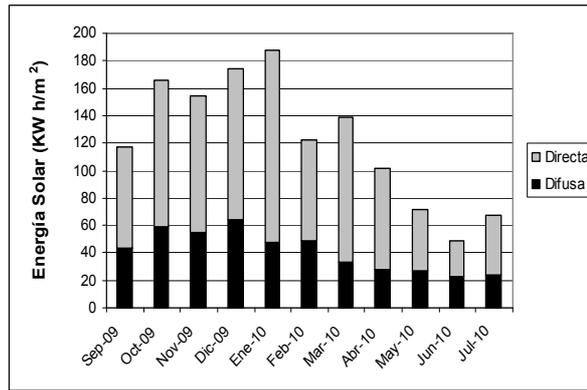


Figura 6: Composición de la Energía Solar Incidente para cada mes del año

El comportamiento de las componentes de la radiación con las características climáticas del día se presentan en la figura 7, donde se grafican los valores diarios de las energías directa y difusa, en función de la energía solar global del mismo día. Se observan tres zonas, la primera para valores de la energía solar global menor a 3 KWh/m<sup>2</sup>, que corresponden a días nublados completamente, con o sin lluvia, donde predomina la componente difusa y tiene una correlación lineal creciente con la global, luego entre 3 y 5 KWh/m<sup>2</sup>, donde los días son nublados con mejoramientos temporarios, la difusa presenta un comportamiento aleatorio, pero la directa una tendencia lineal creciente con la energía global, finalmente el último tramo, para energías mayores a 5 KWh/m<sup>2</sup>, donde los días son de buen clima con alguna nubosidad temporaria vemos que ambas componentes responden linealmente pero en sentidos contrarios, la directa aumenta con la energía global y la difusa disminuye, como se muestra en el Insert de la figura 7.

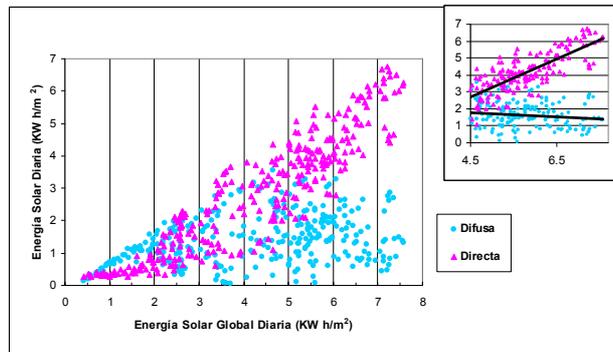


Figura 7: Composición de la Energía Solar Diaria en función de la Energía Solar Global para todo un año

Estos cambios en la composición de la radiación se manifiestan en los rendimientos de conversión de los módulos como se muestra en la figura 8 para el caso del módulo con ángulo de inclinación 0 grados. Vemos que la eficiencia de conversión para radiación global menor a 3 KWh/m<sup>2</sup> es baja y crece con el aumento de la intensidad, para alcanzar un estado estacionario en la zona entre 3 y 5 KWh/m<sup>2</sup> y presentar luego una leve disminución a altas radiaciones, lo que se explica en parte también por un aumento de la temperatura de trabajo del módulo. Todos estos valores de la eficiencia de conversión del módulo a la intemperie, son menores a 11.6%, que es la eficiencia medida para este panel bajo condiciones estándares de radiación y temperatura (AM1.5 y 25°C).

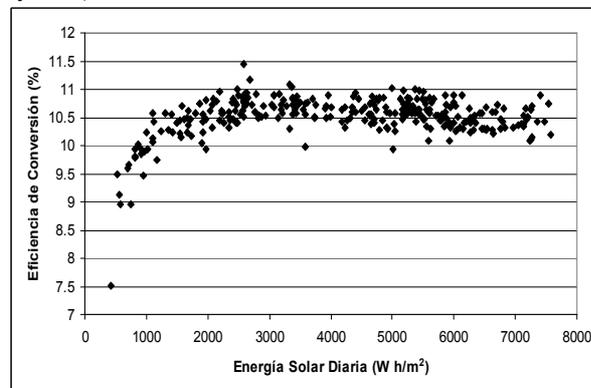


Figura 8: Eficiencia de Conversión de un módulo en posición horizontal en función de la Energía Solar Diaria

## CONCLUSIONES:

Se analizaron los resultados obtenidos de medir durante un año la energía generada por cuatro módulos iguales instalados respecto a la horizontal a diferentes ángulos, monitoreando simultáneamente la radiación difusa y global sobre el plano horizontal. A partir de estos datos se calculó el ángulo óptimo de inclinación para la instalación de un módulo fotovoltaico fijo, que genere la máxima energía posible en un año. El valor obtenido de 29 grados coincide con los cálculos realizados por el servicio meteorológico de la NASA para las coordenadas geográficas de la ciudad de Santa Fe.

Este valor de 29 grados y el análisis de los datos, prueban que la energía generada por un módulo depende de varios factores, no solo los intrínsecos al módulo en cuanto a su eficiencia de conversión, sino los relacionados con el lugar geográfico en que es instalado, el clima del lugar, las características del medio circundante, la velocidad y dirección del viento. Todos estos factores que están de algún modo correlacionados, son los que continuaremos estudiando vía el uso de redes neurales.

## REFERENCIAS

- Chang Y.P. (2010) Optimal the tilt angles for photovoltaic modules in Taiwan. *Electrical Power and Energy Systems* 32, 956–964.
- De Bernardes 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.  
<https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
- 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.
- Mehlerer 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.
- 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 electric energy generated by four photovoltaic modules installed on a rack with four different angles were measured during a year together with the diffuse and global solar radiation. From these data the monthly and year optimum angle for maximum energy generation were calculated. The solar radiation composition as a function of the weather characteristic were analyzed and its relation with the module conversion efficiencies as well.

**Keywords:** solar energy, electric energy generated, photovoltaic modules.