

# Simulación Usando Labview de la Radiación Incidente sobre Superficies bajo Diferentes Condiciones Aplicando un Modelo de Irradiancia Solar Basado en Transmitancias

B. Chiriboga, N. Mondragón, J. Urquizo  
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación  
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)  
Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 vía Perimetral  
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador  
bchiribo@espol.edu.ec, nmondiag@espol.edu.ec, jurquizo@espol.edu.ec

## Resumen

*El presente trabajo describe la simulación realizada en el entorno de programación Labview de la radiación solar incidente en un plano inclinado y su aplicación en optimización de paneles solares, cálculo de radiación recibida por fachadas, estudio de seguidores solares y pérdidas por sombras creadas por obstáculos cercanos. El cálculo de las componentes directa y difusa de la radiación incidente en superficie horizontal fue realizado con los modelos de Hottel y Liu-Jordan respectivamente. La energía recibida por éste tipo de superficies se obtuvo ingresando valores de irradiancia en intervalos de cinco minutos aproximadamente despendiendo de las horas de luz solar y luego integrando numéricamente esta función. Seguidamente ésta información fue utilizada para deducir la radiación en superficies inclinadas con cualquier orientación. Se aprovechó luego la versatilidad y potencia de Labview para determinar las condiciones en las cuales se obtendría mejores rendimientos en paneles solares y fachadas. Finalmente se realiza un caso de estudio en una comunidad rural de Ecuador proponiendo una solución sencilla y económica para incrementar la energía recibida por un panel solar fotovoltaico.*

**Palabras claves:** Labview, radiación solar, paneles fotovoltaicos, transmitancia.

## Abstract

*The present work describes Labview's simulation of solar radiation on tilted planes and applications such as PV panel optimization, incident energy on facades, solar trackers comparison and shading losses. Calculation of direct and diffuse component of solar radiation on horizontal surfaces was made by Hottel and Liu-Jordan methods, respectively. The energy received for this kind of plane was simulated entering irradiance values every five minutes approximately depending on daytime hours and performing a numeric integration on this function. Then we use this data to deduce solar radiation received by a tilted plane at any slope and orientation. We used Labview's power and versatility on finding out the best conditions for PV panels operation and facades orientation. Finally, we present a case from a rural community in Ecuador where we proposed a simple, cheap improvement for a PV panel based on results obtained from this simulation.*

**Keywords:** Labview, solar radiation, PV panels, transmittance.

## 1. Introducción

A medida que se agotan las reservas internacionales de petróleo y aumentan los problemas causados por el cambio climático, el mundo mira cada vez con más interés el desarrollo de las energías renovables. Dentro de éste grupo, la energía solar representa una de las más prometedoras debido a su relativa abundancia.

Bajo este panorama, es deseable el desarrollo de herramientas que permitan un análisis detallado de todas las variables implicadas en la captación y transformación de la radiación solar en otros tipos de energía. Utilizando el entorno de programación

Labview hemos creado un programa (en este lenguaje los programas son llamados instrumentos virtuales o VI por sus siglas en inglés) que nos permitirá obtener la energía recibida por un plano inclinado tal como un panel solar o la fachada de un edificio para distintas condiciones de inclinación y orientación. También podremos modificar los parámetros de entrada en los intervalos que deseemos y observar el comportamiento de la radiación solar ante los cambios realizados en la superficie de captación. Se presenta además la posibilidad del estudio de un seguidor acimutal y un sencillo método para calcular las pérdidas causadas por sombras de obstáculos cercanos al punto de

estudio. Finalmente proponemos una modificación a un panel solar ubicado en una hacienda ganadera del Ecuador rural basada en criterios de economía y facilidad de instalación y operación; para esto, sólo fue necesario realizar cableados y operaciones lógicas sencillas en el instrumento virtual desarrollado anteriormente y aplicar un poco de teoría e intuición, demostrando la utilidad y practicidad del programa realizado.

## 2. Métodos y materiales

La transmitancia atmosférica para la componente directa en superficie horizontal  $\tau_b$  se calculó utilizando el modelo de Hottel[1]:

$$\tau_b = a_0 + a_1 \exp\left(\frac{-k}{\cos \theta_z}\right) \quad (1)$$

Donde  $\theta_z$  es el ángulo cenital solar y  $a_0$ ,  $a_1$  y  $k$  son coeficientes que dependen del tipo de clima según las siguientes fórmulas:

$$a_0 = r_0 \left[ 0.4237 - 0.00821(6 - A)^2 \right] \quad (2)$$

$$a_1 = r_1 \left[ 0.5055 + 0.00595(6.5 - A)^2 \right] \quad (3)$$

$$k = r_k \left[ 0.2711 + 0.01858(2.5 - A)^2 \right] \quad (4)$$

A representa la altitud del lugar de estudio (en kilómetros) y  $r_0$ ,  $r_1$  y  $r_k$  se encuentran detallados en la tabla 1 para los diferentes tipos de clima considerados por este modelo.

**Tabla 1.** Coeficientes de corrección del modelo de Hottel

Tipo de clima	$r_0$	$r_1$	$r_k$
Tropical	0.95	0.98	1.02
Verano latitudes medias	0.97	0.99	1.02
Invierno latitudes medias	1.03	1.01	1.00
Verano subártico	0.99	0.99	1.01

Una vez obtenido el valor de  $\tau_b$  hallamos la transmitancia atmosférica para la irradiancia difusa  $\tau_d$ , utilizando la relación establecida por Liu-Jordan[2]:

$$\tau_d = 0.2710 - 0.2939\tau_b \quad (5)$$

Entonces, las irradiancias directa y difusa quedan expresadas por las siguientes fórmulas[3]:

$$I_b = I_{\text{ext}} \tau_b \cos \theta_z \quad (6)$$

$$I_d = I_{\text{ext}} \tau_d \cos \theta_z \quad (7)$$

En ambos casos  $I_{\text{ext}}$  representa la irradiancia extraterrestre en superficie horizontal.

Se obtienen los ángulos horarios de salida y puesta del sol y dividimos este periodo de tiempo para 144, lo cual nos brinda intervalos de aproximadamente 5 minutos (este valor no es fijo sino que varía en función

de las horas de luz solar disponibles), un valor común para la recolección de datos en estaciones meteorológicas. Se evalúa la irradiancia en cada uno de estos intervalos y se colocan en un arreglo de datos. Labview se encarga de integrar numéricamente estos valores, obteniendo una aproximación muy buena del valor real del área bajo la curva de irradiancia, es decir, la energía total recibida durante el día. He aquí una de las principales novedades con respecto a otros enfoques, pues la mayoría de autores asumen valores fijos de irradiancia durante intervalos de tiempo muy largos para luego en una sencilla operación multiplicar la irradiancia por el tiempo y así obtener la energía recibida en el referido intervalo. Si bien no es una aproximación errónea, creemos que el enfoque de la integración numérica brinda un resultado mucho más aproximado a la realidad.

Hallada la radiación global en superficie horizontal para un día en particular, podemos encontrar la radiación global en superficie inclinada  $G_T$  para ese mismo día por medio de la relación:

$$G_T = R_b B + R_d D + R_r G \quad (8)$$

B, D y G representan la radiación directa, difusa y global en un día n para una superficie horizontal, respectivamente; mientras el cálculo de los factores de corrección que acompañan a estos términos se explica a continuación.

$R_b$  se denomina factor geométrico y se define como la relación entre el coseno del ángulo de incidencia  $\theta$  y el coseno del ángulo solar cenital  $\theta_z$ . Sin embargo, como nuestro interés apunta a obtener valores diarios de irradiancia, utilizamos la expresión:

$$R_b = \frac{\int_{\omega_r}^{\omega_s} \cos \theta(\omega) \cdot d\omega}{\int_{\omega_r}^{\omega_s} \cos \theta_z(\omega) \cdot d\omega} \quad (9)$$

Los valores de  $\omega_r$  y  $\omega_s$  son los ángulos horarios de salida y puesta del sol en la superficie inclinada y se calculan de acuerdo al método de Klein modificado por Andersen[4]. El ángulo de incidencia de los rayos solares en el plano  $\theta$  en todo momento está dado por[5]:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos S \\ & - \sin \delta \cos \phi \sin S \cos O \\ & + \cos \delta \cos \phi \cos S \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin S \cos O \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin S \sin O \sin \omega \end{aligned} \quad (10)$$

Siendo  $\omega$  el ángulo horario, que para nuestros propósitos será considerado negativo en las mañanas y positivo en las tardes;  $\delta$  es la declinación solar,  $\phi$  es la latitud del punto de estudio, S la inclinación de nuestro plano con respecto a la horizontal y O define la orientación de la superficie receptora asignándole al

punto cardinal Sur el valor de  $0^\circ$  y midiendo su valor positivamente en sentido Sur-Oeste.

El ángulo solar cenital está dado por:

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (11)$$

Para hallar  $R_r$  necesitamos conocer el albedo del suelo  $\rho$ , el cual es una medida de la capacidad del suelo para reflejar la radiación solar. Existen muchas tablas con los valores aproximados de  $\rho$ , pero es una práctica común asumir su valor en 0.2 cuando no se conoce exactamente, por lo cual adoptaremos esta aproximación. Una vez hecha la aclaración llegamos a la siguiente expresión:

$$R_r = \rho \frac{(1 - \cos S)}{2} \quad (12)$$

La componente difusa de la radiación solar en nuestro plano inclinado la obtenemos con el modelo de Reindl et al.[6]:

$$R_d = \frac{B}{G_0} R_b + \left(1 - \frac{B}{G_0}\right) \left(1 + \frac{\cos S}{2}\right) \left(1 + \sqrt{\frac{B}{G}} \cdot \sin^3 \frac{S}{2}\right) \quad (13)$$

$G_0$  es la radiación global diaria extraterrestre en superficie horizontal y los demás valores han sido definidos anteriormente.

Una vez obtenidos estos tres factores de corrección se calcula la energía total recibida por el plano inclinado en el día de acuerdo a (8). Para obtener la energía recibida en un año o en un intervalo de días específico solo es necesario modificar los lazos de programación que gobiernan la variable deseada en el diagrama de bloques de Labview.

Son precisamente estos lazos los que le confieren la flexibilidad suficiente al programa para realizar estudios incrementando a gusto del usuario un parámetro para visualizar gráficamente el resultado así como también obtener sumatorias de energías diarias.

Realizamos un estudio del seguidor acimutal para lo cual se reescribió (10) en la siguiente forma:

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos S + \sin \theta_z \sin S \cos(\Psi - O) \quad (14)$$

En un seguidor de este tipo, el ángulo acimutal solar  $\Psi$  es seguido por la proyección de la normal del panel solar en el horizonte, y por lo tanto  $\Psi - O = 0$ , con lo cual (14) se reduce sustancialmente para los cálculos pertinentes.

Para caracterizar la sombra de un obstáculo cercano a nuestro lugar de estudio representamos el perfil de la obstrucción con cuatro puntos  $P_{ob,i}(\psi_{ob}^i, \alpha_{ob}^i)$ -los vértices de la figura- denotados por su acimut y altura solar, siguiendo las convenciones descritas anteriormente[7]. Como no es el objetivo de este trabajo un análisis detallado de sombreados, creemos que cuatro puntos son suficientes para definir una forma típica de las encontradas en sitios urbanos tales como edificios, vallas publicitarias, etc. En todo

caso, el programa ofrece la posibilidad de ampliar este número de puntos si se requiere. Utilizando estos datos y la ecuación general de la recta definimos el contorno del obstáculo por medio de líneas  $T_{ob,i}$ :

$$T_{ob,i}(\Psi) = \frac{\alpha_{ob}^{i+1} - \alpha_{ob}^i}{\psi_{ob}^{i+1} - \psi_{ob}^i} \Psi + \frac{\alpha_{ob}^i \psi_{ob}^{i+1} - \alpha_{ob}^{i+1} \psi_{ob}^i}{\psi_{ob}^{i+1} - \psi_{ob}^i} \quad (15)$$

Es de notar que los puntos deben ser ingresados siempre desde el menor acimut hacia el mayor. Una vez cumplido este paso el programa determina si existe sombra en el plano calculando primero el acimut solar, constata luego que  $\psi_{ob}^0 \leq \Psi \leq \psi_{ob}^3$  y después verifica con la ecuación de la recta correspondiente si  $T_{ob,i}(\Psi) \geq \alpha$  en ese preciso instante. Sólo si se cumplen estas condiciones existe sombra en la superficie receptora.

### 3. Resultados y discusión

Las posibilidades de expansión del programa son muy variadas, así como también sus posibles aplicaciones. A continuación brindaremos breves detalles de los usos posibles.

#### 3.1. Irradiación anual recibida por un plano en un lugar determinado

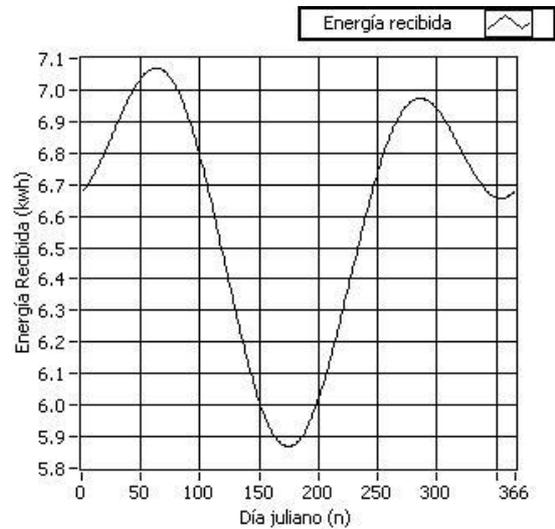


Figura 1. Radiación recibida por un plano horizontal ubicado en la plazoleta de la FIEC;  $\phi = -2.14534$

En la figura 1 observamos la curva de radiación recibida por un plano horizontal ubicado en la plazoleta central de la Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación. La energía total recibida durante el año es de 2411.33 Kwh.

#### 3.2. Inclinación óptima de un panel solar

Para encontrar la inclinación óptima de un panel ubicado en el hemisferio sur, lo orientamos hacia el

norte y procedemos a estudiar la energía recibida por ese panel durante el año para cada inclinación. En el caso de nuestro hipotético panel en la FIEC, la curva resultante se observa en la figura 2.

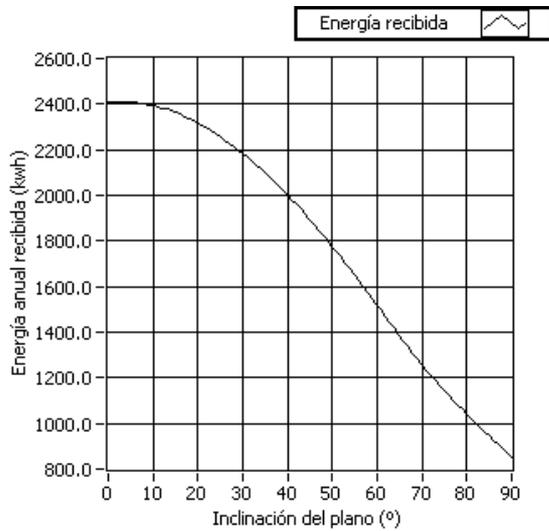


Figura 2. Radiación recibida vs. ángulo de inclinación

Utilizando un indicador en Labview notamos que con una inclinación de 2° se logra captar la mayor cantidad de energía, siendo este valor de 2412.68 Kwh.

### 3.3 Análisis de un seguidor acimutal

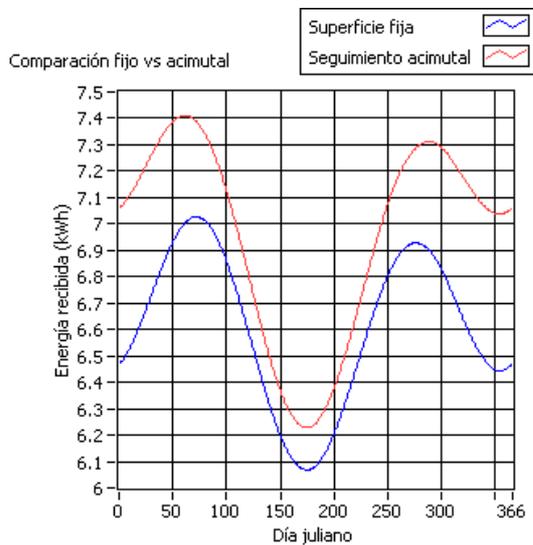


Figura 3. Comparación fija vs. acimutal

En la figura 3 observamos el comportamiento de un seguidor acimutal frente a una superficie fija en la plazoleta de la FIEC. Ambos planos están inclinados 2° respecto de la horizontal. Nótese la poca ganancia que se obtiene en este seguidor. La razón es que por encontrarnos prácticamente en el ecuador, los rayos solares caen casi perpendiculares. Por intuición deducimos que en nuestro país el tipo de seguidor

ideal sería un plano horizontal con un eje norte-sur. Este sistema lograría captar los rayos solares casi perpendicularmente durante todo el año.

### 3.4 Irradiación recibida por fachadas

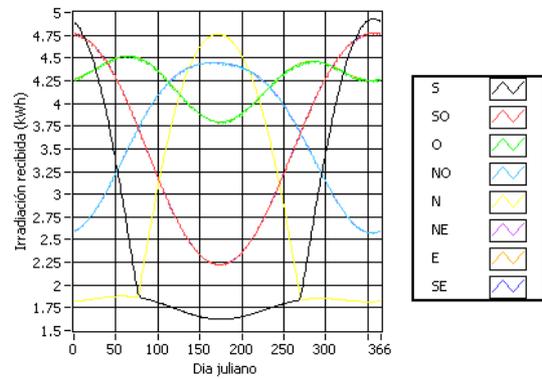


Figura 4. Radiación recibida por fachadas

La figura 4 muestra las curvas de energía recibida por las distintas fachadas de un edificio según su orientación. La energía recibida por cada una de ellas durante el año queda registrada en la tabla 2.

Tabla 2. Energía total recibida por cada fachada

Fachada	Energía recibida (Kwh.)
S	990.9
SO	1291.2
O	1545.4
NO	1331.8
N	1048.4
NE	1333.0
E	1547.2
SE	1292.5

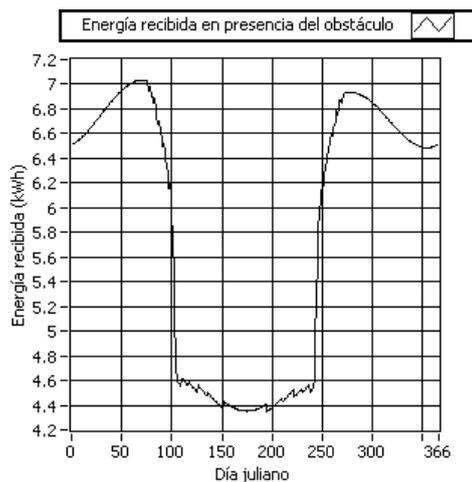
### 3.5 Pérdidas por sombras

Para calcular las pérdidas producidas por un obstáculo en las cercanías de nuestro plano inclinado, supongamos que la obstrucción se encuentra al noroeste y está representada por los puntos que se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Vértices del obstáculo en estudio

Punto	Acimut (°)	Altura (°)
P0	100	30
P1	120	90
P2	140	90
P3	170	20

Una vez ingresados estos puntos, el programa se ejecuta normalmente con una única diferencia: si existe sombra no se tomarán en cuenta en la sumatoria las componentes de radiación directa y difusa anisotrópica en el intervalo indicado. En la figura 5 observamos el gráfico de radiación resultante para el obstáculo definido.



**Figura 5.** Radiación en presencia del obstáculo definido en la tabla 3

### 3.6 Diseño de una mejora para un panel solar

Para demostrar una de las múltiples aplicaciones que se pueden implementar con el programa nos dirigimos a una hacienda ganadera ubicada en la provincia de Manabí, donde se encuentra un panel solar con el objetivo de proponer una mejora.

Nuestro objetivo es captar más energía teniendo en cuenta tres factores importantísimos por la pobreza y difícil acceso del lugar: economía, facilidad de instalación y facilidad de operación.

Notamos que el panel solar se encuentra prácticamente horizontal. Esto no es ninguna novedad puesto que nuestro GPS marca una latitud  $\phi = -0.22642$ . Se encuentra sujeto por cuatro soportes (uno en cada esquina) hechos de varilla metálica. La altura es de 193 metros sobre el nivel del mar.

Observando la pobreza y la poca educación de la gente del sector deducimos inmediatamente que un seguidor solar conllevaría un costo muy alto, el cual no puede ser asumido por los habitantes.

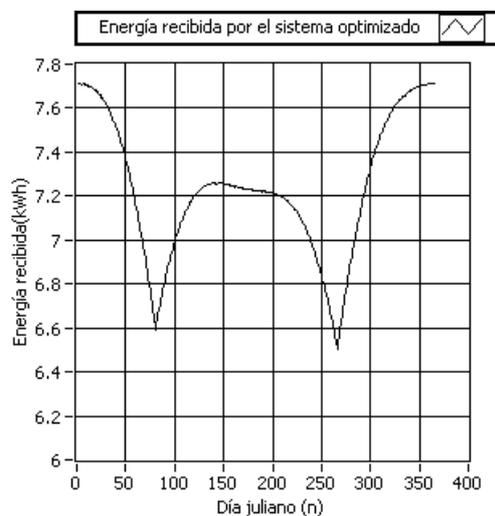
Tomando esto en cuenta configuramos Labview para encontrar la inclinación óptima del panel entre el 21 de marzo y el 22 de septiembre (días de los equinoccios, aproximadamente). Durante éste intervalo de tiempo el panel tendrá una orientación de  $180^\circ$ , puesto que en este lapso la declinación solar es positiva, es decir, el sol se encontrará ligeramente al norte del panel. El resultado en nuestro programa nos indica que la inclinación óptima del panel entre estos días es de  $23^\circ$ .

En contraposición, configuramos Labview para estudiar la radiación solar captada por el panel durante la otra porción del año, orientando el panel al sur. El indicador nos confirma una vez más que la inclinación adecuada es de  $23^\circ$ .

Observando la geometría de los soportes llegamos a la conclusión de que únicamente es necesario cortar dos de estos para lograr una inclinación del panel respecto a la horizontal de  $23^\circ$  y cambiar la orientación

del panel dos veces al año, coincidiendo con los equinoccios.

Este diseño aumenta la energía recibida por el plano a 2641.5 Kwh., mientras que en condiciones de operación normales este valor rondaría los 2441.5 Kwh. Hemos logrado un aumento en la energía disponible para transformación del 8.2% simplemente recortando dos soportes del panel y cambiando su orientación dos veces al año.



**Figura 6.** Energía recibida por el panel solar aplicando la mejora propuesta

## 4. Conclusiones

Los modelos de radiación solar basados en transmitancias presentan una manera sencilla y relativamente precisa de calcular la radiación solar incidente en la superficie de la tierra. Su principal limitación radica en que son muy imprecisos en presencia de nubes.

La complementación de un modelo sencillo basado en transmitancias con Labview ha permitido crear una herramienta potente y muy exacta para el estudio de la energía recibida por planos inclinados. Sus aplicaciones son muchas y debido al diseño modular con el que se programó las posibilidades de expansión son variadas entre las que podemos mencionar estudio de seguidores de uno y dos ejes, sombras con formas complejas, cambiar el modelo de transmitancia utilizado, etc.

También es posible comparar el rendimiento de un seguidor acimutal con el de un panel fijo, aspecto muy importante a tener en cuenta para la implementación o no de un seguidor.

## 5. Agradecimientos

Agradecemos al ingeniero Javier Urquiza por su apoyo y diligencia en la consecución de éste proyecto.

A los señores Tito y Miguel Macay, propietarios del panel solar para el cual se diseñó la mejora.

## 6. Bibliografía

- [1] Hottel, H.C.: "A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres", *Solar Energy* Vol. 18, páginas 129-134; Estados Unidos, 1976
- [2] Liu, B. y Jordan, R.: "The interrelationship and characteristics distribution of direct, diffuse and total solar radiation"; *Solar Energy* Vol. 4, páginas 1-19; Estados Unidos, 1960
- [3] Passamai, V.: "Determinación de radiación solar horaria para días claros mediante planilla de cálculo", *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, [www.unsa.edu.ar](http://www.unsa.edu.ar); Argentina, 2000
- [4] Andersen, P.: Comment son "Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces" by SA Klein, *Solar Energy* Vol. 27, página 287, Estados Unidos, 1980
- [5] Allen, R., Trezza, R., Tasumi, M.: "Analytical integrated functions for daily solar radiation on slopes", *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 139, páginas 55-73; Estados Unidos, 2006
- [6] Kamali, Gh., Moradi, I., Khalili, A.: "Estimating solar radiation on tilted surfaces with various orientations: a study case in Karaj (Iran)", *Theoretical and applied climatology*, Vol. 84, páginas 235-241; Austria, 2006
- [7] Drif, M., Perez, P., Aguilera, J., Aguilar, J.: "A new estimation method of irradiance on a partially shaded PV generator in grid-connected photovoltaic systems", *Renewable Energy*, Vol. 33, páginas 2048-2056, [www.elsevier.com/locate](http://www.elsevier.com/locate), 2008