

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DIRECCIONAL DE CUBIERTAS DE SOLARÍMETROS ANTE VARIACIONES DEL ÁNGULO DE INCIDENCIA

P. Galimberti, M. Principi, J. Barral
Grupo de Energía Solar – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Río Cuarto
Ruta Nacional N° 36- Km. 601 – 5800 Río Cuarto - Córdoba
Tel. 0358-4676488 – Fax 0358-4676246 e-mail: pgalimberti@ing.unrc.edu.ar

RESUMEN: Mediante una fuente de luz artificial y un dispositivo diseñado a tal efecto se analiza el comportamiento de distintas cubiertas en un solarímetro fotovoltaico ante variaciones del ángulo de incidencia de la radiación, con el propósito de determinar cual es la cubierta que se adapta mejor teniendo en cuenta diferentes aspectos técnicos y económicos. Se refirió el error a la condición de incidencia normal, mostrándose gráficas que describen el comportamiento de distintas cubiertas: seis de vidrio y dos de teflón. A pesar de su simplicidad la cubierta de vidrio común plano y transparente muestra un buen comportamiento, con un error referido que llegó al 3 % en el caso más desfavorable. Las cubiertas de vidrio plano con tratamiento superficial poseen un buen comportamiento para ángulos de incidencia bajos. Las cubiertas de teflón se presentan como una alternativa a desarrollar.

Palabras clave: piranómetro, error, radiación solar, materiales.

INTRODUCCION

A los efectos de medir la radiación solar es posible utilizar distintos dispositivos según la información que se quiera obtener: desde los piranógrafos que nos entregan una gráfica diaria que representa la irradiancia en función del tiempo, hasta los espectralradiómetros que nos entregan la composición espectral de la radiación. En este trabajo nos concentraremos en los solarímetros cuya función es la medición de la irradiancia global, comúnmente las mediciones de irradiancia global realizadas en meteorología se efectúan sobre el plano horizontal. En el estudio de dispositivos de aprovechamiento de la energía solar es de uso corriente un solarímetro ubicado en forma coplanar con la superficie activa del artefacto.

Los solarímetros más difundidos tienen dos principios de funcionamiento distintos según el tipo. Los solarímetros de termopila, llamados comúnmente piranómetros, basan su funcionamiento en la señal generada por una pila de termocuplas existiendo varios subtipos de acuerdo al diseño adoptado en la construcción. Por otra parte se encuentran los solarímetros fotovoltaicos también llamados piranómetros fotovoltaicos, cuyo elemento esencial consiste en un fotodiodo de material semiconductor capaz de generar una señal proporcional a la radiación incidente. Estos últimos de aparición posterior, se han difundido notablemente debido a su menor costo comparado con los primeros.

La medición de radiación solar mediante solarímetros esta influenciada por distintos errores. Dentro de los más destacables se pueden considerar los errores debidos a una respuesta diferencial ante la composición espectral de la radiación debido a un comportamiento no plano espectralmente y los errores originados por una respuesta angular variable que se aleja de la ley del coseno para distintos ángulos de incidencia. En la mayoría de los casos la alinealidad no constituye un error importante. También originan errores las variaciones de la señal de salida debidas a cambios de variables ambientales como temperatura o velocidad del viento, etc. Numerosos han sido los esfuerzos para realizar mediciones de radiación solar con elementos semiconductores (Alados-Arboleda et al, 1995; Bajons, 1998). En el país se han desarrollado distintas experiencias a los efectos de comprobar el comportamiento de los solarímetros fotovoltaicos para su utilización en la red solarimétrica (Lopardo et al 1979; Grossi Gallegos et al, 1991). Con posterioridad, partiendo de las celdas solares desarrolladas en el Grupo de Energía Solar de la Comisión Nacional de Energía Atómica (GES-CNEA) los esfuerzos se encaminaron a obtener un diseño apropiado de solarímetro fotovoltaico con el objetivo de lograr localmente dispositivos que permitan realizar la medición de una manera confiable y a un costo razonable (Bolzi et al, 1999). El dispositivo desarrollado aloja la celda en un cuerpo de aluminio, utilizando como cobertura un vidrio esmerilado plano. También se desarrollaron diseños de piranómetros fotovoltaicos basados en diodos de silicio comerciales provistos de una cubierta difusora de teflón (Vera et al, 2005).

Frente a la necesidad de solarímetros para atender a las distintas actividades desarrolladas por el Grupo de Energía Solar de la Universidad Nacional de Río Cuarto (GES-UNRC) tanto en docencia como investigación, el GES-CNEA le facilitó celdas fotovoltaicas y especificaciones técnicas de diseño a los efectos de posibilitar la construcción de los dispositivos. Partiendo del diseño logrado por el GES-CNEA se analizaron distintas posibilidades de cubierta. El presente trabajo se concentra en el estudio de la desviación de la respuesta de las distintas cubiertas ante la ley del coseno, comparando esta respuesta con la de piranómetros comerciales marca Li-cor, que son tomados como ejemplo por su uso extendido.

MATERIALES Y MÉTODOS

El apartamiento de la ley del coseno del comportamiento direccional de los sensores de radiación trae aparejado un error de medición variable con el ángulo de incidencia de los rayos solares. Partiendo del diseño de piranómetro fotovoltaico establecido por le GES-CNEA se comprobó el comportamiento del mismo ante variaciones del ángulo de incidencia a los efectos de estudiar este error, de igual manera se procedió con dos piranómetros de fotodiodo marca Li-Cor. Con el propósito de realizar mejoras en el diseño del solarímetro fotovoltaico, se procedió al ensayo de distintas cubiertas para optar por la que se adaptara mejor a la función. A los fines de este trabajo se define ángulo de incidencia al que forman los rayos provenientes de la fuente de radiación con la normal al plano que contiene a la celda fotovoltaica.

Se construyó un piranómetro fotovoltaico de cubierta intercambiable con el propósito de probar las distintas cubiertas sobre la misma base (Ver figura 1). El dispositivo consiste en una pieza de aluminio sobre la cual se monta una plaqueta que opera como soporte mecánico de la celda fotovoltaica. Por encima de la celda se coloca la cubierta que corresponda. Completa el diseño un anillo móvil que permite intercambiar las cubiertas con facilidad y puede determinar un reborde si fuese necesario. Todas las cubiertas ensayadas tienen forma circular de 25 mm de diámetro con la cara inferior plana. Se propusieron para la experiencia dos materiales que anteriormente se habían utilizado en las referencias citadas: vidrio y Teflón. En el caso del vidrio se midió el comportamiento de 6 cubiertas distintas: a) se utilizó el vidrio común plano de 1,8 mm de espesor; b) vidrio plano de 3,6 mm de espesor, satinado en la cara superior; c) el vidrio común plano de 1,8 de espesor con tratamiento de esmerilado en la cara superior, d) vidrio común plano de 1,8 de espesor con tratamiento de ataque químico con ácido fluorídrico en la cara superior, e) vidrio común plano de 1,8 de espesor con tratamiento de ataque químico con ácido fluorídrico en un círculo central de 5 mm en la cara superior y f) vidrio plano para enmarcaciones con tratamiento antirreflejo de 1,8 mm de espesor. Por otra parte, se realizaron dos cubiertas teflón: g) plana de 2 mm de espesor y h) plana de 2mm de espesor con una semiesfera de 5 mm de radio en el centro (ver figura 1, derecha). En este último caso se determinaron dos situaciones: h1) sin reborde y h2) con un pequeño reborde, obtenido por un desplazamiento del anillo móvil, de altura igual al engrosamiento central debido a la semiesfera.

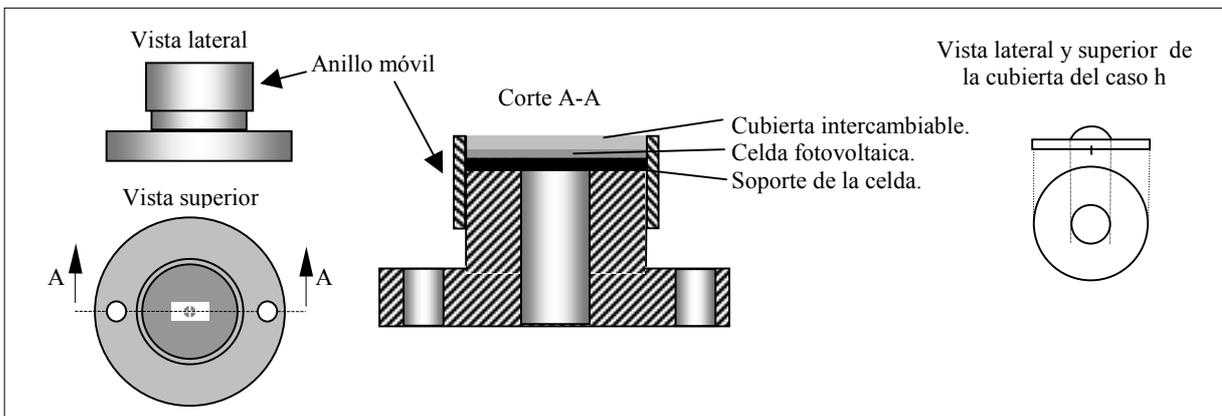


Figura 1: Aspecto del piranómetro fotovoltaico de cubierta intercambiable (distintas vistas y corte transversal) conjuntamente con la cubierta definida para el caso h.

Para efectuar las mediciones correspondientes se diseñó un dispositivo a tales efectos (Ver Figura 2-Izquierda). El dispositivo consiste en una cámara cúbica cuyas paredes internas fueron tratadas con pintura negro mate. Dentro de la cámara se encuentra un soporte giratorio de tal forma que permite sujetar los distintos piranómetros alternativamente, de manera que la superficie sensible contenga al eje de giro del sensor. Sobre el soporte se estableció una escala graduada en el que es posible determinar el ángulo de giro a través de una ventana realizada en la cámara. Al otro extremo del soporte giratorio se fijó una rueda con 36 dientes helicoidales que se articula con un tornillo sin fin de doble filete lo que establece una relación de giro 18:1. Es decir que por cada vuelta completa del tornillo el soporte gira 20°. Esta disposición permite variar manualmente la posición del soporte en forma rápida y con errores menores a un grado. Las medidas fueron realizadas cada 5°, este avance corresponde al giro del tornillo en un ángulo recto. La constatación de los ángulos se realizó en forma directa sobre la escala graduada unida al soporte. Tanto la cara superior como las dos caras laterales de la cámara se pueden remover fácilmente permitiendo el fácil acceso a los efectos de intercambiar las cubiertas o los piranómetros.

En la parte superior de la cámara se realizó otra ventana cuadrada de 40 mm de lado para permitir el ingreso de la radiación proveniente de la fuente artificial (Ver Figura 2-Derecha). Como fuente de radiación se utilizó una lámpara dicroica de pequeño ángulo de apertura para permitir un alejamiento importante de la lámpara a los efectos de que la divergencia de los rayos sea la menor posible y simultáneamente mantener un valor elevado de irradiancia sobre el elemento bajo ensayo. Al costado de la ventana superior se posicionó un piranómetro fotovoltaico testigo, cuya función es determinar variaciones temporales y no deseadas en la radiación proveniente de la lámpara.

Para realizar la medición de las señales se utilizó una unidad adquisidora de datos 34970A de Agilent dotado de una placa 34901A de múltiples canales conectado a una PC.

Cada cubierta se ensayo cuatro veces como mínimo realizando las mediciones de respuesta a la ley del coseno cada 5°. Una vez realizadas las mediciones el archivo proveniente de la PC contiene 19 filas, cada fila contiene los datos de fecha y hora,

valor de tensión de la señal en el dispositivo testigo y valor de tensión de la señal en el dispositivo de cubierta intercambiable. Luego se procede al tratamiento matemático de los datos para corregir algunos errores que podrían surgir con la variación de la intensidad de la radiación emitida por la lámpara dicróica. Con tal propósito se adoptó al valor inicial de cada archivo que corresponde a un ángulo de incidencia de 0° como valor de referencia corrigiendo las lecturas de señal del dispositivo de cubierta intercambiable (S_i) mediante un factor que compensa el cambio de radiación registrado en el piranómetro testigo. De esta forma se obtiene la señal corregida del dispositivo de cubierta intercambiable (S_{c_i}) donde el subíndice indica fila.

$$S_{c_i} = \frac{S_{t_1}}{S_{t_i}} S_i$$



Figura 2: (Izquierda) Aspecto del dispositivo diseñado para realizar las experiencias en ausencia de los laterales y la cara superior. (Derecha) Montaje de la lámpara dicróica y el piranómetro testigo. Se puede observar la ventana superior por donde ingresa la radiación y la lateral para leer el ángulo en la escala fijada el soporte rotante.

Los valores obtenidos se normalizan para que la señal con un ángulo de incidencia de 0° corresponda a 1000. Obteniendo de esta forma la señal normalizada S_{n_i} para cada valor de ángulo.

$$S_{n_i} = \frac{1000}{S_{c_1}} S_{c_i}$$

Por otra parte, analizando el error relativo debido al apartamiento de la ley del coseno y considerando su definición como la diferencia entre el valor medido y el valor real, dividida por el valor real, es posible observar que el error relativo adopta valores mayores a medida que el ángulo de incidencia se acerca a los 90° ya que en estos casos el valor real de la irradiancia tiende a cero a medida que el ángulo de incidencia tiende a 90° . Sin embargo, como en la mayoría de las mediciones donde se utilizan los piranómetros lo que se determina es la integral de la irradiancia en el tiempo, en este caso los errores absolutos se integran, pudiendo incluso, anularse cuando la integral incluye errores absolutos de distinto signo. En el caso de integración de la irradiancia global horizontal durante un día para obtener al valor de irradiación, el error de la irradiación es proporcional a la integración de los errores absolutos. Por lo tanto el error relativo de la irradiación, despreciando los pequeños errores que podría incluir las inexactitudes en el tiempo, quedaría definido por el cociente entre ambas integrales, por esta razón es más apropiado trabajar con el error absoluto que con el error relativo.

En este caso como se han normalizado los valores a 1000 para incidencia normal, se trabaja en función del error referido a condiciones normales que se define por la expresión siguiente, tomando como referencia el nivel 1000 correspondiente a incidencia normal.

$$\varepsilon_i = \frac{S_{n_i} - 1000 \cos(\theta_i)}{1000}$$

Posteriormente, se realizaron gráficos para visualizar los errores y poder formular conclusiones.

RESULTADOS

En los siguientes gráficos (figura 3 y 4) se muestra el resultado de las mediciones. En el eje horizontal se representan los distintos valores de ángulo de incidencia, mientras que en el eje vertical izquierdo se representan los valores medidos de irradiancia normalizados (1000 para incidencia normal) mostrados en forma de puntos llenos y se comparan con la línea

delgada que representa la ley del coseno. Los valores de error referido porcentual a la condición de incidencia normal se presenta en el eje vertical derecho, y se grafican mediante una línea con rombos insertos.

Las medidas se realizaron varias veces y la gráfica muestra los valores medios obtenidos. Las diferencias entre el valor referido porcentual de un punto determinado de una serie y el valor estimado del error referido porcentual de la misma cubierta fue, en el peor de los casos, de un 1,8 %.

En la figura 3 (Caso a) se puede observar el comportamiento de la cubierta de vidrio común sin tratamiento alguno. Los valores normalizados primero se encuentran por encima de lo indicado por la ley del coseno y luego por debajo. Es decir que para ángulos de incidencia que se encuentran entre los 0° y 70° aproximadamente, el sensor sobrestima la irradiancia. Esta sobrevaloración es máxima para un ángulo de incidencia de 45°. Para ese ángulo dado un valor de 1000 unidades en incidencia normal, corresponde a un 3 % de sobrestimación, o sea unas 30 unidades. Por otro lado, que para ángulos entre 70° aproximadamente y 90° la cubierta de vidrio subestima la irradiancia incidente, esta subestimación nunca supera el -2%.

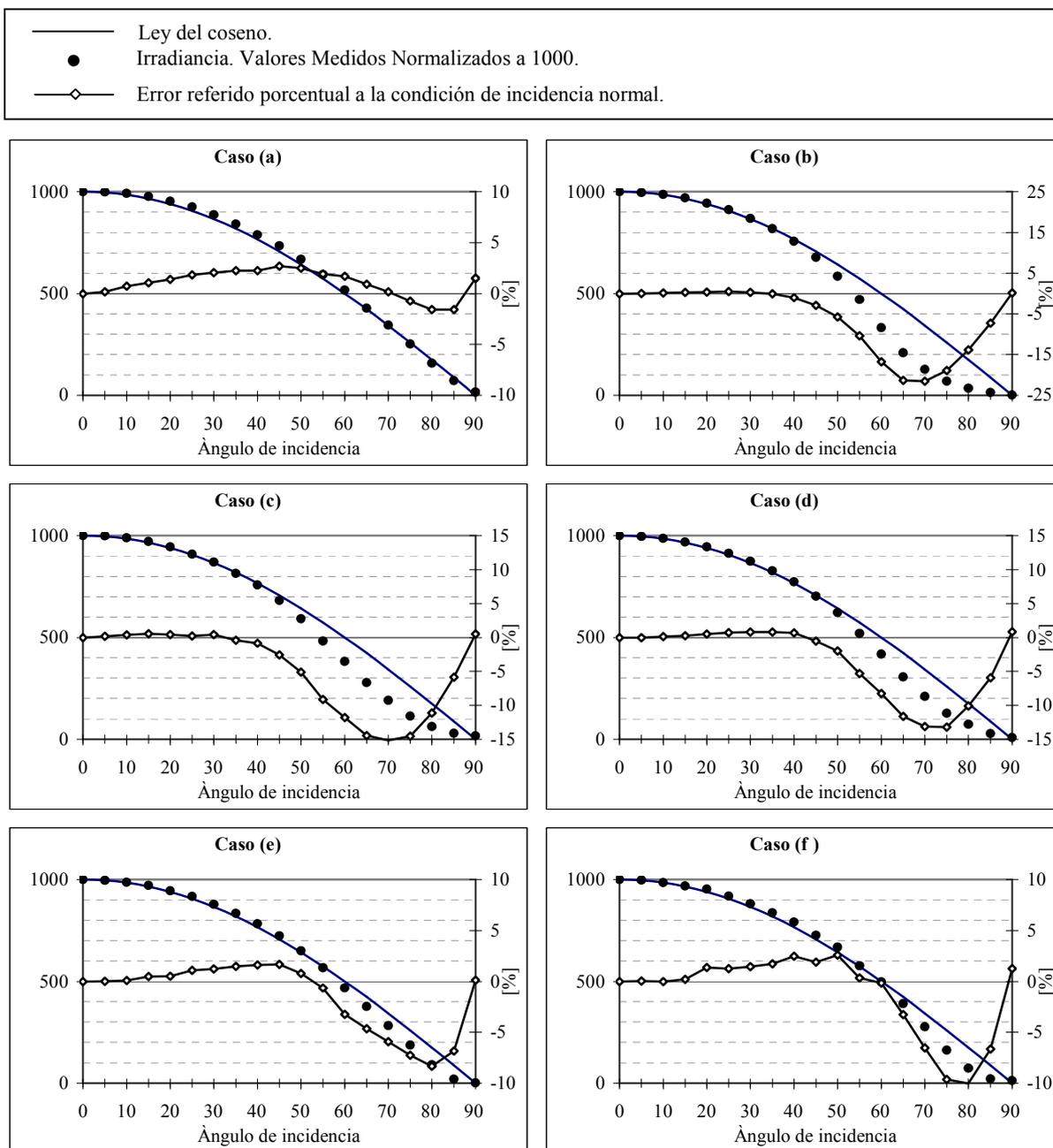


Figura 2: comportamiento direccional de distintas cubiertas. **Caso(a)**: cubierta de vidrio plano de 1,8 mm de espesor, sin tratamiento; **Caso (b)**: cubierta de vidrio plano, satinado en la cara superior, de 3,6 mm. de espesor; **Caso(c)**: cubierta de vidrio plano esmerilado en la cara superior, de 1,8 mm de espeso; **Caso(d)**: cubierta de vidrio plano, de 1,8 mm., atacado con ácido, fluorídrico en la cara superior; **Caso(e)**: la cubierta de vidrio plano, de 1,8 mm., atacado con ácido, fluorídrico en un círculo central de 5 mm de diámetro de la cara superior; **Caso(f)**: cubierta de vidrio plano, de 1,8 mm., con tratamiento antirreflejo.

Los casos (b), (c) y (d) mantuvieron un comportamiento similar entre si lo que se puede observar en los siguientes cuadros de la figura 3. El caso (b) se trata de un vidrio de 3,6 mm de espesor satinado en la cara superior. El caso (c) se refiere a una cubierta de vidrio común plano de 1,8 de espesor con tratamiento de esmerilado en la cara superior, mientras que el (d) vidrio común plano de 1,8 de espesor con tratamiento de ataque químico con ácido fluorídrico en la cara superior. En todos los casos el error referido porcentual se mantiene por debajo del 0,5 % para valores bajos del ángulo de incidencia, pero cuando el ángulo de incidencia crece por encima de los 40° a 45° dependiendo del caso, el error referido porcentual adquiere significancia. Llegando a ser mayor al -20 % en el caso (b) y superando el -10% en los otros dos casos.

El caso (e) correspondiente a una cubierta de vidrio común plano de 1,8 de espesor con tratamiento de ataque químico con ácido fluorídrico en un círculo central de 5 mm de diámetro en la cara superior, se observo un mejor comportamiento que en los tres casos anteriores para ángulos de incidencia mayores, con un error referido porcentual del orden del -8,1 % sin embargo esta mejora se logra en detrimento de lo que sucede a menores ángulos de incidencia donde la sobrevaluación puede llegar a un 2% (ver figura 3). Se observó notables diferencias al variar el ángulo acimutal, dichas diferencias podrían estar generadas por imperfecciones geométricas del “círculo” atacado, o falta de concetridad entre el círculo y la zona sensible de la celda.

El caso (f), representado en el último cuadro de la figura 3, corresponde a una cubierta de vidrio plano de 1,8 de espesor con tratamiento antirreflejo, se observo un comportamiento similar al del caso anterior, pero para ángulos de incidencia comprendidos entre 75 y 80° el error referido porcentual adopta valores alrededor del -10%.

Los resultados del caso (g) correspondiente a una cubierta plana, de teflón, de 2 mm de espesor, se presentan en el primer cuadro la figura 4. Esta cubierta produce una subevaluación con un error referido porcentual que llega a ser del -6% para ángulos de incidencia cercanos al 70°.

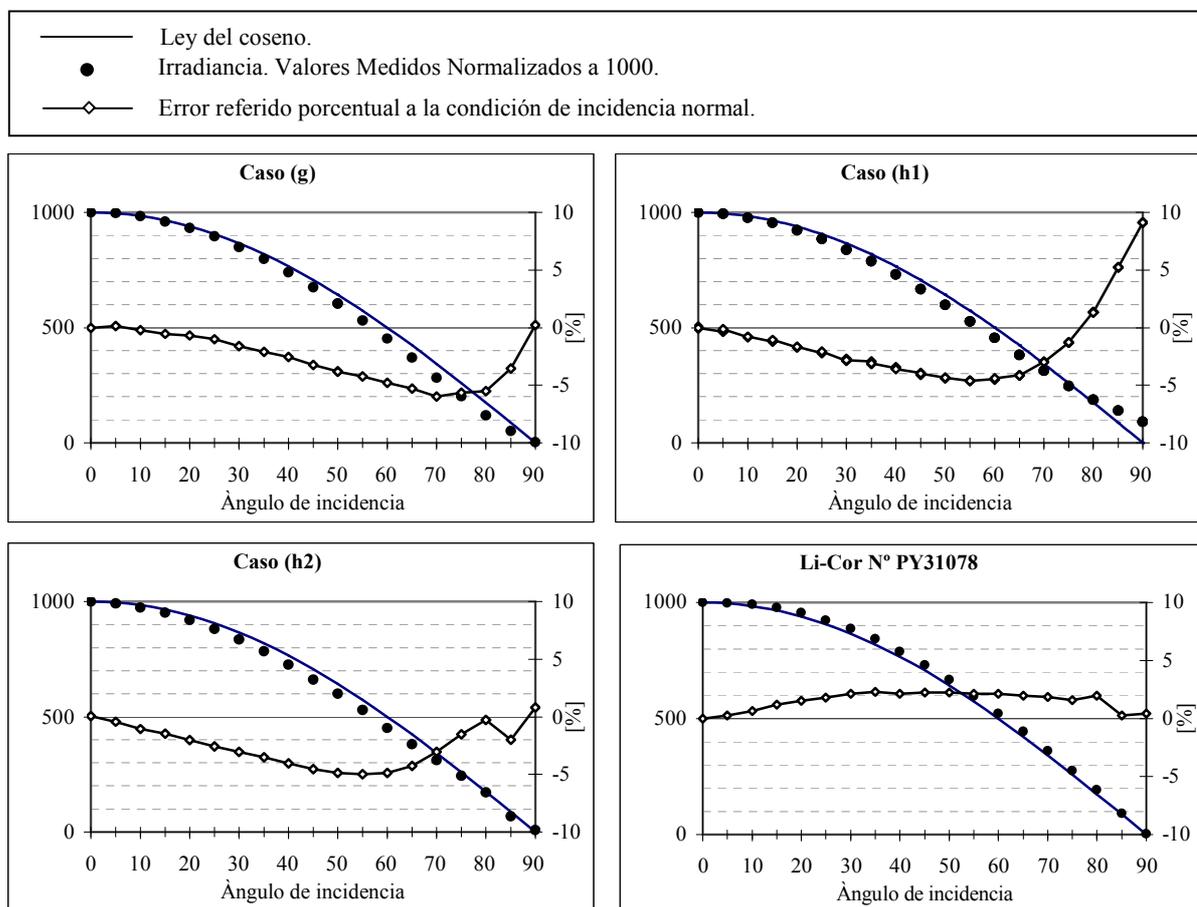


Figura 4: comportamiento direccional de distintas cubiertas; **Caso(g):** cubierta de teflón plano, de 2 mm. **Caso(h1):** cubierta de teflón consistente en un disco de 2 mm. de espesor con un engrosamiento en el centro correspondiente a una semiesfera de 5 mm de radio, dispuesta sin borde; **Caso(h2):** cubierta de teflón consistente en un disco de 2 mm. de espesor, con un engrosamiento en el centro correspondiente a una semiesfera de 5 mm de radio, dispuesta con borde; **Li-Cor:** comportamiento direccional del sensor marca Li-Cor.

En el caso (h1) correspondiente a la cubierta de teflón con el engrosamiento central en forma de semiesfera y sin reborde, se observa (ver figura 4) que el error referido porcentual, para ángulos de incidencia no elevados, adopta valores negativos que llegan a ser de -4,5% para ángulos de -55°. Para ángulos de incidencia superiores a los 77° adopta valores positivos llegando al máximo valor del 9% para ángulos de incidencia de 90°. En el caso (h2) donde se agrega un reborde a la disposición (h1)

el comportamiento es similar a esta para ángulos de incidencia bajos, las diferencias empiezan a surgir claramente a partir de los 75° cuando comienza a situarse la sombra que produce el reborde en la zona cercana al centro, donde se encuentra la parte sensible de la celda fotovoltaica. Se pudo constatar que el comportamiento para grandes ángulos resulta muy sensible a la altura del reborde.

Finalmente, en el último cuadro de la figura 4, se muestra el comportamiento de un sensor de la firma Li-Cor, el mismo sobrestima la radiación en todo el rango de ángulos de incidencia, un comportamiento similar se obtuvo en el otro sensor de la misma marca y modelo.

Por último, se debe destacar que el método de análisis empleado, que refiere todos los valores a incidencia normal, no coincide exactamente con el utilizado para la calibración de los piranómetros, que generalmente se realiza por comparación de datos de irradiación con otros de mejor calidad. Este último método tiene por objetivo disminuir el error cometido al medir irradiación diaria.

CONCLUSIONES

Analizando los resultados de la sección anterior se puede arribar a las siguientes conclusiones:

- El error cometido por el alejamiento de la ley del coseno de la cubierta de vidrio de 1,8 mm sin ningún tratamiento es aceptable en la mayoría de las aplicaciones.
- Para ángulos de incidencia inferiores a 40° las cubiertas satinada, esmerilada, o atacada químicamente tienen muy buenos resultados, sin embargo para ángulos mayores pueden acarrear errores considerables.
- Los piranómetros con cubierta de teflón muestran un comportamiento aceptable y por su facilidad en el maquinado es posible darles la forma que se requiera, sin embargo, sería conveniente explorar nuevas formas con el objeto de lograr un comportamiento más adecuado aún. Se debería comprobar fehacientemente la estabilidad en el tiempo.
- Si se conoce composición entre radiación solar directa, difusa y el ángulo de incidencia es posible corregir el error cometido por estos sensores, correspondiente al apartamiento de la ley del coseno.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece particularmente al Grupo de Energía Solar de la Comisión Nacional de Energía Atómica que facilitó las celdas fotovoltaicas diseñadas especialmente para desarrollar sensores de radiación.

REFERENCIAS

- Alados-Arboledas L., Batlles F. J. y Olmo F. J. (1995). Solar radiation resource assessment by means of silicon cells, *Solar Energy*, Vol 54, No. 3, pp 183-191
- Bajons P. (1998). A Sensor Element For Direct Radiation Measurement, *Solar Energy* Vol. 63, No. 2, pp. 125-134.
- Bolzi, C.G. et al (1999), Construcción y Ensayo de Piranómetros Fotovoltaicos de Bajo Costo Desarrollados en la C.N.E.A. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Volumen 3, pp 29-33.
- Durán, J.C., Bolzi, C. G., Godfrin, E. M., Plá, J. C., Merino, L. M., Bruno, C. J. y Tamasi, M. J. L. (1998). Fabricación de solarímetros de bajo costo en la Argentina. Algunas propuestas teóricas y primeras experiencias. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 2 N°2.
- Dursi O., Grosi Gallegos H. Renzini G. (1998) Algunos comentarios sobre el comportamiento de un sensor Fotovoltaico. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 2 N°2.
- Vera L., Busso A., Benitez F. (2005) Piranómetro fotovoltaico con sistema autónomo de adquisición de datos, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 9.

ABSTRACT

The behavior of different cover materials for a photovoltaic solarimeter were analyzed by means of an artificial source of light and an apparatus that varies the incident angle of radiation. The goal was to determine what is the best type of cover considering different technical and economic aspects. The errors were referred to the normal incidence condition, and the cover behaviors were described by plots: six for glass and two for teflon. In spite of its simplicity, the normal glass cover, flat and transparent, showed a good performance, with an approximate error of 3 % in the most unfavorable case. The flat glass covers with superficial treatment had a good behavior for small incident angles. The teflon covers appear as a good alternative to be developed.

Keywords: pyranometer, error, solar radiation, materials.