

## DESARROLLO Y CALIBRACIÓN DE DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS PARA DETERMINAR EL RECURSO SOLAR UTILIZABLE POR SFCR

A. Firman<sup>1</sup>, L. Zini<sup>2</sup>, R. Sanchez<sup>2</sup>, L. Vera<sup>1</sup>

GER – Grupo en Energías Renovables - FaCENA – UNNE.

Av. Libertad 5470 – 3400 Corrientes. Argentina.

Tel./Fax: (0379) 4473931 int 129, e-mail: afirman@ger-unne.com.ar

*Recibido 12/08/14, aceptado 25/09/14*

**RESUMEN:** Para proporcionar una evaluación precisa de la capacidad de generación de dispositivos fotovoltaicos es necesario determinar de forma adecuada el recurso solar disponible. Diferentes autores afirman que celdas FV de referencia presentan menores desvíos, en relación a piranómetros térmicos, cuando se desea determinar la capacidad de generación FV. Teniendo en cuenta lo antes expuesto, este trabajo presenta el desarrollo y calibración de un medidor de radiación solar cuyo elemento sensor está constituido por celdas fotovoltaicas en un encapsulado convencional de dispositivo FV. El comportamiento del sistema fue estudiado, y los valores obtenidos son comparados con los valores medidos con una celda patrón calibrada en el *PV Evolution Labs (PVEL)* en la ciudad de Berkeley, California. Se estudió el comportamiento del sistema, y los valores obtenidos se comparan con los medidos con una celda estándar. El análisis estadístico de las mediciones ha llevado a desarrollar una metodología para determinar los parámetros del modelo de análisis para medir el valor de la irradiancia. Una comparación entre los valores medidos resultó en valores de correlación mayores que 0,999 desarrollados entre la celda y la celda patrón, lo que confirma la linealidad y correspondencia del instrumento desarrollado con el patrón.

**Palabras clave:** energía solar, celdas de referencia, calibración.

### INTRODUCCIÓN

Con el crecimiento exponencial de la industria fotovoltaica en las últimas décadas, los proyectos e instalaciones de sistemas fotovoltaicos conectados a la red (SFCR) se han vuelto más comunes. En estos proyectos el retorno de la inversión es calculado, básicamente, sobre la base de la generación de electricidad esperada. Esta energía que puede ser entregada por el generador fotovoltaico depende principalmente de dos factores: El recurso solar (y su variación debido a condiciones climáticas y de geometría solar) y la eficiencia del sistema fotovoltaico (FV). Es decir, para proporcionar una evaluación precisa de la capacidad de generación de dispositivos fotovoltaicos es necesario determinar de forma correcta la eficiencia de los módulos, así como el recurso solar en cantidad y calidad.

Los fabricantes de módulos FV pueden garantizar la eficiencia de su producto respecto a las *condiciones estándar de medida*, definidas a la temperatura de 25 °C, 1000 W/m<sup>2</sup> de la irradiancia y una distribución espectral especificada en la norma IEC 60904, conocida como AM 1,5, pero no pueden garantizar la energía que el módulo puede entregar.

Las variaciones climáticas ocasionan que la energía que entrega una instalación fotovoltaica cambie y, además, no sólo la irradiación afectan al rendimiento de la instalación, existen otros factores como el espectro, el ángulo de incidencia de los rayos solares, la temperatura, la velocidad y dirección del viento. Gran parte de esta variabilidad es predecible, pero a estas variables se les suman los cambios en el comportamiento de los módulos, que con el tiempo se pueden presentar debido a defectos de fabricación.

En este contexto, se requieren los datos del recurso solar utilizable y la energía real que pueden entregar los módulos FV, para evaluar con precisión el rendimiento de estos dispositivos. Estimar en forma precisa el recurso solar utilizable por los sistemas FV hace necesario determinar cuál es el sensor de irradiancia que suministrará la menor incertidumbre para caracterizar la productividad de un generador FV. Por lo tanto, el sensor de radiación para el monitoreo FV debería tener un comportamiento, a lo largo del tiempo, similar a la forma que se espera se comporte un módulo. Es decir, medir con precisión la radiación utilizable incidente bajo cualquier condición ambiental, para determinar si la instalación fotovoltaica genera acorde a las expectativas.

### MEDIDORES DE IRRADIANCIA

En general, para determinar el recurso solar disponible se utilizan sensores del tipo termopila (Piranómetros térmicos) o sensores que funcionan a través del efecto fotovoltaico (celdas FV).

<sup>1</sup> Investigador Grupo en Energías Renovables – UNNE.

<sup>2</sup> Becario Grupo en Energías Renovables – UNNE.

**Piranómetros:** Los piranómetros térmicos (o de termopilas) son los instrumentos por excelencia utilizados para cuantificar la radiación solar. Estos instrumentos están constituidos por un disco negro cubierto por una cúpula de cristal o cuarzo simple o doble. El disco absorbe toda la luz solar que se transmite a través de la cúpula. Cuando estos instrumentos reciben la luz del sol se calienta la superficie de color negro que produce un aumento de temperatura en dicha superficie, situación que se traduce en una señal de tensión que es directamente proporcional a la irradiancia.

Los piranómetros están especialmente diseñados para captar la luz desde todos los ángulos, tener una respuesta plana para todas las longitudes de onda hasta 2500 nm (longitud de onda donde el cuarzo de la cúpula disminuye su transmitancia) y proporcionar una salida estable independientemente de las condiciones de nubosidad y cambios de las condiciones ambientales (Figura 1). Los piranómetros térmicos primarios y secundarios son instrumentos muy estables cuyos precios son más altos que los medidores que utilizan celdas FV. Típicamente, los piranómetros deben ser recalibrados aproximadamente una vez al año, ya que la tensión de salida puede presentar desvíos con el tiempo de exposición debido a la degradación de la superficie negra.

**Celdas FV de referencia:** Las celdas FV también son utilizados para medir la irradiancia, sin embargo, trabajan de una manera muy diferente a los piranómetros térmicos; los fotones con energía por encima del gap (Luque y Hegedus, 2011) se convierten directamente en las cargas positivas y negativas que pueden ser recogidas y utilizada en un circuito externo, es decir, trabajan sobre un determinado rango del espectro solar y su respuesta no es plana (Figura 1). La celda FV genera una corriente que depende de la cantidad y la distribución espectral de los fotones, por esta los valores de corriente se encuentran afectados por las variaciones en la distribución espectral causado por nubes, vapor de agua, aerosoles, masa de aire, etc, (Iqbal, 1983) (Osterwald, 1986). En general, la corriente de la celda se obtiene mediante la medición de la caída de tensión a través una resistencia de pequeño valor y alta estabilidad térmica (*shunt*), la cual se conecta sobre los terminales positivo y negativo de la celda FV (Vera, 2005). La señal de tensión medida es proporcional a la irradiancia.

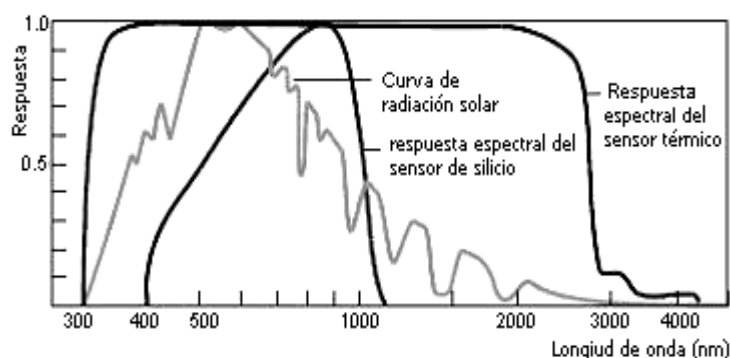


Figura 1: Curvas normalizadas mostrando la respuesta espectral de un sensor de silicio, un sensor térmico y el espectro solar a nivel del mar (Kipp & Zonen, 2005).

Al igual que el módulo fotovoltaico la celda de referencia responde a la luz desde todos los ángulos, pero presenta un mayor reflectancia y, por lo tanto, una disminución de la eficiencia para ángulos bajos de incidencia. Si la celda FV de referencia está construida con el diseño típico de módulos FV: vidrio, encapsulante y cubierta posterior, la respuesta espectral y angular coincidirá estrechamente con el comportamiento de los módulos fotovoltaicos utilizados para la generación de energía.

La celda FV está diseñada para medir la irradiancia que está disponible para la conversión en electricidad a través del módulo fotovoltaico, en lugar de estar diseñada para medir la irradiancia en todas las longitudes de onda (denominada banda ancha). La respuesta espectral análoga, entre la celda FV de referencia y el sistema FV minimiza la dispersión en los datos debido a las condiciones variables espectrales. Es decir, el principal factor que ocasiona una incerteza cuando se utilizan celdas de referencia para caracterizar el clima es el mismo factor que las hacen más adecuadas para caracterizar el rendimiento del sistema FV.

Dunn et al (2009) realizaron una comparación entre las incertezas que presentan las celdas FV de referencia respecto de las incertezas de medición que piranómetros tipo Termopila. Esta comparación se realizó analizando los valores de irradiancia correspondientes al espectro de banda ancha y el espectro utilizable por dispositivos FV. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 1, donde se presentan las incertezas de medición de banda ancha y las mediciones de irradiancia espectral. Estas incertezas de medición corresponden a días de cielo claro, sin nubes, con  $1000 \text{ W/m}^2$ , y un intervalo de confianza de 95%. Es importante destacar que los resultados presentados en la Tabla 1 corresponden a un piranómetro de alta calidad. Piranómetros de clase más baja darán lugar a mayores incertezas de medición.

Recurso solar	Piranómetro térmico	Celda FV de referencia
Espectro de banda ancha	~4.3%	~4.3%
Espectro útil para FV	~5.3%	~2.4%

Tabla 1: Incertezas asociados a la medición de irradiancia con celdas FV y piranómetro térmico. Las incertezas presentadas corresponden a un día de cielo claro a  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Cuando las proyecciones de capacidad de generación se realicen con datos de irradiancia provenientes de piranómetros térmicos la incerteza será mayor en relación a los datos medidos utilizando una celda FV de referencia. Una confirmación de

esta conclusión, discusiones, resultados y comparaciones sobre las características de los sensores fotovoltaicos y térmicos se encuentran en Haeblerlin et al. (1995), Meydbray et al. (2012), entre otros.

Considerando lo expuesto, y verificando la gran expansión que las instalaciones fotovoltaicas han tenido en los países en vías de desarrollo, el Grupo en Energías Renovables de la Universidad Nacional del Nordeste (GER-UNNE) se planteó como objetivo el desarrollo y calibración de celdas FV, con el encapsulado característico de módulos FV, para la medición del recurso solar en SFCR instalados en siete provincias del Norte Grande (NG). La experiencia se enmarca en el programa “Interconexión de Sistemas Fotovoltaicos a la Red Eléctrica en Ambientes Urbanos” otorgado en el marco de la convocatoria FITS 2010 – Energía Solar, del FONARSEC. Proyecto impulsado por el consorcio público privado, denominado IRESUD, en el cual participan: CNEA –Dpto. Energía Solar, UNSAM –Esc. C&T y GESTEC-Esc. E&N, Aldar S.A., Edenor S.A., Eurotec S.R.L., Q-Max S.R.L., Tyco S.A y el GER de la Universidad Nacional del Nordeste. Siendo esta última la encargada de coordinar el trabajo de instituciones públicas del NG. Además, la calibración tiene como finalidad verificar los desvíos que presentan las celdas, que serán utilizadas en los sistemas demostrativos del Norte Grande, para acotar las incertezas en las medidas de irradiancia

## DESCRIPCIÓN DE CELDAS FV DE MEDICIÓN

Para cumplir los objetivos planteados en este trabajo se han desarrollado, en el GER-UNNE, celdas fotovoltaicas encapsuladas con el fin de evaluar el recurso solar para generación de energía eléctrica. Con la finalidad de verificar su aplicabilidad se ha realizado la contrastación/calibración del sensor de radiación solar desarrollado frente a un sensor de radiación solar (celda patrón) fabricado y calibrado por el *PV Evolution Labs* (PVEL, 2012). Esta celda patrón (Cpve) está conformada por dos celdas FV, las cuales trabajan de manera eléctricamente independiente, una de ellas se encuentra destinada a medir la irradiancia y la otra la temperatura de celda FV (Figura 2a). La Cpve posee las mismas celdas de los módulos fotovoltaicos de la empresa Solar World SW240 y fue calibrada según la norma IEC 60904.

Las celdas construidas y a calibrar (Cger) (Figura 2b), poseen una disposición similar a la Cpve y consta de dos celdas encapsuladas en un marco común.



Figura 2: a) Fotografía de la celda patrón construida y calibrada por *PV Evolution Labs*. b) Fotografía de una celda a ser contrastada, desarrollada en el GER.

### *Descripción de las celdas a contrastar*

El sensor de radiación solar está diseñado para monitorear sistemas fotovoltaicos y utiliza dos celdas fotovoltaicas independientes, una de ellas para determinar la temperatura y la otra para medir la irradiancia incidente sobre las celdas. El valor de tensión de circuito abierto de una de las celdas es proporcional al valor de la temperatura y, con este valor, se corrige la irradiancia medida por la celda restante (de esta forma se obtiene una mayor precisión en la medición). Es decir, el valor de temperatura de celda es utilizada para eliminar el efecto de esta última sobre los valores de irradiancia medida. Evaluar si la temperatura de la celda es representativa de la temperatura de los módulos que forman parte del generador fotovoltaico va más allá de los objetivos planteados en el presente artículo.

Las dos celdas suministradas que conforman el dispositivo medidor de irradiancia se encuentran encapsuladas de forma convencional (Tedlar©-EVA-celda-EVA-Vidrio), quedando todo el conjunto soportado por un marco de aluminio. Las celdas son de silicio policristalino y cada una posee un área efectiva de captación de 40 cm<sup>2</sup>.

Los contactos eléctricos de cada celda se encuentran disponibles de manera independiente. Una de estas celdas se conecta a un *shunt* calibrado de 0,5 % de precisión, que posee una relación de 5 A/60 mV. Esta celda es utilizada para medir de forma indirecta, a través de la corriente de corto circuito, la radiación solar que incide. Es decir permite medir la irradiancia. La corriente de corto circuito es proporcional a la irradiancia (y en menor medida a la temperatura) y, a su vez, esta corriente es proporcional a la tensión en el *shunt*. De esta forma, el valor de tensión medido es proporcional a la irradiancia incidente en la celda FV.

La segunda celda se deja en circuito abierto de manera que a través de su tensión de circuito abierto se determina la temperatura a la cual se encuentra la celda FV, aplicando el modelo correspondiente de variación de la misma con la temperatura.

### METODOLOGIA DE CALIBRACIÓN

En la Figura 3 se observa la disposición de dos celdas Cger junto con la celda de referencia patrón (Cpve). Dichas celdas se han dispuesto sobre un mismo soporte, asegurando la coplanaridad de las mismas.



Figura 3: Disposición de la celda patrón con dos celdas a contrastar dispuestas sobre un mismo soporte, asegurando su coplanaridad.

#### Montaje experimental

La celda patrón y las desarrolladas fueron dispuestas de forma solidaria sobre una superficie plana, ubicadas longitudinalmente de norte a sur, de esta forma, se evitan reflejos de unas sobre las otras para ángulos de incidencia bajos del sol. La superficie plana que propicia de base tenía un ángulo respecto a la horizontal de  $12^\circ$ , de tal manera que, para el día del ensayo, los rayos solares incidían de manera perpendicular en el mediodía solar. Este ángulo es calculado según la latitud en que se encuentra el lugar de ensayo (Duffie y Beckman, 1991). El día elegido para el ensayo fue un día claro sin presencia de nubes, de manera de evitar fluctuaciones rápidas de irradiancia.

Los valores de irradiancia se obtienen a través de los valores de tensión sobre el *shunt* ( $R$ ) conectado a una de las celdas y los de temperatura sobre los buses de la otra celda (midiendo la tensión de circuito abierto). Los valores de tensión fueron adquiridos, en intervalos de un minuto, utilizando un multímetro de la marca Rigol DM-3064 de 6 ½ dígitos equipado con placa multiplexora (2007), instrumento que posee una incerteza del 0,2% a fondo de escala y posibilita realizar varias calibraciones de manera simultánea.

Se adquieren datos de irradiancia mayores de  $350 \text{ W/m}^2$  descartando el resto de manera de evitar efectos en el ajuste que no sean representativos de condiciones de trabajo donde se produce mayor generación FV y donde aparecen efectos de segundo orden; de esta forma se obtienen alrededor de 600 estados medidos para cada ensayo de calibración.

Los valores de tensión medidos en las Cger fueron ajustados correlacionándolos con los valores de tensión medidos sobre la celda de referencia Cpve.

#### Metodología de calibración y ecuaciones utilizadas

Para la determinación de la temperatura a través de la medición de la tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ ), se utiliza la ec. 1 (Luque y Hegedus, 2011), la cual representa la variación de la  $V_{oc}$  con la temperatura y la irradiancia para una celda FV.

$$V_{oc} = V_{oc_{STC}} + \beta(T_c - T_{c_{STC}}) - m \cdot \frac{k \cdot T_c}{q} \cdot \ln\left(\frac{G_{STC}}{G}\right) \quad (1)$$

donde  $V_{oc}$ : es la tensión de circuito abierto  
 $\beta$ : el coeficiente de variación de la tensión de circuito abierto con la temperatura. Expresado en  $\text{V}/^\circ\text{C}$ .  
 $T_c$ : la temperatura absoluta de celda FV.  
 $m$ : el índice de idealidad del diodo  
 $k$ : la constante de Boltzmann, en  $\text{J/K}$ .

$q$ : la carga del electrón en C.

$G$ : la irradiancia en el plano de la celda FV.

En esta ecuación, el subíndice “STC” indica “condiciones estándar de medida”.

La ec. 1 muestra que la  $V_{oc}$  varía de forma lineal con la variación de temperatura y de manera logarítmica con la variación de la irradiancia.

Para emplear la ec. 1 necesita conocerse los valores de los parámetros  $V_{oc_{STC}}$  y  $\beta$ . El valor del índice de idealidad del diodo ( $m$ ) es estimado en función de la tecnología de celda empleada. Para el caso de celdas de silicio policristalino, como las utilizadas, un valor adecuado resulta de 1,2 (Yordanov et al. 2012).

Para encontrar el valor del parámetro desconocido  $\beta$  en la celda a calibrar, se debe trabajar aritméticamente sobre la ec. 1, de manera que resulta la ec. 2. En este caso, se emplean dos estados diferentes medidos cualesquiera, es decir el estado 1 determinado por valores simultáneos de  $V_{oc_1}$ ,  $G_1$ ,  $T_{c_1}$  y el estado 2 de la misma celda FV determinado por la  $V_{oc_2}$ ,  $G_2$  y la  $T_{c_2}$ .

$$(V_{oc_1} - V_{oc_2}) + m \cdot \frac{k.T_c}{q} \cdot \ln\left(\frac{G_2}{G_1}\right) = \beta \cdot (T_{c_1} - T_{c_2}) \quad (2)$$

De esta manera la ec. 2, posee un solo valor desconocido, que es el valor de  $\beta$ .

La ec. 2 posee la forma de una recta que atraviesa el origen coordenado, de la manera indicada en la ec. 3.

$$Y = a.X \quad (3)$$

Donde en este caso  $Y$  es el primer miembro de la ecuación en su totalidad, y en un ensayo por contraste con una celda patrón, todos los valores participantes del primer miembro son conocidos, a su vez  $X=(T_{c_1}-T_{c_2})$  son variables conocidas. Esta situación permite realizar el ajuste de la recta, obteniendo de su pendiente el valor de  $\beta$ .

Cuando se trabaja con diferencias de estados, es conveniente tener precaución en que el valor de la diferencia empleada sea mucho mayor que las variaciones que se producen en la medición de los parámetros, de manera de evitar que tales variaciones afecten el ajuste.

Para el caso de la determinación de  $V_{oc_{STC}}$ , se recurre a la ec. 4 que se deduce a partir de la ec. 1.

$$V_{oc_{STC}} = V_{oc} - \beta(T_c - T_{c_{STC}}) + m \cdot \frac{k.T_c}{q} \cdot \ln\left(\frac{G_{STC}}{G}\right) \quad (4)$$

Nótese que todos los valores de los parámetros involucrados, en el segundo miembro de la ec. 4, son conocidos, ya han sido determinados, o son datos experimentales. Por lo tanto para hallar el valor de  $V_{oc_{STC}}$ , se aplica la ec. 4 a cada estado medido en el ensayo de calibración y posteriormente se realiza la media de entre todos los valores, resultando el valor más probable.

Por otra parte, para la determinación de la irradiancia incidente sobre la celda se emplea la ec. 5 (Luque y Hegedus, 2011). Esta ecuación indica el cambio de la corriente de cortocircuito según cambia la irradiancia y la temperatura.

$$G_{med} = \frac{I_{med}}{I_{STC}} G_{STC} + \alpha(T_{c_{med}} - T_{c_{STC}}) \quad (5)$$

donde  $G$ : es la Irradiancia en  $W/m^2$

$I$ : es la corriente de cortocircuito de la celda FV.

$T_c$ : es la temperatura de celda FV.

$\alpha$ : en este caso representa el coeficiente de variación de la irradiancia, debido a la variación de la temperatura, expresado en  $(W/m^2)/^\circ C$ .

En la ec. 5, el subíndice “med” indica valores “medidos” y el subíndice “STC” indica “Condiciones estándar de medida”.

La ec. 5 muestra que la irradiancia es proporcional a la relación de las corrientes de cortocircuito (medida y estándar) y que, a su vez, varía de forma lineal con la variación de la temperatura de celda.

Para determinar la irradiancia  $G$ , por medio de la ec. 5, necesita determinarse la corriente de cortocircuito en condiciones estándar de medida ( $I_{STC}$ ) y el valor del coeficiente  $\alpha$ . Los demás parámetros son conocidos o han sido obtenidos por medio del contraste con la celda patrón.

Si se manipula la ec. 5 y si se considera que la corriente de corto circuito es proporcional a la irradiancia, y que a su vez, la corriente de cortocircuito es proporcional a la tensión del *shunt*, operando, se obtiene la ec. 6. En esta ecuación, el valor de 1000 indica la irradiancia en condiciones estándar de medida y se encuentra en  $W/m^2$ .

$$G_{med} = \frac{1000 \cdot R}{Cn} + \alpha(Tc - 25) \quad (6)$$

siendo  $Cn$ : la tensión que presentaría la resistencia *shunt* en condiciones normales, lo que representa un valor constante para la celda.

$R$ : es la tensión medida directamente sobre la resistencia *shunt* en el momento del ensayo en mV.

Para emplear la ec. 6 necesita conocerse el valor de  $Cn$ , de  $\alpha$  y previamente determinar la temperatura de celda  $Tc$ .

Para determinar tales parámetros se recurre a emplear un ajuste bidimensional.

La ec. 6 representa a la ecuación de un plano en un espacio tridimensional que atraviesa el origen coordenado, entonces de la ecuación general de plano ( $a.X+b.Y+c.Z=0$ ), se deduce la ec. 7. Lo que permite, por analogía con la ec. 6, junto con un gran número de valores experimentales (mayor a cien muestras) (Devore, 1998), realizar un ajuste estadístico adecuado y obtener los valores de las variables desconocidas. Estos valores son obtenidos del contraste de los valores medidos a lo largo de un día por la celda patrón y la celda a calibrar ubicadas de manera coplanar. Comparando ambas ecuaciones 6 y 7 resulta;  $Z=G_{med}$ ,  $X=1000.R$  e  $Y=(Tc-25)$  con  $c=(-1)$ , donde el signo negativo de la constante  $c$  permite obtener valores de irradiancia positivos. Del ajuste los valores resultan,  $a=1/Cn$  y  $b=\alpha$ .

$$c.Z = a.X + b.Y \quad (7)$$

Para finalizar, despejando de la ec. 1 la temperatura de celda  $Tc$ , considerando que se desea trabajar en grados Celsius, se llega a la ec. 8, que es la empleada efectivamente para hallar la temperatura de celda FV.

$$Tc = \frac{Voc - Voc_{STC} + \beta \cdot 25 + m \cdot \frac{k}{q} \cdot Tc \cdot \ln\left(\frac{Cn}{R}\right)}{\beta - m \cdot \frac{k}{q} \cdot \ln\left(\frac{Cn}{R}\right)} \quad (8)$$

Por lo tanto, una vez realizado el contraste entre la celda patrón y la celda a calibrar, y encontrados los valores de los parámetros específicos para cada celda, se recurre a la ec. 8 para hallar el valor de la temperatura de celda FV ( $Tc$ ), y con este dato además la utilización de la ec. 6, se obtiene el valor de la irradiancia, corregida por temperatura.

## RESULTADOS

En el siguiente apartado se muestran los resultados de la calibración de 10 celdas.

Las evoluciones de la irradiancia y de la temperatura de celda FV obtenidas con la celda patrón se muestra en la Figura 4. En la misma se observa que la irradiancia medida en el día del ensayo, no sufre alteraciones en su perfil, propio de lo que sucede cuando el procedimiento de calibración se realiza en un día claro y sin presencia de nubes. Además se observa la curva de evolución de la temperatura de celda determinada con la celda patrón, en la que se vislumbra las alteraciones ocurridas en el perfil de la misma debida a la presencia inconstante de viento. En esta figura el eje de tiempo indica las horas acumuladas de ensayo.

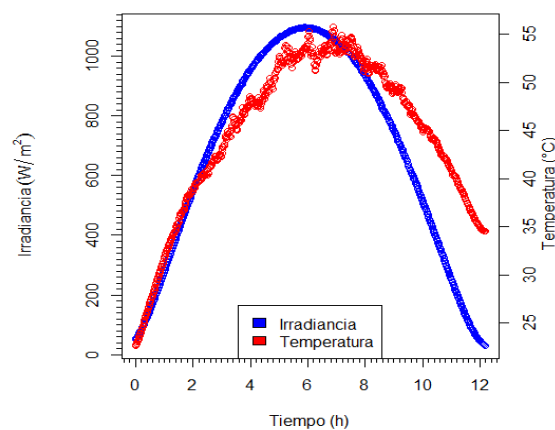


Figura 4: Evolución de la irradiancia y de la temperatura de celda FV en el día de ensayo.

Se procede según la metodología descrita descartando previamente todos los estados medidos con irradiancias menores a 350 W/m<sup>2</sup>, debido que a tales irradiancias el modelo propuesto pierde precisión. El ajuste de los parámetros se realiza con la asistencia de una herramienta informática (R Core Team, 2014).

Para el caso de la calibración de la temperatura de celda, se verifica el resultado logrado en el ajuste de los parámetros graficando la temperatura de celda patrón con respecto a la temperatura obtenida de la celda calibrada, de esta manera, una pendiente de valor igual a 1, indicaría una concordancia perfecta entre los resultados, también se indica el valor del coeficiente de correlación cuadrático logrado. En la Figura 5 se presenta la correlación existente entre una de las celdas calibradas y la patrón.

En la misma se observa una fuerte correlación entre los datos de temperatura de celda obtenidos con la celda patrón con respecto a los de la celda calibrada, denotado por el valor de la pendiente, con un valor muy próximo a la unidad y un coeficiente de correlación cuadrático con un valor de 0,9999.

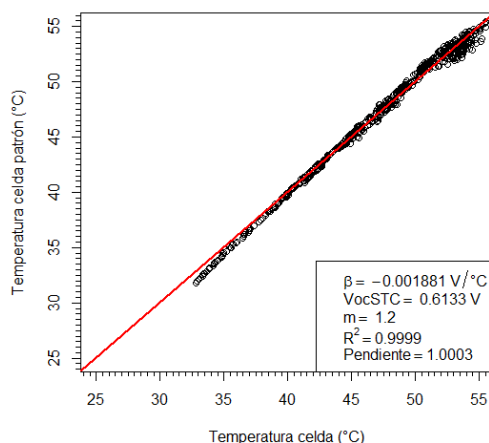


Figura 5: Gráfica de Temperatura obtenida de celda patrón contra temperatura obtenida de la celda calibrada, destinada a la verificación de los resultados.

En la Tabla 2, se indican los resultados obtenidos para 10 celdas calibradas. En la misma se aprecian los valores de  $\beta$ , de  $V_{ocSTC}$ ,  $R^2$  y la pendiente obtenida con respecto a los datos de la celda patrón. De la observación de  $R^2$  y del valor encontrado para la pendiente se deduce un correcto ajuste y poca dispersión en los datos. Los valores presentados entre paréntesis para el caso de  $\beta$  y de  $V_{ocSTC}$  representan la desviación estándar hallada en la determinación de tales parámetros. Valor que se ha usado como referencia para la representación de las cantidades decimales de tales datos.

	$\beta$ (V/°C)	$V_{ocSTC}$ (V)	$R^2$	pendiente
Celda calibrada 1	-0,001881 (4,8e-6)	0,6133 (0,0009)	0,9999	1,0003
Celda calibrada 2	-0,001845 (3,1e-6)	0,6153 (0,0006)	0,9999	1,0002
Celda calibrada 3	-0,001954 (6,2e-6)	0,6141 (0,0011)	0,9999	1,0004
Celda calibrada 4	-0,001942 (5,6e-6)	0,6135 (0,0010)	0,9999	1,0003
Celda calibrada 5	-0,001921 (3,3e-6)	0,6118 (0,0005)	0,9999	1,0002
Celda calibrada 6	-0,001903 (4,3e-6)	0,6137 (0,0008)	0,9999	1,0006
Celda calibrada 7	-0,001849 (4,4e-6)	0,6183 (0,0007)	0,9999	1,0005
Celda calibrada 8	-0,001862 (4,6e-6)	0,6130 (0,0008)	0,9999	1,0005
Celda calibrada 9	-0,002201 (9,3e-6)	0,6205 (0,0015)	0,9998	1,0010
Celda calibrada 10	-0,001864 (5,9e-6)	0,6158 (0,0009)	0,9999	1,0006

Tabla 2: Constantes de ajuste utilizadas para la determinación de la temperatura de celda junto a utilizados en la verificación de los resultados.

Una vez calibrada la celda destinada a la medición de su temperatura, se procede ahora según la metodología descrita para calibrar la celda destinada a la medición de la irradiancia, con los datos obtenidos el mismo día. Para el ajuste de los datos se utilizó la asistencia del software estadístico, previamente citado.

La verificación de los resultados conseguidos se realiza graficando la irradiancia de la celda patrón contra la irradiancia obtenida de la celda calibrada, como el caso mostrado en la Figura 6. En la figura se presentan los valores de  $C_n$  y  $\alpha$  hallados, junto con el valor de  $R^2$  y la pendiente de ajuste lograda. En este caso se utilizaron datos con irradiancias superiores a los 50 W/m<sup>2</sup>.

En base a los valores del coeficiente de correlación cuadrático y de la pendiente, en este caso con un valor igual a 1, se deduce una adecuada correlación entre los datos obtenidos por ambas celdas (la patrón y la calibrada).

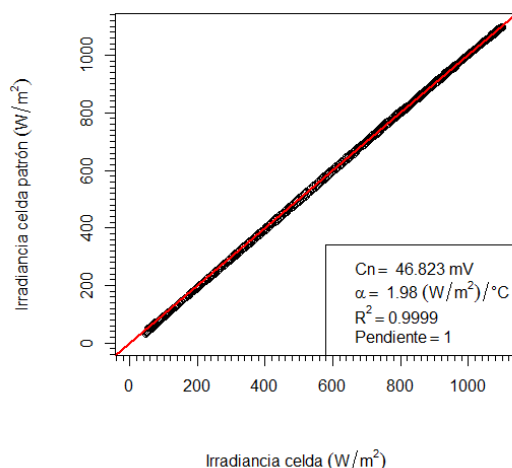


Figura 6: Curva que relaciona la irradiancia medida con la celda de patrón y la celda calibrada utilizada para verificación de la correlación existente entre ambos.

La Tabla 3, presenta los valores hallados de  $C_n$ ,  $\alpha$ ,  $R^2$  así como el valor de la pendiente obtenida para las 10 celdas calibradas. Por comodidad, los resultados de  $R^2$  y de la pendiente han sido redondeados al cuarto decimal. De la observación de los valores obtenidos en la correlación, se deduce un excelente ajuste logrado para la irradiancia de la celda de patrón con respecto a la celda calibrada. En la tabla los valores entre paréntesis de los parámetros  $C_n$  y  $\alpha$  son los valores de la desviación estándar obtenidos en su determinación.

	$C_n$ (mV)	$\alpha$ (W/m <sup>2</sup> )/°C	$R^2$	pendiente
Celda calibrada 1	46,823 (0,065)	1,98 (0,048)	0,9999	1
Celda calibrada 2	46,515 (0,052)	1,48 (0,039)	0,9999	1
Celda calibrada 3	47,453 (0,079)	2,35 (0,056)	0,9999	1
Celda calibrada 4	47,812 (0,071)	2,05 (0,051)	0,9999	1
Celda calibrada 5	46,477 (0,050)	1,39 (0,037)	0,9999	1
Celda calibrada 6	47,670 (0,063)	2,21 (0,050)	0,9999	1
Celda calibrada 7	47,649 (0,066)	2,22 (0,053)	0,9999	1
Celda calibrada 8	48,215 (0,081)	2,79 (0,063)	0,9999	1
Celda calibrada 9	48,439 (0,088)	3,07 (0,067)	0,9999	1
Celda calibrada 10	49,181 (0,106)	3,27 (0,080)	0,9999	1

Tabla 3: Constantes ajustadas utilizadas para la determinación de la irradiancia y valores de la pendiente de ajuste utilizada en la verificación de los resultados.

La incerteza en los valores de irradiancia de la celda patrón, fabricada y calibrada por el laboratorio PVEL, es del 3,2 %. Este resultado se ha determinado en base a la propagación de errores utilizando las incertezas proporcionadas por el certificado de calibración del fabricante y el instrumental de medición empleado en este caso específico (Firman, 2014).

Mediante un procedimiento similar se ha determinado la incerteza en el valor de la irradiancia para la celda fabricada Cger, resultando para un intervalo de confianza del 95 % una incerteza del 4,7 %.

## CONCLUSIONES

Se han desarrollado celdas FV destinadas a la medición de la irradiancia, de manera que se convierte en un recurso para predecir la capacidad de generación de los SFCR instalados en el norte grande.

Se logró desarrollar una metodología destinada a calibrar celdas FV partiendo de una patrón, y que de la verificación de sus desvíos resulta un comportamiento aceptable dentro del rango de incerteza hallado, menor al 5 %.

La metodología desarrollada para este proceso de calibración permite ser llevada a cabo, mediante el empleo de métodos estadísticos sobre una elevada población de muestras, sin la necesidad de recurrir a equipamientos específicos para la tarea.

Los resultados fueron verificados comparando los resultados entre las celdas calibradas y la celda patrón. De este modo se comprueba que los valores determinados en el proceso de calibración poseen elevada correlación entre ambos y que los modelos empleados responden a la necesidad de calibrar celdas FV destinadas a la determinación de la irradiancia.

## AGRADECIMIENTOS



Los autores desean agradecer a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT), Argentina, por proporcionar ayuda financiera a través del proyecto de investigación: PICT 0300/2008. Los autores también desean agradecer el apoyo económico del Ministerio de Ciencia y Técnica a través del proyecto de investigación FITS- Energía 008/2010 del FONARSEC.

## BIBLIOGRFÍA

- Devore, J. (1998). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. International Thompson.
- Duffie, J., y Beckman, W. (1991). Solar engineering of thermal processes. John Wiley & Sons.
- Dunn, L., Gostein, M., y Emery, K. (2012). Comparison of pyranometers vs. PV reference cells for evaluation of PV array performance. In Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2012 38th IEEE (pp. 002899-002904). IEEE.
- Firman, A. (2014). Estudio y determinación de la capacidad de generación eléctrica de sistemas fotovoltaicos conectados a red en condiciones reales de operación. Tesis Doctoral. UNSa.
- Haerberlin, H., Beutler, C., ISB, I. B., Blaesser, G., & Jantsch, M. (1995). Comparison of pyranometer and si-reference cell solar irradiation data in long term PV plant monitoring. In Proceedings of the 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Nice, France (pp. 644-677).
- IEC 60904-1:2006, Photovoltaic Devices Part 1: Measurement of Photovoltaic Current-Voltage Characteristics. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland.
- IEC 60904-3:2008: Photovoltaic devices - Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2008.
- Iqbal, M., (1983). An introduction to solar radiation. Academic Press. Canadá.
- Kipp & Zonen (2005). Instruction manual Silicon Pyranometer SP LITE.
- Luque, A. Hegedus, S. (2011). Handbook of photovoltaic science and engineering. Wiley.com,
- Meydbray, J., Emery, K., & Kurtz, S. (2012). Pyranometers and Reference Cells, What's the Difference?. NREL Journal Article, NREL/JA-5200-54498, 5.
- Osterwald, C. (1986). Translation of device performance measurements to reference conditions. Solar cells, 18(3):269–279.
- PVEL, (2012). PV Evolution Labs, Certificado de calibración de celda de referencia número 3252.01.
- R Core Team (2014). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.
- Rigol DM-3064. (2007). Dm3000 series digital multimeter user's guide.
- Vera, Luis H., Benitez, F. (2005). "Piranómetro Fotovoltaico con Sistema Autónomo de Adquisición de Datos" XXVIII Reunión de Trabajo de Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente (ASADES), Neuquen, Argentina.
- Yordanov, G., Midtgård, O., and Saetre, T. (2012). Series resistance determination and further characterization of c-si PV modules. Renewable Energy, 46:72–80.

## DEVELOPMENT AND CALIBRATION OF PHOTOVOLTAIC DEVICE TO EVALUATE THE SOLAR RESOURCE USABLE IN SFCR

**ABSTRACT:** To provide a precise capacity valuation of photovoltaic generation is necessary to determine the solar resource accurately. Several authors claim that reference cells have minor deviations that thermal pyranometers to determine the ability of PV generation. This work presents the development and calibration of a solar radiation meter sensor which consists of a conventional photovoltaic cells encapsulated device. The system behavior was studied, and the values obtained are compared with those measured with a standard cell. The statistical analysis of measurements has led to develop a methodology to determine the parameters of the analytical model to measure value of the irradiance. A comparison between measured values resulted in high correlation values (0.999) developed between the cell and the cell pattern, confirming the linear response of the instrument developed

**Keywords:** *Solar Energy, Reference cells, calibration.*