

# FABRICACIÓN Y CALIBRACIÓN DE CELDAS DE REFERENCIA PARA DETERMINAR LA IRRADIANCIA EFECTIVA EN SFCR

Andrés Firman – afirman@ger-unne.com.ar

Luis Vera – lvera@ger-unne.com.ar

Arturo Busso – ajbusso@ger-unne.com.ar

Universidad Nacional del Nordeste (UNNE) – Grupo en Energías Renovables (GER)-FaCENA

**Resumen.** Para proporcionar una evaluación precisa de la capacidad de generación de dispositivos fotovoltaicos es necesario determinar de forma adecuada la irradiancia efectiva. 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 la fabricación, el desarrollo y evaluación de metodologías destinadas a la calibración y corrección por temperatura de un medidor de radiación solar, cuyo elemento sensor está constituido por celdas fotovoltaicas en un encapsulado convencional. El proceso se realiza mediante el contraste con una celda patrón calibrada por un laboratorio internacional. Se describen los métodos estadísticos utilizados para el ajuste de los modelos propuestos. Se realiza una comparación entre los resultados obteniendo una correlación mayor que 0,999 lo que confirma la linealidad y correspondencia del instrumento desarrollado con el patrón.

**Palabras clave:** Energía Solar, Fotovoltaica, Celda de referencia.

## 1. INTRODUCCIÓN

Con el crecimiento exponencial que experimenta actualmente la industria fotovoltaica, 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. 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 garantizan la eficiencia de su producto respecto a las condiciones estándar de medida, definidas a la temperatura de celda 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.

Las variaciones climáticas ocasionan que la energía que entrega una instalación fotovoltaica cambie y, además, no sólo los cambios en la irradiación afectan al rendimiento de la instalación, desde el punto de vista eléctrico, existen otros factores como el espectro, el ángulo de incidencia de los rayos solares, la temperatura junto con la velocidad y dirección del viento.

En este contexto, se requieren 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 indispensable determinar cuál es el sensor de irradiancia con la menor incertidumbre para caracterizar la productividad de un generador FV. Por otro lado, el sensor de radiación, idealmente debe comportarse, de manera similar a la del módulo FV. Es decir, debe responder de la misma manera a la radiación incidente bajo la misma condición ambiental.

### 1.1 Medidores de irradiancia

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

**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 de cuarzo simple o doble. El disco absorbe la luz solar que se transmite a través de la cúpula calentando la superficie negra, lo que produce un aumento de temperatura de dicha superficie, situación que se traduce por la termopila en una señal de tensión que es directamente proporcional a la irradiancia.

Los piranómetros están especialmente diseñados para captar la luz solar sin ser alterados por efectos angulares, poseer 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 independientemente de las condiciones ambientales (Fig. 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:** Estas 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 (Fig. 1). La celda FV genera una corriente que depende de la cantidad y la distribución espectral de los fotones, por esta razón 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), resultando que la señal de tensión medida es proporcional a la irradiancia.

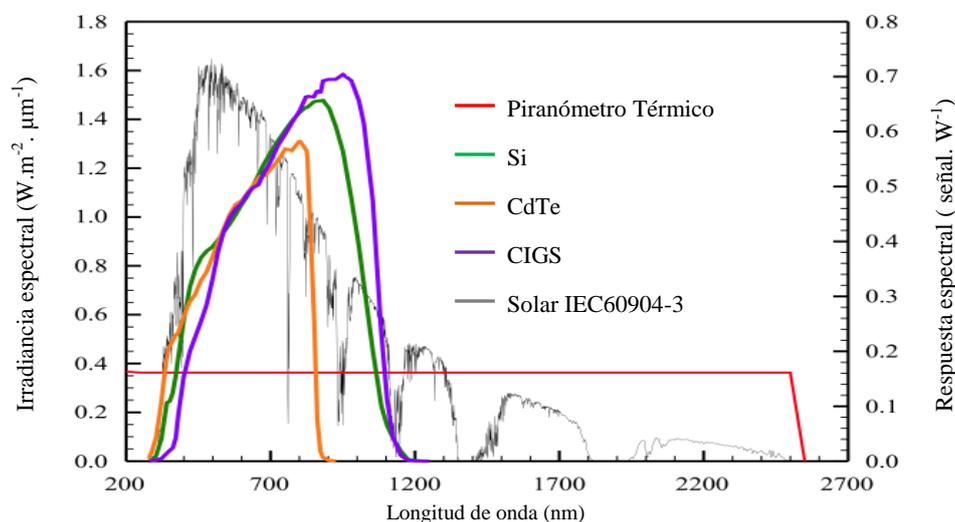


Figura 1 - Curvas normalizadas mostrando la respuesta espectral de un sensor de silicio, un sensor térmico y el espectro solar a nivel del mar (Adaptado de Meydbray et al, 2012).

En estas celdas la reflectancia se incrementa para ángulos bajos de incidencia. Si la celda 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 irradiación 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 de 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 espectrales variables. En perspectiva, este hecho junto con su similar respuesta angular, provoca que sean más adecuadas para caracterizar el rendimiento del sistema FV.

Dunn et al (2012) realizaron una comparación entre las incertezas que presentan las celdas FV de referencia respecto de las incertezas de medición que piranómetros tipo Termopila. Para ello se analizó los valores de irradiancia correspondientes al espectro de banda ancha y el espectro utilizable por dispositivos FV. Los resultados obtenidos se resumen en la Tab. 1, donde se presentan las incertezas de medición de banda ancha y las mediciones de irradiancia espectral con un intervalo de confianza de 95%. Es importante destacar que los resultados presentados en la Tab. 1 corresponden a un piranómetro de alta calidad. Piranómetros de clases menores darán lugar a mayores incertezas de medición.

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

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

Cuando las proyecciones de capacidad de generación se realizan con datos de irradiación 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 tenidos en los países en vías de desarrollo, el Grupo en Energías Renovables (GER) de la Universidad Nacional del Nordeste, Argentina, se planteó como objetivo el desarrollo y calibración de celdas FV, con el encapsulado característico de módulos FV, destinadas a la medición del recurso solar en SFCR. Además, la calibración tiene como finalidad verificar los desvíos que presentan las celdas, que serán utilizadas en los sistemas demostrativos denominados del Norte Grande, para acotar las incertezas en las medidas de irradiancia

## 2. CELDAS FV PARA MEDICIÓN DE IRRADIANCIA.

Para cumplir los objetivos planteados en este trabajo se han desarrollado, celdas fotovoltaicas encapsuladas con el fin de evaluar el recurso solar para generación FV 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 (CP) 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 (Fig. 2a). La CP 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 (CC) (Fig. 2b), poseen una disposición similar a la CP 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.

### 2.1 Descripción de las celdas a contrastar.

El sensor de radiación solar está diseñado para monitorear sistemas fotovoltaicos y utiliza dos celdas fotovoltaicas independientes. El valor de tensión de circuito abierto de una de las celdas esta relacionado al valor de la temperatura de celda 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.

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 incidente.

La corriente de corto circuito es proporcional a la irradiancia (y en menor medida a la temperatura). 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 se determina la temperatura a la cual se encuentra la celda FV, aplicando el modelo correspondiente de variación de la misma con la temperatura.

## 3. METODOLOGIA DE CALIBRACIÓN

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 altura solar bajos. La superficie poseía un ángulo respecto a la horizontal de tal manera que, para el día del ensayo, los rayos solares (en el mediodía solar) incidían de manera perpendicular. Este ángulo es calculado según la latitud en que se encuentra el lugar de ensayo (Duffie y Beckman, 1991) y la fecha. 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 indirectamente a través de los valores de tensión sobre una resistencia *shunt* ( $R$ ) conectada a una de las celdas y los de temperatura, también indirectamente, 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-3064de 6 ½ dígitos equipado con placa multiplexora (Rigol, 2007), instrumento que posee una incerteza del 0,2% a fondo de escala y posibilita realizar calibraciones de varias celdas de manera simultánea. Se adquieren datos de irradiancia a lo largo del día, pero solo se utilizan los valores mayores de 350 W/m<sup>2</sup>; descartando el resto de los datos de manera de obtener valores más representativos de las condiciones de generación, y evitar efectos de segundo orden que alteran los modelos utilizados.

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

### 3.1 Modelos, ecuaciones y metodologías de ajuste utilizadas.

Para considerar variaciones de irradiancia por temperatura, se recurre a la medición de la tensión de circuito abierto de una segunda célula FV, aquí también se utilizan los datos de temperatura obtenidos de la misma manera por la CP. Para ello se toma como punto de partida la Ec. (1), la cual representa la variación de la  $V_{oc}$  con la temperatura y la irradiancia para una celda FV (Luque y Hegedus, 2011).

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

donde  $V_{oc}$  es la tensión de circuito abierto (V),  $\beta$  es el coeficiente de variación de la tensión de circuito abierto con la temperatura (V/°C),  $T_c$  es la temperatura absoluta de celda FV (K),  $m$  es el índice de idealidad del diodo,  $k$  es la constante de Boltzmann (J/K),  $q$  es la carga del electrón (C) y  $G$  es la irradiancia en el plano de la celda FV.

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

La Ec. (1) indica que la  $V_{oc}$  varía de forma lineal con la variación de temperatura y de manera logarítmica con la variación de la irradiancia.

Considerando la temperatura en Celsius (Ec. (2)), se despeja el valor de la temperatura de la celda FV. Obteniendo la temperatura de la celda, lo que permite, luego, corregir su efecto sobre la irradiancia (Ec. (3)).

$$V_{oc} = V_{oc_{STC}} + \beta(T_c - 25) - m \cdot \frac{k \cdot (T_c + 273)}{q} \cdot \ln\left(\frac{G_{STC}}{G}\right) \quad (2)$$

$$T_c = \frac{V_{oc} - V_{oc_{STC}} + \beta \cdot 25 + m \cdot \frac{k \cdot 273}{q} \cdot \ln\left(\frac{G_{STC}}{G}\right)}{\left(\beta - m \cdot \frac{k}{q} \cdot \ln\left(\frac{G_{STC}}{G}\right)\right)} \quad (3)$$

Para emplear la Ec. (3) necesita conocerse los valores de los parámetros  $\beta$  y  $V_{oc_{STC}}$ . 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 es 1,2 (Yordanov et al. 2012).

Para encontrar el valor del parámetro  $\beta$  en la celda a calibrar, se debe trabajar aritméticamente sobre la Ec. (1), de manera que resulta la Ec. (4). En este caso, se emplean dos estados diferentes medidos, 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 dado por la  $V_{oc_2}$ ,  $G_2$  y la  $T_{c_2}$ .

$$(V_{oc_1} - V_{oc_2}) + m \cdot \frac{k \cdot T_c}{q} \cdot \ln\left(\frac{G_2}{G_1}\right) = \beta \cdot (T_{c_1} - T_{c_2}) \quad (4)$$

De esta manera la Ec. (4), posee un solo valor desconocido, que es el valor de  $\beta$ .

Al analizar la Ec. (4), la misma puede ser presentada como la ecuación de una recta que atraviesa el origen de coordenadas ( $y = a \cdot x$ ). Por analogía la variable dependiente “ $y$ ” es la totalidad del primer miembro de la ecuación y, experimentalmente, todas las variables participantes son conocidas; a su vez  $x$  es igual a  $(T_{c_1} - T_{c_2})$ , variables también conocidas. Esta situación permite el ajuste lineal y así obtener el valor de  $\beta$  a través de su pendiente.

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. (5) que se deduce a partir de la Ec. (1).

$$V_{oc_{STC}} = V_{oc} - \beta(T_c - T_{c_{STC}}) + m \cdot \frac{k \cdot T_c}{q} \cdot \ln\left(\frac{G_{STC}}{G}\right) \quad (5)$$

Nótese que todos los valores de los parámetros involucrados, en el segundo miembro, son conocidos, han sido determinados, o son datos experimentales. Por lo tanto, para hallar el valor de  $V_{oc_{STC}}$ , para cada estado medido en el ensayo de calibración, se aplica la Ec. (5), y posteriormente se calcula el valor más probable a 25 °C.

Para el caso de la determinación de la irradiancia incidente sobre la celda se emplea la Ec. (6) donde la corriente de cortocircuito es corregida por el efecto de la temperatura (Luque y Hegedus, 2011).

$$I_{med} = \frac{G_{med}}{G_{STC}} I_{STC} (1 + \alpha \Delta T_c) \quad (6)$$

donde  $I$  es la corriente de cortocircuito de la celda FV (A),  $\alpha$  es el coeficiente de variación con la temperatura ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ), aquí el subíndice “*med*” indica valores medidos.

La Ec. (6) muestra que la  $I_{med}$  es proporcional a la relación de las corrientes de irradiancias (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. (6), 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. (6), y 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 sobre la resistencia *shunt*, operando, se obtiene la Ec. (7), en la cual 1000R representa la irradiancia en condiciones normales y su unidad se encuentra  $\text{W}/\text{m}^2$ .

$$G_{med} = \frac{1000R}{Cn(1 + \alpha \Delta T_c)} \quad (7)$$

donde,  $Cn$  es la tensión del *shunt* para condiciones normales expresada (mV),  $R$  es la tensión medida directamente sobre la resistencia *shunt* (proporcional a la irradiancia) en el momento del ensayo (mV) y  $\alpha$  es la constante de corrección por temperatura expresada en ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).

Para emplear la Ec. (7) necesita conocerse el valor de  $Cn$ , de  $\alpha$  y previamente, como se indicó, determinar la temperatura de celda  $T_c$ . Para ello se le otorga a la constante  $\alpha$ , de las celdas a calibrar, el valor de  $0,000443 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ . Dicho valor es el mismo que figura en la hoja de calibración de la celda patrón y se encuentra dentro del rango de variación de  $\alpha$  para la tecnología de Si cristalino.

Entonces, la Ec. (7) puede ser reescrita como  $1000R/(1 + \alpha \Delta T_c) = Cn \cdot G_{med}$ , interpretada como  $y = a \cdot x$ , siendo  $a = Cn$ . Analogía que permite, junto con un gran número de valores experimentales (Devore, 1998), realizar un ajuste estadístico adecuado y obtener el valor de las variables desconocidas. Este valor es determinado por el contraste de los valores medidos a lo largo de un día por la celda patrón y la celda a calibrar ubicadas de manera coplanar.

Resumiendo, una vez realizado el contraste entre la CP y la CC, y encontrados los valores de los parámetros específicos para cada celda, se recurre a la Ec. (3) para hallar el valor de la temperatura de celda FV ( $T_c$ ) y, utilizando la Ec. (7), se obtiene el valor de la irradiancia corregido por temperatura.

En una primera aproximación se realiza la calibración sin considerar efectos térmicos, para, posteriormente, analizar que ocurre cuando estos efectos son considerados (para ello se considerará  $\alpha$  igual a 0).

#### 4. RESULTADOS

La metodología presentada en el apartado anterior ha sido utilizada para determinar las variables desconocidas de 10 celdas a calibrar desarrolladas en el GER.

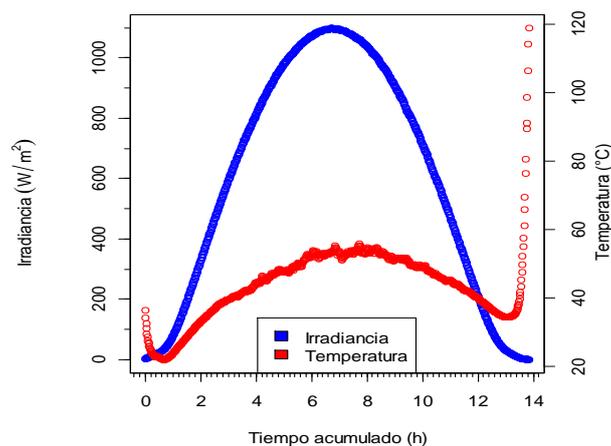


Figura 3- Evolución diaria de la irradiancia y de la temperatura de celda FV patrón.

La evolución de los valores de irradiancia y de temperatura de celda FV, obtenidas con la celda patrón durante el ensayo de calibración, se muestran en la Fig. 3. En la misma se observa que la irradiancia medida en el día del ensayo, no sufre alteraciones en su perfil, comportamiento característico en un día claro y sin presencia de nubes. Además se observa en la curva de evolución de la temperatura dos efectos, uno de ellos relacionado al efecto de viento que produce variaciones en el perfil de la misma, y otra alteración que se presenta en horarios del amanecer y atardecer. Esta alteración es producida debido a que el modelo de celda, obtenido a través del valor de la  $V_{oc}$ , no representa

adecuadamente el comportamiento de la temperatura para irradiancias bajas, provocando un aumento brusco de la misma. Este comportamiento lleva a que los ajustes de la temperatura se realizan para valores de irradiancia mayores a  $350 \text{ W/m}^2$ . En la Fig. 3 el eje de tiempo indica las horas acumuladas de ensayo, donde los datos se midieron en intervalos de 1 minuto, obteniendo alrededor de 600 estados medidos.

#### 4.1 Determinación de la Temperatura de celda.

Para obtener la temperatura de celda se emplea el modelo de  $V_{oc}$ . Por lo cual, se procede a ajustar con los datos experimentales el modelo descrito en la Ec. (3). Una vez obtenidos los parámetros ajustados se verifica el resultado 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.

En la Fig. 4 se presenta la correlación existente entre la  $T_c$  de una de las celdas calibradas y la patrón, también se indica el valor del coeficiente de correlación cuadrático logrado. En dicha figura se observa una fuerte correlación entre los datos de temperatura obtenidos con la celda patrón con respecto a los de la celda calibrada, denotado por el valor de la pendiente próxima a la unidad y un coeficiente de correlación cuadrático con un valor de 0,9999.

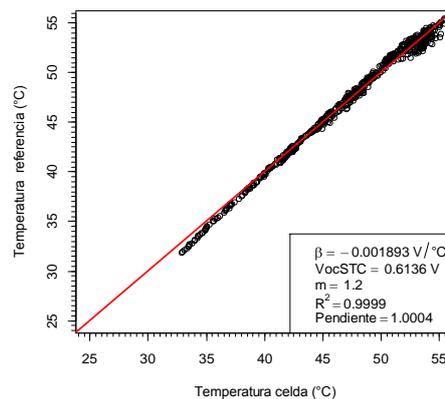


Figura 4- Curva que relaciona la temperatura de celda patrón con la temperatura obtenida de una celda calibrada.

Considerando los resultados obtenidos para 10 celdas calibradas se obtiene un valor de  $\beta$  promedio de  $-0,00192 \text{ V/}^\circ\text{C}$  con una desviación estándar de  $0,00011 \text{ V/}^\circ\text{C}$ , para el caso de  $V_{ocSTC} = 0,61493 \text{ V}$  con un desvío de  $0,00266 \text{ V}$ . Para todos los casos se encontraron valores de correlación del orden de 0,9999. Los valores obtenidos de  $R^2$  indican un correcto ajuste y poca dispersión en los datos medidos.

#### 4.2 Determinación de la Irradiancia.

Para evaluar el comportamiento de las celdas, en primera instancia, se procedió a la calibración mediante el modelo lineal presentado en la Ec. (7), sin considerar la corrección por temperatura.

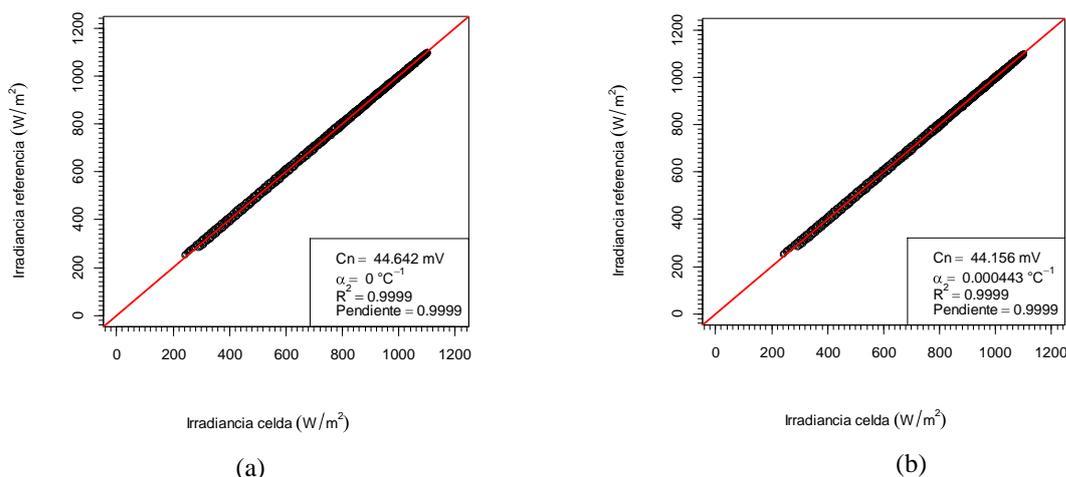


Figura 5- Curva que relaciona la irradiancia medida con la celda de patrón y calibrada a) sin corrección de temperatura y b) con corrección de temperatura.

En la Fig. 5 (a) se presenta la curva que correlaciona los valores de irradiancia medida por la CP y la CC. En esta figura se ha realizado una correlación directa con el objeto de verificación de resultados de  $C_n$  que determina la pendiente de la curva, así como verificar la correspondencia y linealidad analizando los valores de  $R^2$  y la pendiente.

La constante normalizada  $C_n$  se determina utilizando un entorno de programación para análisis estadístico y gráfico (R Core Team, 2014) que conduce a un valor, para la celda presentada en la Fig. 5 (a), de 44,642 mV. El procedimiento se ha repetido para las 10 celdas desarrolladas, y se han determinado los valores de  $C_n$  y  $R^2$ . Por lo tanto, para las 10 celdas se ha obtenido un  $C_n$  promedio de 44,817 mV con una desviación estándar de 0,05 %. El efecto de la variación de la temperatura sobre el valor de irradiancia, en este primer análisis, no es considerado. Para todos los casos se obtienen valores de correlación y de pendiente próximos a la unidad, indicando un correcto ajuste y poca dispersión en los datos medidos.

En la Fig. 5 (a) también se observa una pequeña dispersión de los valores medidos sobre el comportamiento lineal, consecuencia de efectos de segundo orden que provocan que los valores de irradiancia tengan una determinada trayectoria hasta el mediodía solar y otro diferente a la tarde.

Seguidamente, se incorpora la corrección por efecto de temperatura con los valores de  $T_c$  determinados utilizando la Ec. (3). La Fig. 5 (b) muestra la curva que correlaciona los valores de irradiancia corregidos por temperatura con los correspondientes valores de las constantes  $C_n$  y  $\alpha$ , junto con el valor de  $R^2$  y la pendiente de ajuste lograda.

Considerando el valor de la constante calculada, empleando un valor de  $\alpha$  de  $0,000443 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  para la celda presentada en la Fig. 5 (b), se observa que el valor de  $C_n$ , que representa la pendiente de la curva de correlación, tiene un valor de 44,156 mV. El procedimiento repetido para las 10 celdas arrojan valores de  $C_n$ ,  $\alpha$ ,  $R^2$ . De esta forma, se obtiene un  $C_n$  promedio de 44,397 mV, con una desviación estándar de 0,05 %. Para todos los casos se obtienen valores de correlación del orden de 0,9999 y valores de pendiente próxima a la unidad indicando, nuevamente, un correcto ajuste y poca dispersión en los datos medidos.

Del análisis de las constantes calculadas se evidencia una diferencia entre los valores de  $C_n$  obtenidos con y sin corrección del efecto de temperatura. Esta diferencia denota la variación de la pendiente que se obtiene debido al efecto térmico. En la Fig. 6 (a) se presenta gráficamente la variación de la pendiente de la curva que correlaciona la irradiancia con y sin corrección, así como los valores de temperatura de celda obtenidos en horarios matutinos y vespertinos, donde, en este último horario se presentan mayores valores de temperatura. El contraste entre valores graficados en toda la escala de irradiancia no permite visualizar adecuadamente las mencionadas diferencias; por esta razón en la Fig. 6 (b) se presenta una ampliación de ambas curvas en la región de irradiancia próximas a las condiciones normalizadas. En dicha figura se observa que el valor de irradiancia, sin considerar el efecto térmico, alcanza un valor de  $1011 \text{ W/m}^2$  para una temperatura de celda de  $48 \text{ } ^\circ\text{C}$ . La calibración de la CP se realiza a  $25^\circ\text{C}$  y  $1000 \text{ W/m}^2$ , por lo cual, el valor de irradiancia deber ser corregido, procedimiento que conduce a una disminución de  $11 \text{ W/m}^2$ .

Se ha observado en meses de verano diferencias de temperatura, respecto al valor normalizado, que provocan desvíos que pueden alcanzar un 1,4% de variación entre valor de irradiancia con y sin corrección .

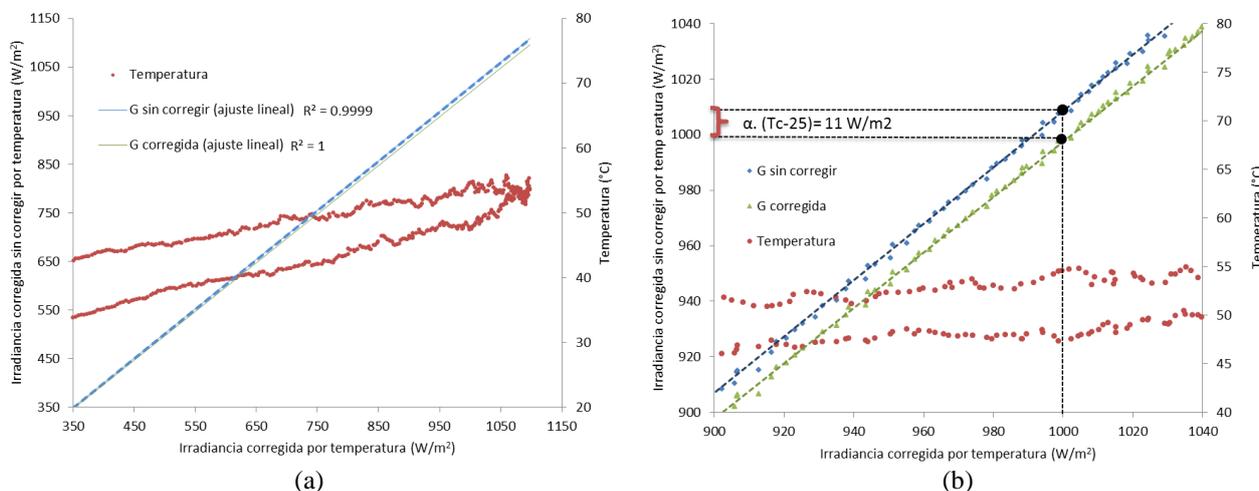


Figura 6- Curvas que relacionan la irradiancia obtenida con y sin considerar corrección por efectos térmicos, a) para el intervalo de valores utilizadas para el ajuste, b) ampliando la región próxima a las condiciones patrón de medida.

La incerteza en los valores de irradiancia de la CP, fabricada y calibrada por el laboratorio PVEL, es de 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 CC, resultando para un intervalo de confianza del 95 % una incerteza del 4,7 %.

## 5. 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 SFGR instalados en el norte grande.

Se desarrolló una metodología destinada a calibrar celdas FV partiendo de una celda patrón, calibrada por un laboratorio internacional, en la que se incorpora corrección por efectos térmicos.

La metodología desarrollada para este proceso de calibración utiliza métodos estadísticos sobre una elevada población de muestras, ajustando el valor de irradiancia en el rango de funcionamiento de los dispositivos FV.

Los resultados se contrastaron utilizando los valores determinados en el proceso de calibración entre las celdas calibradas y la celda patrón. Verificando una elevada correlación entre ambos y que los modelos empleados responden a la necesidad de calibrar celdas FV destinadas a la determinación de la irradiancia.

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 y se verifica la mejora introducida al considerar los efectos térmicos de la celda ya que se reducen desvíos que pueden llegar hasta afectar en 1,4% el valor de irradiancia medida. Aumentando la precisión del dispositivo desarrollado para la medida de la irradiancia.

### **Agradecimientos**

Los autores desean agradecer a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT), Argentina, por proporcionar ayuda financiera. Los autores también desean agradecer el apoyo económico de la Secretaria General de Ciencia y Técnica de la UNNE a través del proyecto de investigación PI- 023/2014.

### **REFERENCIAS**

- 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.
- Haeblerlin, 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.
- Meydbray, J., Emery, K., & Kurtz, S. (2012). Pyranometers and Reference Cells, What's the Difference?. NREL Journal Article, NREL/JA-5200-54498,(April 2012), 5.
- 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, 18:269-279.
- 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. (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).
- Yordanov, G., Midtgård, O., and Saetre, T. (2012). Series resistance determination and further characterization of c-si PV modules. Renewable Energy, 46:72–80.

### **PRODUCTION AND CALIBRATION OF REFERENCE CELLS TO DETERMINE THE EFFECTIVE IRRADIANCE OF GCPS**

**Abstract.** To give a precise estimation of the generation capacity of photovoltaic devices is necessary to determine the effective irradiance adequately. Several authors argue that PV reference cells have lower uncertainty, in relation to thermal type pyranometers, to determine the ability of PV generation. Therefore, this paper presents the production, development and evaluation methodologies destined to calibration of solar radiation meter whose sensor element is constituted by photovoltaic cells in a conventional encapsulation and corrected for temperature effects. The process is performed by the contrast with a calibrated reference cell by an international laboratory. Statistical methods are used for adjusting the proposed models and are described. A comparison between the results is made obtain more than 0,999 for quadratic correlation factor, confirming the linearity and matching aim with the calibrated reference cell.

**Key words:** Solar Energy, Photovoltaic, Reference Cell.