

CARACTERIZACIÓN DEL NUEVO LABORATORIO DE CALIBRACIÓN DEL GERSolar

Raúl Righini, Rosana Aristegui

GERSolar, INEDES-CONICET, Universidad Nacional de Luján,
Av. Constitución y Ruta 5, (6700) Luján,
Buenos Aires, Argentina – Tel. (54-02323) 440241– e-mail: gersolar@yahoo.com.ar

Recibido 01/09/15, aceptado 03/10/15

RESUMEN: Se describe el nuevo laboratorio de calibración en interior de piranómetros que el Grupo de Estudios de la Radiación Solar ha construido en Luján. Se describe su equipamiento, sus rutinas de calibración y se muestran los resultados de las primeras calibraciones efectuadas en él. El objetivo es dotar al grupo de una herramienta que permita calibrar equipos independientemente de las condiciones climáticas, manteniendo el control sobre los parámetros requeridos para efectuar una calibración adecuada. Las facilidades instaladas posibilitarán, además, estudiar el desempeño de los piranómetros bajo condiciones controladas. Se describen los procedimientos adoptados y los resultados de las primeras calibraciones efectuadas.

Palabras clave: Radiación solar, piranómetros, calibración

INTRODUCCION

La calibración periódica de piranómetros destinados a medir el recurso solar constituye una necesidad básica a la hora de evaluar adecuadamente los niveles de radiación. Un error, porcentualmente pequeño puede traer aparejadas consecuencias económicas importantes a la hora de, por ejemplo, estimar los niveles de producción de una planta fotovoltaica generadora de electricidad. Ese tipo de errores influyen al evaluar la factibilidad económica del emprendimiento y definir la negociación sobre la tarifa a percibir por parte de la empresa generadora. No obstante ello, esa necesidad es, a menudo pobremente atendida por las redes de medición. En efecto: la degradación de los elementos sensores de los piranómetros, sumada a otro tipo de degradación a la que los instrumentos están expuestos, puede provocar errores en los niveles de radiación medidos, que en algunos casos superan holgadamente el 5% en base horaria, diaria y valores medios diarios mensuales.

Para limitar esas incertezas es necesario calibrar los equipos, determinando sus constantes de calibración, al menos cada dos años (Grossi Gallegos, 2004, Hayman, 1999). Los procedimientos habituales de calibración se efectúan al aire libre y requieren condiciones meteorológicas adecuadas y, según el proceso a seguir, de varios días de medición continua.

Por todas esas razones, la calibración efectuada en el laboratorio, reviste ventajas particulares: por un lado permite calibrar equipos independientemente de las condiciones ambientales, acortar enormemente los tiempos de calibración y, al mismo tiempo disminuir los errores asociados a la determinación de la constante si los procedimientos son los adecuados. Para atender este tipo de situaciones que se plantean en general, y la demanda futura que representará la operación de la red ENARSOL (Aristegui et al., 2012) que medirá los niveles de radiación solar en 32 estaciones diseminadas en el territorio nacional y que implicará la calibración periódica de 64 radiómetros, el Grupo de Estudios de la Radiación Solar (GERSolar) ha construido un laboratorio de calibración de piranómetros. El laboratorio ha sido diseñado para dar una rápida respuesta a las necesidades de calibración de dicha red y de otros actores interesados en el uso adecuado de la información que brindan los sensores piranométricos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Instalaciones

La instalación sigue, en parte, las recomendaciones que la firma Kipp&Zonen hace para la calibración “indoor” de sus piranómetros. En otros puntos se apartan de ellas.

El laboratorio donde se realizan las calibraciones ha sido pintado completamente de negro mate, con el objetivo de disminuir la luz dispersa que puede incidir sobre los equipos y, de esa forma, introducir datos espúreos. El laboratorio consta de una mesada de granito “Negro Brasil”, a la que se ha quitado el pulido.

Un pie de hierro de altura regulable sostiene una luminaria 74405 -E150 Shane Proxy, en cuyo interior se ubica la lámpara Osram Powerball HCI-T 150W/942 cuya temperatura de color es de 4200 K. Un datalogger CR1000 de la firma Campbell permite almacenar los datos provenientes del equipo a calibrar y del piranómetro CMP22 usado como referencia.

Un estabilizador provee de tensión estabilizada al 3,5% a un balasto electrónico que alimenta la lámpara de 150 W de potencia. La temperatura del ambiente se regula para permanecer estable en torno a los $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Una vista del laboratorio puede apreciarse en la figura 1.



Figura 1: Vistas del laboratorio (izquierda) y de la lámpara y la mesa del laboratorio de calibración (derecha)

La Lámpara

La lámpara de calibración es una Osram Powerball HCI-T 150W/942 . Posee una temperatura de color de 4200 K y una vida útil estimada en 12000 horas. El espectro de emisión de la lámpara fue medido con un espectrorradiómetro Avantes Ava-Spec-ULS2048XL. Se muestra en la figura 2.

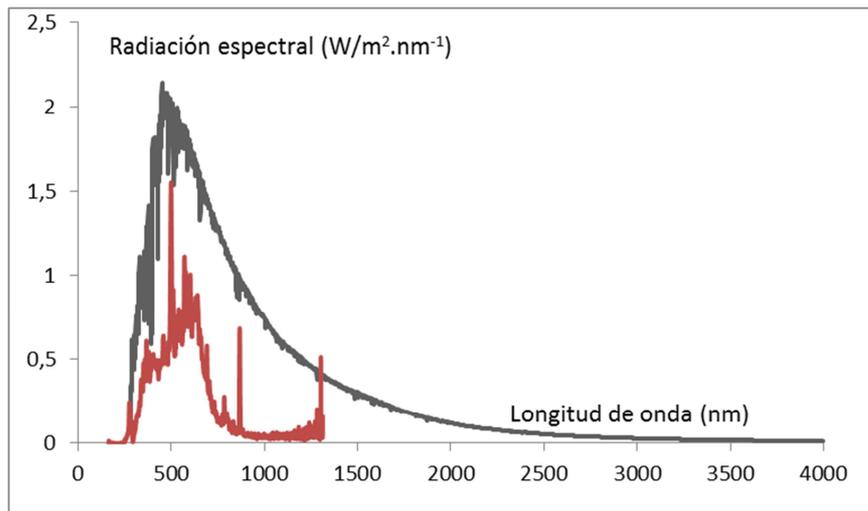


Figura 2: Espectro de la Lámpara de calibración (unidades arbitrarias) en color rojo. En gris: espectro solar estándar AM1,5 (ENREL, 2015)

Obviamente su espectro no es igual al solar (figura 2), pero presenta características similares en el rango visible. La lámpara es una lámpara de larga duración (12000 horas asegura el fabricante), por lo que es necesario usarla previamente al menos 150 horas para estabilizar su funcionamiento. Debe encendérsela al menos media hora antes de su uso, para lograr que su salida se mantenga estable. Si bien la misma está sujeta a procesos de degradación en lo que hace a su flujo radiante, brillo y su espectro de emisión (Assaf et al., 2012), resulta apta para calibraciones que implican comparaciones entre el desempeño del solarímetro patrón y el solarímetro a calibrar.

La firma Kipp&Zonen usa este tipo de lámpara en el equipo de calibración que comercializa y en la propia calibración que realiza de sus solarímetros. Allí recomienda que la inestabilidad de la fuente no debe ser mayor al 10% para la intercomparación entre el solarímetro a calibrar y el que se usa como referencia (Kipp&Zonen, 2013). En nuestro caso se usó un estabilizador de tensión de 500 V.A de la firma Mega Red, que garantiza según su fabricante una estabilidad del 3,5 % en la salida de tensión, dentro del rango de potencia especificada.

Se usó un balasto electrónico para la lámpara, la que fue colocada en una luminaria 74405 -E150 Shane Proxy (figura 3).



Figura 3: Luminaria 74405 -E150 Shane Proxy para la lámpara de calibración

La lámpara se sitúa dentro de la luminaria la cual se ubica a 72 cm de altura respecto a la superficie de calibración. Esa disposición permite lograr potencias del orden de los 600 W/m^2 en la zona central, justo debajo de la lámpara. Una próxima etapa considerará la medición de la temperatura en el sensor de referencia para determinar con mayor precisión la constante del equipo de referencia y las condiciones de calibración. No obstante, lo informado por Kipp&Zonen respecto a la dependencia de las constantes de calibración con la temperatura para los CMP22 establece una variación muy pequeña de las mismas (menor al 0,5 %) en el rango de temperatura entre -30°C y 50°C .

Bajo las condiciones de uso citadas, la energía provista por la lámpara se mantiene estable, tal como muestra el gráfico de la figura 4. Para realizar esta medición se colocó bajo la lámpara un solarímetro CMP22 usado exclusivamente como referencia dentro del laboratorio de calibración y se midió la tensión de salida del mismo durante 15 horas con un multímetro Fluke modelo 289, que permite apreciar décimas de mV. Se realizaron mediciones cada 15 segundos de la tensión del solarímetro, la que se muestra en la figura 4. Es posible notar la estabilidad de la señal de salida, lo que resulta importante al momento de realizar las comparaciones que el proceso de calibración requiere. La reciente adquisición reciente de una fuente INSTEK APS-7050, garantiza una inestabilidad menor al 0,5% en la potencia entregada a la lámpara.

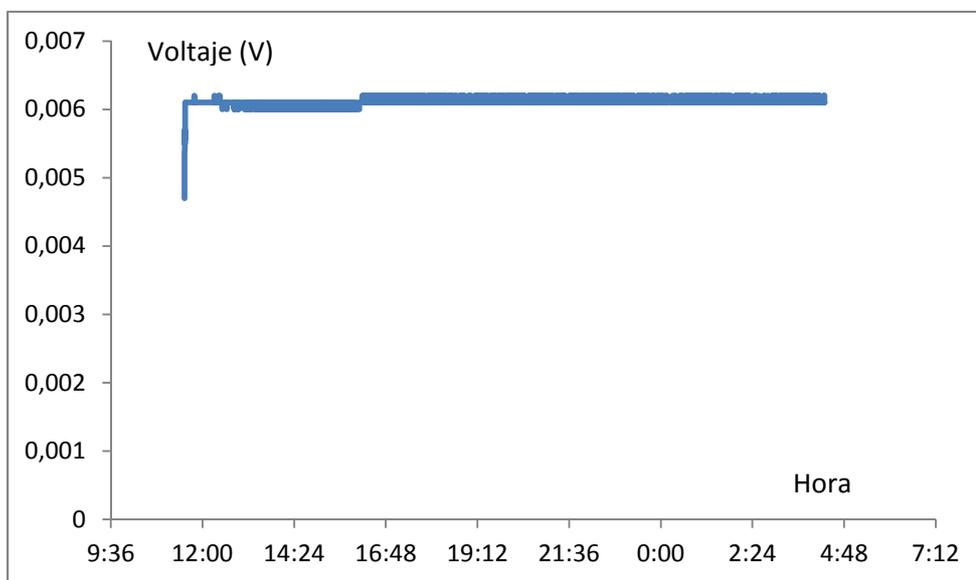


Figura 4: Tensión del solarímetro CMP22 durante 15 hs de iluminación con la lámpara de calibración

La distancia de posicionamiento de la lámpara respecto de la mesada puede ser modificada, pero la seleccionada responde a un par de premisas: en primer lugar, cuanto más cerca se encuentre la lámpara respecto al instrumento a calibrar, mayor será la energía recibida por el mismo. Este hecho es importante, pues valores muy bajos determinan altos pesos relativos en los errores de medición de la tensión. Por otra parte, una excesiva cercanía implica una concentración alta del haz de la lámpara y una variabilidad espacial muy grande en las potencias recibidas en el plano de medición. Cuando ello ocurre, el posicionamiento del equipo resulta crítico y puede perderse mucho tiempo tratando de ajustarlo si no se recurre a un posicionamiento mecánico que pueda situar al solarímetro con una exactitud superior al milímetro.

Por otro lado, esa circunstancia determina que sólo sea posible comparar solarímetros que poseen la misma geometría en la superficie expuesta a la radiación. La distancia seleccionada supone un compromiso entre ambos requerimientos: potencias medias, razonablemente elevadas, cercanas a los entre 500 y 600 W/m^2 y suficiente apertura del haz de salida de la luminaria para lograr un área

relativamente grande de uniformidad de iluminación en el plano de medición y se encuentra en línea con lo propuesto por Assaf (Assaf et al., 2012),

Para corroborarlo se confeccionó un mapa de radiación en el plano de medición, el que se muestra en la figura 5.

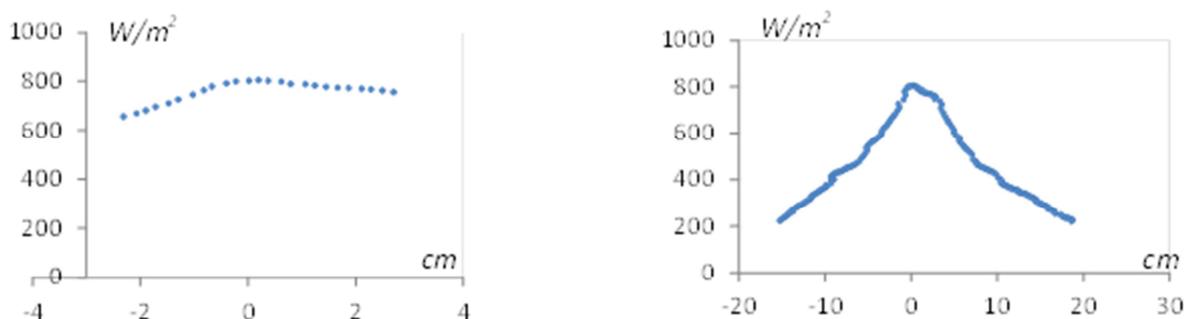


Figura 5: Valores de radiación sobre el plano de medición. Izquierda: detalle alrededor de la zona central

Un paso futuro para superar la variabilidad espacial del campo lumínico deberá contemplar la instalación de un difusor, con respuesta espectral plana, con el objetivo de uniformizarlo en el plano de medición.

El patrón de referencia

Como patrón de referencia se usa un CMP22 de la firma Kipp&Zonen. El CMP22 es un patrón secundario, con una constante que varía en menos del 0,5% en un rango de temperaturas de operación entre -20°C y 50°C. De rápida respuesta (del orden de los 5 segundos), de muy bajo offset y con una incerteza en su sensibilidad menor al 1%, resulta particularmente apropiado para ser usado como referencia de calibración de piranómetros termoelectrónicos de buenas prestaciones pero con incertezas mayores, tales como los CMP21, CMP11, CMP6, B&W y otros de características similares.

El datalogger

Como adquirente de datos se usó un datalogger Campbell CR1000. Dicho datalogger presenta amplias posibilidades de configuración, dotándolo de una amplia versatilidad para la adquisición de los datos que el laboratorio requiere. A los efectos de la medición de calibración aún varias ventajas: la disponibilidad de ocho canales diferenciales de entradas analógicas; la posibilidad de muestrear con alta frecuencia y procesar datos en una memoria volátil antes de grabarlos y una buena resolución en el rango de entrada de 0 a 25 mV que permite apreciar hasta el μV .

El error de ganancia de una medición de este datalogger es $\pm 0.06\%$ del voltaje medido y un error de offset que se calcula como:

$$\text{Offset Error} = 1,5 \cdot \text{Basic Resolution} + 1,0 \mu\text{V}$$

Los salidas de voltaje provenientes del solarímetro de referencia y del solarímetro a calibrar fueron almacenados cada cinco segundos. Dicha frecuencia de muestreo está relacionada con la velocidad de respuesta de los solarímetros, tanto del que se calibra como el usado como referencia. Ese tiempo no puede ser menor que el mayor tiempo de respuesta seleccionado entre ambos.

Incertezas

Existen varias fuentes de incertezas en la determinación de la sensibilidad del solarímetro a calibrar.

Ellas son:

- a) Incerteza en la constante del CMP22 usado como referencia. La incerteza con que el fabricante determina la sensibilidad de este instrumento es igual al 1% según las especificaciones de Kipp&Zonen.
- b) Deriva de la constante del CMP22 debida a la temperatura de funcionamiento. Esta deriva que se encuentra tabulada, puede ser despreciada cuando se trabaja entre 20°C y 22°C.
- c) Errores de medición de los voltajes de salidas de ambos solarímetros. Dicho error está asociado al datalogger y, tal como se mencionó anteriormente, debe ser calculado en función de dos términos: Error de Ganancia y Error de Offset.
 Error de ganancia: $\pm 0,06\%$. Voltaje de entrada
 Error de offset: $1,5 \cdot \text{Basic Resolution} + 1,0 \mu\text{V}$
 Error total: Error de Ganancia+Error de Offset.
 El error total porcentual asociado a la medición de voltaje se calcula promediando los errores de medición de voltaje y dividiéndolos por el voltaje medio, para expresarlos en forma porcentual. Se suman los errores de voltaje de medición del CMP22 y del equipo a calibrar.
- d) Error estadístico de las mediciones. Cada medición realizada cada cinco segundos da lugar al cálculo de una constante de calibración del equipo. El desvío de dichas constantes parciales de la constante media total se evalúa con la dispersión estándar. El error estadístico se evalúa, entonces, como el desvío estándar de las constantes relativo a su valor promedio.

Se calcula, finalmente, el error relativo de la constante como:

$$e_{\text{relativo}} = \sqrt{(2 \cdot \Delta_{\text{medición promedio}}^2 + \Delta_{\text{estadístico}}^2 + \Delta_{\text{constante}}^2)}$$

lo que supone considerar los errores como independientes.

Ubicación de los solarímetros para realizar las calibraciones

Se emplean dos disposiciones básicas para realizar las calibraciones.

Disposición 1; Del nadir de la lámpara situado sobre la mesada de calibración se aparta el solarímetro de referencia unos 10 cm hacia un lado. Denominaremos A a ese punto. En ese sitio se realiza una marca y se busca otro sitio equivalente, simétrico respecto al nadir, donde la salida del solarímetro de referencia sea la misma que en el punto A. Denominaremos B a ese segundo punto. La disposición es mostrada en la figura 6.

Ambos solarímetros (el de referencia y aquel que se desea calibrar) se nivelan y se colocan en los puntos A y B. Sus salidas son medidas por el datalogger CR1000. Luego de un tiempo las posiciones de los solarímetros se invierten con el objetivo de promediar los resultados de las constantes calculadas en cada medición. Esto resulta necesario ya que las asimetrías de la lámpara se ven reflejadas en asimetrías en el campo de iluminación sobre la mesada, lo que obliga a promediar espacialmente las respuestas de ambos solarímetros para que la constante calculada no se vea sesgada. Esta disposición tiene la ventaja de que ambas mediciones son realizadas simultáneamente por lo que una eventual inestabilidad en la emisión de la lámpara se verá reflejada a la vez en la salida de ambos solarímetros. Se realiza una serie de unas diez mediciones en ambas posiciones, cuidando que la cantidad de datos en cada una de ellas sea la misma, evitando así un sesgo hacia alguna de las posiciones que vendría dado por considerar un número mayor de datos en alguna de ellas que en la otra.

Disposición 2: Tanto el solarímetro de referencia como el solarímetro a calibrar son colocados alternadamente en el nadir de la lámpara (punto C: ver figura 6). Cada uno es dejado durante unos 10 minutos en esa posición y luego reemplazado por el otro. Se efectúa una serie de mediciones alternadas de cada uno de ellos, cuidando que el número de mediciones de ambos equipos sea el mismo. La ventaja de esta disposición consiste en que ubicar a los solarímetros en el punto cenital

debajo de la lámpara posibilita alcanzar valores más elevados de irradiancia. Su desventaja estriba en que las mediciones no son simultáneas, por lo cual para luego efectuar el cálculo de sensibilidad resulta imprescindible que la salida de la lámpara sea lo suficientemente estable como para que las comparaciones de valores puedan ser realizadas.

En ambos casos, la constante del equipo a calibrar se calcula, para cada medición, como:

$$C_{te} = C_{tedelCMP22dereferencia} \cdot \frac{Voltajedelequipoacalibrar}{VoltajedelCMP22}$$

Tanto en la disposición 1 como en la 2 se tiene especial cuidado en lograr que los elementos sensores de los piranómetros estén a la misma altura, suplementando de ser necesario alguno de ellos para lograrlo. De no proceder así, uno de los sensores estaría a una menor distancia de la lámpara que el otro, recibiendo mayor cantidad de radiación, por lo que la calibración se vería afectada.

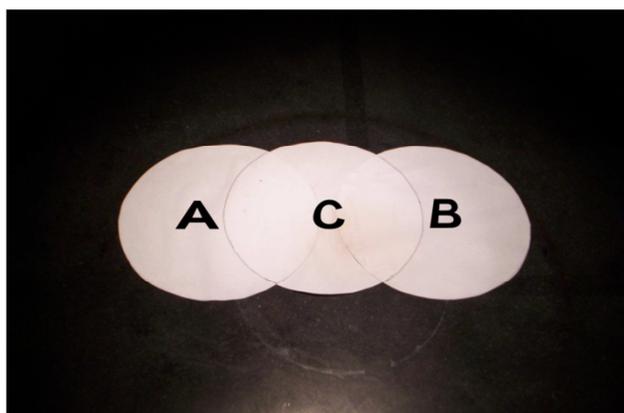


Figura 6: Ubicaciones A, B y C de los solarímetros sobre la mesa del laboratorio

RESULTADOS

Se calibraron, según los procedimientos descritos, una serie de piranómetros: tres CMP11, cinco CMP5, tres B&W, dos solarímetros fotovoltaicos, fabricados por CNEA y dos Licor.

En general tanto los procedimientos usando la disposición 1 como la 2 se demostraron aceptables para la calibración de piranómetros termoelectrónicos. Los CMP11 que se calibraron nunca habían sido usados: lo fueron únicamente durante el proceso de calibración. En las calibraciones realizadas para ellos, las constantes de fábrica y las calculadas no difirieron en más del 2%. Los errores relativos calculados según se explicó en el apartado anterior, no superaron el 1,7%. Se muestra a título de ejemplo una calibración en la figura 7. En dicho gráfico se ven los valores de las constantes que devienen de cada medición individual realizada con el CMP22 usado como referencia y con el CMP11 que se deseaba calibrar.

En algunos casos, las constantes calculadas pueden presentar tendencia a agruparse en torno a valores definidos, tal como se muestra en la figura 7. Puede verse allí que existen dos agrupamientos de datos en torno a dos valores medios diferentes. Esto puede deberse a varios hechos:

- Fluctuaciones en la irradiancia de la lámpara debida, a su vez, a inestabilidades en su tensión de alimentación.
- Fluctuaciones en la irradiancia de la lámpara, ocasionadas por no haberla usado el tiempo suficiente como para estabilizarla.
- Diferencias debidas a problemas en el posicionamiento de los solarímetros respecto a la lámpara. Tanto en la disposición 1 como en la 2, es necesario ubicar los equipos en las posiciones requeridas. Si se usa la disposición 1, donde ambos solarímetros invierten sus posiciones, es necesario ubicarlos al invertirlos en el mismo lugar en el que estaba el

solarímetro que reemplazan. En la disposición 2, donde se usa la posición central, es necesario el mismo cuidado y, además, asegurar la estabilidad de la lámpara para que las condiciones de iluminación de ambos resulten iguales.

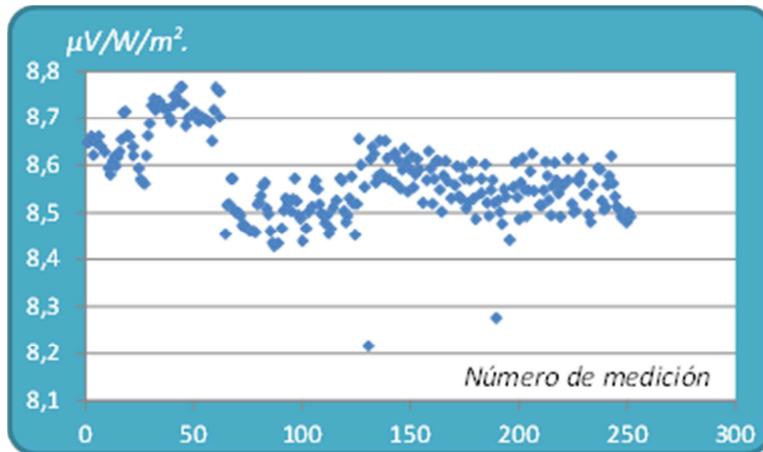


Figura 7: Calibración en interior de un CMP11 con un CMP22 como referencia

La figura 8 muestra una calibración en exterior de otro CMP11 hecha usando como referencia un CMP21, exponiendo ambos a la radiación solar global en plano horizontal durante un día despejado del mes de junio de 2015. Se nota allí que los valores de las constantes oscilan en torno a un único valor medio, a diferencia de lo que pasaba en algunas mediciones efectuadas dentro del laboratorio de calibración. Las constantes determinadas para el CMP11 en ambas calibraciones difirieron en un 0,5%, lo que muestra la confiabilidad del procedimiento de calibración interior.

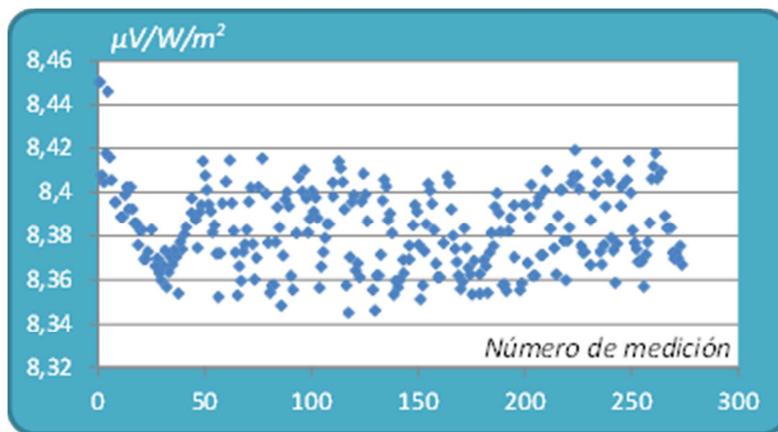


Figura 8: Calibración en exterior de un CMP11 con un CMP21 como referencia, ambos expuestos a la radiación solar global en plano horizontal

Las calibraciones de solarímetros fotovoltaicos, tales como los Licor o los fabricados por CNEA no fueron exitosas. La diferencia entre las constantes de fábrica (en el caso de los Licor) y las constantes determinadas por comparación entre integrales diarias con un CMP11 expuesto a la radiación solar tomado como referencia resultaron muy altas. A pesar de que los errores de medición no fueron excepcionalmente altos, las constantes determinadas en el laboratorio difirieron en todos los casos en más del 10% de las calculadas durante las calibraciones en el exterior.

No está clara aún la causa de este hecho. Una posibilidad es que al ser la superficie sensible a la radiación de los sensores fotovoltaicos notablemente menor que la de los piranométricos, las inhomogeneidades del campo lumínico determinen que los sensores estén expuestos a diferentes intensidades de radiación, invalidando de esta manera la calibración.

Un estudio más detallado en ese sentido sumado al cálculo de las constantes de calibración en función del ángulo de incidencia del haz, permitirá comprender más en profundidad el porqué de las diferencias presentadas y, posiblemente, hallar el camino para superarlas.

CONCLUSIONES

El laboratorio de calibración construido se revela como una herramienta adecuada para efectuar calibraciones de piranómetros termoeléctricos en interior. Los errores de determinación de las constantes (menores que el 2% en todos los casos) resultan aceptables dada la precisión de los equipos que son calibrados. El laboratorio, por lo tanto, está en condiciones de efectuar calibraciones rápidas y precisas de equipamiento destinado a evaluar el recurso solar, independientemente de las condiciones ambientales.

La calibración de piranómetros fotovoltaicos revela una dificultad mayor, siendo necesario un estudio más profundo de las condiciones de iluminación y de la dependencia de las constantes de calibración con el ángulo de incidencia del haz de la lámpara. Una serie de modificaciones se está realizando en el laboratorio para permitir sumar otra lámpara, con un ángulo de incidencia variable respecto al plano de calibración de los equipos. Creemos que esta nueva disposición permitirá estudiar con detalle la respuesta de los equipos y, además, sumar otra luminaria que posibilitará uniformizar el campo de iluminación en el caso de ser necesario. Ambos hechos harán factible, según estimamos, la calibración de piranómetros fotovoltaicos en un futuro cercano.

REFERENCIAS

- Grossi Gallegos H. (2004), Notas de radiación solar. Editado por la Universidad Nacional de Luján. (ISBN 987-9285-19-0), pp.90-91.
- Hayman S. (1999). The CIE Daylight measurement guide revisited. Proceedings of the XXIVth. Session of the Commission Internationale d'Eclairage, Publication Nr.133, Warsaw, pp 145-147.
- Aristegui. R. y Righini R. (2012). Discusión sobre el proceso de selección de sitios apropiados para la ubicación de estaciones de una futura red solarimétrica nacional. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (ISSN 0329-5184) vol. 16, pp. 11.39-11.46.
- Assaf L., Molina M., Ortiz de Adler N. y Marcelo De Nobrega M (2012). Desarrollo de un dispositivo de contrastación de radiómetros basados en lámparas eléctricas. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (ISSN 0329-5184) vol. 16, pp. 8.137-.8.142.
- ENREL (2015). Reference Solar spectral irradiance..Air Mass 1,5 . <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/>
- Kipp&Zonen (2013). Requeriments for the supply of the Kipp&Zonen CFR calibration facility for radiometers an the CFI calibration facility infrared for pyrgeometers. Nota técnica.

ABSTRACT: Then new pyranometers calibration laboratory of the Study Group of Solar Radiation, built in Lujan, is described. Their equipment, the calibration routines and the results of the first calibration are comented here. The goal is to provide the group with a tool to calibrate equipments regardless of weather conditions while maintaining control over the parameters required for a proper calibration. The installed utilities will enable study the pyranometers performance under controlled conditions. The procedures adopted and the results of the first calibrations performed are described.

KEYWORDS: Solar radiation solar, piranómetros, calibration.