

**EFFECTO DE LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN
EN LA CALIBRACIÓN DE PIRHELÍOMETROS SEGÚN ISO 9059****Balenzategui J.L.*, Molero M.*, Cuenca J.*, Fabero F.*, Mejuto E.*, Silva J.P.*, De Lucas J.****

* CIEMAT, DER, PVLab – Laboratorio de Energía Solar Fotovoltaica.

Avenida Complutense, 40 – 28040 Madrid. Tel. +34 91 496 2509 || j.l.balenzategui@ciemat.es

** INTA, Centro de Metrología y Calibración, Laboratorio de Temperatura y Humedad.

Ctra. Ajalvir, Km 4 – 28850 Torrejón de Ardoz (Madrid). Tel. +34 91 520 1714 || delucasvj@inta.es<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.6112>

RESUMEN

La calibración de la sensibilidad S o responsividad de piranómetros y pirheliómetros, con trazabilidad a la WRR, se realiza mediante procedimientos sencillos descritos en las normas ISO 9847 e ISO 9059, entre otras, que permiten una medida de los sensores y de la irradiancia solar de forma homogénea y equivalente en todo el mundo. La demanda de medidas de irradiancia cada vez más precisas hace necesario mejorar los resultados y fiabilidad de las calibraciones y reducir su incertidumbre, tanto en la parte técnica como en los métodos de medida. En particular, este trabajo analiza la influencia de la temperatura de operación de los pirheliómetros en su sensibilidad y en la irradiancia directa calculada. En base a la experiencia en su calibración, se sugiere la aplicación del mismo método de corrección en S de pirheliómetros que el admitido para piranómetros (ISO 9847), mediante un coeficiente de temperatura lineal. Se muestra el resultado de la aplicación del método en ejemplos reales de calibración y se hacen algunas recomendaciones para fabricantes, sistemas de monitorización y laboratorios de ensayo.

PALABRAS CLAVE: Calibración, irradiancia solar, pirheliómetros, temperatura, normativa.

ABSTRACT

Calibration of sensitivity S or responsivity of pyranometers and pyrhemometers, traceable to WRR, is performed through simple procedures described in ISO 9847 and ISO 9059 Standards, among others, allowing an homogeneous and equivalent measurement of sensors and of solar irradiance all around the world. The demand for measurements of solar irradiance of increased accuracy makes necessary an improvement on calibration results and reliability and on reducing their uncertainty, both in the technical aspects as in the design of measurement methods. In particular, this work analyzes the influence of operating temperature of pyrhemometers in their sensibility and in the direct irradiance calculated. Application of the same correction method for S as that used for pyranometers (ISO 9847), based on a linear temperature coefficient, is suggested here for pyrhemometers. Results of application of this method on real examples of calibration are shown. Recommendations for manufacturers, monitoring systems and test laboratories are also included.

KEYWORDS: Calibration, solar irradiance, pyrhemometer, temperature, Standards.

INTRODUCCIÓN

Piranómetros, pirheliómetros y células solares son los principales tipos de radiómetros que se utilizan en el campo de la energía solar para la medida de la irradiancia solar integrada espectralmente (Balenzategui et al 2019). Estos radiómetros permiten estimar la irradiancia solar (dada en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ en el SI) gracias a la dependencia lineal entre la señal (eléctrica) de salida de sus elementos sensores y la irradiancia, que se expresa a través de una constante de proporcionalidad denominada *responsividad* R o *sensibilidad* S (dada, por ejemplo, en $\text{V}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^2$). En ocasiones, se trabaja también con su inversa, el *factor de calibración* (que se expresaría en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{V}^{-1}$).

Para determinar correctamente la sensibilidad de un radiómetro, la señal de salida del sensor se evalúa a distintos niveles de irradiancia en el rango de interés. Los métodos de calibración más sencillos y directos se basan en la comparación entre los sensores bajo ensayo (DUT) y un patrón de referencia, que se miden al mismo tiempo (de forma síncrona o consecutiva) frente a una misma fuente luminosa, como el Sol en condiciones de exterior, o lámparas artificiales de alta intensidad en laboratorio. Los patrones de referencia permiten realizar la transferencia de la magnitud de irradiancia solar y de la unidad del $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ dentro de una escala metrológica que, en este caso, deriva de la realización práctica de esa unidad mediante un conjunto de instrumentos de la mayor precisión y fiabilidad y con la menor incertidumbre posible: la Referencia Radiométrica Mundial, WRR (*World Radiometric Reference*).

Los procedimientos para esa calibración están bien establecidos y extendidos, y se recogen en Normas internacionales y en numerosos artículos en la literatura. En principio, son procedimientos sencillos de aplicar e incluyen requisitos mínimos, criterios de aceptación de datos, y métodos de análisis y cálculo simples de la sensibilidad S de los sensores. Están pensados para que puedan realizarse de forma universal en cualquier laboratorio dotado con un mínimo de equipamiento. Así se asegura la correcta diseminación de la escala de irradiancia solar desde el WRR y la medida homogénea y equivalente de la irradiancia solar en todo el mundo.

Sin embargo, la creciente demanda de medidas de irradiancia solar cada vez más precisas hace necesario mejorar los resultados y fiabilidad de las calibraciones y reducir su incertidumbre, tanto por la parte técnica e instrumental como por la de los métodos de medida. En este sentido, en aras de esa simplicidad, hay aspectos en la aplicación rutinaria de estas Normas que quedan indefinidos o demasiado abiertos. Por ejemplo, aunque se detecten dependencias de S con otras variables meteorológicas además de la irradiancia, sólo se requiere incluir en los certificados de calibración una declaración sobre el rango de las condiciones de trabajo (temperatura ambiente, viento, irradiancia, elevación solar, etc) abarcado durante el ensayo. Como mucho, “en casos especiales”, se pueden expresar valores medios de S en función de esas variables. Como consecuencia, pueden encontrarse para algunos sensores diferencias de más de un 2% entre sensibilidades determinadas en sucesivos informes de calibración, realizadas cada uno o dos años, en función de la época del año y la localización geográfica del laboratorio en que se realiza la calibración. De la misma forma, se constata que, en función de su nivel metrológico, hay dispositivos para los que la sensibilidad no es estable o uniforme a lo largo de un mismo día o entre días consecutivos. El problema adicional en estos casos es determinar si estas diferencias se han debido a un problema en el sistema de medida o en el procedimiento de cálculo, si son debidas a una deriva del instrumento o si se deben a factores ambientales o atmosféricos. Por otro lado, incorporar la influencia de las variables climáticas, atmosféricas y de operación en la sensibilidad o en la señal de los sensores permitiría hacer correcciones y mejorar la estimación de la irradiancia solar.

Este trabajo analiza, en particular, la influencia de la temperatura T de operación de los pirheliómetros durante la calibración y cálculo de su sensibilidad. Esta dependencia sí se contempla en la calibración de piranómetros (como en la Norma ISO 9847) pero no es así en el caso de los pirheliómetros. Se revisan en primer lugar aspectos básicos sobre la escala de irradiancia solar y la trazabilidad de las medidas. Se describe a continuación el procedimiento de calibración de pirheliómetros aplicado en el PVLab-CIEMAT, en base a la Norma ISO 9059, y el modelo sencillo que permite describir la dependencia $S(T)$ en base a un coeficiente térmico lineal. Se presentan y discuten los resultados de la aplicación de este método, y se extraen conclusiones prácticas y se hacen algunas recomendaciones para mejorar la precisión y la fiabilidad de la medida de la irradiancia solar directa (DNI) con pirheliómetros.

TRAZABILIDAD EN IRRADIANCIA SOLAR

Aunque históricamente la medida de la irradiancia solar (tanto el desarrollo de instrumentación, de los radiómetros y de sus patrones de referencia así como de los procedimientos de medida y calibración) estuvo gestionada e impulsada por la Organización Meteorológica Mundial (WMO), la *magnitud* de irradiancia solar está desde 2008 plenamente integrada en el Sistema Internacional (SI). Así está reconocida por el CIPM (Comité Internacional de Pesas y Medidas del BIPM) e incluida en la lista de posibles CMCs (Capacidades de Medida y Calibración) que pueden reconocerse a los Laboratorios Nacionales de Metrología (NMI) o a sus Institutos Designados (DI). La propia WMO firmó en 2010 el CIPM-MRA, siendo entonces equivalente a un NMI y pudiendo definir sus propios laboratorios asociados como depositarios de sus patrones primarios.

La escala de irradiancia solar está basada por consenso en una referencia primaria, la WRR, que se materializa mediante la medida concurrente de un grupo especial de radiómetros absolutos de cavidad, el WSG (*World Standard Group*). Se trata por tanto de una escala basada en un artefacto o prototipo (como lo era la escala de masa basada en el kilogramo-patrón hasta hace muy poco). Todas las medidas de irradiancia solar que se realizan a nivel mundial deben estar referidas a esta escala y ser trazables al WRR mediante una serie ininterrumpida de procesos de transferencia y calibración entre radiómetros de diferente nivel metrológico, desde los instrumentos de mayor precisión y exactitud hasta los instrumentos de campo o de uso cotidiano. Los patrones de referencia de mayor nivel, que se comparan directamente con el WSG cada cinco años en las IPC (*International Pyrheliometer Comparison*), son también radiómetros absolutos de cavidad (ACRs) (Balanzategui et al 2020) iguales en muchos casos a los propios del WSG, y que pertenecen a laboratorios de calibración, agencias meteorológicas e instituciones de todo el mundo que trabajan en el campo de la medida de la radiación solar y de sus sensores, y que diseminan la escala aplicando esos procesos normalizados.

La Fig 6 representa este esquema de diseminación jerárquica de la escala de irradiancia de la WRR entre instrumentos de distinto nivel metrológico y las normas de aplicación en este ámbito. La escala WRR es, en origen, una escala de irradiancia solar directa que se amplía o expande a la medida de irradiancia solar global o hemisférica, y a sensores que operan bajo principios físicos distintos a los ACR. Las partes nucleares de estas normas se refieren a la transferencia o la calibración entre los ACRs y pirheliómetros (ISO 9059:1990), entre ACRs y piranómetros (ISO 9846:1992), y entre ACRs y células fotovoltaicas (IEC60904-4). A su vez, se contempla la transferencia entre piranómetros (ISO 9847:1990), entre pirheliómetros (la misma ISO 9059:1990) y entre células solares (IEC60904-2). Y las mismas normas permiten seguir diseminando sucesivamente la escala hacia sensores de campo y de trabajo. Finalmente, otra de las normas fundamentales (ISO 9060:2018) clasifica piranómetros y pirheliómetros de acuerdo a su precisión y nivel metrológico, y establece los requisitos técnicos para esa clasificación. El PVLab-CIEMAT realiza de forma sistemática calibraciones de pirheliómetros, piranómetros y células solares mediante procedimientos conformes a estas Normas.

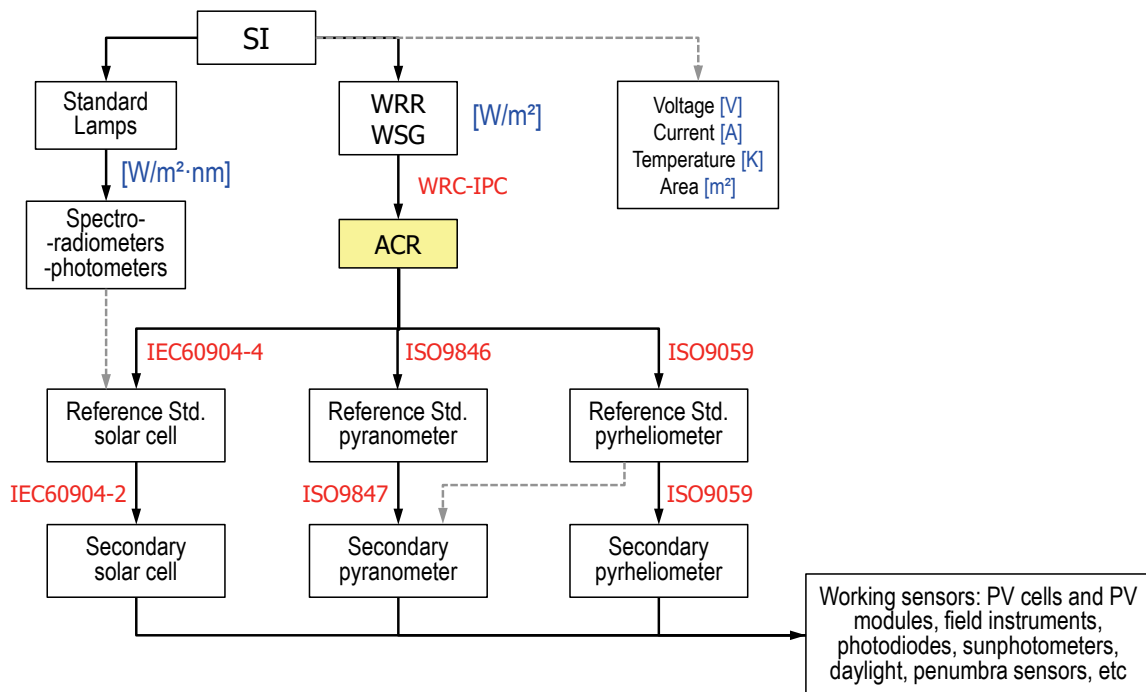


Fig 1. Esquema de trazabilidad de los radiómetros al WRR en la escala de irradiancia solar. Cada conexión entre recuadros (de arriba hacia abajo) implica un proceso de transferencia a un instrumento con nivel metrológico inferior, con un incremento progresivo en la incertidumbre de medida. Se indican también las principales normas internacionales con procedimientos de calibración aplicables.

Finalmente, la *escala solar* WRR y la *escala radiométrica* de irradiancia del SI (que se utiliza para la realización de la candela y de otras unidades como el lumen o el lux) se han intercomparado varias veces (Fehlmann et al 2012), de forma que la trazabilidad al WRR garantiza la trazabilidad al SI. Aunque existe actualmente alguna discrepancia entre ambas escalas, la WMO y el CIPM están trabajando para que estén adecuadamente alineadas, posiblemente mediante la redefinición de la escala de irradiancia solar en base a radiómetros criogénicos como el CSAR (*Cryogenic Solar Absolute Radiometer*) (Martin y Fox 1993) que, en combinación con el MITRA (*Monitor for Integrated Transmittance*) (Walter et al 2014), permiten alcanzar incertidumbres del orden de 150 ppm en la medida de DNI.

CALIBRACIÓN DE PIRHELÍOMETROS SEGÚN ISO 9059:1990

La Norma ISO 9059 establece procedimientos para la calibración de pirheliómetros, tanto entre un radiómetro absoluto y un pirheliómetro patrón de referencia, como entre pirheliómetros de igual o distinto nivel metrológico. Una adaptación en plena concordancia con ISO 9059 es la Norma ASTM E816–15. En el PVLab-CIEMAT se llevan a cabo dos procedimientos de calibración en exterior de pirheliómetros en base a estas normas, y a métodos de validación y filtrado de datos aplicados en los IPC: un procedimiento para calibración de pirheliómetros patrón (de Clase A) frente a los ACRs, que son la referencia primaria del laboratorio, y otro para la calibración de pirheliómetros de cualquier clase frente a esos pirheliómetros patrón.

En general, los dos pirheliómetros (DUT y referencia), junto a un tercero usado como dispositivo de control, se fijan en un seguidor solar a dos ejes de forma que apuntan directamente al Sol de forma continua. Las señales de los pirheliómetros y sus temperaturas de operación, junto a las variables climáticas (temperatura ambiente, dirección y velocidad del viento, presión atmosférica), se registran en intervalos de 30 s mediante un *datalogger* y una estación meteorológica situada en el área de calibración en la terraza del edificio. Los instrumentos permanecen en régimen de medida ininterrumpido durante varios días, hasta que se dispone de datos suficientes para el cálculo de la sensibilidad. Las ventanas de los instrumentos se limpian diariamente durante el período de calibración. Al final o al inicio de este período, se registran también las señales de *offset* (señal a irradiancia nula) durante varias horas, ocultando las ventanas de los pirheliómetros de la luz solar.

Posteriormente, se analizan y procesan los datos experimentales, excluyendo valores anormales, distorsionados o erróneos, aquellos con irradiancias DNI por debajo de $700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ y aplicando otra serie de filtros (referidos a la estabilidad de la irradiancia, al índice de turbidez atmosférica, la velocidad del viento, etc). Se requiere un mínimo de 300 puntos válidos, obtenidos en 3 días de calibración distintos, con una contribución mínima del 10% para cada día en el conjunto total de datos, y con una distribución de [mínimo 40% | máximo 60%] para datos medidos por la mañana y por la tarde. A partir del conjunto de N datos válidos, se calcula la sensibilidad final del dispositivo bajo ensayo como el promedio de las sensibilidades individuales:

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i = \frac{1}{N} S_R \sum_{i=1}^N \frac{V_i - V_0}{V_{Ri} - V_{R0}} \quad (1)$$

donde V_i , V_0 son las señales de salida del pirheliómetro bajo ensayo y su *offset*, V_{Ri} , V_{R0} son las del patrón de referencia, y S_R es su sensibilidad. Opcionalmente, puede no tenerse en cuenta el *offset* registrado para el cómputo de la sensibilidad a costa de incrementar la incertidumbre final $U(S)$.

Fruto de la experiencia en la aplicación de este procedimiento, se ha ido incorporando la práctica habitual de medir la temperatura de operación de todos los pirheliómetros bajo ensayo, incluidos aquellos que no disponen de sensor interno de temperatura, simultáneamente a sus señales de salida. Esta medida permite hacer una estimación de la influencia de la temperatura en la sensibilidad del instrumento y analizar posibles desviaciones en los resultados encontrados. La cuestión es que, mientras esta aproximación está contemplada en la norma ISO9847 para calibración de piranómetros, no aparece en absoluto en la ISO 9059 para el caso de los pirheliómetros.

En ISO9847:1992 se admite la posibilidad de corregir las sensibilidades que varían con la temperatura T y referirlas a una temperatura de referencia T_0 (aunque no se especifica en la norma). La dependencia de la sensibilidad de los piranómetros con T se expresa mediante un modelo lineal y un coeficiente térmico relativo α_R en la forma:

$$S(T) = S(T_0) \cdot [1 + \alpha_R \cdot (T - T_0)] \quad (2)$$

donde α_R viene expresado en $^{\circ}\text{C}^{-1}$ o en K^{-1} (de forma uniforme con T). De acuerdo a la experiencia del PVLab, la sensibilidad de los pirheliómetros responde al mismo modelo matemático y la ecuación (2) puede aplicarse igualmente para corregir sus sensibilidades medidas a diferentes T o para calcular sus coeficientes relativos α_R .

De cara a la aplicación de este método han de tenerse en cuenta algunos detalles. La *respuesta en temperatura* está definida en la norma ISO 9060:2018 (sección 4.3.2) como la dependencia de la *responsividad* o sensibilidad del instrumento con la temperatura *del cuerpo* del radiómetro. En las tablas de esta misma norma ISO 9060 donde se especifican las clases de los piranómetros y pirheliómetros y los intervalos de aceptación correspondientes, la respuesta en temperatura (c5) se define como “el porcentaje de desviación debido a un cambio en la temperatura *ambiente* en el intervalo entre -10°C y $+40^{\circ}\text{C}$ con respecto a su *señal* a $+20^{\circ}\text{C}$ ”. La Tabla 16 es un extracto de la norma con esta clasificación para los radiómetros. Como la norma se refiere indistintamente a la temperatura ambiente y a la temperatura del cuerpo del radiómetro, entendemos que se asume que los instrumentos estarán en equilibrio térmico con respecto a la temperatura ambiente. También se trata de forma indistinta la dependencia con la temperatura de la sensibilidad o de la señal de salida, por lo que entendemos que también se asume que ambas son proporcionales igualmente a ΔT .

Tabla 1. Intervalos de aceptación en la clasificación de piranómetros y pirheliómetros de acuerdo con ISO 9060:2018 referidos a la respuesta en temperatura (parámetro c5) en el intervalo entre -10°C a $+40^{\circ}\text{C}$. La correspondencia con las clases o denominaciones de la antigua ISO 9060:1990 es solo aproximada.

Clase ISO9060:2018	Nombre de las Clases e intervalos de aceptación			
	AA	A	B	C
Equivalencia con ISO9060:1990 (aprox)	—	<i>Secondary Standard</i>	<i>First class</i>	<i>Second class</i>
Piranómetros	—	$\pm 1\%$	$\pm 2\%$	$\pm 4\%$
Pirheliómetros	$\pm 0,01\%$	$\pm 0,5\%$	$\pm 1\%$	$\pm 5\%$

Aunque siempre es complicado escoger una temperatura de referencia T_0 válida universalmente, la norma ISO9060:2018 se refiere, aunque sea de forma indirecta, a $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$ cuando establece los criterios de clasificación para la respuesta en temperatura tanto de piranómetros como de pirheliómetros. Por esta razón, y por ser una temperatura de operación comúnmente registrada en los pirheliómetros (en algún momento del día) en campañas de calibración en nuestras instalaciones en cualquier época del año, se toma en el PVLab como valor de consigna.

La segunda incógnita se refiere a cuál es la temperatura T que debe usarse en (2), especialmente para instrumentos que no tienen incorporado un sensor interno de temperatura junto al sensor de irradiancia. Una posibilidad es usar la temperatura ambiente (registrada, como es nuestro caso, en una estación meteorológica situada en la zona de calibración). Sin embargo, siempre existe la duda sobre cuál es la temperatura local de operación de los pirheliómetros o su diferencia con respecto al sensor de la estación meteorológica (una Pt100 insertada en una carcasa que apantalla al sensor del viento, de la radiación directa y de la lluvia). Aunque en las primeras fases se comenzó utilizando esta temperatura ambiente para aquellos pirheliómetros bajo ensayo que no disponían de sensor interno, finalmente se ha adoptado la práctica sistemática de adherir un sensor de temperatura externo (tipo Pt1000) al cuerpo de estos pirheliómetros, en una zona próxima al elemento sensor de irradiancia (ver Fig 7). Así, siempre se realiza una medida de su temperatura *externa*, simultánea al registro de su señal de salida (utilizando un sensor T individual para cada DUT). Esto permite obtener un valor (aproximado) del coeficiente α_R de variación relativa de S con la temperatura y hacer una primera valoración sobre si los cambios en la sensibilidad se pueden deber a un efecto térmico o si puede tener otras causas. Para los pirheliómetros dotados de sensor interno de T y que tienen su señal o los terminales del sensor accesibles a través de su conector de forma analógica, se usa directamente esta señal en el sistema de registro. En estos casos, el valor del coeficiente α_R es mucho más realista, a falta de tener una calibración del propio sensor interno de temperatura (desviación, incertidumbre, etc).



Fig 2. Detalles sobre la colocación de sensores de temperatura T externos (tipo Pt1000), adheridos al cuerpo de los pirheliómetros (que carecen de sensor interno de T) durante su calibración. El sensor externo se coloca en una zona del cuerpo próxima al sensor de irradiancia del pirheliómetro y de forma que quede apantallado de la irradiancia solar directa.

RESULTADOS OBTENIDOS Y DISCUSIÓN

La Fig 8 muestra un ejemplo de la sensibilidad obtenida en la calibración de dos pirheliómetros de Clase B durante varios días de ensayo, una vez filtrados y eliminados los datos con baja irradiancia, los valores anómalos y los periodos de inestabilidad (nubes, viento, etc). No se trata de un comportamiento generalizado para todos los pirheliómetros de esa clase, se trata simplemente de dos casos especialmente escogidos (con comportamientos opuestos) para demostrar la aplicación del método y los problemas asociados al cálculo de la sensibilidad.

Puede observarse cómo en ambos casos existe una evolución en las sensibilidades calculadas a distintas horas y para distintos días, aunque en distinto sentido. En el primer caso, la sensibilidad calculada disminuye a lo largo del día y tiene a recuperarse ligeramente. En el segundo caso, la sensibilidad aumenta a lo largo del día, estabiliza y parece tender a reducirse de nuevo. Obsérvese que el primer pirheliómetro está calibrado a finales de febrero y el rango de temperaturas registradas abarca desde 5°C a 25°C. El segundo pirheliómetro está calibrado en septiembre y las temperaturas de operación oscilaron entre los 15°C a casi 35°C. Dada la evolución natural de la temperatura ambiente a lo largo del día, estos comportamientos inducen a pensar en una posible dependencia de S con T . El segundo gráfico en la Fig 8 (columna central de la figura) muestra para ambos instrumentos cómo, efectivamente, existe una correlación de tipo lineal entre S y la temperatura del sensor (medida en la parte exterior del cuerpo) y que puede calcularse un coeficiente α_R aproximado de la pendiente de la recta mediante un ajuste por mínimos cuadrados.

En la columna de la derecha de la Fig 8 se ha vuelto a calcular la sensibilidad $S(T_0)$ de cada pirheliómetro corregida a la temperatura de referencia ($T_0 = 20^\circ\text{C}$) a partir de la ecuación (2) usando el valor aproximado de α_R calculado en el paso anterior. Como se puede apreciar, se obtienen valores de S corregidos a una misma temperatura que son mucho más homogéneos y estables, independientes de la hora del día y con dispersiones experimentales muchísimo más pequeñas. La Tabla 2 recoge los resultados numéricos de estas correcciones y sensibilidad calculada a la temperatura de referencia T_0 y sus diferencias con respecto a los valores obtenidos inicialmente.

La principal incógnita, al aplicar este tipo de procedimientos de corrección, es cuál debe ser el valor de sensibilidad a reflejar en el certificado de calibración, y en qué condiciones de referencia. En el caso de PVLab, se procede a usar el valor promedio de S obtenido, tal como indica la Norma ISO 9060, sin usar correcciones en T , y se informa al cliente sobre la situación detectada y la dependencia calculada con la temperatura. Pero sería muy interesante que las Normas de calibración incluyeran algún tipo de procedimiento de corrección a aplicar, o al menos, una temperatura de referencia a la que declarar el valor de S , aunque no fuera con carácter obligatorio. Esto sería también útil a efectos de comparar sensibilidades obtenidas en situaciones climáticas diferentes, a lo largo del tiempo o por distintos laboratorios. También sería conveniente recomendar a los fabricantes que incluyeran un sensor de temperatura en todos sus radiómetros.

Tabla 2. Comparación entre los resultados obtenidos para los dos pirheliómetros tomados como caso de estudio.

	Pyrh-1	Pyrh-2
Nº de datos válidos	4643	3886
T media durante la (re)calibración	18.44°C	27.85°C
S sin corrección por T ($\mu\text{V}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^2$)	10.504 ($\sigma = 0.0364$)	9.0137 ($\sigma = 0.0471$)
S con corrección por T , $S(T_0)$ ($\mu\text{V}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^2$)	10.495 ($\sigma = 0.0077$)	8.9326 ($\sigma = 0.0042$)
α_R ($^\circ\text{C}^{-1}$) aproximado	-5.626×10^{-4}	$+1.087 \times 10^{-3}$
c5. Respuesta aproximada en temperatura (entre -10° a $+40^\circ\text{C}$) según ISO 9060:2018	2.81%	5.44%

Como se ve en ambos ejemplos, el parámetro de respuesta en temperatura excedería el intervalo de $\pm 1\%$ permitido para clasificar los instrumentos como de Clase B. Sin embargo, no puede hacerse esta afirmación porque no se ha medido el instrumento en el rango completo (desde -10° hasta $+40^\circ\text{C}$), la estimación se basa en un coeficiente calculado en un intervalo de temperaturas más estrecho y, finalmente, porque la temperatura medida en el cuerpo del pirheliómetro puede no ser representativa de la temperatura real del sensor. A pesar de todas estas prevenciones, los valores encontrados son indicativos de que la sensibilidad de los sensores tiene una dependencia excesiva con la temperatura y que probablemente convendría realizar un ensayo específico para confirmarlo.

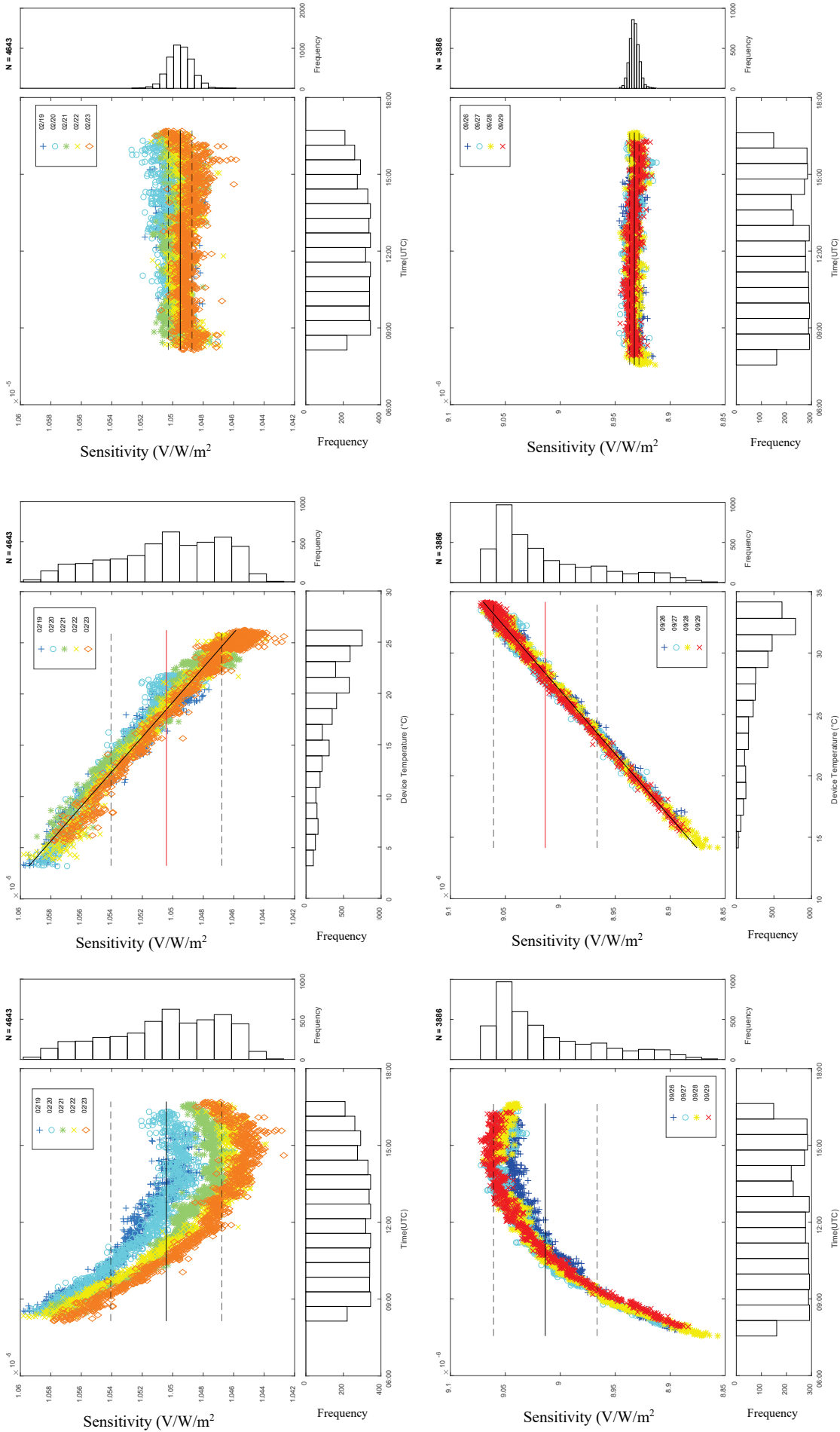


Fig 3. Ejemplos de aplicación del método de corrección propuesto, en dos pirheliómetros con coeficiente negativo (arriba) y con coeficiente positivo (abajo). (Izquierda) Sensibilidad calculada respecto hora (UTC) del día. (Centro) Sensibilidad obtenida frente a temperatura (del cuerpo del radiómetro) y regresión para estimar el coeficiente relativo α_R tomando $T_0 = 20^\circ\text{C}$. (Derecha) Sensibilidad corregida por temperatura a partir de los mismos datos experimentales. En los gráficos, la línea continua representa el valor medio de S y las líneas punteadas el intervalo 1σ . Se ha mantenido la misma escala en el eje y para cada sensor a efectos de comparación.

Una consecuencia inmediata es que la medida de la DNI que realizan estos sensores en sus plantas y/o en sus sistemas de monitorización puede estar afectada por una diferente sensibilidad obtenida en (re)calibraciones realizadas en distintos periodos del año, y por la propia dependencia de la sensibilidad con T . Por ejemplo, supongamos que el pirheliómetro Pyrh-2 de la Tabla 17, con $\alpha_R > 0$, cuya sensibilidad se ha (re)calibrado en verano, está trabajando en invierno a una temperatura de $\sim 10^\circ\text{C}$. La sensibilidad correcta en estas condiciones sería aproximadamente un 2% inferior al valor reflejado en su certificado de calibración. Por tanto, en esas condiciones este sensor estaría subestimando la irradiancia DNI en la misma proporción, esto es, un 2% más baja del valor real. Dependiendo de las necesidades del sistema de monitorización o de la aplicación en la que se utiliza el sensor, esta desviación puede tener mayor o menor impacto. La magnitud del error dependería en cada caso del valor del coeficiente α_R , del rango de temperaturas durante el periodo de calibración y de la diferencia ΔT en cada momento respecto al valor de referencia. Para minimizar este error, y en el caso de no poder realizar correcciones por efecto de la temperatura de operación del pirheliómetro, lo mejor sería (re)calibrarlo en una época en la que su temperatura sea representativa o lo más cercana posible a la temperatura media de su emplazamiento final a lo largo del año durante las horas de insolación.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha comprobado cómo los resultados de la calibración de algunos pirheliómetros, cuya sensibilidad depende de forma evidente con la temperatura, puede mejorar notablemente mediante un método de corrección sencillo que ya se contempla para el caso de piranómetros en la norma ISO9847. De cara a su uso en sistemas de monitorización o en plantas de conversión solar, y para los propios laboratorios de ensayo, el uso de un sensor de temperatura, incluso de forma externa adherido al cuerpo del pirheliómetro, permite realizar estas correcciones en caso necesario. En cualquier caso, sería recomendable que los propios fabricantes dotaran a todos los pirheliómetros de sensores internos de temperatura en todos sus sensores de irradiancia.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está parcialmente financiado por el proyecto DEPRISACR, “Desarrollo de patrones Primarios de Irradiancia Solar basados en Radiómetros Absolutos de Cavidad (ACR)”, Programa Estatal de Fomento de la Investigación Científica y Técnica de Excelencia, Subprograma Estatal de Generación de Conocimiento, convocatoria 2017 (Referencia CGL2017-87299-P).

REFERENCIAS

- Balenzategui J.L., Fabero F., Silva J.P. (2019). Solar Radiation Measurement and Solar Radiometers. Chapter 2 in *Solar Resources Mapping*, Polo J. et al. (eds.), pp 15-69. Springer Nature Switzerland AG 2019.
- Balenzategui J.L., De Lucas J. *et al* (2020). Caracterización de Radiómetros Absolutos de Cavidad como Patrones Primarios de Irradiancia Solar. *Actas del XVII Congreso Ibérico y XIII Congreso Iberoamericano de Energía Solar*, 3-5 Noviembre, Lisboa, Portugal. *In Press*.
- Fehlmann A. et al. (2012). Fourth World Radiometric Reference to SI radiometric scale comparison and implications for on-orbit measurements of the total solar irradiance. *Metrologia* 49, S34–S38.
- ISO 9059:1990. Solar energy – Calibration of field pyrheliometers by comparison to a reference pyrheliometer. 1st edition (1990). International Organization for Standardization.
- ISO 9060:2018. Solar energy – Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation. 2nd edition (2018). International Organization for Standardization.
- ISO 9847:1992. Solar energy – Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer. 1st edition (1992). International Organization for Standardization.
- ISO TR 9901:1990. Solar energy – Field Pyranometers – Recommended practice for use. 1st edition (1990). International Organization for Standardization.
- Martin J.P. y Fox N.P. (1993). Cryogenic Solar Absolute Radiometer (CSAR). *Metrologia* 30, 305-308.
- Walter B. Fehlmann A., Finsterle W., Suter M., Soder R., Schmutz W. (2014) Spectrally integrated window transmittance measurements for a cryogenic solar absolute radiometer. *Metrologia* 51, S344–S349.