

**CARACTERIZACIÓN DE RADIÓMETROS ABSOLUTOS DE CAVIDAD
COMO PATRONES PRIMARIOS DE IRRADIANCIA SOLAR****Balenzategui J.L.*, De Lucas J.**, Cuenca J.*, Molero M.*, Fabero J.F.*,
Mejuto E.*, Silva J.P.*, González-Leiton A.*, Conde F.**, Hernández P.****

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

Avenida Complutense, 40 – 28040 Madrid. Tel. +34 91 496 2509 || jl.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/cies2020.1.6111>

RESUMEN

Los radiómetros absolutos de cavidad (ACR) son los instrumentos de mayor nivel metrológico para la medida de la irradiancia solar directa (DNI), que trabajan según el principio de sustitución eléctrica. Para asegurar su trazabilidad, se comparan (cada 5 años) contra el grupo de patrones WSG que materializan la referencia radiométrica mundial WRR en el PMOD/WRC (Davos, Suiza). Sin embargo, también pueden caracterizarse de forma absoluta mediante la calibración, el modelado y cálculo numérico de todos sus componentes, en base a una ecuación o función de medida, para obtener su incertidumbre total de medida. Este artículo describe distintas tareas realizadas en la caracterización de dos ACR y los resultados preliminares encontrados. En el caso del Eppley AHF, se han calibrado las magnitudes eléctricas y el área de la apertura de precisión, se han determinado la absorptancia y el factor de no-equivalencia, así como la dependencia de la corriente en el circuito calefactor de la cavidad con la temperatura. Con estos resultados se esperan alcanzar los objetivos de una incertidumbre inferior a 1000 ppm en DNI y la trazabilidad directa al SI.

PALABRAS CLAVE: Radiometría, metrología, irradiancia, calibración, pirheliómetro, trazabilidad

ABSTRACT

Absolute Cavity Radiometers (ACR) are the instruments, working under the principle of electrical substitution, of the highest metrological level for measuring Direct Normal Irradiance (DNI). To ensure their traceability, they are compared every 5 years in PMOD/WRC (Davos, Switzerland) to the group of standards WSG realizing the World Radiometric Reference WRR. However, they can also be characterized in an absolute way through the calibration, modelling and numeric simulation of all their components, based on a measurement function, and obtaining their total measurement uncertainty. This paper describes different labors carried out in the characterization of two ACRs and the preliminary results obtained. In the case of the Eppley Labs' AHF radiometer, the electrical magnitudes and the precision aperture area have been calibrated, effective absorptance and non-equivalence factor have been determined, as well as the dependence on temperature of the electrical current in the heater of the ACR cavity. With these results, the objectives of an uncertainty below 1000 ppm in DNI and the direct traceability to SI can be achieved.

KEYWORDS: Radiometry, metrology, irradiance, calibration, pyrhelimeter, traceability

INTRODUCCIÓN

Los radiómetros absolutos de cavidad (ACR, de *absolute cavity radiometer*) son los instrumentos más precisos para la medida de la irradiancia solar directa a nivel terrestre y de la TSI (*Total Solar Irradiance*) en el espacio. Son los pirheliómetros con mayor nivel metrológico en la escala de irradiancia solar y se consideran como la realización práctica (*mise en pratique*) de la unidad del W/m^2 . Están designados como patrones primarios en la Guía WMO CIMO (CIMO Guide 2017) y como instrumentos de Clase AA en la norma ISO 9060:2018 (ISO9060).

El funcionamiento de estos radiómetros de cavidad se basa en el *principio de sustitución eléctrica*: el calentamiento producido por la radiación solar en el receptor y el calentamiento producido en el mismo receptor mediante una corriente eléctrica son equivalentes. Es decir, la potencia radiante y la potencia eléctrica son equivalentes, indistinguibles o sustituibles a efectos de calentar un receptor de radiación.

Los ACR usan receptores en forma de cavidad, con formas diversas, aunque normalmente con simetría cilíndrica (similares a las de cuerpos negros). Incorporan sensores diferenciales de temperatura o de flujo térmico que se miden eléctricamente (termopilas, resistencias, etc). Adherido a la cavidad, por su parte interna, hay un pequeño elemento calefactor en forma de hilo arrollado. El modo de operación de los radiómetros absolutos se basa en exponer y ocluir la cavidad a la radiación solar de forma intermitente o periódica mediante un obturador electromecánico, y conseguir que el flujo térmico o la diferencia de temperaturas (entre la cavidad frontal y un punto de referencia) se mantenga igual entre ambas fases, mediante la inyección de una corriente eléctrica (adicional) en el calefactor. Así, la diferencia en las potencias eléctricas consumidas entre ambas fases, la abierta (expuesta al Sol) y la cerrada (o de auto-calibración), es proporcional a la potencia radiante recibida. Existen instrumentos de tipo *activo*, en los que siempre hay una corriente eléctrica inyectada en el circuito calefactor (aunque diferente entre las fases abierta y cerrada), e instrumentos de tipo *pasivo*, en los que la corriente solo se inyecta durante la fase cerrada (ver Fig 1).

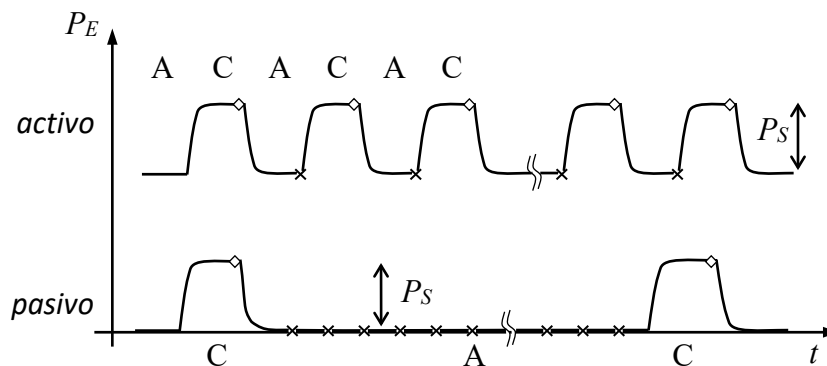


Fig 1. Modos esquemáticos de operación para radiómetros absolutos de tipo activo y pasivo, y estimación de la potencia radiante P_S a partir de la diferencia entre las potencias eléctricas P_E , durante las fases abierta (A) y cerrada (C). Las marcas 'x' representan cuándo se obtienen valores experimentales de irradiancia mientras que en '◇' se miden valores de referencia (fase de auto-calibración).

La sensibilidad absoluta del ACR y sus desviaciones respecto a ese comportamiento ideal pueden determinarse por dos medios: 1) por su **calibración por comparación** frente a un patrón de referencia, o 2) por la **caracterización** completa del instrumento, mediante medidas en laboratorio, cálculo numérico o modelado, y la calibración individual de algunos de sus componentes. En la práctica, salvo para el fabricante de cada instrumento particular, es muy difícil para un laboratorio acometer la tarea por la vía de la caracterización y se prefiere aplicar el primer método por su mayor simplicidad.

Como estrategia, el Comité Ejecutivo del WMO estableció en 1976 la Referencia Radiométrica Mundial (WRR, *World Radiometric Reference*), definida a partir del valor medio de irradiancia determinada por un grupo especial de radiómetros absolutos (Fröhlich 1991), el WSG (*World Standard Group*). Cada radiómetro del WSG es una realización práctica de la unidad de irradiancia ' W/m^2 '. Es una escala basada en un 'artefacto' pero reconocida por consenso internacional como la referencia para medidas de irradiancia solar, y su trazabilidad al SI se ha analizado periódicamente (Fehlmann et al 2012). Cada 5 años se organizan Comparaciones Internacionales de Pirheliómetros (IPC) en el instituto WRC/PMOD (Davos, Suiza) encargado por la WMO de mantener el WSG, para diseminar la referencia WRR al resto de radiómetros absolutos de laboratorios e instituciones a nivel mundial, y para validar la estabilidad del WSG. En esta comparación IPC, para cada ACR participante se calcula un factor de desviación (y su incertidumbre) respecto a la irradiancia determinada por el WSG, que el operador del ACR debe aplicar posteriormente en sus medidas para que sus valores de irradiancia reproduzcan y sean trazables al WRR.

Sin embargo, la caracterización de un ACR (la segunda vía) constituye una tarea de investigación necesaria, interesante y conveniente para conocer en profundidad las características de cada radiómetro, determinar su incertidumbre de medida absoluta, averiguar el origen de sus desviaciones del comportamiento ideal, y analizar las posibilidades de mejora del instrumento. El PVLab-CIEMAT, en colaboración con el INTA, ha emprendido esta tarea para el caso de dos radiómetros absolutos que son la referencia primaria para la calibración de sus patrones de irradiancia solar: un radiómetro AHF de Eppley Labs (USA) y un radiómetro PMO6 de Davos Instruments / PMOD (Suiza). En este trabajo se presentan algunos de los resultados obtenidos en esta tarea de caracterización y se extraen algunas conclusiones y lecciones sobre su funcionamiento y sobre la propia tarea de investigación.

CARACTERIZACIÓN DE UN RADIÓMETRO ABSOLUTO

La caracterización de un ACR se basa en una ecuación o *función modelo de medida* que relaciona la irradiancia solar directa E con el valor de las magnitudes físicas que se miden durante su operación y de un conjunto de constantes características del instrumento. Esta ecuación matemática es específica para cada modelo (comercial) de radiómetro absoluto, pero las constantes son propias de cada instrumento particular. La tarea de caracterización involucra tanto a la calibración de los sistemas de medida del instrumento como a la determinación o estimación de esas constantes.

En el caso del radiómetro PMO6, de tipo activo, la función de medida computa la diferencia entre las potencias medidas durante las fases abierta P_O y cerrada P_C para calcular la irradiancia E en la forma (Brusa y Fröhlich 1986):

$$E = C \cdot (P_C - P_O) = \frac{1}{A} \cdot C_{DF} \cdot C_{SC} \cdot C_{RL} \cdot C_{NE} \cdot C_{AH} \cdot C_{LH} \cdot (P_C - P_O) \quad (1)$$

donde C es un factor de caracterización o de calibración. Idealmente, $C = 1/A$, siendo A es el área de la apertura de precisión (situada a la entrada de la cavidad). Pero en la práctica existen varias desviaciones posibles del comportamiento ideal que se pueden analizar como factores (de ganancia o de pérdida) independientes: C_{DF} es el factor de difracción, C_{SC} el de dispersión (*scattering*), C_{RL} para las pérdidas radiativas, C_{NE} es el factor de no-equivalencia, C_{AH} el de calentamiento de la apertura (dilatación) y C_{LH} el factor por calentamiento de los cables. Las potencias eléctricas inyectadas en la resistencia calefactora en ambas fases se determinan a partir de la tensión V_H y la corriente I_H en la resistencia calefactora, que se mide por la caída de tensión V_{SH} en una resistencia de precisión (*shunt*) de valor conocido, R_{SH} .

En el caso del AHF, de tipo pasivo, el elemento sensor es una termopila en forma toroidal que está en contacto térmico estrecho con la cavidad receptora. Mediante un multímetro multicanal se mide la tensión de salida de la termopila durante la fase abierta V_{TS} y durante la fase cerrada V_{TE} , así como su offset V_{T0} . Durante la fase cerrada, también se mide la potencia eléctrica inyectada ($I_H \cdot V_H$) en la resistencia calefactora, teniendo en cuenta las pérdidas por conducción en los cables, con resistencia R_C . Finalmente, la irradiancia E viene determinada por (Manual AHF 2010):

$$E = \frac{L}{A \cdot \alpha_c \cdot \gamma} \cdot \left(\frac{V_{TS} - V_{T0}}{V_{TE} - V_{T0}} \right) \cdot I_H (V_H - I_H R_C) \quad (2)$$

donde L es el factor de no-equivalencia, α_c es la absorptancia efectiva de la cavidad, A es el área de la apertura y γ es un factor de calidad óptico del sistema (incluyendo el efecto del colimador).

Como puede apreciarse, existen elementos y conceptos comunes, asimilables o equivalentes entre ambos radiómetros mientras otros aspectos son particulares de cada instrumento (por el tipo de sensor, por su forma de operación, etc). Algunos factores están más expandidos o contraídos en una ecuación y en otra, pero ambos deben tener en cuenta pérdidas o ganancias similares para calcular la irradiancia. En todo caso, se ha respetado para cada instrumento la nomenclatura original usada por sus fabricantes. Adicionalmente, hay que tener en cuenta que los elementos sensores y los instrumentos de medida pueden tener derivas o dependencias con la temperatura (explícitas o implícitas) que deben evaluarse para poder hacer correcciones según las condiciones de operación.

Para no dispersar el análisis sobre los distintos factores y sus influencias, este trabajo se centra en la caracterización del AHF como caso particular. También se ha preferido centrar la exposición en determinados componentes que resultan más ilustrativos sobre los progresos de la investigación y sus resultados. Los elementos que resultan más fáciles de caracterizar en la ecuación (2) se refieren a las magnitudes eléctricas, en la parte derecha de la ecuación. Esto se ha realizado mediante la calibración del multímetro que se utiliza para la medida de estas magnitudes (V_{TS} , V_{TE} , V_{T0} , V_H , V_{SH}), de la resistencia de los cables R_C y de la resistencia shunt R_{SH} . El área A de la apertura de precisión se ha calibrado en el Área de Longitud del CEM (Centro Español de Metrología). Los otros términos característicos, L , α_c y γ , son mucho más complejos de caracterizar y en algunos casos, debe recurrirse al cálculo y simulación en base a sus propiedades físicas para determinar su valor y estimar su incertidumbre asociada. Se presentan a continuación algunos resultados sobre la estimación del factor de no-equivalencia L y la linealidad de la termopila, sobre la caracterización de la resistencia shunt R_{SH} y su dependencia con la temperatura, y sobre el cálculo de la

absortancia efectiva de la cavidad. Se analiza posteriormente cómo pueden influir los resultados de esta caracterización en la medida de la irradiancia DNI en relación con la vía alternativa de *calibración por comparación*.

El factor de no-equivalencia L

La señal de salida de la termopila del AHF es, en teoría, lineal con respecto a la diferencia de temperaturas entre los focos caliente y frío (donde se sitúan las uniones) y, por tanto, proporcional a la potencia de la excitación (eléctrica P_E , radiante o solar P_S) recibida por la cavidad frontal, adherida a la termopila en una de sus caras (foco caliente), de forma que puede expresarse:

$$V_{TS} - V_{T0} = k_S \cdot P_S \quad \text{y} \quad V_{TE} - V_{T0} = k_E \cdot P_E \quad (3)$$

donde k_S, k_E son dos constantes. Según el principio de equivalencia, idealmente, si las potencias de ambas fuentes son iguales $P_E = P_S$ entonces la respuesta del sistema (termopila) sería la misma, $(V_{TE} - V_{T0}) = (V_{TS} - V_{T0})$, y por tanto $k_E = k_S$. En la práctica, se admite que puede haber pequeñas desviaciones en su realización (por cuestiones de diseño, fabricación, propiedades de los materiales, degradación, etc) y que, en realidad, las constantes pueden ser ligeramente diferentes, $k_E \neq k_S$, pero relacionadas entre sí mediante un factor L , el factor de no-equivalencia:

$$k_E = L \cdot k_S \quad \leftrightarrow \quad L = k_E / k_S \quad (4)$$

Para evaluar este factor de no-equivalencia, que debería tener un valor próximo a 1, deben analizarse por separado las respuestas de la termopila ante las dos excitaciones independientes y calcular k_S, k_E a partir de las relaciones (3).

El comportamiento de la termopila para distintos niveles de potencia eléctrica se ha estudiado mediante un calibrador Fluke 5520A que se ha utilizado para polarizar el circuito calefactor de la cavidad, con el radiómetro y su sistema de medida emplazados en el laboratorio de calibración a temperatura ambiente de $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$. Una vez estabilizada la señal de la termopila para cada potencia, se mide la corriente I_H que circula por el circuito calefactor y la tensión en sus bornas V_H , y se calcula la potencia eléctrica $P_E = I_H \cdot V_H - I_H^2 \cdot R_C$ descontando la caída parásita en los cables de conducción. Se ha podido comprobar que, efectivamente, la termopila se comporta de forma lineal con la potencia eléctrica inyectada. La Fig 2.a muestra los resultados de la regresión lineal $(V_{TE} - V_{T0})$ frente a P_E para obtener una pendiente $k_E = 0.022\ 8121$ (V/W) de la recta.

Por otro lado, para determinar la respuesta de la termopila ante una potencia radiante variable, se han utilizado por el momento los datos experimentales de la señal $(V_{TS} - V_{T0})$ recogidos durante la última intercomparación IPC (2015) en la que participó el radiómetro AHF, y los valores de la irradiancia de referencia del WSG durante la misma intercomparación, medidos de forma totalmente independiente por el PMOD. Para obtener la potencia radiante a partir de los valores de irradiancia absoluta, se ha usado el valor del área de la apertura frontal, calibrada en el CEM, con un valor de $A = (50.183 \pm 0,015) \text{ mm}^2$. Se constata que, en el rango de irradiancias proporcionadas por PMOD, la termopila también se comporta linealmente con respecto a la potencia radiante recibida por la cavidad. Un ajuste lineal (ver Fig 2.b) de $(V_{TS} - V_{T0})$ frente a P_S permite obtener a su vez $k_S = 0.022\ 6144$ (V/W).

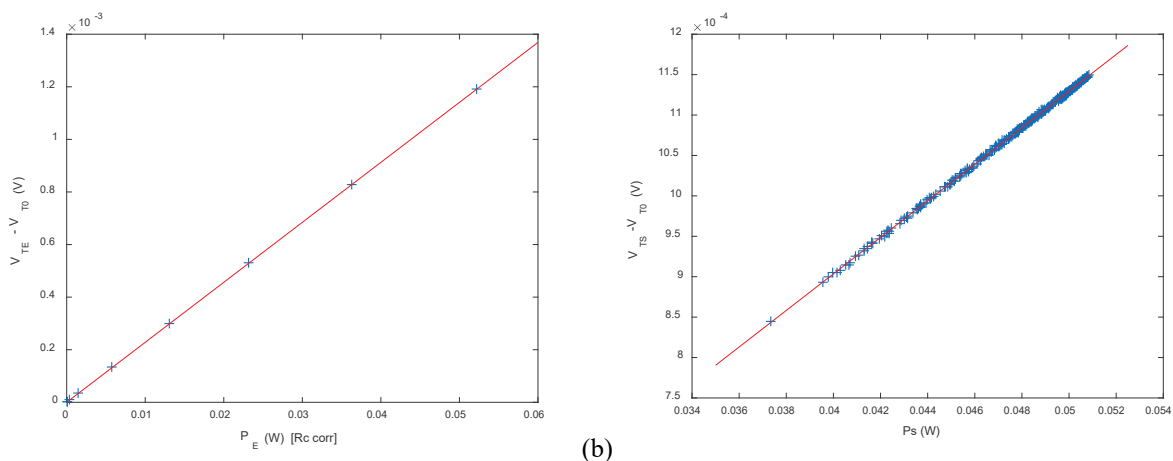


Fig 2. (a) Respuesta lineal de la termopila a distintas potencias eléctricas inyectadas en el circuito calefactor.
(b) Cálculo de la respuesta de la termopila al ser iluminada con luz solar a distintas irradiancias.

Como resultado, se obtiene de (4) un valor del factor de no-equivalencia $L = 1.008\ 743$ con una incertidumbre estimada (a falta de la revisión de algunas contribuciones) en ± 500 ppm ($k=2$), valor algo más alto que el proporcionado por el fabricante ($L = 1.0005$). En la práctica, el valor de L obtenido quiere decir que la termopila daría una señal un 0.87% más alta cuando la excitación en la cavidad es de tipo eléctrico que cuando es de tipo radiante (usando como referencia el WRR) a igualdad de potencia.

La resistencia shunt R_{SH} y su dependencia con la temperatura

La corriente I_H que circula por el circuito calefactor se determina, en el interior del sistema de control del radiómetro AHF, mediante la medida de la caída de tensión en una resistencia *shunt* de precisión de valor nominal $R_{SH} = 10 \Omega$. Se ha tratado por un lado, de calibrar el valor real de su resistencia y por otro, de estimar su coeficiente de temperatura para verificar el cumplimiento de las especificaciones del fabricante a este respecto y además permitir efectuar correcciones por temperatura ambiente durante las medidas de irradiancia solar de forma dinámica.

Para ello, en la unidad de control del radiómetro se instaló un termómetro de resistencia de platino (TRP_s) del tipo Pt100 junto al shunt. El ensayo para medir el coeficiente de temperatura del *shunt* se realizó en el margen de 0 °C a 55 °C utilizando una cámara climática y el montaje de la Fig 3, donde se puede observar el propio *shunt*, el nuevo TRP_s situado junto a él, dos TRP que actúan de patrones de referencia en el ensayo (Pt100₁ y Pt100₂) y el Pt100 de control de la cámara climática.

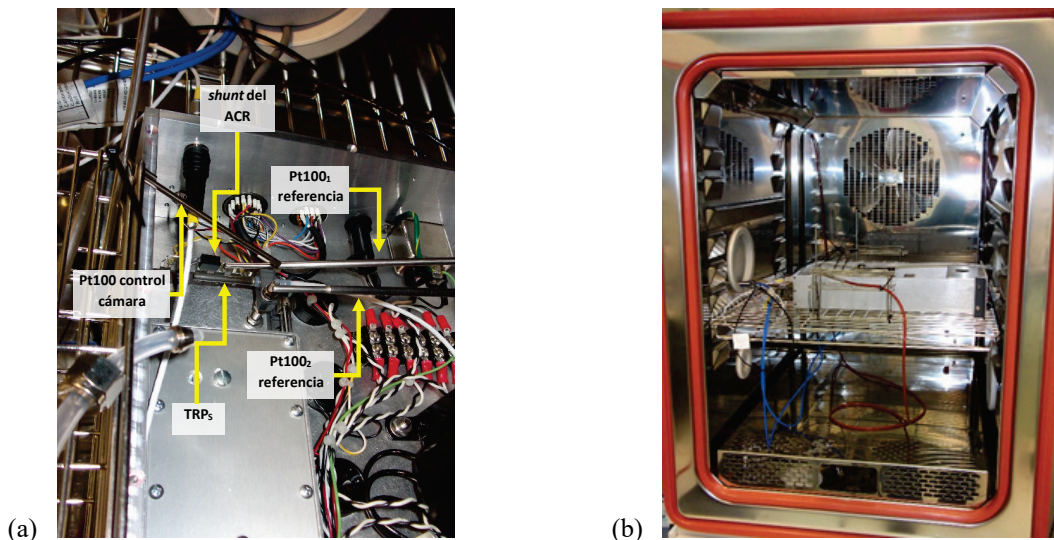


Fig 3. (a) Montaje de un TRP tipo Pt100 junto al shunt del radiómetro y configuración durante el ensayo climático. (b) Cámara climática utilizada, con el equipo a ensayar instalado en su interior.

Previamente, el nuevo TRP_s fue calibrado por comparación con termómetros de resistencia de platino patrón (TRPP) con trazabilidad a la Escala Internacional de Temperatura de 1990 (EIT-90) en baños de temperatura controlada, lo cual permitió alcanzar una incertidumbre máxima de $\pm 0.01 \text{ }^\circ\text{C}$ ($k=2$). Durante el ensayo climático, las medidas de la resistencia del shunt (R_{SH}) fueron realizadas con un multímetro patrón HP 3458A.

Según las especificaciones del fabricante, la tolerancia en el valor de resistencia del *shunt* es del 0.01 % respecto al nominal de 10 Ω , es decir 100 ppm. El *shunt* también fue calibrado previamente para un valor nominal de intensidad de corriente de 17.5 mA y temperatura ambiente de $(23 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$. La intensidad fue determinada considerando el margen de potencia eléctrica medida por el radiómetro en condiciones de uso normal. El valor de resistencia certificado en esta calibración fue de 9.998 69 Ω , con incertidumbre de $\pm 11 \text{ ppm}$ (0.000 11 Ω) ($k=2$).

Con todo ello, los resultados de la Fig 4 muestran que el efecto de la temperatura ajusta muy bien a un polinomio de grado 2, observándose una región entre 35 °C y 40 °C donde la dependencia es mínima, con un coeficiente de temperatura en el *shunt* (pendiente) muy bajo. Las barras de error de la figura, sobre los valores residuales respecto al ajuste, indican la incertidumbre expandida ($k=2$) calculada considerando factores de influencia tales como: calibración de los patrones de temperatura, uniformidad y estabilidad de la cámara climática, reproducibilidad en un punto de control y calibración del 3458A.

La absortancia efectiva de la cavidad del AHF

La cavidad de radiómetro AHF es de tipo cilindro-cónica interior, es decir con el cono orientado hacia el interior de la cavidad. El interior está pintado con el recubrimiento Chemglaze (Aeroglaze) Z302, con una reflectancia cuyas componentes especular y difusa están dadas por: $\rho = \rho_s + \rho_d = 0.05 + 0.01$ (Fox y Rice 2005). Uno de los parámetros fundamentales en el modelo de medida del radiómetro AHF (2) es la absortancia efectiva α_c . Considerando, por hipótesis, que la radiación llega al interior de la cavidad a través de la apertura de precisión únicamente en dirección

paralela al eje de simetría, se ha calculado la absorptancia efectiva integrada normal, aplicando el método de las sumas (Bedford 1974). Para ello se ha dividido la cavidad en secciones perpendiculares al eje y en cada una ellas se ha calculado la absorptancia efectiva local.

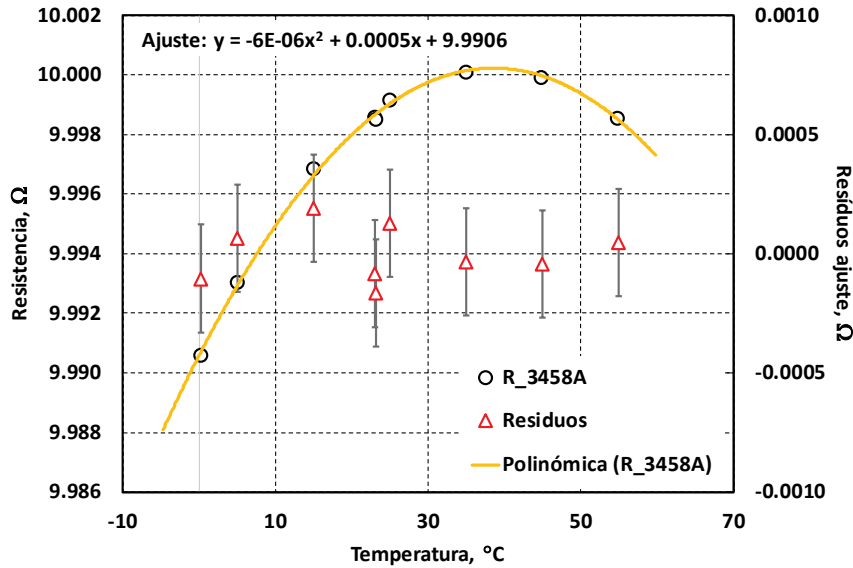


Fig 4. Dependencia de la resistencia shunt R_{SH} (R_3458A, medida con un multímetro HP 3458A) con la temperatura ambiente.

Siguiendo a (Fox y Rice 2005), hemos supuesto que la radiación reflejada inicialmente tiene dos contribuciones. La de tipo difuso, asume que después de la reflexión inicial en el cono, la radiación puede salir de la cavidad por la apertura o ser absorbida en su totalidad por las paredes de la sección cilíndrica, sin que existan más reflexiones. Por otra parte, la reflejada inicialmente de forma especular mantendría este comportamiento en sucesivas reflexiones. Es fácil ver que, después de 5 reflexiones internas, prácticamente toda la contribución especular es absorbida. Finalmente, se calcula α_C integrando sobre valores locales en el cono, en la región iluminada por rayos que atraviesan la apertura de precisión en dirección normal.

Un esquema de la cavidad, con los parámetros geométricos principales, puede verse en la Fig 5 junto a los resultados obtenidos para la absorptancia efectiva local en el cono y en el cilindro.

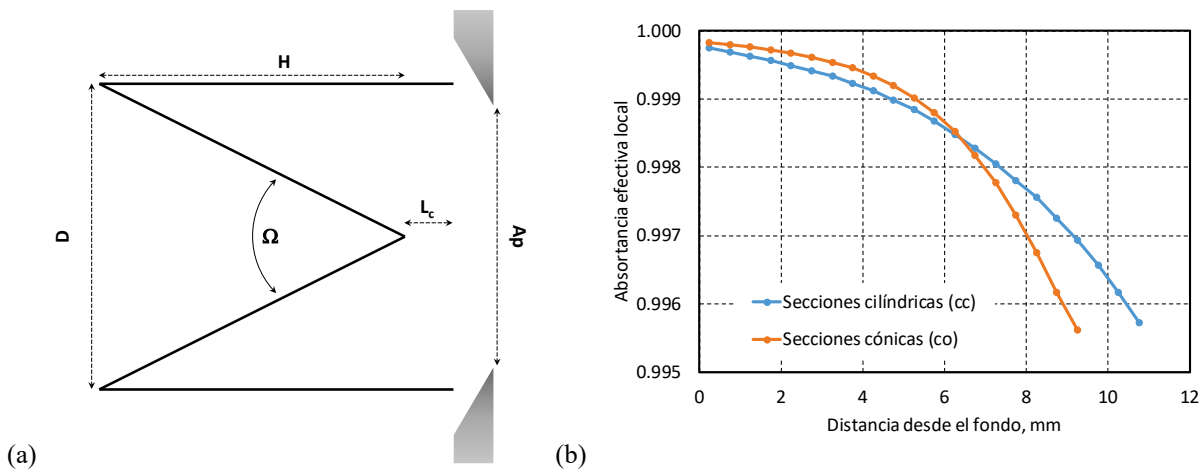


Fig 5. (a) Esquema básico de la cavidad receptora del radiómetro AHF. (b) Estimación de la absorptancia efectiva local en distintas secciones de la cavidad. Se distingue entre secciones del cono y secciones de la parte cilíndrica.

Variando ligeramente los parámetros geométricos, así como la reflectancia de la cavidad, se pudo estimar la incertidumbre $U(\alpha_C)$ aplicando el método de Montecarlo (GUM 2008), asumiendo para ello contribuciones en las variables de entrada del modelo en forma de distribuciones de probabilidad de tipo rectangular. De esta forma se pudo estimar finalmente un valor: $\alpha_C = (0.99912 \pm 0.00011)$ ($k=1.8$), para una probabilidad de cobertura del 95%. El fabricante del radiómetro proporciona en su manual un valor de 0.999 con incertidumbre del 0.1 %, con lo cual nuestro análisis mejora de forma apreciable dicha especificación.

DISCUSIÓN: RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN Y DE COMPARACIÓN

A excepción del factor de calidad óptico γ , el resto de parámetros de la función de medida (2) del AHF estarían adecuadamente caracterizados y calibrados. Adicionalmente, se ha detectado una dependencia con la temperatura en la resistencia *shunt*, que afectaría fundamentalmente a la medida de la corriente I_H , y que es compatible con la variabilidad de la sensibilidad del instrumento con la temperatura durante su operación en las campañas de calibración. Se han realizado ensayos complementarios, no descritos en este artículo, para conocer en profundidad el funcionamiento del sensor, de la electrónica de control y de la operación del sistema en su conjunto. Para el cálculo del factor γ se están teniendo ya en cuenta los mismos factores que en el caso del radiómetro PMO6 (difracción, dispersión, pérdidas radiativas) y que serán detallados en sucesivos trabajos.

A pesar de todos los esfuerzos de investigación, de lo que se ha avanzado en el conocimiento del instrumento y las mejoras introducidas en el mismo, sigue existiendo cierta incógnita sobre el resultado final en términos de incertidumbre y de la trazabilidad de este ACR. Como referencia, el factor WRR obtenido por el AHF durante el último IPC-XII (en 2015) (WMO124 2016) fue de 0.997 318 (con $\sigma = 629$ ppm), estable respecto al valor anterior de 0.997 308 (con $\sigma = 674$ ppm) en el IPC-XI (en 2010) (WMO108 2011). Esto quiere decir que el AHF mide valores de DNI aproximadamente un 0.27% por encima de la referencia WRR antes de efectuar la corrección. Por otro lado, las sucesivas comparaciones entre la escala radiométrica del SI (que realiza la candela y magnitudes asociadas como lúmenes, luxes, etc) y la escala radiométrica del WRR han encontrado que el WRR estaría midiendo valores de irradiancia un 0.34% por encima del SI (Fehlmann et al 2012). Esto situaría la irradiancia determinada con el AHF en aproximadamente un $\sim 0.6\%$ por encima del SI.

En términos prácticos, un valor del factor γ compatible con el factor WRR y con el valor de L calculado anteriormente sería de $\gamma \approx 1.0082$. Como referencia, el fabricante da un valor estimado de $\gamma = 1.0010$ (con 0.1% de incertidumbre) pero que por ahora se desconoce cómo se ha determinado. Esto sin tener en cuenta que las medidas de I_H han podido estar calculadas en exceso, a lo largo de la vida del instrumento, hasta en un 0.5% por encima de su valor real sólo por efecto de la temperatura de R_{SH} , lo que reduciría la *presión* sobre el valor esperado de γ hasta el orden de ~ 1.003 . Con estos valores y las correcciones dinámicas que ahora pueden introducirse en el cálculo de la irradiancia, se espera que el nuevo factor WRR (a obtener en el próximo IPC-XIII) podría ser perfectamente igual a 1. Conseguir alinear los resultados con la escala radiométrica del SI implica necesariamente realizar otra determinación independiente del factor L que no esté basada en la irradiancia del WRR.

En términos de incertidumbre, el objetivo fijado en el proyecto de investigación es ser capaces de medir DNI con $U = \pm 1000$ ppm (0,1%) como máximo. Obtener esta incertidumbre estaría condicionada a conseguir que todas las contribuciones sean inferiores a este valor de referencia y que sus coeficientes de sensibilidad sean también bajos. A la vista de los resultados obtenidos hasta ahora, y pendientes de revisar algunas de las contribuciones, parece que el objetivo puede ser perfectamente alcanzable.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha descrito brevemente el método de caracterización de radiómetros absolutos de cavidad, como alternativa al procedimiento por comparación frente al WRR que se realiza durante las intercomparaciones internacionales de pirheliómetros IPC. Se han puesto dos ejemplos basados en las funciones de medida de los dos ACR con los que cuenta el PVLab-CIEMAT para las calibraciones de sus patrones de referencia.

El trabajo se ha centrado en describir detalles específicos sobre las calibraciones, cálculos y modelos empleados para la determinación de las magnitudes físicas y de las constantes características para uno de los radiómetros, el AHF de Eppley Labs (USA). Se han descrito los métodos empleados para determinar el factor de no-equivalencia L y la absortancia efectiva α_C de la cavidad, que son parámetros que aparecen de forma explícita en su función de medida, y para determinar la dependencia de la resistencia *shunt* R_{SH} con la temperatura, que no figura como magnitud de influencia de forma explícita en esa ecuación.

La determinación de estas magnitudes y de sus incertidumbres permite ser optimistas sobre la trazabilidad entre las medidas de la irradiancia DNI realizadas por el AHF y el WRR una vez terminada la caracterización. Se ha estimado además que el objetivo de conseguir una incertidumbre final por debajo de las 1000 ppm es alcanzable y realista en base a los resultados obtenidos hasta la fecha.

AGRADECIMIENTOS

Esta 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

Manual AHF (2010). Instruction and Information Manual for Model AHF Self-Calibrating Cavity Pyrheliometer. The Eppley Laboratory, Inc. (USA).

Bedford R.E., Ma C.K.(1974) Emissivities of diffuse cavities: Isothermal and nonisothermal cones and cylinders. *Journal of Optical Society of America* 64, 339-349.

Brusa R.W., Fröhlich C. (1986). Absolute radiometers (PM06) and their experimental characterization. *Applied Optics* 25, 4173-4180.

CIMO Guide (2017). *WMO Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation* (the CIMO Guide). WMO-No. 8 (2014 edition, Updated in 2017)

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.

Fox N.P., Rice J.P. (2005). Absolute Radiometers. In *Experimental Methods in the Physical Sciences. Optical Radiometry*, Vol: 41, Issue: C, (Amsterdam: Elsevier BV), 35-96

Fröhlich, C. (1991). History of Solar Radiometry and the World Radiometric Reference. *Metrologia* 28, 111-115.

GUM 2008. BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML (2008). Evaluation of Measurement Data, Supplement 1 to the ‘*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*’ *Propagation of Distributions Using a Monte Carlo method*, JCGM 101:2008, 1st ed (Sèvres, Paris: BIPM Joint Committee for Guides in Metrology).

ISO 9060:2018. *Solar energy -- Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation*. ISO International Standard.

WMO IOM Report No.108 (2011). Final Report of the WMO International Pyrheliometer Comparison IPC-XI (27 September - 15 October 2010). Davos, Switzerland.

WMO IOM Report No.124 (2016). Final Report of the WMO International Pyrheliometer Comparison IPC-XII (28 September - 16 October 2015). Davos, Switzerland.