

Caracterización de Radiómetros de Cavidad para la Medida de Irradiancia Solar con Trazabilidad al WRR/SI

J.L. Balenzategui⁽¹⁾, J. De Lucas⁽²⁾, M. Molero⁽¹⁾, J. Cuenca⁽¹⁾, F. Fabero⁽¹⁾,
A. González-Leiton⁽¹⁾, J.P. Silva⁽¹⁾, E. Mejuto⁽¹⁾

⁽¹⁾ CIEMAT – PVLab, Av. Complutense, 40, 28040 Madrid

⁽²⁾ INTA – CMyC, Ctra. de Ajalvir, Km 4, 28850 Torrejón de Ardoz, Madrid
jl.balenzategui@ciemat.es | Tel: +34 91 496 2509.

RESUMEN: Los radiómetros de cavidad de tipo solar son los pirheliómetros más precisos para la medida de la irradiancia solar directa y sirven como patrones del mayor nivel metrológico en la escala de irradiancia solar basada en la *World Radiometric Reference* (WRR). Su trazabilidad a la referencia WRR se obtiene en intercomparaciones periódicas que se celebran en el PMOD/WRC (Davos), frente al grupo de patrones WSG que materializa la unidad de irradiancia solar ($W \cdot m^{-2}$). En este trabajo se exponen detalles sobre la investigación desarrollada para la caracterización completa de dos radiómetros de cavidad con el fin de determinar su incertidumbre de medida y obtener su trazabilidad directa al SI, de forma complementaria a la escala WRR. La metodología se basa en el análisis de su función modelo de medida, que relaciona la irradiancia solar con las magnitudes físicas que se miden durante su operación y con un conjunto de constantes características de cada instrumento. La incertidumbre típica obtenida hasta ahora es del orden del 0.4% ($k=1$) pero se espera poder reducirla por debajo de la cota del 0.1%.

1. INTRODUCCIÓN

La historia de la metrología de la irradiancia solar está llena de logros científico-técnicos, de instrumentos de medida sorprendentes y de distintas escalas metrológicas que se han ido sucediendo y superponiendo unas a otras, lo que pone de manifiesto la dedicación y el interés por parte de muchos investigadores en su correcta determinación, y la importancia clave que estas medidas han tenido durante décadas. Existen en la literatura buenas revisiones sobre la evolución de estos instrumentos y escalas en el campo de la radiometría solar [14].

En [5] se introducen también algunos conceptos básicos en el campo de la irradiancia solar de interés para este trabajo. En general, un radiómetro que mide la radiación solar directa se denomina *pirheliómetro*. Los pirheliómetros terrestres miden la radiación procedente del Sol con un ángulo de $\pm 2,5^\circ$ (aproximadamente 0.006 sr en ángulo sólido) y por tanto incluyen una pequeña contribución de la llamada *radiación circunsolar* o *aureola solar*. Los radiómetros diseñados para medir la radiación global o hemisférica son los *piranómetros*.

En la actualidad, los pirheliómetros del nivel metrológico más alto son radiómetros de cavidad que en el ámbito de la radiometría solar se denominan *radiómetros “absolutos” de cavidad* (ACR, de “*absolute*” *cavity radiometer*) y a veces *radiómetros de sustitución eléctrica* (ESR, de *electrical substitution radiometer*). Las primeras versiones de estos instrumentos fueron desarrolladas en el JPL (NASA) al final de la década de 1960 [6] y se concibieron para dar soporte a las misiones que incluían sensores de medida de la irradiancia solar total (TSI, de *Total Solar Irradiance*) y del balance radiativo de la Tierra (ERB, de *Earth Radiation Budget*) en satélites espaciales. Estos radiómetros de cavidad fueron muy pronto adaptados para medidas sobre la superficie terrestre y, gracias a su mayor precisión y estabilidad, desplazaron rápidamente a los radiómetros de referencia existentes en aquella época y dieron lugar en 1977 a la definición por parte de la WMO de una nueva escala de irradiancia solar [7]: la referencia radiométrica mundial (WRR, de *World Radiometric Reference*).

La referencia WRR se materializa a partir del promedio de medidas concurrentes de irradiancia solar realizadas por un grupo especial de radiómetros de cavidad, el WSG (*World Standard Group*). Cada radiómetro en el WSG se considera una realización práctica (*mise en pratique*) de la unidad de irradiancia $W \cdot m^{-2}$. La escala WRR está por tanto definida a partir de un “artefacto” o un “prototipo” pero se reconoce por consenso como la referencia absoluta o patrón primario para medidas de irradiancia solar. Cada 5 años, la WMO organiza una intercomparación, la *International Pyrheliometer Comparison* (IPC), en el PMOD/WRC (Davos, Suiza), instituto designado por la WMO para el mantenimiento del WSG (ver **Fig. 1**). Las IPC son los eventos clave para la transferencia de la escala WRR a radiómetros de cavidad de laboratorios, instituciones y centros meteorológicos regionales de todo el mundo.



Fig. 1. Izquierda: imagen de la *International Pyrheliometer Comparison IPC-XII* (2015) organizada en el centro PMOD/WRC (Davos, Suiza); Derecha: el grupo mundial de patrones WSG emplazados en su seguidor solar junto a otros sensores de irradiancia solar.

Por otra parte, los radiómetros de cavidad siguieron evolucionando en el entorno de los laboratorios de radiometría y fotometría de los NMI, hasta el desarrollo de los radiómetros criogénicos absolutos [8,9], que se usan para definir escalas de responsividad espectral y realizar la unidad de la candela (cd). A diferencia de los radiómetros solares, que trabajan a temperatura ambiente y presión atmosférica (cavidad abierta), los radiómetros criogénicos trabajaban en vacío y con temperaturas de referencia de 2 K a 20 K en el foco frío, utilizando He y N₂ líquidos.

En sus fundamentos de medida, los radiómetros solares son similares a los radiómetros criogénicos. Trabajan según el *Principio de sustitución eléctrica* o *Principio de equivalencia* [10,11] de forma que la potencia o flujo radiante se asocia o se refiere a la potencia eléctrica, que se puede medir de forma mucho más precisa y más fácilmente. Sin embargo, la realización práctica del Principio no es perfecta y diversos errores de tipo sistemático (efectos ópticos, eléctricos y térmicos) provocan ligeras desviaciones de ese comportamiento ideal. Así, la responsividad del radiómetro o su desviación pueden determinarse de dos formas: 1) la calibración por comparación frente a un patrón de referencia; o 2) la caracterización completa del instrumento.

La primera de las vías, mucho más fácil de acometer, es la que se realiza precisamente durante los IPC, por comparación directa contra el WSG. Pero, desde un punto de vista metrológico, como consecuencia de esta comparación frente a un instrumento *primario*, los ACRs devienen en instrumentos de referencia *secundarios*. Así lo reconocen las regulaciones de la WMO [7,12],

aunque dejan aún abierta la posibilidad de usarlo como instrumento primario *si se cumplen ciertas condiciones adicionales* (no sólo la mera comparación frente al WSG). No obstante, el radiómetro seguiría sin tener determinada su incertidumbre típica y solo contaría con un término correspondiente a la transferencia de la escala.

De forma complementaria, un ACR puede someterse a un proceso de caracterización [7,17], lo que permite obtener su trazabilidad directa a unidades del SI y determinar la incertidumbre absoluta de medida del radiómetro. La caracterización se realiza en base a una *función modelo de medida*, que relaciona la irradiancia solar directa E con ciertas magnitudes físicas que se miden durante su operación (por ejemplo, señales de tensión, corriente y temperatura) y con un conjunto de parámetros o factores de corrección característicos (idealmente constantes) [13,14]. La caracterización requiere por tanto la calibración individual de sus componentes (sensores, dispositivos de medida), ensayos en laboratorio (por ejemplo, para calcular coeficientes de temperatura, dependencias espectrales, etc), y la estimación mediante simulación numérica de aquellos parámetros que no pueden medirse directamente, identificando y cuantificando las fuentes de error particulares en cada caso para determinar la incertidumbre combinada del instrumento. En realidad, la caracterización se consideró desde el mismo momento de definir la WRR como un requisito para los radiómetros solares de cavidad para determinar su precisión y fiabilidad [7]. Solo una caracterización (correcta y completa) convierte al radiómetro en realmente “absoluto” y “primario”.

Finalmente, mencionaremos que la correspondencia entre la escala de radiometría del SI y la escala WRR se ha verificado varias veces [15-18] y se debe aplicar una corrección del 0.3 % para tener en cuenta la diferencia entre ambas escalas [19,20] (la WRR estima valores un poco más altos de irradiancia que la escala radiométrica del SI). De esta forma, la trazabilidad a la WRR asegura la trazabilidad a unidades del SI. Sin embargo, la práctica habitual en los laboratorios de calibración de sensores de radiación solar en todo el mundo es emitir sus resultados referidos a la escala WRR, siguiendo las recomendaciones de la WMO [12], sin aplicar esa corrección. Por otro lado, la escala WRR está siendo revisada de forma conjunta por la WMO y el BIPM, debido a las desviaciones encontradas en la última comparación y a la conveniencia de que ambas escalas confluyan.

En este trabajo se presenta en líneas generales la metodología que se viene aplicando para la caracterización de dos radiómetros solares de cavidad de tipo comercial, modelo AHF de *Eppley Labs* (USA) y modelo PMO6 de *Davos Instruments* (Suiza) (ver **Fig. 2**). Estos instrumentos son patrones de referencia en el PVLab-CIEMAT para el establecimiento de la escala de irradiancia solar y para la calibración de sus patrones secundarios. Las tareas de caracterización se emprendieron en parte gracias al proyecto de investigación “DEPRISACR” (ver sección de *Agradecimientos*) en colaboración entre el PVLab-CIEMAT y el CMYC-INTA. Se presentan también algunos resultados obtenidos hasta la fecha en las tareas de caracterización, y se sugieren líneas de trabajo para las siguientes fases de la investigación, encaminadas sobre todo a reducir la incertidumbre y mejorar la trazabilidad al SI.

En la literatura pueden encontrarse varios trabajos sobre caracterización de radiómetros solares, realizados fundamentalmente por los propios diseñadores y fabricantes de los instrumentos [6,21-32]. Especial relevancia han tenido las realizadas sobre radiómetros incorporados en las distintas misiones espaciales, debido a las diferencias aparecidas entre distintas generaciones de instrumentos y con distinta trazabilidad [33,34]. Sin embargo, las versiones terrestres apenas se han caracterizado, mucho menos las versiones comerciales y menos aún por laboratorios independientes [35-37]. En la práctica, la complejidad técnica que supone realizar esta

caracterización es muy elevada (incluso se considera arriesgada debido a la delicada manufactura de cavidades, elementos calefactores y sensores) por lo que se prefiere aplicar el procedimiento de comparación.



Fig. 2. Radiómetros solares de cavidad del CIEMAT durante la última intercomparación IPC-XIII (2021) en el PMOD/WRC (Davos, Suiza), montados sobre el seguidor solar a dos ejes.

2. ASPECTOS BÁSICOS DE UN RADIÓMETRO SOLAR DE CAVIDAD

El funcionamiento básico y estructura de estos instrumentos se ha discutido en detalle en trabajos anteriores [13,14,38] por lo que aquí haremos una descripción muy sucinta. Las cavidades de los ACR tienen normalmente simetría cilíndrica (con forma similar a los de cuerpos negros), son de pequeño tamaño (varios milímetros de altura y diámetro) y con paredes delgadas para tener una inercia térmica pequeña (ver **Fig. 3**). Las cavidades van pintadas con pinturas negras de muy alta absorción, que son fundamentalmente especulares y con una componente difusa muy pequeña. Este comportamiento especular es el que favorece, por reflexiones múltiples, una elevada absorción efectiva de las cavidades [39].

La estructura soporte donde va montada la cavidad incorpora sensores de temperatura o de flujo térmico de tipo diferencial (termopilas, termómetros de resistencia, puentes de Wheatstone, etc.) y permite su conductividad térmica hacia un bloque que actúa como sumidero (foco frío) a temperatura ambiente. Adherido a la cavidad se coloca un elemento calefactor eléctrico (p.ej. un hilo delgado arrollado o un circuito en forma de lámina delgada). La disposición de este elemento calefactor es clave para tratar de reproducir el calentamiento radiante de la forma más fiel posible para realizar en la práctica el principio de equivalencia. En muchos casos, la estructura del sensor es de una doble cavidad: la cavidad frontal recibe la radiación solar mientras la cavidad posterior actúa como elemento de compensación o balance térmico. Montado sobre el bloque sensor se dispone un colimador (tubo tipo Gershun) que restringe el FOV hasta los 5°.

La cavidad frontal se expone a la radiación solar de forma intermitente o periódica mediante un obturador electromecánico, distinguiéndose dos fases: la abierta (expuesta al Sol) y la cerrada (o de auto-calibración). En la fase cerrada se inyecta una corriente eléctrica (adicional) en el calefactor hasta conseguir que el flujo térmico o la diferencia de temperatura (entre la cavidad

frontal y un punto de referencia) se mantenga igual que en la fase abierta. Así, la diferencia entre las potencias eléctricas inyectadas en ambas fases es proporcional a la potencia radiante recibida. La estimación de la irradiancia se hace en base al área (calibrada) de una apertura de precisión fabricada en un material con coeficiente de dilatación térmica muy bajo (Invar, WC). 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.

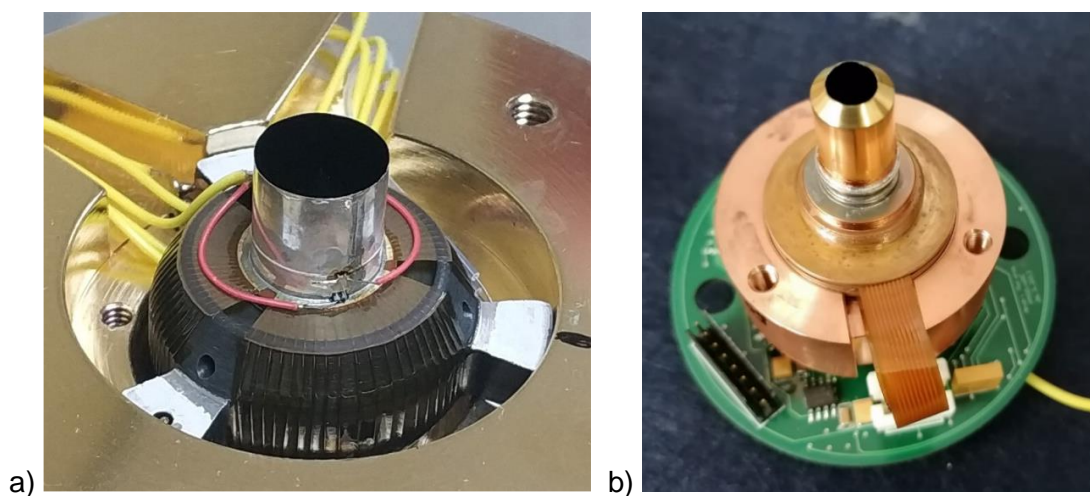


Fig. 3. Vista de las cavidades de los dos ACR sujetos a caracterización: a) AHF; b) PMO6. Ambas tienen forma cilindro-cónica, con el cono invertido hacia la entrada de la cavidad.

Aunque hay diferencias en la formulación matemática particular para cada modelo de radiómetro, la función modelo de medida computa la diferencia entre la potencia medida durante la fase abierta P_0 y la cerrada P_C para calcular la irradiancia solar directa E en la forma [7,23]:

$$E = C \cdot (P_C - P_0) = \frac{1}{A} \cdot C_{DF} \cdot C_{SC} \cdot C_{RL} \cdot C_{NE} \cdot C_{AH} \cdot C_{LH} \cdot (P_C - P_0) \quad (1)$$

donde C es un factor de caracterización o de calibración. Idealmente, $C = 1/A$, siendo A el área de la apertura de precisión. Sin embargo, se tiende a expresar las desviaciones posibles del comportamiento ideal como factores (de ganancia o de pérdida) independientes, tal como muestra la ecuación (1), fundamentalmente porque facilita el cálculo de la incertidumbre típica: C_{DF} es el factor de difracción, C_{SC} el de dispersión (*scattering, stray light*), C_{RL} para contabilizar 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. Normalmente, 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} . 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 varían las condiciones de operación.

3. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN

Se describen a continuación algunas aproximaciones y resultados obtenidos en el proceso de caracterización de los dos radiómetros. Pueden encontrarse detalles adicionales en otras referencias [13,14,38,39,40]. El proceso está completado para el caso del AHF (aunque se va a seguir trabajando para mejorar los resultados obtenidos) mientras que faltan algunos pequeños detalles por completar para el radiómetro PMO6 (adquirido durante el desarrollo del proyecto DEPRISACR, ha ido sufriendo retrasos respecto al otro). Por contra, existe mucha más documentación y referencias sobre la caracterización de instrumentos de la familia del PMO6 [23,30,31] mientras que no hay muchos detalles publicados sobre cómo se ha abordado su caracterización o la forma de estimar los factores de corrección para el AHF [21,22]. Se dispone de valores dados por el fabricante en la documentación técnica del instrumento, pero en algunos casos son valores típicos comunes para todos los AHF y para otros no se da su incertidumbre, lo que convierte su caracterización en una tarea exploratoria o tentativa en muchos aspectos. Pero, a la vez, el concepto de instrumento es más abierto y modular en el AHF que en el PMO6, que es un sistema más cerrado e integrado, en el que es muy difícil aislar, extraer o separar elementos.

En ambos instrumentos, las componentes más fáciles de caracterizar y calibrar en la función modelo de medida se refieren a las que involucran medidas de las señales (tensión, corriente, temperatura) o a elementos que pueden desmontarse y calibrarse con relativa facilidad. Por ejemplo, las áreas de las aperturas de precisión del AHF (radio nominal $r = 4$ mm) y del PMO6 (radio nominal $r = 2,5$ mm) se han calibrado en el Área de Longitud e Ingeniería de Precisión del CEM y en el METAS, respectivamente, mediante técnicas equivalentes en ambos centros.

Los voltímetros de medida para las señales de tensión y corriente junto a las resistencias de precisión se han calibrado por el Laboratorio de Electricidad del CMYC del INTA. En el caso del AHF, las señales se miden con un registrador multicanal Keysight 34970A externo a la unidad de control, mientras que en el PMO6 la electrónica de medida está integrada en su propia unidad de control fabricada por Davos Instruments. En el CMYC del INTA se ha calibrado y caracterizado también un termómetro de resistencia de platino que se ha incorporado a la unidad de control del AHF para poder realizar correcciones en temperatura de la corriente inyectada en el calefactor medida a través de la resistencia R_{SH} . Más complicada ha sido la calibración de algunos elementos que no pueden desmontarse del radiómetro, como la resistencia de los hilos que alimentan el elemento calefactor y que supone una pequeña caída de potencia que también debe tenerse en cuenta (puede apreciarse en la **Fig. 3.a**).

Las componentes que han requerido quizás mayor esfuerzo para su determinación han sido los factores de no equivalencia, de dispersión y el cálculo de la absortancia efectiva de las cavidades.

El término de no equivalencia C_{NE} es uno de los aspectos funcionales que más se ha discutido en la literatura y que se origina como una suma de contribuciones que no tienen por qué ser las mismas para todos los radiómetros, en función de su diseño y estructura. En realidad, siempre se refiere a la capacidad técnica de reproducir el calentamiento por absorción de la radiación con el calentamiento de tipo eléctrico en un sistema dado, pero teniendo en cuenta que el primero se produce con la cavidad abierta mientras que en el segundo está ocluida y esto altera los mecanismos de transferencia térmica entre las fases abierta y cerrada (procesos de radiación y de convección, principalmente). En el caso del AHF se ha propuesto un nuevo método de determinación [14,38] basado en la elevada linealidad de la señal de salida V_T de la termopila, de forma que, hipotéticamente, podría obtenerse a partir de los ratios de las pendientes de V_T

frente a potencia eléctrica ($P_E - P_O$) y de V_T frente a potencia correspondiente a la radiación solar P_S . El método ha demostrado proporcionar valores consistentes y permitir la estimación de su incertidumbre, pero existen algunas dudas de concepto sobre su validez o sobre la independencia respecto de la fuente luminosa que se pretende estimar.

El cálculo de la absortancia efectiva y de su distribución espacial, y del término de dispersión, se ha realizado para ambos radiómetros mediante programas de cálculo numérico de desarrollo propio y mediante el programa de simulación Zemax Optics Studio. También se han medido experimentalmente las reflectancias espectrales hemisféricas y difusas de distintas superficies y recubrimientos en el rango entre $0,25 \mu\text{m}$ a $16 \mu\text{m}$ mediante espectrofotómetros UV/VIS/IR y MIR. Resultados más detallados sobre esta caracterización de tipo óptico pueden encontrarse en [39].

Finalmente, en el caso del radiómetro AHF, el cálculo detallado de la incertidumbre típica [14] ha arrojado un valor del 0.42 % ($k = 1$). La mayor contribución de incertidumbre la origina la medida de la tensión de salida de la termopila (del orden de $V_T \sim 1 \text{ mV}$), que realiza el registrador 34970A y cuyo fondo de escala mínimo además es de 100 mV. Se hace necesario, por tanto, reemplazar este medidor por un nano-voltímetro/micro-óhmetro con un fondo de escala mejor adaptado a estas señales tan pequeñas de tensión y con mejores especificaciones para reducir este término de incertidumbre. Por otro lado, esto también permitirá ampliar el rango dinámico del instrumento para medir niveles de irradiancia mucho más bajos. Se ha verificado mediante ensayos en laboratorio con un calibrador Fluke 5520A que, incluso con el registrador actual, la termopila es totalmente lineal hasta niveles de señal equivalentes a $\sim 1 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ (flujo radiante equivalente a $\sim 500 \mu\text{W}$). La verificación se ha realizado también a distintas temperaturas en una cámara climática. Esto permite plantear la realización de ensayos comparativos con los radiómetros frente a detectores de trampa, que trabajan con niveles de potencia (típicamente del orden de los $\sim 100 \mu\text{W}$) mucho más bajos que los habituales en irradiancia solar (100 mW a 220 mW). En la práctica, esta vía sería una forma alternativa de lograr la trazabilidad directa a la escala de radiometría del SI, equivalente a la que se realiza frente al WSG/WRR.

4. CONCLUSIONES

Se han discutido en este trabajo los aspectos más importantes sobre el funcionamiento de los radiómetros de cavidad de tipo solar y el problema de lograr la trazabilidad a dos escalas de radiometría diferentes, WRR y SI. La discrepancia existente entre ambas escalas es uno de los motivos que han promovido la necesidad o el interés en realizar la caracterización de dos radiómetros solares, AHF y PMO6, que son patrones de referencia en la escala de irradiancia solar establecida en el laboratorio PVLab-CIEMAT. Se han descrito las aproximaciones y algunos resultados obtenidos en esta caracterización. Las incertidumbres obtenidas hasta el momento son más elevadas de lo esperado, pero se han señalado algunos detalles que permitirán reducir progresivamente esa incertidumbre por debajo del objetivo del 0.1% ($k = 1$).

5. REFERENCIAS

- [1] C. Fröhlich, *Metrologia* 28 (1991), 111
- [2] F.Vignola et al, in *Solar and Infrared Radiation Measurements*, CRC Press (2012) 35-76
- [3] R.M. Marchgraber, in *Meteorological Observations and Instrumentation*, Springer (1970), 302-314
- [4] J.L. Balenzategui et al, en *Solar Resources Mapping*, J. Polo et al (eds.), Springer (2019), 15–69
- [5] F. Fabero et al. *7º Congreso Español de Metrología*, Ávila (2022), referencia S7-2-R29-OR.
- [6] J.M. Kendall. NASA-JPL Technical Report 32-7263 (1968)
- [7] WMO CIMO, “Abridged Final Report of the Seventh Session”. *WMO Report* 490 (1977), Annex IV
- [8] T.J. Quinn, J.E. Martin. *Phil. Trans. Royal Society of London, Series A*, 316 (1985) 85-189.
- [9] J.E. Martin, N.P. Fox, P.J. Key. *Metrologia* 21 (1985) 147-155
- [10] N.P. Fox, J.P. Rice, en *Optical Radiometry*, A.C. Parr et al (eds.), Elsevier (2005), 35–96.
- [11] F. Hengstberger, *Absolute Radiometry*, Academic Press (1989)
- [12] WMO CIMO Guide 2017. *Report WMO* No. 8.
- [13] J.L. Balenzategui et al. *Actas XVII Cº Ibérico y XIII Cº Iberoamericano de En.Solar 2020*, pp. 935-942.
- [14] J.L. Balenzategui, J. De Lucas et al. *Meas. Sci. Tech.* Manuscript ID: MST-114644. En revisión.
- [15] J. Romero, N.P. Fox, C. Fröhlich. *Metrologia* 28 (1991), pp.125–128.
- [16] J. Romero, N.P. Fox, C. Fröhlich. *Metrologia* 32 (1995), pp. 523
- [17] W. Finsterle, P. Blattner et al. *Metrologia* 45 (2008), pp. 377–381.
- [18] A. Fehlmann, G. Kopp et al. *Metrologia* 49 (2012), S34.
- [19] Norma Internacional IEC 60904-4, “Photovoltaic devices - Part 4” (2019).
- [20] J.L.Balenzategui, M. Molero et al. *Solar* 2 (2022), 158–185.
- [21] J.R. Hickey, R.G: Frieden et al. *Proc. International Solar Energy Society Annual Meeting* 1977, 15-1.
- [22] J.R.Hickey, A.R.Karoli. *Applied Optics* 13 (1974) 523
- [23] R.W. Brusa, C. Fröhlich. *Applied Optics* 25 (1986), 4173-4180.
- [24] R.C. Willson. *Applied Optics* 12 (1973) 810.
- [25] R.C. Willson. *Applied Optics* 19 (1980) 3256.
- [26] D.A. Crommelynck. *Earth Radiation Science Seminars*, NASA Conf. Publication 2239 (1982) 53
- [27] V.I. Sapritskii, M.N. Pavlovich. *Metrologia* 26 (1989) 81
- [28] F. Wei et al. *Proceedings of the SPIE* Vol. 4895 (2003) 218
- [29] G. Kopp, G. Lawrence. *Solar Physics* 230 (2005) 91–109
- [30] A. Fehlmann. *Metrology of Solar Irradiance*. PhD Thesis, University of Zurich (2011)
- [31] M. Suter. *Advances in Solar Radiometry*. PhD Thesis, University of Zurich (2014)
- [32] B. Walter et al. *Metrologia* 54 (2017) 674–682.
- [33] N. Fox N et al. *Phil. Transactions of the Royal Society A* 369 (2011) 4028–4063.
- [34] G. Kopp G, J.L.Lean. *Geophysical Research Letters* 38 (2011) L01706
- [35] W. Rainer. *Cryogenic Solar Absolute Radiometer*. PhD Thesis, University College London (2013)
- [36] I. Reda. *Report NREL/TP* 463-20619 (1996)
- [37] H.J. Patrick. *Applied Optics* 55 (2016) 6346–6354

- [38] J.L. Balenzategui, J. De Lucas *et al.* *Proc. IPC-XIII Symposium*, Davos, (2021). *To be published.*
- [39] J.L. Balenzategui *et al.* *XVIII Cº Ibérico y XIV Cº Iberoamericano de En.Solar 2022*. *To be published.*
- [40] J. De Lucas *et al.* *7º Congreso Español de Metrología*, Ávila (2022), referencia SP2-R41-P.

5. AGRADECIMIENTOS

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