

EVALUACIÓN DE LA DEPENDENCIA DE LAS CALIBRACIONES DE PIRHeliómetros CON LAS CONDICIONES EXPERIMENTALES

Ferrera-Cobos F. ^{*}, Zarzalejo L. F. ^{}, Valenzuela R. X. ^{**}, Ramírez L. ^{**},
Hanrieder N. ^{***}, Wilbert S. ^{***}, Liria J. ^{****}, García G. ^{****}, González S. ^{****}.**

- ^{*} Universidad Complutense de Madrid (UCM). Avda. Séneca, 2, 28040 Madrid, España.
^{**} Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT).
División de Energías Renovables. Avda. Complutense 40, 28040 Madrid, España.
^{***} German Aerospace Center (DLR). Institute of Solar Research. Ctra. de Senés km 4,
04200 Tabernas, España.
^{****} CIEMAT Plataforma Solar de Almería (PSA). Ctra. de Senés, km. 4, 04200 Tabernas,
España.

RESUMEN

En este trabajo se estudia la influencia del ángulo de elevación solar y la velocidad de viento sobre las constantes de calibración de pirheliómetros, tanto de manera individual como de forma conjunta. Mediante regresiones múltiples y análisis ANOVA (analysis of variance) se analiza la dependencia de la sensibilidad con la velocidad de viento así como con el ángulo de elevación solar. Los resultados obtenidos sugieren que la influencia de ambos factores experimentales puede caracterizarse como una dependencia lineal con la constante de calibración. Por otra parte, se han observado diferencias significativas entre los resultados obtenidos para calibraciones realizadas con ángulos de elevación solar bajos, medios y altos en 8 de los 14 pirheliómetros utilizados. Del mismo modo, en 12 de los 14 pirheliómetros se han observado diferencias significativas en las calibraciones realizadas con velocidades de viento bajas y altas.

PALABRAS CLAVE: Calibraciones, energía solar, recurso solar, metrología

ABSTRACT

In this work we study the influence of the solar elevation angle and the wind speed on the calibration constants of pyrheliometers, both individually and jointly. By means of multiple regressions and ANOVA (analysis of variance), the dependence of the sensitivity with the wind speed as well as with the solar elevation angle has been studied. The results obtained suggest that the influence of both experimental factors can be characterized as a linear dependence with the calibration constant. On the other hand, significant differences were observed between the results obtained for calibrations performed with low, medium and high solar elevation angles in 8 of the 14 pyrheliometers. Likewise, in 12 of the 14

pyrheliometers significant differences have been observed in the calibrations carried out with low and high wind speeds.

KEYWORDS: Calibrations, solar energy, solar resource, metrology

INTRODUCCIÓN

A medida que aumenta la demanda de mediciones de irradiancia solar exactas, los expertos estudian cómo mejorar la precisión de las mismas. Es importante comprender y caracterizar de manera adecuada los factores que influyen en la calibración de pirheliómetros para mejorar la precisión de las calibraciones y que esto nos permita disponer de medidas de irradiancia más fiables. Diversos factores como la incertidumbre de calibración, las especificaciones de los instrumentos, el mantenimiento del equipo o el envejecimiento contribuyen a la incertidumbre de las mediciones de irradiancia solar. De entre todos estos factores, la principal contribución a la incertidumbre de las mediciones de irradiancia solar es la incertidumbre de la calibración. Los factores que influyen en la calibración del pirheliómetro fueron abordados por (Thacher et al., 2000). Entre las condiciones experimentales, la velocidad del viento y el ángulo cenital solar son los factores que más contribuyen a los resultados de la calibración. En (Ferrera Cobos et al., 2018) se estudia la dependencia de las constantes de calibración con la elevación solar, velocidad del viento, turbidez de Linke y dirección de viento respecto del azimut solar. Varios estudios han abordado la influencia de la velocidad del viento (Michalsky et al., 2011) y el ángulo cenital solar (Dooraghi et al., 2014; Habte et al., 2017, 2016). También (Vignola and Lin, 2010) evaluaron los factores que influyen en la calibración de un pirheliómetro NIP de Eppley.

En este trabajo se pretende profundizar en el conocimiento de los factores que afectan a la determinación de la sensibilidad de los pirheliómetros durante una campaña de calibración al aire libre, en la que por tanto se utiliza la luz solar como fuente de radiación. En Junio de 2017 se realizó una campaña de calibración de pirheliómetros dentro del marco del proyecto europeo Sfera2 en las instalaciones de la Plataforma Solar de Almería (PSA) en Tabernas, Almería (España). En ella participaron un total de 14 pirheliómetros. Todo el procedimiento de esta campaña se ha realizado de acuerdo a las disposiciones de la normativa ISO 9059:1990 (ISO, 1990). Todos los análisis y resultados que se muestran en este trabajo han sido obtenidos a partir de los datos registrados en esta campaña.

CAMPAÑA JUNIO 2017 EN LA PSA

Esta campaña de calibración se llevó a cabo del 26/06/2017 al 13/07/2017 en las instalaciones de la Plataforma Solar de Almería (PSA) en Almería, España. Se usaron dos bancos de calibración. El primero se compone de una placa de montaje para pirheliómetros con un sistema de seguimiento solar motorizado de dos ejes y su sistema de adquisición de datos (SAD) emplea una tarjeta modelo IMP 35951C. Mientras que el segundo seguidor es un Kipp & Zonen 2-AP y un sistema de adquisición de datos Campbell Scientific CR3000. Los pirheliómetros que participaron en esta campaña aparecen descritos en la Tabla 1. Además, se utilizaron dos radiómetros de cavidad absoluta PMO6-CC (ACR) con números de serie 807 y 106 como los pirheliómetros de referencia para la calibración.

DATOS AUXILIARES

Los datos auxiliares fueron proporcionados por una estación meteorológica en la PSA, que está operada por el Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR). Los instrumentos de estación meteorológica se muestran en la Tabla 2. Esta estación nos proporciona datos de dirección y velocidad del viento, presión barométrica y humedad relativa, registrados en períodos de 10 segundos. Más detalles sobre la estación se encuentran en (Pozo-Vázquez et al., 2011).

Tabla 1. Pirheliómetros participantes en la campaña de calibración de Junio 2017 en las instalaciones de la PSA

Pirheliómetro	Tipo de pirheliómetro	Fabricante	Modelo	Número de serie	Sensibilidad previa ($\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$)
1	Termopila	Kipp & Zonen	CHP1	080001	7.98
2	Termopila	Kipp & Zonen	CHP1	140129	8.15
3	Termopila	Kipp & Zonen	CHP1	110766	7.94
4	Termopila	Kipp & Zonen	CHP1	080028	8.13
5	Termopila	Kipp & Zonen	CHP1	110656	7.56
6	Termopila	Kipp & Zonen	CH1	040381	10.89
7	Termopila	Kipp & Zonen	CH1	060495	10.17
8	Termopila	Eppley	NIP	29015E6	8.85
9	Termopila	Eppley	NIP	21131E6	7.93
10	Termopila	Eppley	NIP	36473E6	8.39
11	Termopila	Eppley	NIP	18949E6	7.97
12	Termopila	Eppley	NIP	19776E6	8.55
13	Termopila	Kipp & Zonen	CHP1	140057	7.46
14	Termopila	Kipp & Zonen	CH1	010270	10.02

Tabla 2. Instrumentos presentes en la estación meteorológica

Instrumento	Fabricante	Modelo	Medida
Veleta	NRG	200	Dirección del viento
Anemómetro	Thies Klima	4.3351.00.161	Velocidad del viento
Barómetro	Setra	278	Presión atmosférica
Termometro	Campbell Scientific	CS215	Temperatura ambiente y humedad relativa

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACION

Para el procedimiento de calibración de los pirheliómetros se ha seguido las indicaciones de la normativa ISO 9059:1990. Para el filtrado de datos óptimos para la calibración se han utilizado filtros como los descritos en (Ferrera Cobos et al., 2018):

- Condiciones de irradiancia: se emplean valores de DNI de más de 700 Wm^{-2} . La irradiancia horizontal directa debe ser superior al 80 % de la GHI.
- Turbidez atmosférica: los valores de turbidez de Linke han de estar por debajo de 6.
- Condiciones del viento: consideramos aceptable una velocidad del viento inferior a 5 ms^{-1} si proviene de la dirección del azimut solar ($\pm 5^\circ$) como otros autores han considerado previamente (Michalsky et al., 2011; Reda et al., 2014; Wilbert et al., 2010); no hay restricciones para vientos procedentes de otras direcciones.

La campaña de calibración consiste en al menos 20 series de 20 minutos de duración cada una. La determinación de la sensibilidad en $\mu\text{V}/(\text{Wm}^{-2})$ se realiza empleando las ecuaciones (1) y (2).

$$C(k) = \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1/i \neq j}^m V_G(i)}{\sum_{i=1/i \neq j}^m V_P(i) \cdot F_P} \quad (1)$$

$$C = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n C(k) \quad (2)$$

i indica la posición de cada registro dentro de su serie, k es la posición de cada serie dentro del total de series, n es el número total de series, j indica los registros eliminados de cada serie, m el número total de registros válidos, V_G el voltaje medido por el pirheliómetro a calibrar, V_P el voltaje medido por el pirheliómetro patrón, F_P la sensibilidad del pirheliómetro patrón. El cálculo de la incertidumbre de calibración se realizó utilizando (JCGM, 1995; Reda, 2011).

RESULTADOS

Para estudiar la influencia de las calibraciones con el ángulo de elevación solar (γ) y la velocidad de viento (v) respectivamente, se ha planteado en primer lugar la hipótesis de que las constantes de calibración dependan linealmente de ambas condiciones experimentales. En este trabajo, se realiza un análisis ANOVA para estudiar la interdependencia de las calibraciones con el ángulo de elevación solar y la velocidad del viento conjuntamente.

INFLUENCIA DEL ÁNGULO DE ELEVACIÓN SOLAR

Para comprobar la hipótesis de dependencia lineal se realiza un ajuste según la Ec. (3)

$$C = a + b\gamma \quad (3)$$

en donde C es la sensibilidad en $\mu\text{V}/(\text{Wm}^{-2})$, y γ es el ángulo de elevación solar en grados. En la Tabla 3 se puede ver como para 9 de los 14 pirheliómetros se cumple la hipótesis, ya que tienen un p -valor por debajo del nivel de significancia $\alpha = 0.05$. Las variaciones producidas por el término de la pendiente son del orden de 0.10%, lo cual mejora la precisión de la calibración. Cabe destacar además, que excepto para el pirheliómetro NIP 29015E6, para el resto de pirheliómetros en los que la hipótesis es válida se obtienen pendientes negativas. Que se deben a que con ángulos altos de elevación solar hay más convección libre sobre los pirheliómetros y eso provoca menor sensibilidad.

INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO

En este caso también se recurre a un ajuste lineal como muestra la Ec. (4) para estudiar la dependencia de las calibraciones con la velocidad del viento.

$$C = c + dv \quad (4)$$

Nuevamente C es la sensibilidad en $\mu V/(Wm^2)$, y v es la velocidad del viento en ms^{-1} . En la Tabla 4 se muestran los resultados del ajuste. En ellos se observa que 11 de los 14 pirheliómetros cumplen con la hipótesis de dependencia lineal, ya que obtienen un p-valor por debajo del nivel de significancia $\alpha=0.05$. Además también en este caso todos los pirheliómetros que cumplen la hipótesis lineal, tienen pendientes negativas. Estas pendientes negativas se deben a que cuando la velocidad del viento aumenta se propicia la convección en el pirheliómetro y esto provoca un descenso en la sensibilidad.

Tabla 3. Resultados del ajuste con γ . Subrayados aquellos que cumplen la hipótesis.

Modelo	Número de Serie	P-valor	c	d
CHP1	080001	0.5581	8.01	-0.000093
CHP1	140129	0.0596	8.20	-0.000291
<u>CHP1</u>	<u>110766</u>	<u>0.0067</u>	<u>7.99</u>	<u>-0.000314</u>
CHP1	080028	0.0011	8.16	-0.000504
<u>CHP1</u>	<u>110656</u>	<u>0.0409</u>	<u>7.62</u>	<u>-0.000262</u>
CHI	040381	0.1475	10.86	0.000268
CHI	060495	0.5843	10.14	0.000103
<u>NIP</u>	<u>29015E6</u>	<u>0.0000</u>	<u>8.49</u>	<u>0.001304</u>
<u>NIP</u>	<u>21131E6</u>	<u>0.0000</u>	<u>7.98</u>	<u>-0.001091</u>
<u>NIP</u>	<u>36473E6</u>	<u>0.0003</u>	<u>8.55</u>	<u>-0.000834</u>
<u>NIP</u>	<u>18949E6</u>	<u>0.0000</u>	<u>8.83</u>	<u>-0.001224</u>
<u>NIP</u>	<u>19776E6</u>	<u>0.0000</u>	<u>8.96</u>	<u>-0.001443</u>
CHP1	140057	0.1032	7.38	0.000494
<u>CHI</u>	<u>010270</u>	<u>0.0000</u>	<u>10.24</u>	<u>-0.000664</u>

Tabla 4. Resultados del ajuste para v . Subrayados aquellos que cumplen la hipótesis.

Modelo	Número de Serie	P-valor	a	b
CHP1	080001	0.1300	8.01	-0.0014
CHP1	140129	0.0000	8.21	-0.0050
<u>CHP1</u>	<u>110766</u>	<u>0.0000</u>	<u>7.99</u>	<u>-0.0050</u>
CHP1	080028	0.0000	8.16	-0.0067
<u>CHP1</u>	<u>110656</u>	<u>0.0000</u>	<u>7.63</u>	<u>-0.0045</u>
<u>CHI</u>	<u>040381</u>	<u>0.0000</u>	<u>10.90</u>	<u>-0.0047</u>
<u>CHI</u>	<u>060495</u>	<u>0.0000</u>	<u>10.17</u>	<u>-0.0056</u>
NIP	29015E6	0.0582	8.58	-0.0034
<u>NIP</u>	<u>21131E6</u>	<u>0.0000</u>	<u>7.97</u>	<u>-0.0116</u>
<u>NIP</u>	<u>36473E6</u>	<u>0.0000</u>	<u>8.55</u>	<u>-0.0106</u>
<u>NIP</u>	<u>18949E6</u>	<u>0.0000</u>	<u>8.80</u>	<u>-0.0089</u>
<u>NIP</u>	<u>19776E6</u>	<u>0.0000</u>	<u>8.92</u>	<u>-0.0095</u>
CHP1	140057	0.6133	7.40	0.0009
<u>CHI</u>	<u>010270</u>	<u>0.0000</u>	<u>10.22</u>	<u>-0.0038</u>

INFLUENCIA CONJUNTA DE AMBOS FACTORES

Para estudiar la influencia conjunta de γ y v sobre las sensibilidades se ha recurrido a una regresión múltiple respecto de γ y v . Por otra parte, también se realiza un análisis ANOVA (analysis of variance) con los datos de sensibilidad, γ y v .

REGRESIÓN MÚLTIPLE

Se ha llevado a cabo una regresión múltiple de la forma que indica la Ec. (5)

$$C = e_1\gamma + e_2v + e_3\gamma v + f \quad (5)$$

en donde las C es la sensibilidad en $\mu\text{V}/(\text{Wm}^2)$, γ es el ángulo de elevación solar en grados y v es la velocidad del viento en ms^{-1} . Como puede observarse en la Tabla 5, 12 de los 14 pirheliómetros participantes tienen un p-valor inferior al nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

Tabla 5. Resultados de la regresión múltiple. Subrayados aquellos que cumplen la hipótesis.

Modelo	Número de Serie	p_val	f	e_1	e_2	e_3
CHP1	080001	0.1029	8.03	-0.00046	-0.00904	0.00000
CHP1	140129	0.0000	8.23	-0.00042	-0.01365	0.00004
CHP1	110766	0.0000	8.01	-0.00031	-0.01118	0.00004
CHP1	080028	0.0000	8.18	-0.00045	-0.01395	0.00004
CHP1	110656	0.0000	7.66	-0.00051	-0.01435	0.00008
CH1	040381	0.0000	10.92	-0.00015	-0.02154	0.00013
CH1	060495	0.0000	10.19	-0.00031	-0.02283	0.00015
NIP	29015E6	0.0000	8.54	0.00105	-0.02337	0.00006
NIP	21131E6	0.0000	8.02	-0.00096	-0.02181	0.00007
NIP	36473E6	0.0000	8.60	-0.00084	-0.02315	0.00010
NIP	18949E6	0.0000	8.85	-0.00100	-0.01175	-0.00003
NIP	19776E6	0.0000	8.98	-0.00125	-0.01235	-0.00001
CHP1	140057	0.0754	7.43	-0.00042	-0.01551	0.00001
CH1	010270	0.0000	10.24	-0.00055	-0.00355	-0.00005

Es notable que el termino e_1 (asociado a γ) son negativos para todos los pirheliómetros excepto para el pirheliómetro NIP 29015E6, como ocurría en la regresión lineal de γ . Así mismo, todos los e_2 (asociadas a v) son negativos al igual que con la regresión lineal de v . Por el contrario, el termino b_3 asociado al termino cruzado son todos positivos excepto en 3. La influencia debida a los términos e_1 y e_2 son del orden del 0.10%, mientras que el término cruzado e_3 produce unas variaciones del 0.01%

ANÁLISIS ANOVA

Para realizar el análisis ANOVA se ha dividido el rango de variables en varios grupos. Se ha dividido γ en tres grupos, "bajo" ($\gamma \leq 40^\circ$), "medio" ($40^\circ \leq \gamma \leq 50^\circ$) y "alto" ($\gamma \geq 50^\circ$). Mientras que v se ha dividido en dos grupos, 'bajo' ($v \leq 5$ m/s) y 'alto' ($v > 5$ m/s). Los resultados se muestran en la Tabla 6. El nivel de significancia del estudio es $\alpha = 0.05$.

Tabla 6. Resultados del análisis ANOVA. Subrayados aquellos que cumplen la hipótesis.

Modelo	Número de Serie	P-valor Elevacion solar	P-valor Velocidad viento	P-valor Cruzada
CHP1	080001	0.6293	0.2546	0.4221
CHP1	140129	0.5605	0.0000	0.0592
CHP1	110766	0.1724	0.0000	0.0459
CHP1	080028	0.0945	0.0000	0.0544
CHP1	110656	0.3116	0.0000	0.0106
CH1	040381	0.0006	0.0000	0.0004
CH1	060495	0.0066	0.0000	0.0001
NIP	29015E6	0.0000	0.0000	0.0268
NIP	21131E6	0.0000	0.0000	0.3081
NIP	36473E6	0.0172	0.0000	0.0060
NIP	18949E6	0.0000	0.0008	0.5992
NIP	19776E6	0.0000	0.0000	0.6879
CHP1	140057	0.2857	0.4161	0.0974
CH1	010270	0.0000	0.0166	0.5775

CONCLUSIONES

Se ha estudiado la influencia en los resultados de la calibración de pirheliómetros producida por el ángulo de elevación solar (γ) y la velocidad de viento (v).

Los resultados evidencian que para 9 de los 14 pirheliómetros participantes la influencia de γ en su sensibilidad puede describirse mediante una dependencia lineal con pendiente negativa, menos en un instrumento que evidencia una pendiente positiva. El análisis muestra que para 11 de los 14 pirheliómetros la influencia de v se ajusta a una dependencia lineal con pendiente negativa. Los resultados obtenidos en este trabajo son sólo representativos de los pirheliómetros que han participado en esta campaña.

El mejor modelo ha resultado ser la dependencia conjunta de γ y v , puesto que 12 de los 14 pirheliómetros han verificado la hipótesis. Cabe destacar además, que los signos de las pendientes de γ y v coinciden con los obtenidos en los ajustes lineales individuales.

El análisis ANOVA muestra que las constantes de calibración obtenidas con γ bajos, medios y altos son significativamente distintas desde el punto de vista estadístico en 8 de los 14 pirheliómetros. Mientras que las constantes de calibración que han sido obtenidas con v altas o bajas muestran diferencias estadísticamente significativas en 12 de 14 pirheliómetros. La influencia conjunta produce constantes de calibración estadísticamente diferentes en 6 de los 14 pirheliómetros.

Los resultados evidencian la distinta sensibilidad que muestra cada pirheliómetro frente a las condiciones experimentales estudiadas e invitan a seguir estudiando y profundizando en el conocimiento de los factores que afectan a las calibraciones para mejorar la precisión de las mismas.

AGRADECIMIENTOS

La investigación que condujo a estos resultados ha recibido financiación del 7th Framework Programme de la Unión Europea (FP7/2007-2013) en virtud del acuerdo de subvención nº 312643 (SFERA 2).

Los autores desean agradecer a los técnicos de PSA, especialmente Antonio Campos, Jesús Valero y Juan Rafael López, por su colaboración durante la campaña de calibración así como por el mantenimiento y cuidado de las instalaciones de calibración.

REFERENCIAS

- Ferrera Cobos, F., Valenzuela, R.X., Ramírez, L., Zarzalejo, L.F., Nouri, B., Wilbert, S., García, G., 2018. Assessment of the impact of meteorological conditions on pyrheliometer calibration. *Sol. Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.03.046>
- ISO, 1990. Solar energy - Calibration of field pyrheliometers by comparison to a reference pyrheliometer.
- JCGM, 1995. Guide to the expression of uncertainty of measurement: point/counterpoint.
- Michalsky, J., Dutton, E.G., Nelson, D., Wendell, J., Wilcox, S., Andreas, A., Gotseff, P., Myers, D., Reda, I., Stoffel, T., Behrens, K., Carlund, T., Finsterle, W., Halliwell, D., 2011. An extensive comparison of commercial pyrheliometers under a wide range of routine observing conditions. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 28, 752–766. <https://doi.org/10.1175/2010JTECHA1518.1>
- Pozo-Vázquez, D., Wilbert, S., Gueymard, C., Alados-Arboledas, L., Santos-Alamillos, F., Granados-Munoz, M., 2011. Interannual variability of long time series of DNI and GHI at PSA, Spain. *Proc SolarPACES Conf* 1–8.
- Reda, I., 2011. Method to Calculate Uncertainties in Measuring Shortwave Solar Irradiance Using Thermopile and Semiconductor Solar Radiometers.
- Reda, I., Dooraghi, M., Habte, A., Reda, I., Dooraghi, M., Habte, A., 2014. NREL Pyrheliometer Comparisons : NREL Pyrheliometer Comparisons : September 22 – 26 , 2014 (NPC-2014).
- Wilbert, S., Janotte, N., Pitz-Paal, R., van Wely, L., Geuder, N., 2010. Reduced uncertainties of field pyrheliometers through improved sensor calibration. *SolarPaces Conf*. 1–8.