

## **PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN AUTOMÁTICA MEDIANTE EL MÉTODO DE “TAPADO-DESTAPADO”**

**R. Righini, R. Aristegui, M. Parquet, S. Bazán**

GERSolar, INEDES-CONICET, Universidad Nacional de Luján, Av. Constitución y Ruta 5, (6700) Luján, Buenos Aires, Argentina – Tel. (54 02323 440241)

**RESUMEN:** La calibración de piranómetros requiere trazabilidad para brindar datos confiables. Un método preciso consiste en la calibración de este tipo de instrumental valiéndose de un pirheliómetro para realizarlo. El procedimiento de calibración, determinado por la norma ISO 9846:1993, requiere tapar y destapar el piranómetro bajo calibración con el objetivo de medir la radiación solar global y difusa que recibe. El presente artículo describe un mecanismo automático que permite efectuar el proceso entero, que, en principio, puede lograr mejores resultados que los que brinda el procedimiento manual habitualmente empleado.

**Palabras clave:** Calibración de piranómetros, tapado-destapado, automatización

### **INTRODUCCIÓN**

Las obras, públicas y privadas, destinadas a vivienda componen hoy en día una parte importante de las construcciones desarrolladas en la Provincia, y las viviendas de financiación estatal, destinadas a los usuarios de menor poder adquisitivo, representan el 11% de las viviendas ocupadas en la ciudad de San Miguel de Tucumán y casi el 30% si se consideran las ciudades aledañas del Gran San Miguel (Martínez, 2001).

Los procedimientos de calibración de solarímetros resultan importantes. Mediante ellos se determinan las sensibilidades para el instrumental de medición, de él dependerá, a través del error con el que se determinen, la incerteza con la que se mida la irradiación solar.

De esta manera la calibración del instrumental solarimétrico influye, entre otras cosas, en la exactitud de las cartas de irradiación confeccionadas con datos provenientes de solarímetros, en el análisis de la variabilidad del recurso solar, en la evaluación del desempeño de modelos de estimación de la irradiancia solar, en la determinación de la factibilidad económica de proyectos que aprovechen la radiación solar como fuente primaria de energía, por citar algunas de las muchas actividades relacionadas con la medición de la energía solar en las que la evaluación del recurso tiene un peso decisivo.

Las formas de calibrar equipos son múltiples y se aplican, en varias maneras a sensores que presenten distintos grados de precisión, de diversa confiabilidad y diferentes condiciones de estabilidad en sus sensibilidades. Pero todas ellas deben resultar trazables, para asegurar que las calibraciones cumplan con los requisitos establecidos destinados a procurar datos de buena calidad.

Un procedimiento básico consiste en calibrar (generalmente un estándar secundario) usando un pirheliómetro absoluto, que haya sido parte de algún proceso internacional de intercomparación de pirheliómetros, tal como el que lleva a cabo el World Radiation Center (WRC) en la ciudad suiza de

Davos cada cinco años. Allí el WRC compara durante un determinado período de tiempo los equipos a calibrarse contra un conjunto de patrones propios. El resultado garantiza la trazabilidad de la constante de calibración de los pirheliómetros participantes y, por ello, permite usarlos para calibrar luego patrones secundarios.

Uno de los métodos habitualmente usado (Norma ISO 9847:1992) consiste en comparar dos radiómetros, uno de ellos de referencia. Resulta una posibilidad que no requiere equipamiento costoso tal como el que representa un seguidor solar.

Otro de los mecanismos usados para calibrar en exteriores un piranómetro contra un pirheliómetro absoluto es el de "tapado-destapado". El método consiste en ubicar el solarímetro a calibrar en plano horizontal junto al pirheliómetro absoluto y puede ser aplicado tanto para calibraciones en plano horizontal como en plano inclinado. Se mide la tensión de salida del solarímetro en dos condiciones:

- a) Cuando su zona sensora está tapada por un disco que subtende un ángulo sólido de 5 grados (coincidente con el campo de visión del pirheliómetro). Al voltaje así medido lo denominamos  $V_t$ .
- b) Cuando el solarímetro está destapado. A esa tensión la denominamos  $V_d$ .

La sensibilidad del equipo ( $c$ ) se determina entonces mediante la siguiente relación:

$$c = \frac{V_D - V_T}{I_0 \cdot \cos(\varphi)}$$

Donde  $I_0$  es la radiación directa proveniente del Sol, medida por el pirheliómetro y  $\varphi$  el ángulo cenital solar (Grossi Gallegos y Raichijk, 2018).

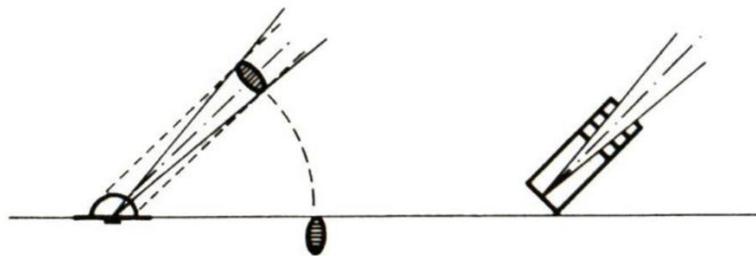


Figura 1: esquema del método de tapado y destapado (Grossi Gallegos y C. Raichijk, 2018)

Las mediciones con el sensor tapado y destapado no pueden realizarse simultáneamente, por lo cual, según la norma ISO 9846:1993, se debe:

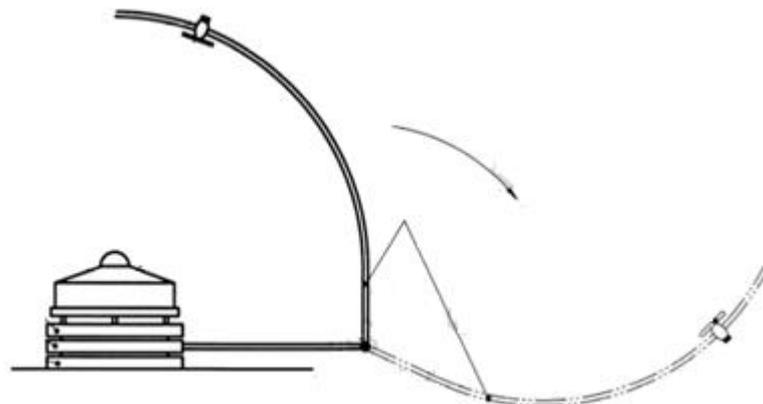
- 1) Medir las tensiones del solarímetro a calibrar cuando el sensor está tapado en los extremos de un intervalo temporal determinado por la velocidad de respuesta del pirheliómetro.
- 2) Medir la radiación solar directa que recibe el pirheliómetro y la tensión del solarímetro destapado en la mitad del intervalo anteriormente definido, juntamente con el ángulo cenital solar en ese momento.
- 3) Considerar simultáneas las mediciones realizadas con el sensor a calibrar tapado y con el sensor destapado.
- 4) Realizar al menos diez mediciones de este tipo en no más de 35 minutos, lo que se considerará una serie.
- 5) Realizar al menos diez series de mediciones para calcular la constante de calibración según el procedimiento definido por la norma mencionada.

Resulta necesario, por lo tanto, para realizar correctamente la calibración, atenerse a dos condiciones que permitan minimizar el error cometido:

- a) Las mediciones con el solarímetro a calibrar deben hacerse bajo condiciones similares de cielo, ya sea que el solarímetro esté tapado o destapado.
- b) La irradiación solar directa debe mantenerse estable (dentro de ciertos límites) para poder asumir que es similar durante las dos mediciones.

Para cumplir con ambos requisitos se realizan las mediciones bajo condiciones de cielo despejado, cerca del mediodía durante cortos períodos de tiempo. Accionar así asegura que se cumplan los requerimientos que una comparación de procedimientos de calibración exige.

Habitualmente el mecanismo usado consta de una plataforma sobre la cual se sitúa el solarímetro a calibrar. Un aro circular, de aproximadamente 1 metro de radio, cuyo centro está donde se ubica el solarímetro, porta un disco que subtiende un ángulo sólido de 5 grados. El aro puede girar, para que el solarímetro sea tapado o destapado. Simultáneamente el pirheliómetro, montado en un seguidor solar, mide la radiación solar directa.



*Figura 2: esquema de funcionamiento usual para el método Tapado-destapado, llevado a cabo en forma manual (según norma ISO 9846).*

Este mecanismo presenta algunas dificultades ya que el posicionamiento del disco es manual. Hay que modificar su posición en el aro a medida que transcurre el tiempo y debe registrarse el voltaje del piranómetro y la lectura del pirheliómetro, al mismo tiempo que la hora. Todo ese proceso debe hacerse con cuidado para no desnivelar el piranómetro y esperar a que el voltaje se estabilice. Como todo ello queda a criterio de quienes realizan la calibración (siempre más de una persona), el proceso suele tener errores aparejados que resultan difíciles de disminuir y cierta dificultad operativa.

El presente artículo describe un procedimiento automático para realizar la calibración mediante el método de tapado-destapado, empleando un seguidor Solys 2, un adquisidor de datos Campbell CR6, un pirheliómetro absoluto TMI y un dispositivo mecánico de posicionamiento.

Si bien es cierto que puede calibrarse de forma continua midiendo, simultáneamente, radiación solar directa con un pirheliómetro y radiación solar difusa (mediante un solarímetro que mida la radiación solar difusa por medio de una esfera sombreadora), esa alternativa requiere del empleo de dos sensores de referencia. Si sólo se cuenta con uno, la metodología propuesta simplifica la operatoria tradicionalmente recomendada para la calibración.

## MATERIALES Y MÉTODO

Se utiliza un seguidor Solys 2, sobre el cual se monta el pirheliómetro TMI, responsable de la medición de radiación solar directa. El seguidor lleva puesta la esfera sombreadora que permite medir radiación solar difusa.

En la plataforma del Solys se monta un carro. Debajo de él un actuador lineal, cuyo brazo ha sido fijado a la plataforma, puede posicionarlo en dos sitios de la plataforma. El actuador se acciona por medio de dos relé mediante dos salidas de tensión del adquisidor empleado. Sobre el carro se sitúa, convenientemente nivelado, el piranómetro que se desea calibrar. Una de las dos posiciones que el carro puede tomar, sitúa el piranómetro en la posición que corresponde a la medición de radiación solar difusa en plano horizontal (posición "tapado"). La otra, en aquella en que el solarímetro se encuentra destapado. Las salidas de tensión del pirheliómetro y del piranómetro se conectan al adquisidor CR6 que, conviene recordar, además controla a través de dos puertos de salida de tensión el posicionamiento del carro en la plataforma del Solys 2. A intervalos previamente programados, el carro se desplaza entre sus dos posiciones. El programa cargado en el adquisidor CR6 promedia, cada 5 segundos, los valores de tensión conectados a sus entradas de medición. Cada vez que el carro se posiciona en alguno de los dos sitios asignados, el adquisidor espera 20 segundos para comenzar a tomar datos. El objetivo es que el solarímetro a calibrar estabilice sus valores de tensión de salida. Ese intervalo de tiempo puede ser cambiado por la programación del adquisidor para operar con pirheliómetros cuyo tiempo de estabilización de señal de salida sea diferente. El adquisidor, además, calcula la posición del Sol y, en particular, el ángulo cenital. Los datos son almacenados luego y procesados.

Cada conjunto de datos constituye una lectura de las tantas que conforman una serie de medición. La sensibilidad del equipo se determina, usando esos datos según la especificación de la norma ISO 9846:1993. Se calcula el desvío asociado a la sensibilidad promedio, el cual, junto con los errores de medición del pirheliómetro, de los voltajes y del ángulo cenital, permite evaluar la incerteza de la constante de calibración determinada.

Las fotografías siguientes muestran el dispositivo montado.



*Figuras 3 y 4: Seguidor Solys 2. En la foto de la izquierda puede verse el solarímetro montado sobre el carro. A la derecha, pirheliómetro TMI montado sobre el seguidor.*



Figura 5: detalle que muestra el seguimiento solar del seguidor en la mira del TMI.



Figura 6: Solarímetro en las dos posiciones que toma el carro: destapado (izquierda) y tapado (derecha)



Figura 7: esfera sombradora del Solys 2 tapando el solarímetro a calibrar en la posición "tapado".



Figura 8; extremo del actuador lineal (situado debajo del carro) que permite ubicar al carro en las dos posiciones de medición.

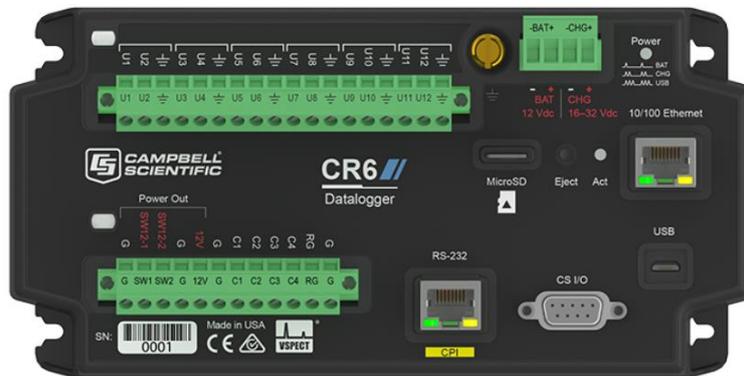


Figura 9; Adquisidor Campbell CR6, usado para el control del carro y las mediciones

Se utilizan los puertos C1 y C2 del adquisidor CR6 para enviar tensión (12V) a dos relé que controlan el actuador lineal. Cuando C1 entrega 12 V, C2 está puesta a tierra. En esas condiciones el actuador mueve el carro hacia la posición “destapado”. Cuando C1 está a tierra y C2 entrega 12V, el actuador mueve el carro hacia la posición “tapado”. El actuador se alimenta con 220V CA y tiene un final de carrera que corta la alimentación cuando alcanza cualquiera de sus dos posiciones extremas.

El siguiente esquema muestra las conexiones.

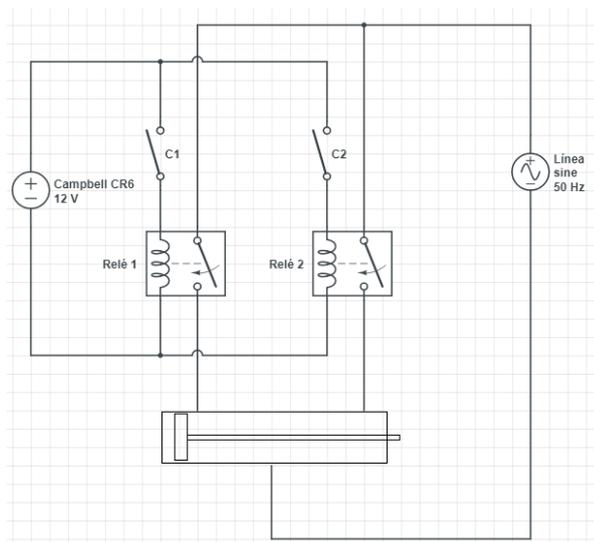


Figura 10: diagrama de conexiones. C1 y C2 son los puertos de la Campbell CR6 que activan los relé. Los relés hacen que el actuador lineal mueva el carro hacia alguna de las dos posiciones de medición.

## RESULTADOS

### Evaluación de la incerteza en la determinación angular

La posición del Sol es calculada por el seguidor usando el algoritmo de Michalsky (Michalsky, 1988), algoritmo que requiere, como variables de entrada, la hora del día, el día del año, y las coordenadas geográficas del sitio de instalación. Todas ellas son obtenidas por la unidad GPS que posee el Solys 2. Éste especifica un error en el seguimiento solar menor a  $0,1^\circ$ , mientras que el algoritmo de Michalsky permite calcular los ángulos que determinan la posición solar con un error menor a  $0,01^\circ$ . La diferencia es debida a las limitaciones mecánicas del seguidor que determinan que el seguimiento no pueda ser tan preciso como el cálculo posibilitaría.

El adquisidor CR6 usa el algoritmo SOLPOS, desarrollado por ENREL para calcular la posición solar (<https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/solpos.html>). El siguiente gráfico muestra los valores calculados por el algoritmo de Michalsky y el brindado por el adquisidor CR6 para horas cercanas al mediodía del 23 de octubre de 2019 en el predio del GERSolar en la ciudad de Luján, Provincia de Bs. As., Argentina ( $59^\circ 3' 48''$  O;  $34^\circ 35' 19''$  S).

La diferencia entre los valores absolutos de los cosenos de los ángulos cenitales, calculados por el algoritmo de Michalsky y el que utiliza el adquisidor resulta levemente inferior (en promedio) al 0,1%. A continuación, se muestra un gráfico que ilustra los valores brindados por ambos para el día 7 de noviembre de 2019, en el predio del GERSolar, entre las 11 y las 15.

Tomando como referencia el valor calculado por el algoritmo de Michalsky, el sesgo del coseno calculado por el CR6 resultó ser del -0,09% y el desvío estándar del 0,14%

La coincidencia en los valores del coseno del ángulo cenital brindados por el algoritmo de Michalsky (usado por el seguidor para posicionarse) y el algoritmo empleado por el adquisidor de datos Campbell CR6, permite asegurar que el uso del coseno del ángulo cenital calculado mediante el CR6 es apropiado para evaluar la radiación solar directa proyectada en el plano horizontal.

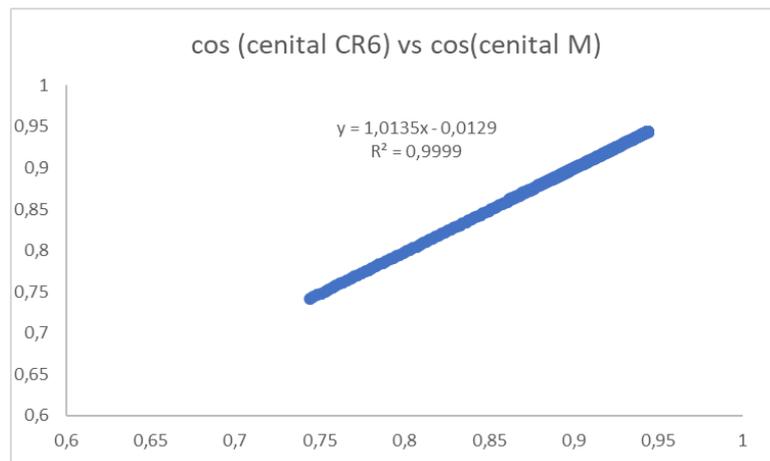
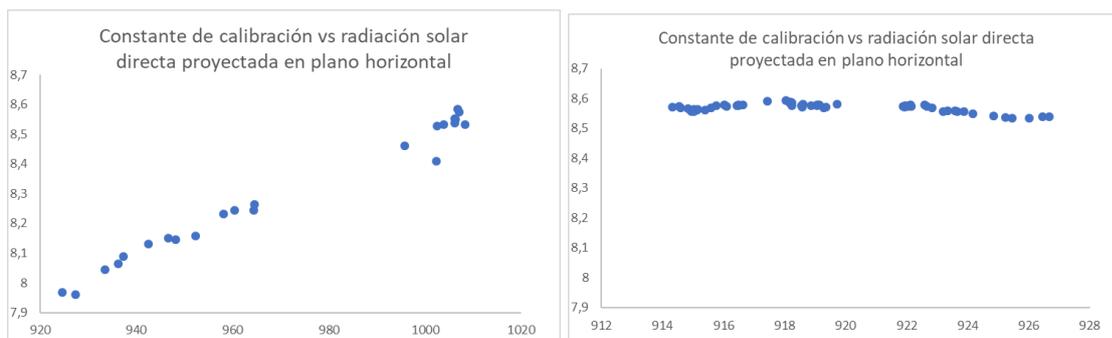


Figura 11: Coseno del ángulo cenital calculado por la CR6 ( $\cos(CR6)$ ) en función del coseno del ángulo cenital calculado por el algoritmo de Michalsky ( $\cos(M)$ ).

## MEDICIONES

A continuación, se muestran los resultados obtenidos mediante dos calibraciones empleando el TMI. El primer gráfico muestra los resultados de una calibración habitual, mediante el método de tapado-destapado, realizado en la plataforma que se usa regularmente para este tipo de tarea. Se requirieron, para realizarlo, de dos operadores que toman los datos y posicionan el disco sombreador.

El segundo gráfico muestra los resultados obtenidos mediante una calibración con TMI de un mismo equipo (un solarímetro CMP11 de Kipp&Zonen) usando el mecanismo automático de movimiento, toma de datos y cálculo descripto más arriba. Toda la calibración puede ser realizada, en este último caso, por una sola persona que supervise, únicamente, las condiciones de funcionamiento a intervalos regulares.



Figuras 12 y 13: resultados de la calibración de un mismo equipo mediante el método tradicional (izquierda) y el automático (derecha).

Una aclaración aquí resulta pertinente: las constantes que se muestran en ambos gráficos son las que corresponden a cada una de las series de medición efectuadas y no al valor final (el promedio de todas las series). La norma internacional establece que aquellas constantes que difieran en más del 1% del promedio de la serie, deben ser rechazadas y el promedio debe recalcularse. No obstante, los gráficos dan buena cuenta de la diferente dispersión que presentan las mediciones manual y automática, por lo que resulta un parámetro apropiado para evaluar la calidad del proceso de calibración.

Calculando las características mencionadas, la sensibilidad determinada para el primer procedimiento fue  $8,55 \mu\text{V}/\text{watt}/\text{m}^2$ , con un error relativo del 6%, mientras que el mecanismo automático de medición estableció el valor de la constante en  $8,57 \mu\text{V}/\text{watt}/\text{m}^2$ , con un error relativo del 0,16%.

El uso del mecanismo automático de medición brinda facilidades mayores, lo que se traduce en un número más elevado de mediciones realizadas. En los casos mostrados, el método automático posibilitó realizar 60 promedios de la constante (el método permitiría calcular 720 promedios parciales tomados cada 5 segundos, tal como se adquieren en el adquisidor) sin esfuerzo, mientras que el modo manual constó de 23 promedios.

## **CONCLUSIÓN**

El procedimiento llevado a cabo para realizar una calibración automática mediante el método de “tapado-destapado” usando un pirheliómetro absoluto, descrito en el presente artículo, permite una facilidad mayor en el mecanismo de calibración, resultando más exacto en el posicionamiento del equipo bajo ensayo en la posición “tapado”. La velocidad con que se realiza el proceso, la automatización del tiempo de espera necesario para que se estabilicen las mediciones, el cálculo preciso de los promedios de las medidas, la determinación del ángulo cenital solar, permiten un mayor número de mediciones realizadas en mejores condiciones que durante una calibración manual. Todas esas facilidades se reflejan en la determinación de la sensibilidad del equipo a calibrar, la que es posible establecer con un error mucho más bajo que el que habitualmente se alcanza con el procedimiento tradicional.

Tal como se expresara en la introducción, el método continuo de calibración (mediante dos equipos de referencia: un pirheliómetro y un solarímetro que mida radiación difusa de manera simultánea) puede resultar preferible. No obstante, requiere de dos sensores de referencia, en lugar de uno. Una comparación entre ambos métodos resulta necesaria para corroborar si este aserto está justificado. Esa comparación será realizada a futuro con ese objetivo concreto.

Si bien consideramos que la propuesta presentada constituye un avance respecto al método tradicional, no escapa a nuestra apreciación que una valoración definitiva del método requiere un conjunto más amplio de calibraciones realizadas con ambos procedimientos que permitan llegar a una conclusión definitiva.

## **REFERENCIAS:**

- H. Grossi Gallegos y C. Raichijk, Radiación Solar. Medición y Modelado (294 páginas), publicado por edUTecNe - Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional y ASADES - Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente, Buenos Aires, 2018.
- Kasten, F. (1988) Field instruments for solar radiation measurements. En Physical Climatology for Solar and Wind Energy, Guzzi, R. and Justus, C. (Eds.), pp. 438-477, World Scientific, Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore.
- Kendall, J. M. (1969) Primary absolute cavity radiometer. NASA Technical Report 32-1396, 29 p.
- Latimer, J.R. (1979) Inves0074
- Michalsky (The Astronomical Almanac's algorithm for approximate solar position (1950–2050), Solar Energy, Vol 40, Issue 3, 227-235, 1988.
- Norma ISO 9846:1993 Calibración de un piranómetro usando un pirheliómetro.

## **ABSTRACT**

Pyranometer calibration requires traceability to provide reliable data. A precise method consists in the calibration of this type of instrument using a pyrhelimeter to perform it. The calibration procedure, determined by the ISO 9846 standard, requires covering and uncovering the pyranometer under calibration in order to measure the global and diffuse solar radiation received. This article describes an automatic mechanism that allows the entire process to be carried out, which, in principle, can be achieving better results than those normally used by the manual procedure.

**KEYWORDS:** Pyranometer calibration, cap-uncap, automation.