

**DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UN BANCO DE COMPARACIÓN PIRANOMÉTRICA EN CENAM
y UACM****Edgar Rayo, Héctor Jiménez, Álvaro Lentz, Rogelio Mendoza**

Universidad Autónoma de la Ciudad de México Programa de Energía, Colegio de Ciencia y Tecnología, Calle Prolongación San Isidro No. 151, Col. San Lorenzo Tezonco, Del. Iztapalapa, Ciudad de México, C.P. 09790.

rayo_ed@yahoo.com.mx

Hector Castillo, Juan C. Molina

Centro Nacional de Metrología, Dirección de Óptica y Radiometría, Carretera a los Cués, Km 4.5, El Marques Querétaro, 76246, México

<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.6102>

RESUMEN

Este artículo describe como calcular y reportar la incertidumbre para uno de los dos métodos de calibración de piranómetros con trazabilidad al Sistema Internacional de Unidades (SI), desarrollado en México por el Centro Nacional de Metrología (CENAM), siguiendo las pautas de la “Guía para la expresión de la incertidumbre de la medición”. El banco de comparación piranométrica, se construyo bajo las indicaciones de la ISO 9847 — “Energía Solar: Calibración de piranómetros de campo en comparación con un piranómetro de referencia”, calibración en interiores tipo IIc. El método utiliza un piranómetro calibrado como estándar y otro dispositivo bajo calibración (DUT por sus siglas en inglés de Dvice Under Test). Este método ofrece varias ventajas sobre los métodos de calibración convencionales al aire libre, como la disponibilidad de una fuente de luz en lugar de la fuente natural, además se cuenta con el control de todos los parámetros relacionados a la medición (control de temperatura e iluminación en el laboratorio).

Palabras clave: Piranómetro, Trazabilidad, Calibración y Banco

ABSTRACT

This article describes how to calculate and report the uncertainty for one of the two pyranometer calibration methods with traceability to the International System of Units (SI), developed in Mexico by the National Metrology Center (CENAM), following the guidelines of the “Guide for the expression of the measurement uncertainty”. The pyranometric comparison bench was built under the indications of ISO 9847 - "Solar Energy: Calibration of field pyranometers in comparison with a reference pyranometer", type IIc indoor calibration. The method uses a calibrated pyranometer as the standard and another Dvice Under Test (DUT) device. This method offers several advantages over conventional outdoor calibration methods, such as the availability of a light source instead of the natural source, as well as the control of all the parameters related to the measurement (temperature and lighting control at the laboratory).

Keywords: Pyranometer, Traceability, Calibration and Bank

INTRODUCCIÓN

Actualmente la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM) desarrolla un proyecto para implementar un laboratorio de pruebas que permitirá evaluar la eficiencia de los Calentadores Solares de Agua (CSA) que se comercializan en el mercado mexicano. En este proyecto se han destinado recursos para la adquisición de equipos de radiometría los cuales permitirán medir las condiciones de radiación solar de la ciudad, sin embargo, con el paso del tiempo, los piranómetros tienen deriva, provocando que los datos obtenidos varíen del valor calibrado, por esta razón es importante tratar de realizar una calibración con una periodicidad de uno a dos años dependiendo de su uso o exposición, por este motivo se requiere de un proceso de calibración programado para garantizar la confiabilidad de su medición.

Las normas internacionales especifican dos métodos para la calibración y son aplicables a la mayoría de los piranómetros de campo, independientemente del tipo de receptor de radiación solar que se emplea en el dispositivo. En general, los piranómetros a utilizar para el monitoreo de radiación solar de incidencia pueden ser calibrados por los métodos descritos en la norma ISO 9847, los cuales se describen a continuación:

Calibración al aire libre o tipo I, este método utiliza la radiación solar como fuente, en tanto, el segundo método, calibración en interiores o tipo II emplea una fuente de radiación artificial.

- a. *La calibración al aire libre de piranómetros de campo, se puede realizar con un piranómetro en posición horizontal (inclinación cero) (tipo I a), en posición inclinada (tipo I b), o con una incidencia normal (tipo I c), esto es, manteniendo la superficie del receptor perpendicular al haz de sol.*
- b. *La calibración en interiores de piranómetros de campo, se realiza con una fuente de luz artificial, esta puede ser una lámpara, sombreada (tipo II a), sin sombra (tipo II b) o en incidencia normal (tipo II c) usando un banco óptico para colocar el receptor de manera perpendicular a la lámpara.¹*

El Centro Nacional de Metrología (CENAM), cuenta con un patrón primario de radiación, lo que le permite realizar la comparación de los piranómetros, como laboratorio primario, en el futuro se espera el incremento en la demanda de calibración de piranómetros, por lo cual nace la necesidad de implementar laboratorios secundarios para este fin.

La UACM iniciará el proceso para certificarse como un laboratorio de calibración secundario, por este motivo se vio en la necesidad de adquirir un banco de comparación piranométrica, dentro de las actividades que esto conlleva están: investigación, construcción y capacitación del banco de comparación piranométrica por parte del CENAM.

TRAZABILIDAD DE CALIBRACIÓN

Para la metrología, la calibración es un proceso de comparación de los valores de medición producidos por un dispositivo sometido a prueba con los de un instrumento calibrado con un rendimiento de medición trazable a un estándar de medición de referencia reconocido internacionalmente. Cuando estos instrumentos calibrados con trazabilidad a estándares de medición internacionales se utilizan para calibrar muchos otros instrumentos, se denominan instrumentos de referencia².

La trazabilidad de la calibración aborda las necesidades de un proceso que tiene como finalidad obtener mediciones consistentes dentro de las incertidumbres establecidas. Los radiómetros, como cualquier otro equipo de medición y de prueba, proporcionan mediciones rastreables a través de una cadena ininterrumpida de comparaciones contra un estándar de medición conocido y avalado por el Instituto Nacional de Metrología de cada país

DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE COMPARACIÓN PIRANOMÉTRICA

La Figura 1. muestra un banco de comparación compuesto por tres sistemas y un multiplexor, El primero es el sistema de iluminación, cuya principal tarea es la proporcionar irradiancia a los dos piranómetros, al de referencia y DUT, este sistema está conformado por un solo LED de alta intensidad capaz de generar irradiancia desde 100 – 1500 W/m². El segundo es el sistema de movimiento lineal, el cual es empleado para realizar el movimiento de ambos piranómetros que serán expuestos a la fuente de luz. El tercero es el sistema de control (software), donde se especifican las condiciones para realizar la calibración. Permitiendo realizar calibraciones automáticas, construir la secuencia de mediciones, disminuir los tiempos de calibración, obtener una menor incertidumbre por repetitividad y una alta reproducibilidad de los resultados en laboratorio sin depender de una fuente natural de iluminación (sol). Por

¹ Solar energy - Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer

² Vignola, F., Michalsky, J. and Stoffel, T., 2019. SOLAR AND INFRARED RADIATION MEASUREMENTS, SECOND EDITION. 2nd ed. New Mexico State University: CRC Press.

último, se requiere de un multiplexor para realizar las mediciones durante la calibración, el utilizado es la marca Keithley, modelo 2700 dicho instrumento debe contemplar al menos dos canales y 6,5 dígitos (un canal para cada piranómetro), con la finalidad de brindar trazabilidad al sistema.

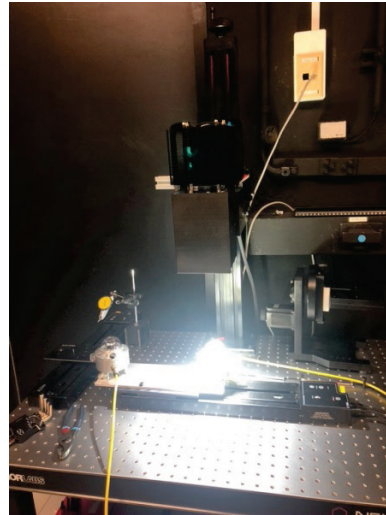


Figura 1. Banco de calibración por sistema lineal

METODOLOGÍA

Para iniciar se debe de encender la lámpara, para estabilizar su funcionamiento, tiene una tensión de 18.1 V (puede variar dependiendo de la altura), el ventilador de la lámpara a una tensión de 5 V; dejar estabilizar lámpara durante 1 hora si el laboratorio es estable en ± 1 °C. Si el laboratorio no es estable, no se puede proceder. Al motor a pasos se le debe de suministrar una tensión de 14 V.

Instalación de piranómetros

El banco de comparación cuenta con un sistema de movimiento lineal, el cual ha sido modificado agregando una placa horizontal con orificios para la colocación de los piranómetros. La instalación de los mismos se hace como lo indica el proveedor.

Nivelación de altura

Al tener los piranómetros a la misma distancia es necesario utilizar el medidor de carátula para obtener una medida más precisa, esto se hace colocando el palpador en la parte más alta del domo de piranómetro patrón y tomar la medida como se muestra en la Figura 2.

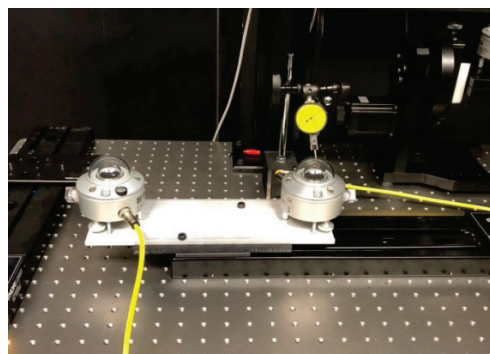


Figura 2. Medición de altura en plataforma lineal

A continuación, se desplaza la plataforma 0,25 m para realizar la medida del DUT, con la finalidad de no sobrepasar los 100 micrómetros de altura entre ambos piranómetros. Esto se muestra en la Figura 3.

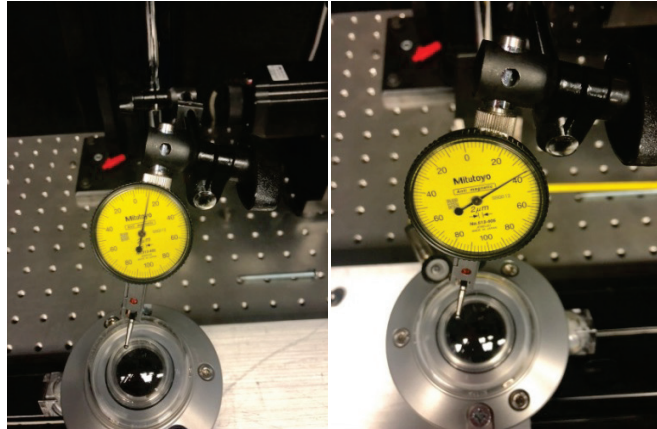


Figura 3. Comparación de alturas

Para concluir la alineación, el sensor del piranómetro de referencia debe de estar alineado a la normal y al plano de la fuente de luz. Para el caso de este método, cuando el sistema de movimiento lineal se mueva, permitirá que el DUT este en la misma ubicación que el piranómetro de referencia. De esta manera se creará una rutina, donde se establecerán los parámetros a utilizar, como son: Intensidad de irradiancia, número de mediciones, movimientos de la plataforma, tiempos de espera y cuantas veces se repetirá la rutina. De esta manera, la calibración se lleva a cabo considerando la radiación directa de la fuente, así como la misma magnitud de irradiancia para ambos sensores que tienen la misma distancia.

Creación de rutina para la obtención de mediciones

Se utiliza el software para crear una rutina de calibración, que consiste en ingresar los pasos a seguir para realizar la comparación entre piranómetros, esta debe de abarcar mediciones para ambos sensores.

La rutina comienza haciendo mediciones del piranómetro patrón, durante la creación de la rutina se especifica la cantidad de mediciones necesarias, se recomienda realizar pocas mediciones que van desde 10 hasta un máximo de 12 mediciones para ambos piranómetros. Se realizan pocas con la finalidad de no calentar los radiómetros y no se afecten las mediciones por cambios de temperatura.

Al terminar las mediciones del piranómetro patrón el sistema de movimiento lineal se desplaza 0.25 m a la izquierda para posicionar al piranómetro bajo prueba por debajo del haz de luz.

Terminado el desplazamiento, se realiza una pausa de 60 s en las mediciones, esto ayuda a que el piranómetro se estabilice bajo el haz de luz, no se tomen mediciones durante la rotación y se están tomando mediciones de radiación global. Por último, el haz de luz cubra por completo el domo.

Al piranómetro bajo prueba se le realizan la misma cantidad de mediciones que al piranómetro patrón para tener la misma cantidad de valores.

Al terminar las mediciones del piranómetro bajo prueba, el sistema de movimiento lineal realizara un desplazamiento de 0.25 m a la derecha para posicionar al piranómetro bajo prueba por debajo del haz de luz.

De igual manera existe una pausa de 60 s por los motivos ya mencionados arriba

Esta rutina se tendrá que repetir 10 veces para la obtención de datos (cabe mencionar, al finalizar las 10 repeticiones se obtendrán un mínimo de 100 mediciones por cada piranómetro). Al terminar la ejecución del programa se debe de cubrir la lámpara con la tapa para evitar que el piranómetro reciba luz.

ESQUEMA DEL PROCESO DE ANÁLISIS DE LA INCERTIDUMBRE

El método de análisis de la incertidumbre se basa en las directrices descritas en la “Guía para la expresión de la incertidumbre en la medición” GUM. El propósito aquí no es evaluar la GUM, sino seguir al pie los procedimientos

descritos por el documento. La notación, nomenclatura y procedimientos para evaluar la incertidumbre son los prescritos en la GUM.

El proceso de GUM se puede resumir en cuatro pasos:

1. Determine la ecuación de medición para la calibración.

Cada intercomparación en la medición consiste en registrar la señal del DUT y después la señal del piranómetro patrón, ambos equipos son iluminados bajo condiciones de radiación solar global en laboratorio. La sensibilidad del DUT (S_{DUT}), se calcula a partir de la siguiente ecuación: [1]

$$S_{DUT} = \frac{V_{DUT} * S_P}{V_P} \left(\mu V / W m^{-2} \right) \quad (1)$$

Donde:

- S_{DUT} es la sensibilidad del DUT
 - V_{DUT} es la tensión se salida del DUT
 - V_P es la tensión se salida obtenida del patrón (*Volt*)
 - S_P es la sensibilidad del patrón
2. Para cada variable en la ecuación, calcule la incertidumbre estándar usando métodos estadísticos (componente de incertidumbre de Tipo A) o métodos no estadísticos, como especificaciones del fabricante, resultados de calibración e información experimental o de juicio (componente de incertidumbre de Tipo B). La única diferencia es que en una evaluación tipo A se estima esta distribución basándose en mediciones repetidas obtenidas del mismo proceso de edición mientras que en le caso del tipo B se supone una distribución con base en experiencia o información externa. En la tabla 1 se muestran las variables para el cálculo de incertidumbre para el método de calibración mencionado arriba. Son necesarios para el cálculo los valores de Valor estimado Xi e Incerti- dumbre original, los cuales se realizaran en la segunda etapa de este trabajo.

Tabla 1. Variables para el cálculo de incertidumbre

Nº	Magnitud de entrada Xi de Fuentes incertidumbre	Tipo, Distribución	Incertidumbre estándar $U(X_1)$	Coefficiente de sensibilidad C_i	Contribución
1a	Calibración del Voltmetro (DUT)	B, Normal	$\frac{U}{k}$	$\frac{S_P}{V_P}$	$U(X_1)*C_i$
1b	Resolución del Voltmetro (DUT)	B, Normal	$\frac{Resolución}{\sqrt{12}}$	$\frac{S_P}{V_P}$	$U(X_1)*C_i$
2ª	Calibración de piranómetro (patrón)	B, Normal	$\frac{U}{k}$	$\frac{V_{DUT}}{V_P}$	$U(X_1)*C_i$
2b	Calibración del Voltmetro (patrón)	B, Normal	$\frac{U}{k}$	$\frac{-V_{DUT} * S_P}{V_P^2}$	$U(X_1)*C_i$
2c	Resolución del Voltmetro (patrón)	B, Normal	$\frac{Resolución}{\sqrt{12}}$	$\frac{-V_{DUT} * S_P}{V_P^2}$	$U(X_1)*C_i$
3ª	Calibración medidor de carátula	B, Rectangular	$\frac{U}{k}$	1	$U(X_1)*C_i$
3b	Resolución del medidor de carátula	B, Rectangular	$\frac{Resolución}{\sqrt{12}}$	1	$U(X_1)*C_i$
4	Repetibilidad	A, Normal	$\frac{S}{\sqrt{n}}$	1	$U(X_1)*C_i$

3. Calcule la incertidumbre estándar combinada utilizando el método de mínimos cuadrados para todas las incertidumbres estándar determinadas en el paso 5.2. Utilizando los datos de la variable "Contribución".

4. Calcule la incertidumbre expandida multiplicando la incertidumbre estándar combinada por un factor de cobertura, k, típicamente la "t" de Student.

CONCLUSIONES

Se han tenido que detener las actividades por la actual contingencia sanitaria COVID-19, en la UACM y en el CENAM; por lo que, este trabajo se vea afectado, al no poder ingresar al plantel para realizar las mediciones necesarias para hacer el cálculo de incertidumbre para el método de calibración ya mencionado. Las actividades descritas nos permitirán desarrollar la validación del método de comparación del banco de comparación piranométrica.

TRABAJOS A FUTURO

- Realizar las mediciones requeridas para el cálculo de incertidumbre.
- Realizar este mismo procedimiento, pero para el otro método de calibración desarrollado por CENAM.

AGRADECIMIENTO

Por el apoyo brindado a través del proyecto de investigación No. 263488 “Diseño e Instalación de un laboratorio de pruebas y certificación para colectores solares destinados al calentamiento de agua” del fondo sectorial CONACyT-SENER.

Al Laboratorio de Ciencia y Tecnología Sustentable (LACyTES) por brindar un espacio para el desarrollo del presente trabajo y al Centro Nacional de Metrología (CENAM) por permitir la estancia de capacitación.

REFERENCIAS

Habte, A., Sengupta, M., Andreas, A., Reda, I. and Robinson, J. (2016). The Impact of Indoor and Outdoor Radiometer Calibration on Solar Measurements. Munich, Germany: Solar Conference and Exhibition. Available at: [http:// www.nrel.gov/publications](http://www.nrel.gov/publications).

Kratzenberg, M. (2006). uncertainty calculations in pyranometer measurements and application. Denver, Colorado: ASME. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/267648401>.

H. A. Castillo Matadamas (2015) Unexplored Indoors method for pyranometers calibration traceable to SI. To cite this article: J. Phys.: Conf. Ser. 582 012051. Available at: https://www.researchgate.net/publication/271020936_Unexplored_Indoors_method_for_pyranometers_calibration_traceable_to_SI.

Ibrahim Reda, Daryl Myers, Tom Stoffel (2008) Uncertainty Estimate for the Outdoor Calibration of Solar Pyranometers: A Metrologist Perspective. Journal of Measurement Science Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19315775.2008.11721448>.

Vignola, F., Michalsky, J. and Stoffel, T., 2019. *SOLAR AND INFRARED RADIATION MEASUREMENTS, SECOND EDITION*. 2nd ed. New Mexico State University: CRC Press.

Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer.1992 ISO 9847 Solar Energy “Guide to the expression of uncertainty in measurement,” BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML, ISO TAG 4, Geneva, 1995.