

**UACM**

Universidad Autónoma  
de la Ciudad de México

*Nada humano me es ajeno*

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE  
MÉXICO**

**COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**PROGRAMA DE ENERGÍA**

**Validación de un sistema comparador de piranómetros para  
calibración en laboratorio**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE

**LICENCIADO EN INGENIERÍA  
EN SISTEMAS ENERGÉTICOS**

PRESENTA:

**Edgar Rayo Visuel**

DIRECTOR DE TESIS

**Dr. Álvaro Eduardo Lentz Herrera**

Profesor-Investigador del Programa de Energía, UACM

CODIRECTOR

**Dr. Héctor Alfonso Castillo Matadamas**

Profesor del Centro Nacional de Metrología (CENAM)

Ciudad de México, septiembre, 2021

**PEUACM**  
Programa de Energía



## SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



## UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

### RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

#### DERECHOS RESERVADOS ©

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

*A Dios por permitirme concluir con esta etapa de mi vida*

*A mi madre, Ana María*

*A mi padre, Alejandro*

*A mi hermana, Yanet*

*Sólo A Mis Incondicionales y Respetables Amigos.*

## Agradecimientos

*Especialmente a mi director de tesis, el Dr. Álvaro Eduardo Lentz Herrera, quien con sus observaciones, consejos y apoyo (psicológico, espiritual, emocional y hasta económico). A los Drs. Héctor Alfonso Castillo Matadamas y Juan Carlos Molina Vázquez por su paciencia, apoyo y por transmitirme parte de sus conocimientos. Al Dr. Rogelio Mendoza Pérez, por su apoyo incondicional, sus palabras y sobre todo por las enseñanzas que me brindo durante mi educación. Al Dr. Eduardo Rincón Mejía por sus observaciones que ayudaron en gran medida a enriquecer y presentar de mejor manera este trabajo de tesis. Al Dr. José Joaquín Lizardi Del Angel por sus enseñanzas, por ser un modelo en mi formación y por todo el apoyo brindado para este trabajo. Fueron piezas claves para culminar satisfactoriamente este trabajo de investigación. A pesar de mí.*

*A Claudia Chávez, por sus observaciones durante mi formación académica, apoyo y cariño incondicional.*

*Quiero agradecer a los profesores de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, Plantel San Lorenzo Tezonco que contribuyeron, dedicaron tiempo, esfuerzo y paciencia para transmitirme parte de sus conocimientos y ayudarme a crecer en mi formación académica.*

*Agradezco a la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, Plantel San Lorenzo Tezonco, mi alma má ter, por permitirme realizar, en esta ocasión, estudios de licenciatura y por el apoyo económico brindado durante un año de mis estudios.*

*Al proyecto -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. Por permitirme colaborar con ellos durante mi preparación.*

*Al Centro Nacional de Metrología (CENAM) y a la Dirección de Óptica y Radiometría por permitirme realizar la estancia de capacitación. Al Laboratorio de Ciencia y Tecnología Sustentable (LACyTES) por brindarme un espacio para mi desarrollo.*

*Finalmente quiero agradecer al pueblo de México, quien a través del CONACyT-SENER, me apoyó económicamente con una beca durante los dos últimos años de la licenciatura.*

## ÍNDICE

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>III</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>2</b>
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>6</b>
<b>OBJETIVO GENERAL</b> .....	<b>7</b>
<b>OBJETIVOS PARTICULARES</b> .....	<b>7</b>
<b><u>CAPÍTULO 1 -ESTADO DEL ARTE EN CALIBRACIÓN DE PIRANÓMETROS</u></b> .....	<b><u>7</u></b>
<b><u>CAPÍTULO 2- CARACTERIZAR UN CALIBRADOR DE PIRANÓMETROS BASADO EN FUENTE DE LUZ LED</u></b> .....	<b><u>12</u></b>
2.1 CALIBRACIÓN DE PIRANÓMETRO .....	12
2.2. ISO 9846 — ENERGÍA SOLAR. CALIBRACIÓN DE UN PIRANÓMETRO CON UN PIRHELIÓMETRO .....	16
ISO - 9846 — MÉTODO CONTINUÓ DE SOL Y SOMBRA .....	18
2.3. ISO 9847 — ENERGÍA SOLAR. CALIBRACIÓN DE PIRANÓMETROS DE CAMPO EN COMPARACIÓN CON UN PIRANÓMETRO DE REFERENCIA .....	19
2.4. MÉTODOS DE CALIBRACIÓN EN INTERIORES .....	22
<b><u>CAPÍTULO 3 -DESCRIPCIÓN DEL COMPARADOR UACM</u></b> .....	<b><u>25</u></b>
3.1. SUBSISTEMA DE ILUMINACIÓN .....	27
3.2. SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO ROTACIONAL .....	30
3.3. SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO LINEAL .....	32
3.4. SUBSISTEMA DE CONTROL.....	33
3.5. MULTIPLEXOR .....	35
<b><u>CAPÍTULO 4 -VALIDACIÓN DEL MÉTODO DEL COMPARADOR CON LED</u></b> .....	<b><u>36</u></b>
4.1. VALIDACIÓN DE UN MÉTODO .....	36
4.2. MÉTODO ABSOLUTO PARA CALIBRAR PIRANÓMETROS .....	40
4.3. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN.....	42
4.4. CALIBRACIÓN DE PIRANÓMETRO POR SUBSISTEMA DE ROTACIÓN .....	45
4.5. CALIBRACIÓN DE PIRANÓMETRO POR SUBSISTEMA LINEAL.....	51
<b><u>CAPÍTULO 5. ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE CALIBRACIÓN DE PIRANÓMETROS POR EL MÉTODO DE COMPARACIÓN (COMPARADOR DE PIRANÓMETROS)</u></b> .....	<b><u>57</u></b>

5.1. MENSURANDO.....	57
5.2. ESQUEMA DEL PROCESO DE ANÁLISIS DE LA INCERTIDUMBRE.....	57
5.3. EJERCICIO.....	61
<b><u>CAPÍTULO 6 - RESULTADOS</u></b> .....	<b>74</b>
<b><u>CONCLUSIONES</u></b> .....	<b>77</b>
<b><u>ÍNDICE DE TABLAS</u></b> .....	<b>79</b>
<b><u>ÍNDICE DE FIGURAS</u></b> .....	<b>79</b>
<b><u>BIBLIOGRAFÍA</u></b> .....	<b>80</b>
<b><u>ANEXO A (INFORMATIVO)</u></b> .....	<b>83</b>
<b><u>ANEXO B (INFORMATIVO)</u></b> .....	<b>84</b>

## Resumen

El siguiente trabajo de investigación describe el proceso de validación de un sistema comparador de piranómetros para calibrar en laboratorio, con trazabilidad al Sistema Internacional de Unidades (SI), desarrollado en México por el Centro Nacional de Metrología (CENAM). El sistema de comparación, se construyó 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 referencia, también llamado patrón y otro dispositivo bajo calibración (DUT por sus siglas en inglés de Device Under Test). Este método ofrece varias ventajas sobre los métodos de calibración convencionales, 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.

La validación se realizó siguiendo los parámetros propuestos por Rubén J. Lazos Martínez e Ignacio Hernández Gutiérrez, en el artículo: “LA VALIDACIÓN DE MÉTODOS: UN ENFOQUE PRÁCTICO”, los pasos descritos por los autores se pueden resumir de la siguiente manera:

- Identificar la función, se establece el mensurando para la medición requerida en el sistema comparador.
- Especificar los requisitos de la función y las características de la herramienta, se ha realizado estudio de los componentes que conforman al sistema comparador y se hace una comparación entre estos contra los sugeridos por la norma mencionada antes.
- Determinar el desempeño de las características de la herramienta, se ha desarrollado la estimación de la incertidumbre para el sistema comparador, bajo las pautas de la Guía para la expresión de la incertidumbre en la medición (GUM).
- Comparar los resultados del desempeño con los requisitos, los resultados de la estimación de la incertidumbre obtenidos por el subsistema rotacional fueron comparados contra los del subsistema lineal.
- Expresar el resultado del proceso, la incertidumbre expandida relativa muestra un resultado de 1,9 % con un factor de cobertura de  $k = 2$ , proporcionan un intervalo de confianza de 95,45 %, este porcentaje asegura la existencia de que el valor representado se encuentra dentro del intervalo de los resultados proporcionados.

## Introducción

Actualmente la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM) desarrolla 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, que permitirá evaluar la eficiencia de los Calentadores Solares de Agua (CSA) comercializados en México. En este proyecto se han destinado recursos económicos como humanos para la adquisición de equipos de radiometría (piranómetros, pirgeómetros, pirheliómetro, seguidor solar, etc.) los cuales permitirán medir las condiciones de radiación solar (directa, difusa y global) de la localidad, estos instrumentos requieren de un proceso de calibración programado para garantizar la confiabilidad de su medición.

En Mexico se cuenta con el CENAM, el cual puede realizar calibraciones de piranómetros, como laboratorio primario, pero en el futuro se espera el incremento en la demanda de calibración de estos equipos, por lo cual nace la necesidad de implementar laboratorios secundarios.

La UACM está en el proceso de acreditarse como un laboratorio de calibración secundario, para ser un apoyo durante las calibraciones de piranómetros, además de realizar la calibración de los equipos mencionados anteriormente. Por este motivo se ha tomado la decisión de adquirir un sistema comparador para realizar las calibraciones de piranómetros.

Métodos para calibrar piranómetros utilizando las normas ISO 9846 — Energía solar. Calibración de un piranómetro con un pirheliómetro e ISO 9847 — Energía Solar. Calibración de piranómetros de campo en comparación con un piranómetro de referencia, las cuales son los estándares para realizar esta tarea y así conocer los requisitos necesarios para la creación del banco de comparación piranométrica.

El sistema comparador o banco de comparación está compuesto por tres subsistemas y un multiplexor, el primer subsistema a mencionar es el de iluminación, cuya principal tarea es proporcionar irradiancia a los dos piranómetros, al patrón y un DUT (por sus siglas en inglés de Device Under Test), este subsistema está conformado por un solo LED de alta intensidad capaz de generar irradiancia desde  $100 - 1500 \text{ W/m}^2$  y con un intervalo espectral de 350 a 800

nm[15]. El segundo subsistema es el de movimiento rotacional, el cual es empleado para realizar el movimiento de ambos piranómetros que serán expuestos a la fuente de luz. El tercer subsistema es el de control (software), donde se especifican las condiciones de la calibración y se especifica la secuencia de mediciones. Por último, se utiliza un multiplexor de la marca Keithley con modelo 2700 para realizar las mediciones durante la calibración, dicho instrumento debe contemplar al menos dos canales de 6,5 dígitos (un canal para cada piranómetro), con la finalidad de brindar trazabilidad. El sistema de comparación permite realizar calibraciones semiautomáticas, 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). Descrito el sistema de comparación, se procede a realizar la validación de su método.

Para la validación del método se usa como guía los pasos mencionados por Rubén J. Lazos Martínez e Ignacio Hernández Gutiérrez en su artículo "LA VALIDACIÓN DE MÉTODOS: UN ENFOQUE PRÁCTICO". Los pasos para validar instrumentos de medición se pueden resumir en:

- Identificar la función, donde se establece el mensurando para la medición requerida en el sistema comparador.
- Especificar los requisitos de la función y las características de la herramienta, donde se hace una comparación de los instrumentos mencionados en la norma ISO 9847, "Energía Solar. Calibración de piranómetros de campo en comparación con un piranómetro de referencia", contra los utilizados en el sistema de comparación y validar si se cumple este punto.
- Determinar el desempeño de la herramienta, para cumplir con este punto se ha construido el sistema lineal del cual se han obtenido resultados, estos son comparados contra los resultados del sistema rotacional.
- Comparar los resultados del desempeño con los requisitos, en este punto se realiza la estimación de la incertidumbre de los datos obtenidos de los sistemas mencionados anteriormente.

- Expresar el resultado del proceso, aquí se evalúa si la estimación de la incertidumbre cumple con lo esperado, valores menores al 2% (esto con base en la experiencia del metrologo).

Al terminar este punto, se presenta el método para calibrar piranómetros con trazabilidad directa al Sistema Internacional de Unidades (SI), empleado por CENAM, el método utiliza un detector piroeléctrico calibrado eléctricamente (ECPR) ofreciendo numerosas ventajas sobre los métodos de calibración convencionales al aire libre, como por ejemplo una baja incertidumbre del patrón y una reducción en la incertidumbre final del coeficiente de sensibilidad del piranómetro calibrado; la incertidumbre de medición lograda con este método a irradiancia normal es del 2,1% para un factor de cobertura  $k = 2$  y podría reducirse si se reduce el nivel de incertidumbre del patrón de referencia.

A continuación, se describe el proceso de calibración por el método creado por CENAM:

1. Encender los equipos con los siguientes parámetros: la lámpara a una tensión de 18.1 V y dejar estabilizar la lámpara durante 1 hora, si el laboratorio es estable en  $\pm 1$  °C, el ventilador de la lámpara a una tensión de 5 V. Para finalizar al motor del sistema rotacional se le suministrar una tensión de 14 V.
2. Durante el tiempo de estabilización de la lámpara se procede a la instalación de los sensores. El sistema de comparación tiene un subsistema mecánico para la colocación de los piranómetros, dicho subsistema cuenta con dos bases de montaje paralelas entre sí. Dentro de esta base se tienen dos ranuras donde internamente hay una tuerca (por ranura), siendo movable en su eje horizontal para adaptarse al piranómetro.
3. El piranómetro patrón se coloca en una de las bases y se nivela girando los dos tornillos de nivelación para poner la burbuja del nivel centrada en el círculo marcado. Después se asegura el piranómetro atornillándolo bien a la base de montaje. Para el DUT se realiza el mismo procedimiento.

4. Una vez instalados los sensores, se debe realizar una nivelación de alturas entre los mismos, esto se hace de la siguiente manera: Se instala un distanciómetro a un costado de la lámpara, a continuación, se mide la distancia del patrón, la cual es tomada como referencia, posteriormente se mide la distancia del piranómetro DUT, se comparan dichas alturas. Este procedimiento se repite utilizando un medidor de carátula.
5. La medición con el medidor de carátula se hace colocando el palpador del medidor en la parte superior del domo del patrón y se toma la medida, a continuación, se hace girar la plataforma 180° para realizar el mismo procedimiento con el DUT, con la finalidad de no sobrepasar los 100 micrometros de altura entre ambos piranómetros.
6. Realizada la nivelación entre altura el siguiente paso es buscar el punto máximo de incidencia para la obtención de los datos. La búsqueda comienza colocando el sistema de rotación por debajo de la lámpara, después el metrólogo se posiciona frente al subsistema para mover al mismoensujeje horizontal, siempre observando las tensiones en el multiplexor con la finalidad de encontrar el lugar donde hay una mayor cantidad de irradiancia. Al encontrar el punto máximo para el eje horizontal se debe de repetir este proceso para el eje vertical.
7. A continuación, utilizando el software se crea una rutina de calibración, esta debe de abarcar mediciones para ambos sensores. movimiento de 180° del subsistema de rotación, y periodos sin mediciones para la estabilización de los piranómetros. Creada la rutina, se procede a la captura de mediciones de tensión para ambos sensores.
8. Al terminar la ejecución del programa. Se generan y/o actualizan tres archivos: *Medicion\_resumen.txt*, *secuencias\_temporales.txt* y *Medicion\_valores.txt* que se ubican en el directorio establecido por el usuario.

9. Los datos obtenidos durante la calibración son exportados a una hoja de cálculo para su manipulación, para el caso de este trabajo son utilizados en la estimación de incertidumbre y con ello la validación del sistema.

Este apartado describe el método paso a paso para estimar y reportar la incertidumbre de calibración, utilizando las pautas de la GUM, que se aplica a la calibración de piranómetros. Procedimiento que será utilizado en UACM.

El proceso de la GUM se puede resumir en cinco pasos:

1. Determinar la ecuación de medición para la calibración
2. Identificación de las fuentes de incertidumbre.
3. Cuantificación para cada variable en la ecuación.
4. Estimar la incertidumbre combinada.
5. Estimar la incertidumbre relativa expandida.

El análisis de incertidumbre muestra que se puede lograr una incertidumbre baja teniendo como resultado una incertidumbre expandida relativa de 1,91 % con un factor de cobertura de  $k = 2$ , proporcionan un intervalo de confianza de 95.45 %. Este valor es similar al proporcionado por CENAM en el certificado de calibración.

## Planteamiento del problema

El presente trabajo aporta información sobre la calibración de piranómetros a puertas cerradas en relación con las siguientes preguntas: ¿El método desarrollado en el CENAM, realiza calibraciones por comparación piranométrica con una baja incertidumbre? ¿Existen otros métodos para comparar los resultados obtenidos por el método creado por CENAM? Las preguntas de investigación planteadas buscan la relación entre las siguientes variables: 1. El procedimiento de calibración por comparación piranométrica y, 2. El modelo matemático para estimar la incertidumbre. Los antecedentes descritos en los estudios sobre la literatura en torno a la calibración de piranómetros a puertas cerradas dan sustento al planteamiento del problema de la presente investigación.

**Objetivo general:** Validar el método desarrollado por CENAM para realizar la calibración de piranómetros en interiores, mediante la comparación con otros métodos considerando la trazabilidad al SI.

**Objetivos particulares:**

- Capacitación para utilizar el sistema comparador por parte de CENAM.
- Realizar mediciones de los piranómetros patrón y DUT.
- Obtener y comparar las mediciones de los piranómetros patrón, así como el DUT.
- Diseñar un modelo matemático que permita estimar la incertidumbre de las mediciones.

# Capítulo 1 -Estado del arte en calibración de piranómetros

**SermJanjai** en el artículo “Verification of the ISO calibration method for field pyranometers under tropical sky conditions” (AIP Conference Proceedings - 2017). Explica que la Organización Internacional de Normalización (ISO) ha definido un método patrón (ISO 9847) para calibrar piranómetros de campo. El método de calibración en exteriores describe el proceso para que los piranómetros de campo sean comparados con un piranómetro patrón durante un período de 2 a 14 días, dependiendo de las condiciones del cielo. En este trabajo, se verificó el método patrón de la norma ISO - 9847 bajo condiciones de un cielo tropical. Para verificar el método, se llevó a cabo la calibración de piranómetros de campo en Nakhon Pathom, Tailandia bajo las siguientes condiciones meteorológicas: cielo despejado y con algunas nubes, (siendo monitoreadas con una cámara de cielo).

Se instalan tres piranómetros DUT y uno de referencia. Todos los piranómetros DUT usados en la calibración son de la marca Kipp & Zonen, modelo CMP11. Para el piranómetro patrón se utilizó un CMP22 de la marca Kipp & Zonen. El último fue calibrado con un pirheliómetro (CHP1, Kipp & Zonen) siguiendo con el método de calibración continuo de sol y sombra descrito en la ISO - 9846: 1993 que es rastreable al instrumento patrón mundial en World Radiation Center, Davos, Suiza. La calibración a cielo despejado se realizó utilizando tres piranómetros DUT y un piranómetro patrón, en tanto a cielo con algunas nubes, se emplearon dos piranómetros DUT y un piranómetro patrón.

Para calibrar piranómetros DUT bajo condiciones de cielo despejado y de cielo con algunas nubes en Tailandia, se encontró en el caso del cielo despejado el factor de calibración obtenido del período del día uno o día dos, no es significativamente diferente, a partir del día tres como lo requiere la norma ISO 9847. Además, para el caso de cielo con algunas nubes, la diferencia entre el segundo o tercer día de calibración y los cinco días requeridos por la ISO 9847 no es estadísticamente significativa.

**Daryl R. Myersen** en el artículo “Recent Progress in Reducing the Uncertainty in and Improving Pyranometer Calibrations” (National Renewable Energy Laboratory, NREL - 2002). Detalla la calibración de piranómetros para probar sistemas de conversión de energía solar en exteriores. El equipo de trabajo apoya a los programas de investigación del cambio climático.

Estas actividades llevaron al NREL a mejorar las calibraciones de los piranómetros. Los radiómetros de baja compensación térmica que miden al componente difuso del cielo de la irradiancia solar de referencia eliminan los errores de polarización del orden de 20 W/m<sup>2</sup> en la irradiancia de referencia de calibración. Las correcciones dependientes del ángulo cenital a las respuestas de los piranómetros eliminan los errores de polarización de 15 a 30 W/m<sup>2</sup> de las mediciones de campo. El análisis de incertidumbre detallado en el proceso de calibración en exteriores muestra una reducción del 20% en la incertidumbre en la capacidad de respuesta de los piranómetros.

**Silvio Alejandro Jiménez Castellanos**, en el artículo “Calibration by comparison Eppley pyranometers” (2014). Describe la metodología de calibración de dos piranómetros utilizados en la medición de la radiación solar de acuerdo con las normas establecidas por la Organización Mundial de Meteorología. El método de ensayo empleado fue de comparación con un piranómetro patrón. Este método menciona que se debe colocar al ambiente un radiómetro patrón con una constante  $K_r$  y un radiómetro a calibrar de constante  $K$ ; buscando cumplir con la siguiente relación:  $K=R*K_r$ . En la expresión anterior se observa cómo se establece una relación directa entre las constantes de calibración (factor  $R$ ). Un aspecto importante del ensayo es la adquisición de datos en forma automática mediante el uso de un sistema de adquisición de datos (Campbell, CR 1000), el cual permite el registro simultáneo de las señales de entrega por los radiómetros.

Para realizar la calibración se utilizó un inquisidor de datos de la marca ya antes mencionada, alimentado por un panel solar de 50 W a 12 V, un regulador de carga en serie de 60 A, una batería de plomo-ácido de capacidad de 100 Ah. El ensayo efectuado contó con tres piranómetros Eppley, el primero es un patrón y los dos restantes para determinar la constante de calibración, una termocupla tipo K, un anemómetro, el software PC200W y el programa ShortCut necesarios en la programación del sistema de adquisición de datos. Cabe destacar que los tres radiómetros se colocaron a la misma altura, libre de obstáculos y nivelados.

El método de calibración por comparación requiere un piranómetro patrón conectado a un sistema de adquisición de datos, facilitando el registro de datos de manera simultánea, permitiendo una mayor confiabilidad a diferencia de un registro manual.

**Fernando Nollas y Germán Pérez Fogwill**, en el artículo “Calibración de Piranómetros s/n 955992 y 955993 del Servicio Meteorológico Nacional” (2019). Calibran dos piranómetros de la marca Kipp & Zonen modelo CM11 con números de serie 955992 y 955993, usando como patrón un piranómetro de la Kipp & Zonen modelo CMP11 con número de serie 163812. Los sensores son colocados sobre una superficie horizontal hecha a la medida para realizar las mediciones. El patrón es colocado a una distancia de 15 m de los DUT. Los piranómetros son conectados a un adquisidor de datos (Campbell Scientific CR1000), el último es conectado a una computadora con la finalidad de analizar la información. Los datos adquiridos son actualizados cada 10 s, obteniendo 6 mediciones por minuto, estos son utilizados para calcular el promedio de estos y así obtener un dato por minuto.

Los datos obtenidos en los días con más nubosidad fueron descartados para evitar las oscilaciones en los datos, únicamente fueron tomados los datos de los días mayormente despejados. Al tener días sombreados los sensores fueron cubiertos por obstáculos en horas de la mañana y en la tarde, debido a esto se tomó la decisión de hacer las calibraciones en horas cercanas al medio día solar, para evitar el error direccional de los instrumentos. Una vez obtenidos los datos se procede a la estimación de la incertidumbre.

Los factores de calibración encontrados fueron de  $5.40E-06$  V/W/m<sup>2</sup> y  $5.31E-06$  V/W/m<sup>2</sup> para los sensores con número de serie 955992 y 955993 respectivamente, mostraron una variabilidad relativa del 1.1% y 3.9% respecto a los factores encontrados en su última calibración llevada a cabo en el 2015. Se cree que el valor más alto en la variación puede ser al cambio del cable realizado a los sensores en 2019.

**Francesco Mariottini**, en el artículo “Assessment and improvement of thermoelectric pyranometer measurements” (2019). Explica los métodos de calibración descritos en la norma ISO 9847 “Energía Solar: Calibración de piranómetros de campo en comparación con un piranómetro de referencia”, en exteriores e interiores.

Calibración en exterior: Los procedimientos en el manejo de datos fueron realizados en cuatro piranómetros de dos fabricantes diferentes frente a un dispositivo de referencia del primer fabricante que incluye un sistema de compensación de temperatura. Los piranómetros se

montaron sobre una estructura aislada térmicamente. Todos los piranómetros se instalaron en el plano horizontal dentro de  $\pm 1^\circ$ . Los datos fueron adquiridos cada diez segundos a través de un adquirente de datos cRIO de National Instruments con el módulo universal NI-9219 para posteriormente hacer el promedio de los datos por minuto y realizar el análisis de estos

Metodología: Solo los datos correspondientes a un ángulo cenit máximo ( $70^\circ$ ) fueron considerados para la calibración en exterior. El tratamiento matemático en el estándar define como válida una serie cuyo número mínimo de puntos válidos (21 para el caso investigado) mostró un factor de calibración dentro de  $\pm 2\%$  del factor de calibración promedio calculado para todos los puntos válidos en la serie. La incertidumbre de la calibración en exterior se calculó teniendo en cuenta la incertidumbre estándar de la serie considerada, la incertidumbre del adquirente de datos, la incertidumbre de la calibración del patrón, la incertidumbre de la respuesta direccional y la incertidumbre de la transferencia de la calibración. Todas las incertidumbres excepto la incertidumbre estándar de la serie se basó en una hoja de datos proporcionada por el fabricante. Se consideró un factor de cobertura  $k$  de 1,96.

Resultados: Sin requisitos estrictos sobre condiciones de cielo despejado, la incertidumbre del factor de calibración aumentó hasta un 2,08% debido al impacto del conjunto de datos correspondientes a los altos ángulos de incidencia y condiciones de alta fracción difusa. Para el piranómetro del segundo fabricante, también se encontraron grandes desviaciones para los ángulos de incidencias bajas y de relaciones de nubes altas. La incertidumbre general para el piranómetro aumentó al 4,73%.

El estudio de estos casos reales muestra que las calibraciones comúnmente se realizan en exteriores, causando retardos en el proceso de calibración, debido a que se requiere esperar a ciertos criterios meteorológicos. Lo que se busca con este nuevo método es poder realizar calibraciones sin importar las condiciones climatológicas, volviendo lo más eficaz y rápido comparado con el método de calibración en exteriores.

## Capítulo 2- Caracterizar un calibrador de piranómetros basado en fuente de luz LED

Uno de los aspectos importantes a considerar para el éxito de un proyecto de generación de energía a partir de la radiación solar es contar con datos confiables del recurso solar del sitio donde se realizará el proyecto. Los piranómetros utilizados para dicho propósito deberán contar con una calibración periódica con el fin de que la medición de irradiancia solar global y difusa, tenga la confiabilidad deseada. Uno de los métodos conocidos para realizar calibraciones de los instrumentos de medición antes mencionados es comparar un DUT contra un piranómetro patrón y así asegurar que los datos proporcionados se encuentran dentro de los parámetros de confianza.

Los datos de la radiación solar son una variable importante para considerar, ya que conociendo el recurso solar se pueden reducir los riesgos asociados a los inversionistas, cuando se proyectan sistemas de conversión de energía solar. También ayudar a los planificadores de servicios públicos y a los operadores de sistemas de redes a comprender los impactos de la variabilidad del recurso. El uso de estos datos es importante para que los inversionistas comprendan los términos cuantitativos de los riesgos de sus inversiones en función del conocimiento de los recursos solares.

### 2.1 Calibración de piranómetro

*“Operación que, en condiciones especificadas, en un primer paso, establece una relación entre los valores de las cantidades con las incertidumbres de medición proporcionadas por los estándares de medición y las indicaciones correspondientes con las incertidumbres de medición asociadas y, en un segundo paso, utiliza esta información para establecer una relación para obtener un resultado de medición a partir de una indicación” [32].*

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 patrón de medición conocido y avalado por el Instituto Nacional de Metrología de cada país en la

Figura 2.1. Se muestra la cadena de trazabilidad para la calibración de piranómetros utilizados en el CENAM.

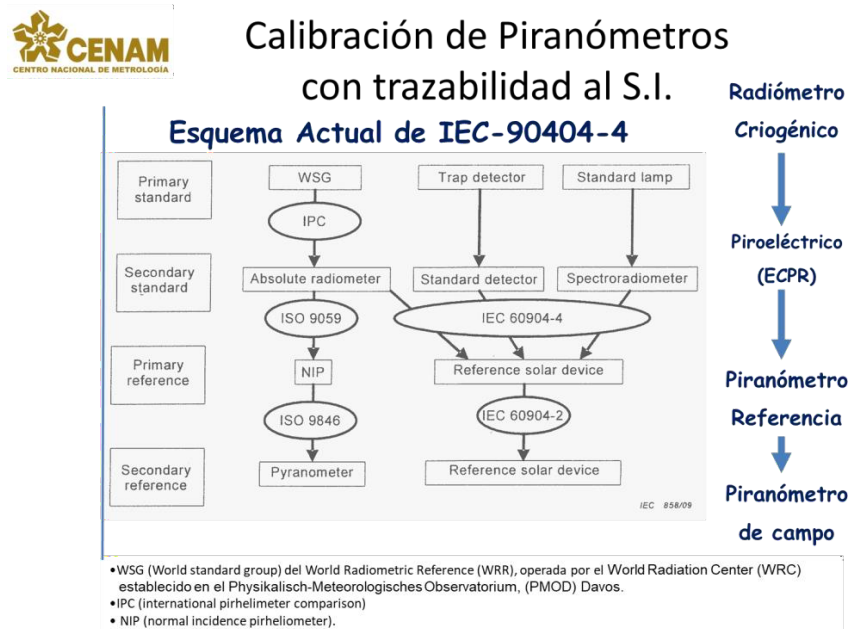


Figura 2. 1. Calibración de piranómetros con trazabilidad al S.I.

La calibración del piranómetro se realiza en exteriores utilizando el sol y el cielo como fuente de radiación o en interiores utilizando fuentes artificiales como lámparas o cámaras de cuerpo negro donde se pueden controlar las siguientes condiciones: temperatura, radiación y proporcionar una fuente de luz uniforme y no tener que depender de las condiciones ambientales, proporcionando calibraciones más rápidas. Estas calibraciones son realizadas por fabricantes de radiómetros y también pueden ser realizadas por laboratorios de patrones nacionales financiados por el gobierno o por servicios de metrología privados.

*“La calibración no es una caracterización. Una calibración de radiómetro proporciona la responsividad del piranómetro ( $R_s$ ) especificando el valor para convertir la señal de salida del radiómetro en irradiancia (micro volts entre Watt por metro cuadrado ( $\mu V / Wm^{-2}$ )) y su incertidumbre de medición estimada. Los resultados de la calibración se basan en comparaciones con un instrumento de referencia cuya calibración es trazable a un patrón de medición de referencia reconocido, como el WRR, en las condiciones específicas en el momento de la calibración. La caracterización del radiómetro, por otro*

*lado, se basa en calibraciones obtenidas con la variación de parámetros que afectan el desempeño de la medición (es decir, posición solar, temperatura del aire, niveles de irradiancia, condiciones del viento, etc.” [31].*

El Physicalisch-Meteorologisches Observatorium Davos que es el Centro de Radiación Mundial (PMOD/WRC), en Davos (Suiza), está a cargo de la referencia radiométrica mundial (world radiometric reference (WWR)) la cual fue establecida por la Organización Mundial de Meteorología (OMM) como estándar internacional para las medidas de radiación solar directa y está determinado por las medidas de un grupo de radiómetros absolutos que forman el Grupo Estándar Mundial (World Estandar Group (WSG)).

Los radiómetros absolutos de cavidad (Absolute Cavity Radiometers (ACR)) al igual que todos los equipos tienden a tener una deriva en sus mediciones a largo de su uso, por este motivo la Organización Internacional de Pirheliómetros (International Organization of Pyrheliometers (IPC)) organiza cada cinco años una reunión con el objetivo de transferir la WWR periódicamente a los centros nacionales, que calibran sus instrumentos de red utilizando sus propios instrumentos de patrón nacional.

Para garantizar a largo plazo la estabilidad de las referencias se utiliza al WSG que está integrado por un mínimo de cuatro pirheliómetros absolutos. Al incorporar los instrumentos a ese grupo. Se les asigna un factor de reducción con el fin de corregir sus lecturas para referirlas a la RRM. Para formar parte de este grupo, un radiómetro debe cumplir con los siguientes requisitos:

- La estabilidad debe superar el 0,2% del valor medido en escalas temporales de decenios.
- La incertidumbre, para un nivel de confianza del 95%, de la serie de mediciones efectuadas con el instrumento debe estar situada dentro de los límites de incertidumbre de la RRM.
- El instrumento ha de tener un diseño distinto al de los demás instrumentos del WSG.

Para validar los criterios de estabilidad, los equipos del WSG son comparados entre sí por lo menos una vez al año, por lo cual se encuentran en el PMOD.

Para la calibración de los radiómetros se utilizan las lecturas de los instrumentos de la WSG, o las de otro instrumento que haya sido calibrado directamente con unos de los instrumentos del grupo. En las comparaciones internacionales del pirheliómetro el valor de la RRM se establece calculando la medida de al menos tres instrumentos de WSG. Los valores de la RRM se establecen siempre corrigiendo las lecturas de cada instrumento del WSG con el factor de corrección individual, el cual es determinado en el momento de la comparación.

Las calibraciones precisas de piranómetros, trazables a estándares reconocidos internacionalmente, son fundamentales para las mediciones de irradiancia solar. Por este motivo, la OMM recomienda el uso dos métodos para realizar la calibración de piranómetros, el primer método es descrito por la norma ISO 9846. Energía Solar: Calibración de un piranómetro con un pirheliómetro (Solar Energy–Calibración of a pyranometer using a pyrhelimeter). El segundo método, es descrito por la norma ISO 9847. Energía Solar: Calibración de piranómetros de campo en comparación con un piranómetro de referencia (Solar Energy–Calibration of field pyranometers by comparison to reference pyranomer).

La trazabilidad que rige a las dos normas mencionadas por la WRR, esta se muestra en la Figura 2.2.

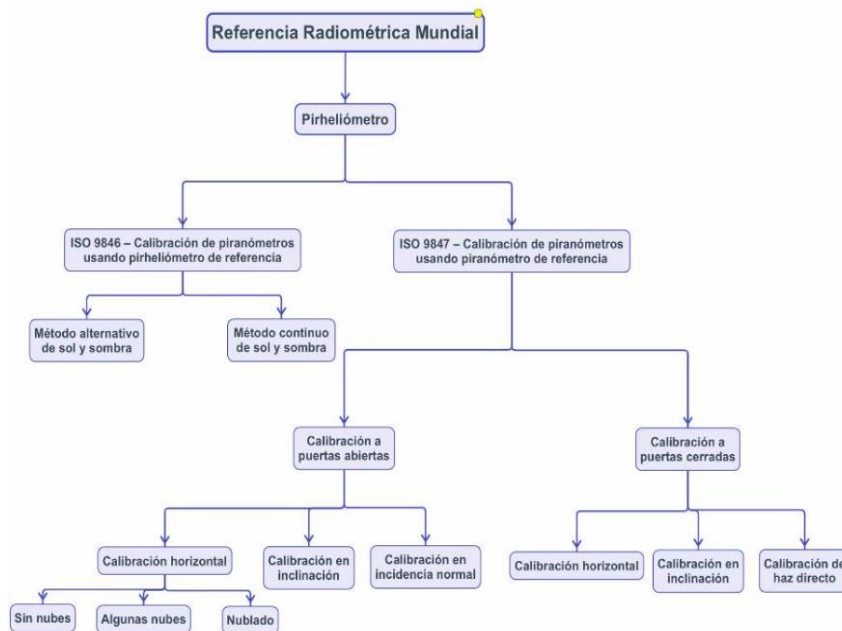


Figura 2. 2. Trazabilidad de normas

En primera instancia se describirán los métodos de calibración en exteriores de la norma ISO 9846, esta norma se basa en el uso de pirheliómetros y piranómetros de referencia como instrumentos principales para realizar la calibración, esto porque tienen ciertas características relativas a su precisión en la medición de radiación solar. Posteriormente se describirán los métodos de calibración mencionados por la norma ISO 9847.

## 2.2. ISO 9846 — Energía solar. Calibración de un piranómetro con un pirheliómetro

Para realizar este tipo de calibración se han creados dos métodos, con la finalidad de ser altamente utilizados y ser viables. Ambos métodos tienen como principal funcionamiento el uso de un disco de sombra para medir la radiación solar difusa y están basados en la medición de radiación solar global, la cual es igual a la suma de las radiaciones directas y difusas. Los métodos descritos por esta norma son: Método alternativo de sol y sombra y Método continuo de sol y sombra.

### Método alternativo de sol y sombra

El piranómetro de prueba se compara con un pirheliómetro cuyo tipo de medición es la irradiancia solar directa. Los valores de tensión obtenidos desde el piranómetro corresponden a la irradiancia solar directa, los valores se derivan de la diferencia entre los valores medidos de la irradiancia solar global y la irradiancia solar difusa. Estos valores son medidos de manera periódica derivada de la capacidad de respuesta, la diferencia en los componentes de irradiancia se divide por la irradiancia solar medida normal al plano receptor del piranómetro.

### Condiciones de medición

Las condiciones de cielo despejado deben de cumplir con una distancia angular de sol mayor a  $45^\circ$  (las nubes que están fuera del campo de visión tienen una influencia mínima en el procedimiento de medición), esto para garantizar la estabilidad de los valores de radiación solar difusa durante el ciclo de medición; es decir, el cambio en la irradiación solar difusa debe ser insignificante. Los parámetros más importantes para tomar en cuenta son: el rango de elevación solar, temperatura ambiente del aire, nivel de irradiancia solar y el ángulo de inclinación.

## Sitio de medición

El sitio debe de contemplar soportes rígidos para la instalación de los instrumentos y además de fácil acceso.

Pueden existir obstáculos en el horizonte, siempre que no obstruya el sol durante la calibración y no exista una variación alta en la tasa de mediciones. También se deben evitar la reflexión especular por obstrucciones, esto para el caso de piranómetros horizontales. En el caso de piranómetros inclinados, las contribuciones de las asignaturas de la radiación reflejada por el primer plano deben variar en el sentido mencionado anteriormente.

El piranómetro cuenta con espacio suficiente para el movimiento del disco de sombra. También tiene que existir un espacio suficientemente grande para que las posibles interferencias entre equipos sean mínimas y sean ignoradas.

Entre el pirheliómetro y el piranómetro no debe de existir una distancia mayor a los 30 m, en el caso de otros radiómetros no pueden ser afectados por las condiciones ambientales ya antes mencionadas.

## Instalación

La instalación del seguidor solar, pirheliómetro, piranómetro con el disco de sombra, se realizará bajo los patrones establecidos en sus respectivos manuales (proporcionados por la empresa), de igual manera se contemplarán las condiciones del sitio de medición (mencionadas arriba).

En el caso de que un piranómetro requiera de ventilación, este deberá ser ventilado durante el proceso de calibración.

Para el caso de los piranómetros inclinados, el cable de salida debe de apuntar hacia abajo para evitar que interfiera con la radiación solar directa y así no afecte durante las mediciones (ISO/TR 9901).

## Procedimiento de calibración

Para comenzar con el procedimiento se requiere de una espera de 30 minutos antes de la fase de medición con este tiempo aseguramos los siguientes puntos:

- Aclimatación de los instrumentos de medición (radiómetros), electrónica y sistema de adquisición de datos.
- Ajuste de piranómetros, seguidor solar y disco de sombra.
- Comprobación de las conexiones eléctricas, voltajes de prueba y pruebas de puesta a cero.
- Limpieza final de las ventanas ópticas.

#### ISO - 9846 — Método continuo de sol y sombra

El DUT debe de ser comparado con un pirheliómetro y piranómetro de referencia (ambos deben estar calibrados). La medición de radiación solar directa se deriva de la señal del pirheliómetro, en tanto, la radiación solar difusa se mide con el segundo piranómetro utilizando el disco de sombra. Este método puede proporcionar resultados continuos, siempre y cuando se puedan tomar lecturas continuas del pirheliómetro.

#### Condiciones de medida

En general, se pueden tomar las condiciones descritas anteriormente. Esto porque los datos pueden ser tomados continuamente, de igual manera los datos obtenidos en condiciones de nubosidad también son aceptados, siempre que:

- La distancia angular entre las nubes desde el sol debe ser a mayor a 15°y
- La velocidad angular de las nubes dentro del campo de visión del piranómetro es lo suficientemente pequeña como para que la irradiancia solar difusa varíe menos de 1% en aproximadamente 10 s.

#### Sitio de medición

El sitio de medición debe cumplir con las especificaciones del método anterior. El DUT debe de estar lo suficientemente separado de la región del disco de sombra del piranómetro de referencia con la finalidad de garantizar que no esté influenciado por el disco de sombra. Además, cualquier obstrucción dentro de los campos de visión de los piranómetros de referencia y DUT debe ser casi idéntica y para instalaciones inclinadas, los primeros planos deben ser casi idénticos.

### 2.3. ISO 9847 — Energía Solar. Calibración de piranómetros de campo en comparación con un piranómetro de referencia

Esta norma específica dos métodos para la calibración y son aplicables a la mayoría de los DUT, 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 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.

La calibración al aire libre de piranómetros de campo se puede realizar con un piranómetro en posición horizontal (inclinación cero) (tipo Ia), en posición inclinada (tipo Ib), o con una incidencia normal (tipo Ic), esto es, manteniendo la superficie del receptor perpendicular al haz de sol.

La calibración en interiores de piranómetros de campo se realiza con una fuente de luz artificial, esta puede ser una lámpara, sombrada (tipo IIa), sin sombra (tipo IIb) o en incidencia normal (tipo IIc) usando un banco óptico para colocar el receptor de manera perpendicular a la lámpara.

#### ISO - 9847 — Calibración en exteriores tipo I

Para realizar la calibración en exteriores o al aire libre, se requiere que el piranómetro de referencia sea de un tipo superior al DUT (esto de acuerdo con lo establecido en la norma ISO 9060). Durante la calibración se tomará en cuenta: la temperatura, la irradiancia, la inclinación y los ángulos de incidencia.

Nota: El piranómetro de referencia debe ser recalibrado al aire libre, bajo las condiciones establecidas por la norma ISO 9846— Energía solar. Calibración de un piranómetro con un pirheliómetro.

## Tipos de calibración en exteriores

Montar los piranómetros patrón y DUT en la plataforma de calibración (común para ambos), la colocación debe ser horizontal (es decir, con ángulo  $0^\circ$  con respecto a lo horizontal), esto se considera para la calibración tipo Ia, para la calibración tipo Ib, se requiere de una inclinación, por último, para la calibración de tipo Ic, se requiere de un montaje apuntando hacia el sol o con un ángulo acimutal.

Nota: por convención se usa el conector eléctrico como referencia acimutal, el cual debe de apuntar hacia el ecuador y hacia abajo.

La plataforma de calibración debe de ser ajustada a la inclinación requerida desde la horizontal.

Al ser realizado el paso anterior, se deberá de conectar el piranómetro patrón y el DUT a un adquisidor de datos o multiplexor, después se debe de comprobar la continuidad eléctrica, la polaridad de la señal, la intensidad de la señal y la estabilidad. Al finalizar esto se requiere limpiar los domos de los piranómetros. Por último, se debe de comprobar los flujos radiantes del primer plano en ambos instrumentos.

Al terminar los pasos anteriormente descritos se deben de contemplar varias condiciones antes de realizar la calibración, estas condiciones estarán establecidas para cada tipo de calibración, las cuales serán descritas a continuación:

### Calibración horizontal para mediciones meteorológicas y de recursos (tipo Ia)

Para este tipo de calibración existen tres condiciones de cielo, las cuales son: cielo despejado, cielo con algunas nubes y cielo nublado.

#### Condiciones de cielo despejado

Las condiciones meteorológicas deben de establecer que no existan nubes durante el periodo de pruebas, se deben de tomar lecturas de tensión de manera instantánea para ambos instrumentos con un mínimo de 15 mediciones, por un periodo de 10 a 20 minutos y con un mínimo de 21 lecturas durante el tiempo ya establecido. Estas mediciones se realizarán por un

periodo de 2 a 3 días, de igual manera se puede realizar estas mediciones por un periodo más largo, para cubrir una gama de condiciones ambientales más amplia. Por último, las mediciones se deben realizar desde la madrugada, hasta el mediodía solar y de ser posible hasta terminar la tarde.

### Condiciones inestables de cielo con algunas nubes

Ninguna formación de nubes debe estar a  $30^\circ$  del sol durante el período de toma de datos. Se deben tomar de manera simultánea mediciones de tensión para ambos equipos, en intervalos de 1 a 5 minutos por serie, con un mínimo 15 series contemplando 21 o más mediciones por serie (con un ángulo de elevación solar de  $> 20^\circ$ ), distribuyendo las series desde el amanecer y terminando al atardecer, con un mínimo de 5 días y un máximo de 2 semanas.

### Condiciones de cielo nublado

Cuando se tienen condiciones de cielo nublado, se deben tomar 50 lecturas de manera simultánea de ambos instrumentos, por un periodo de 1 hora por 10 días con diferentes ángulos de elevación y diferentes tipos de nubosidad, la irradiancia global debe de superar un mínimo de  $100 W/m^2$ .

### Calibración con inclinación tipo Ib

La calibración en inclinación se llevará a cabo únicamente en condiciones de cielo despejado con nubes a una distancia del sol superior a  $30^\circ$ . Se toma como base de inclinación el ángulo horizontal, la inclinación que se empleará en las pruebas de colectores solares. Se requiere tener cuidado con el albedo, se debe considerar que la medición del suelo sea aproximadamente el mismo en ambos receptores.

### Calibración en incidencia normal tipo Ic

Al realizar la calibración se debe de contemplar las siguientes condiciones ambientales, la prueba se realizará a medio día solar y con una irradiancia solar con un mínimo de  $600 W/m^2$ . Al tener estas condiciones se tomarán un mínimo de 15 mediciones con un tiempo estimado de 10 a 20 minutos, cada serie de mediciones contará con un mínimo de 21 lecturas de tensión instantánea.

## 2.4. Métodos de Calibración en interiores

Para realizar la calibración en interiores el patrón debe de ser del mismo tipo o superior al DUT (esto con la finalidad de disminuir los errores que pueda provocar la radiación solar empleada durante el proceso, estos errores principalmente son: una homogeneidad imperfecta del haz de luz o un imperfecto espectro solar).

Se requiere de una plataforma para realizar todas las calibraciones de inclinación, horizontal y de ángulo fijo. La cual debe de estar colocada a 0° de inclinación con respecto a la horizontal, de igual manera se debe de realizar inclinaciones en un rango adecuado de ángulos desde la horizontal tomando en cuenta que su incertidumbre tiene que ser menor a los 0.3 °.

### Calibración de los tipos IIa y IIb

- Se requiere montar en la plataforma de calibración los piranómetros de patrón y DUT, al ser instalados se debe verificar que tengan la misma orientación, relación con la fuente de luz artificial y los hemisferios sean geoméricamente simétricos.
- Al finalizar el paso anterior, se continúa con la conexión de los piranómetros de patrón y DUT a un multiplexor, ya sea de manera individual o común. A continuación, se comprueba la conductividad eléctrica, polaridad e intensidad de la señal y la estabilidad de los equipos. De ser necesario se pueden limpiar los domos de los piranómetros 30 minutos antes de comenzar con la calibración.
- Verificar que ambos piranómetros reciban la misma cantidad de irradiancia al momento de realizar la transposición.
- O bien:
  - Se pueden tomar 10 series de lecturas de tensión de una manera simultánea con 21 mediciones a los piranómetros de patrón y DUT o,
  - Tomar un mínimo de 5 series (de aproximadamente 8 minutos) de lectura de tensión de los piranómetros de patrón y DUT, con la finalidad de garantizar una exactitud de  $\pm 0.25\%$  y una precisión de  $\pm 0.25\%$ .

## Calibración tipos IIc

- Verificar que el piranómetro patrón sea de un tipo superior al piranómetro DUT.
- Instalar los piranómetros patrón y DUT de manera horizontal sobre la plataforma móvil, la cual permita el ajuste e intercambio de posición que permita la nivelación de burbuja. Al finalizar esto, se requiere revisar que ambos equipos tengan la misma orientación acimutal. El haz de iluminación artificial debe ser instalado por encima de los piranómetros para crear una homogeneidad y la divergencia de los haces verticales.
- Aproximadamente 30 minutos antes de realizar la primera lectura, se recomienda encender los equipos de adquisición de datos o multiplexor, energétizar la lámpara para estabilizar el flujo de radiación y el campo de radiación térmica del banco de comparación.
- Al finalizar el paso anterior, se continúa con la conexión de los piranómetros patrón y DUT a un multiplexor, ya sea de manera individual o común. A continuación, se comprueba la conductividad eléctrica, polaridad e intensidad de la señal y la estabilidad de los equipos. De ser necesario se pueden limpiar los domos de los piranómetros.
- Tomar lecturas periódicas de ambos piranómetros, el número de lecturas dependerá de la estabilidad de estas.

En esta norma se hace referencia a dos métodos de calibración en interiores, el primero hace mención del instrumento de calibración para piranómetros, diseñado y construido por la marca Kipp & Zonen, este instrumento está conformado por:

- a) Un filamento tungsteno-halógeno de 1000 W (Osram tipo SPL 1000 Studio, alimentado por un estabilizador de tensión alterna y refrigerado por ventilación), con reflector difuso (espejo cóncavo de 7.5 cm de diámetro) sobre la lámpara (Osram tipo halógeno Superphot), y
- b) diafragmas (para minimizar la luz parásita).

Los piranómetros de patrón y DUT están montados horizontalmente sobre una mesa que puede girar para intercambiar la posición de ambos instrumentos. La distancia entre el

reflector y los piranómetros es de 1.2 m y la irradiancia en los piranómetros es de aproximadamente 500 W/m<sup>2</sup>.

El segundo método mencionado por la norma es el de MetObsHamburg, construido por:

- a) Una lámpara de xenón de 450 W (Osram tipo X BO) con óptica de condensador y refrigeración por aire, estabilizada por retroalimentación de la salida de la lámpara (monitorización de un haz de luz, mediante una celda fotovoltaica de silicio).
- b) Un dispositivo de integración óptica (para homogeneizar la densidad de flujo radiante del haz), y
- c) Un espejo plano inclinado a 45° (para girar el haz de horizontal a vertical).

Los piranómetros patrón y DUT (del mismo tipo) se montan horizontalmente uno al lado del otro en una plataforma rodante e inclinable que puede ser desplazada por un control de modo que los piranómetros estén alternados y expuestos al haz. Los centros de los receptores de ambos sensores deben tener las mismas coordenadas cuando están expuestos al haz (diámetro, aproximadamente 10 cm; irradiancia, 70 W/m<sup>2</sup>; con homogeneidad de la irradiancia,  $\pm 2\%$  dentro de un círculo de 24 mm). La plataforma del piranómetro y el espejo están instalados en una cámara climática pintada de negro, lo que reduce la luz parásita y asegura condiciones ambientales constantes.

En el capítulo 3, se hace la descripción de los dos métodos diseñados, desarrollados y construidos por CENAM. Así como la descripción de los subsistemas de iluminación, rotacional, lineal, software y multiplexor. Además de mencionar las mejoras hechas al sistema de comparación con respecto a las recomendaciones de las normas ya mencionadas en este capítulo.

## Capítulo 3 -Descripción del comparador UACM

El sistema comparador, es una aplicación dirigida al campo de la radiometría de fuentes de luz de amplio espectro. Dicha aplicación está construida bajo la norma ISO 9847-Energía Solar. Calibración de piranómetros de campo en comparación con un piranómetro de referencia, tomando como antecedente el apartado de calibraciones en interiores tipo IIc. El diseño de este comparador incorporó nuevas tecnologías para hacerlo más preciso y reducir los tiempos de calibración.

La calibración de piranómetros por medio de comparación se ha descrito en la norma mencionada anteriormente. Donde a grandes rasgos se establecen que la calibración se debe de hacer de la siguiente manera: se colocan los dos piranómetros bajo una iluminación artificial estable, utilizando preferentemente una lámpara de haluro de metal de alta precisión con estabilización de voltaje, la cual se coloca a una altura aproximada de 110 cm por encima de los radiómetros, produciendo aproximadamente  $500 \text{ W/m}^2$ .

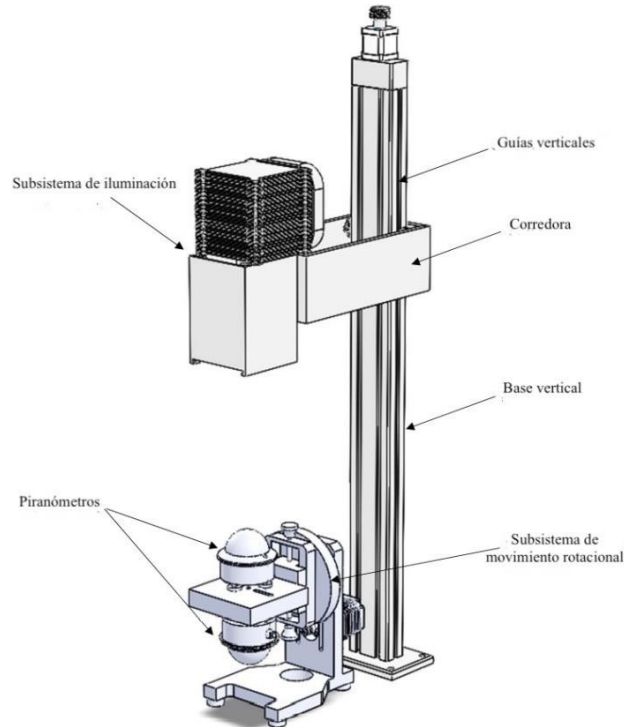
Sin embargo, las fuentes de luz utilizadas en los comparadores antiguos tenían un costo elevado y producían mucho calor. El comparador desarrollado por CENAM, presenta una solución cuya principal operación está basada en una *“fuente de luz de estado sólido (LED) de alta eficiencia energética para iluminación en el espectro visible, iluminación con simetría radial y la gran ventaja de usar un espectro de luz diferente al convencional (espectro solar)”* [17]. La tecnología LED brinda las irradiaciones requeridas por la norma sin un aumento excesivo de temperatura del mensurando.

El comparador fue diseñado para realizar calibraciones semiautomáticas de piranómetros térmicos (basados en termopilas), se realizan mediciones de las respuestas obtenidas por el piranómetro patrón y DUT. Tal como se define en la norma ISO 9847-Energía Solar. Calibración de piranómetros de campo en comparación con un piranómetro de referencia, en su apartado de calibración en interiores tipo IIc, cabe mencionar que los mejores resultados en la calibración se obtienen al usar sensores del mismo tipo, porque sus características físicas son similares (altura,

diámetro del domo y superficie de absorción). Esto permite menos variables para la estimación de la incertidumbre.

Para utilizar el sistema comparador se requiere que el proceso incorpore criterios metrológicos, con la finalidad de tener reproducibilidad en las medidas. Además de disminuir la incertidumbre de la responsividad y la respuesta angular en calibraciones. Contemplando esto el comparador está diseñado de la siguiente manera:

El sistema comparador está compuesto por tres subsistemas y un instrumento de medición: el primer subsistema a describir es el de iluminación, cuya principal tarea es proporcionar irradiancia a los piranómetros tanto al patrón, así como al DUT. El segundo subsistema hace mención al encargado de producir un movimiento rotacional, empleado para rotar ambos piranómetros y sean expuestos a la fuente de luz. El tercero subsistema es el control de movimiento, donde se especifican las condiciones para realizar la calibración. Por último, se requiere de un instrumento de medición para realizar las mediciones durante la calibración, este instrumento es un multiplexor, con la finalidad de brindar trazabilidad al sistema. En la Figura 3.1 se muestra los subsistemas de iluminación, así como el de rotación. Además de mostrar de manera breve cómo interactúan dichos subsistemas. Estos últimos son energizados por medio de una fuente de poder de la marca GwINSTEK, modelo GPD-3303S.



*Figura 3. 1. Ilustra una vista general del comparador automático de piranómetros  
 Figura recuperada de comparador automático de piranómetros, No. de patente MX/u/2019/000289*

### 3.1. Subsistema de iluminación

Este subsistema está conformado de la siguiente manera: fuente de iluminación. Módulo de enfriamiento necesario para controlar la temperatura de la fuente de iluminación, arreglo de lentes TIR (por sus siglas en inglés Total Internal Reflection), una lente esférica que corrigen la divergencia de haz de luz y asegura un perfil de intensidad con simetría radial. La Figura 3.2, muestra los componentes del sistema de iluminación.

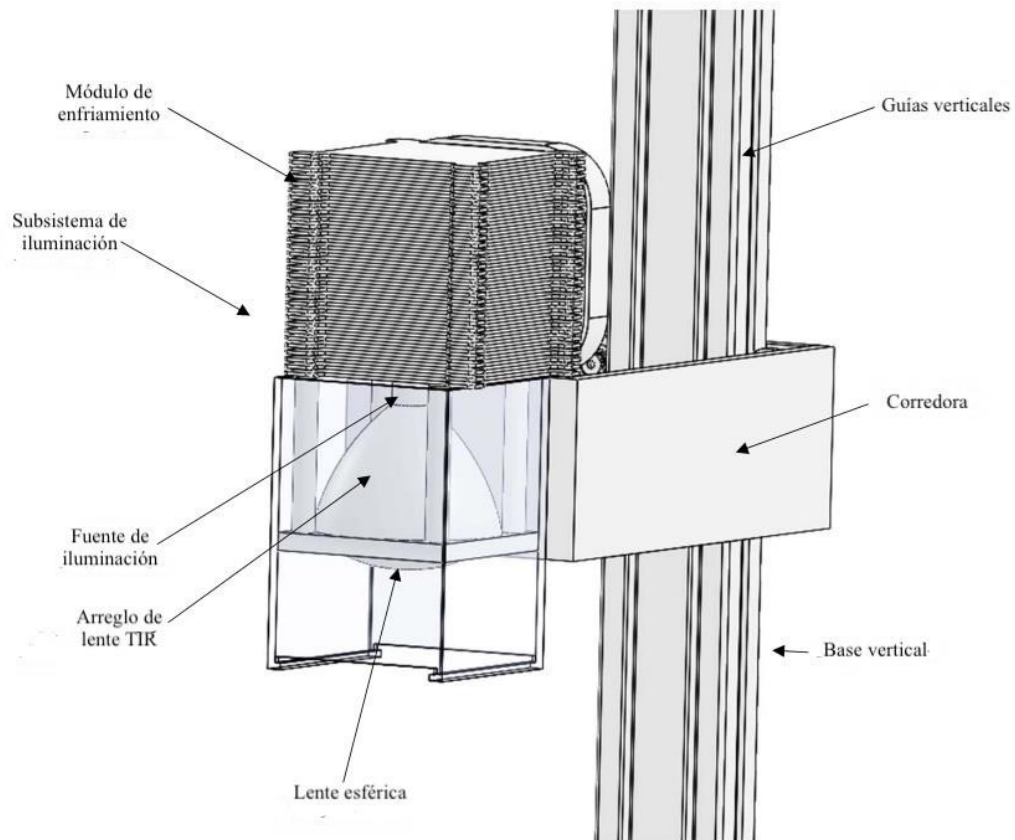


Figura 3. 2. Sistema de iluminación  
 Figura recuperada de comparador automático de piranómetros, No. de patente MX/u/2019/000289

### Fuente de iluminación

Para la fuente de iluminación se utiliza una lámpara de tecnología LED, la cual está conformada por un solo LED de alta intensidad capaz de generar irradiancia desde 100 – 1500  $W/m^2$  y con un intervalo espectral de 350 a 800 nm. Cabe mencionar, la intensidad de irradiancia puede ser mayor disminuyendo la distancia entre la lámpara y la superficie de trabajo. Además de tener un bajo consumo de corriente eléctrica. Esta tecnología proporciona más beneficios: menor generación de calor respecto a otras tecnologías (el aumento de la temperatura no afecta a las mediciones en el piranómetro, esto debido al efecto invernadero producido por los dos domos con los que cuenta el sensor), no requiere de calibración de su emisión espectral ni de

uniformidad espacial de la intensidad mientras no se modifiquen los elementos ópticos del diseño.

La fuente de iluminación LED puede ser ajustada por el usuario dependiendo del valor de irradiancia requerida para realizar la calibración, este ajuste se hace utilizando la perilla manual localizada en la parte superior de la base vertical, esta perilla baja o sube la corredora donde está montado el subsistema de iluminación. Este ajuste puede provocar un calentamiento en la lámpara, para evitar esto se han tomado dos medidas de precaución y estabiliza térmicamente el subsistema de iluminación: la primera es mantener estable la temperatura del laboratorio y la segunda es apoyarse en el módulo de enfriamiento integrado en la parte superior del subsistema de iluminación.

### Módulo de enfriamiento

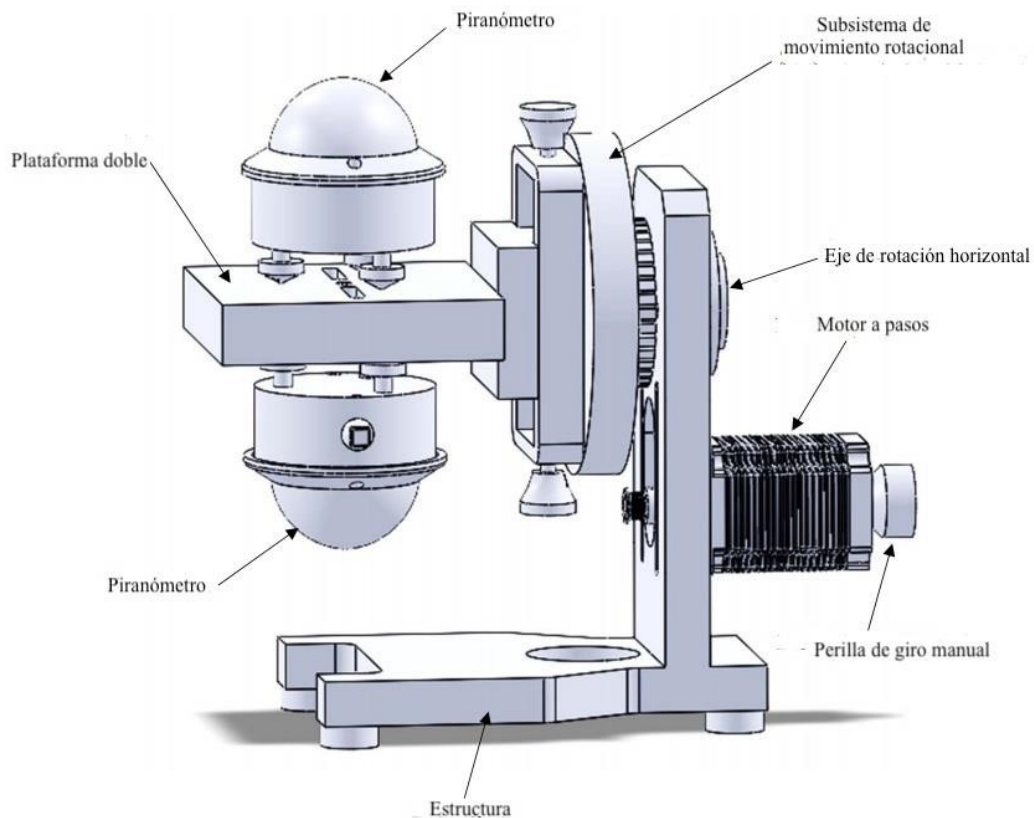
El sistema de comparación cuenta con un módulo de enfriamiento, el cual incluye un disipador de calor en la parte superior de la lámpara, tubos con carga de gas (heat pipe) los cuales se encargan de absorber el calor de la lámpara por medio de conducción, rendijas de aluminio (material que conduce el calor) las cuales rodean a los tubos permitiendo la entrada y la salida de aire y por último, un extractor de calor para proporcionar enfriamiento por medio de disipación por convección forzada de aire (en el caso de ser necesario). Este extractor absorbe aire del medio ambiente dirigiéndolo a los tubos y a las rendijas haciendo que el aire caliente se enfríe provocando una circulación de temperaturas en los tubos.

### Arreglo de lentes TIR

El equipo seleccionado para este arreglo es de la marca LED Engin, modelo LLNS-3T11-H. Este equipo está compuesto para la familia de emisores LED Engin LZP de 24 matrices [15], la fuente de LED se coloca en la parte central del cono y la luz emitida por el LED se redistribuye por una superficie, pasa a través del cono en el borde de la cavidad, luego se refleja totalmente en el lateral de la superficie de la lente, y finalmente refractada en el plano del anillo en la parte superior de la lente, formando la luz saliente.

### 3.2. Subsistema de movimiento rotacional

Este subsistema está compuesto por una estructura formada de la siguiente manera: la una plataforma doble para la colocación de los piranómetros. Sistema de movimiento rotacional, el cual tiene como tarea principal hacer girar a la plataforma doble 360° respecto a la horizontal. Y por un motor a pasos. El subsistema de movimiento rotacional se puede ver en la Figura 3.3 donde se muestran las partes que componen a dicho sistema.



*Figura 3. 3. Mecanismo de alineación y rotación automática de los piranómetros  
Figura recuperada de comparador automático de piranómetros, No. de patente MX/u/2019/000289*

#### Plataforma doble

Se compone de un sistema mecánico para la colocación de los piranómetros, el cual cuenta con dos bases de montaje paralelas entre sí, es decir, una plataforma doble, en una plataforma se coloca el piranómetro patrón y en la otra plataforma se coloca el DUT.

Cada plataforma contiene un sistema de cerradura de círculo, así como dos ranuras donde internamente se encuentra una tuerca (por ranura), la cual se mueve de manera horizontal para adaptarse al piranómetro. Este sistema puede realizar mediciones angulares sin una nivelación horizontal absoluta, permitiendo la repetividad de giro a cualquier grado dado. Esta característica fue calibrada bajo patrones certificados y no requiere de un sistema de nivelación, lo cual es un punto a favor del calibrador.

*“El principio de cerradura del círculo, se puede parafrasear, para el sistema mecánico que nos ocupa, de la siguiente forma: si un sistema rotativo con un nivel absoluto o relativo repite la misma posición angular del nivel, después de una rotación arbitraria, entonces ha rotado 360°grados” [18].*

### Sistema de rotación

En la parte superior de la estructura se observa al eje de rotación, cuya principal función es hacer girar a la plataforma doble. Además, se proporciona esta función para el eje de nivelación vertical, este eje se utiliza para nivelar las alturas de los piranómetros con respecto al haz de luz, para realizar esta tarea se tiene una perilla de giro manual en la parte superior la cual baja o sube a la plataforma doble.

El sistema de rotación permite realizar calibraciones a cualquier ángulo requerido, esto siendo posible porque el software permite especificar el grado necesario para realizar el trabajo, este punto es importante dado que disminuye la incertidumbre durante la calibración, esto disminuye el error humano al momento de colocar el ángulo a trabajar. Cabe mencionar, que este comparador es el único en el país que permite realizar este tipo de calibraciones.

### Motor a pasos

El principal funcionamiento del motor a pasos es realizar un movimiento rotatorio de la plataforma doble, siendo transmitido hacia el eje de rotación (el cual está conectado al sistema de rotación) por medio de una banda dentada. En caso de requerir hacer una nivelación manual de

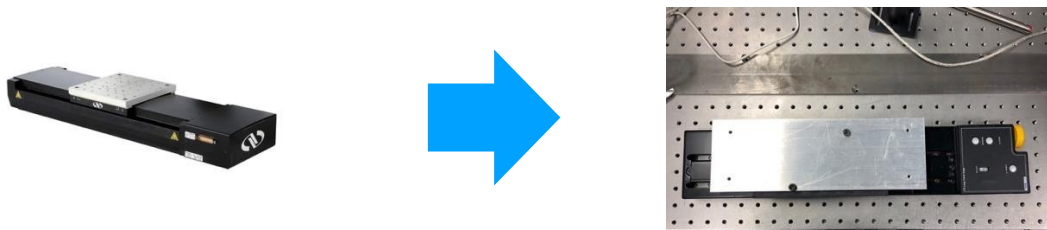
las plataformas, el motor a pasos cuenta con una perilla en la parte posterior del mismo. Por último, el motor a pasos es manipulado por medio de un controlador conectado a un cable USB a mini USB.

### 3.3. Subsistema de movimiento lineal

Para la creación de este subsistema se usó un Long Travel Stage el cual es un equipo ligero, compacto y robusto con excelentes características de rendimiento en todo el rango del recorrido. Este lo hace ideal para aplicaciones donde se requiere de precisión y se tiene un espacio limitado. Además, los interruptores magnéticos integrados proporcionan protección contra sobre marchas en ambas direcciones ofreciendo un movimiento suave.

Se conforma por un controlador electrónico integrado el cual puede ser manipulado de forma remota usando un software o manualmente a través de los botones y el potenciómetro de velocidad (ofrece un movimiento suave y con una precisión en el eje de  $5.0 \mu\text{m}$ ) en el teclado de control. La configuración de los parámetros se puede realizar desde el software programado por CENAM.

Este sistema ha sido modificado, agregando una placa horizontal de aluminio de 0.3 m de largo, y se le han hecho orificios para la colocación de los piranómetros, la modificación se muestra en la Figura 3.4. El sistema fue creado para compararse con el sistema rotacional.



*Figura 3. 4. Modificación del Long Travel Stage*

### 3.4. Subsistema de control

Para controlar los subsistemas rotacional y lineal, así como el multiplexor se creó el subsistema de control por medio de software (desarrollado por CENAM). El cual fue programado en LabWindowsCVI permitiendo realizar calibración es semiautomáticas, construir secuencias de mediciones, disminuir los tiempos de calibración, obtener una menor incertidumbre por repetividad y una alta reproducibilidad de los resultados en laboratorio, sin depender de una fuente natural de iluminación (sol). En este software se encuentran dos niveles para su utilización: la primera es a nivel usuario y la segunda es a nivel programador (de la cual solo se menciona, porque para los alcances de este trabajo no es necesario).

#### Nivel usuario

La interfaz de usuario se compone de dos ventanas: la primera es la ventana de ejecución la cual contiene un cuadro de texto donde se proporciona la información sobre la secuencia ejecutada en tiempo real (inicio y fin de la secuencia, los valores entregados por los sensores, tiempos de espera, y los pasos de motor), estos datos a su vez son recopilados por el multiplexor.

Se muestran siete botones: “Carga de secuencia”, permite utilizar nuevamente una secuencia predeterminada; “Grabar secuencia”, después de crear una secuencia, este botón la guardar en la computadora. “Limpiar Secuencia”, se utiliza cuando se requiera cambiar una secuencia por otra, algunas veces el sistema operativo cambia los puertos de los equipos que se están utilizando, para solucionar esto se usa el botón de “Configuración de puerto”, al crear o reutilizar una secuencia se debe ejecutar la misma con el botón de “Ejecutar secuencia”; En caso de ser necesario interrumpir la calibración por algún problema en el sistema se hace por medio de “Interrumpir rutina”. Por último, se cuenta con “Operaciones e instrumentos” donde se especifican las características para la calibración. En la parte media de la ventana de usuario Figura 3.5. Se observa un rectángulo para visualizar la gráfica obtenida durante el proceso de calibración. En la parte inferior de la ventana se muestra la información de los recorridos de los motores (de los subsistemas rotacional y lineal).

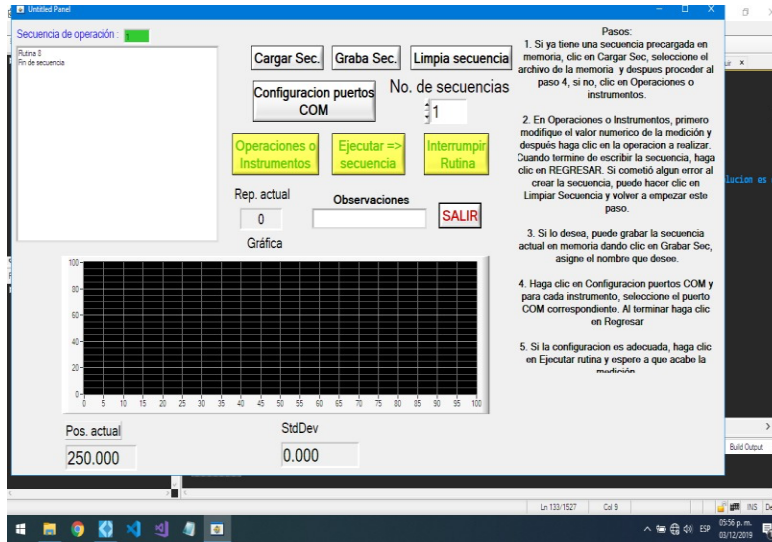


Figura 3. 5. Ventana de ejecución

La segunda ventana “Operación e Instrumentos” es utilizada para crear la rutina y realizar la calibración, esta ventana se muestra en la Figura 3.6, donde se visualizan 25 botones cada uno con una funcionalidad distinta, una caja de texto con el nombre “Número de mediciones” donde se introduce la cantidad de mediciones requeridas para la calibración, dos cajas de texto, haciendo mención del número de pasos de motor en ejecución. Por último, un botón llamado “Regresar” utilizado para regresar a la ventana de ejecución.



Figura 3. 6. Ventana de operaciones e instrumentos

### 3.5. Multiplexor

Cuando un piranómetro recibe irradiancia este enviará señales en volts transmitidos por medio de su cable, el cual a su vez está conectado a un multiplexor, de al menos dos canales (un canal para cada piranómetro) y 6.5 dígitos, el equipo al detectar los voltajes de salida tanto del piranómetro patrón, así como el DUT, enviará los datos a la PC donde se generará un archivo de texto, el cual se puede exportar fácilmente a una hoja de cálculo.

Para esta aplicación se utiliza el multiplexor de KEITHLEY, modelo 2700, se elige este equipo porque cuenta con 4 canales para la conexión de los piranómetros. Además de ser accesible durante la conexión de los equipos. También, cumple con los 6.5 dígitos haciendo más exacta la medición, otro factor que influye en la elección es la facilidad para incluir el equipo al software. En la Figura 3.7 se muestra el sistema de comparación por los métodos de rotación y lineal.

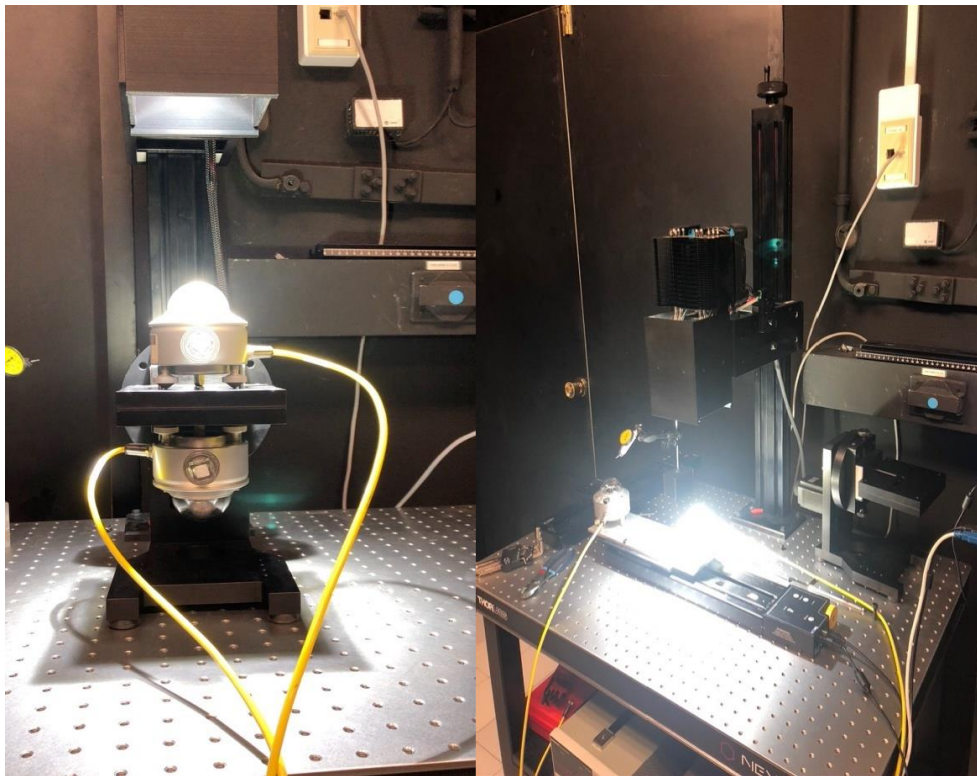


Figura 3. 7. Sistema rotacional (izquierda) y sistema lineal (derecha)

## Capítulo 4 -Validación del método del comparador con LED

### 4.1. Validación de un método

En términos de eficiencia energética y energía renovable, se ha estado trabajando en la normalización desde hace años, dejando aun varios aspectos por normalizar; es importante también considerar que la normalización debe dejar espacio a la innovación y eficiencia. Con respecto a la metrología, se cuenta con patrones que pueden dar trazabilidad a las mediciones de radiación solar y energía eléctrica producida de fuentes renovables, pero están ausentes los laboratorios secundarios de calibración. La evaluación de la conformidad está en desarrollo, existen laboratorios de ensayos y organismos de certificación que tienen las competencias técnicas pero la mayoría no están acreditados.

Los laboratorios secundarios de calibración dan servicio a los laboratorios de la industria y emiten un informe de calibración donde les indican a sus clientes el error o desviación de sus instrumentos y otras características metrológicas que deben conocerse para asegurar la calidad de las mediciones que realizan. Para demostrar que dichos laboratorios de calibración son técnicamente competentes, deben estar acreditados conforme a la ISO/IEC 17025 “Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración”.

Para iniciar con la validación del método, es necesario conocer el termino, donde la norma ISO 9000:2015 define a la validación como: *“La confirmación, mediante la aportación de evidencia objetiva, que se han cumplido los requisitos para una utilización o aplicación específica prevista”*.

Por otra parte, la norma ISO 17025 define a la validación como: *“La confirmación por examen y la provisión de evidencia objetiva que se han cumplido los requisitos particulares para un uso específico propuesto”*.

Por ultimo, The Fitness for Purpose of Analytical Methods A Laboratory Guide to Method Validation and Related Topics. EURACHEM Guide, define la validación de métodos como: *“El proceso de establecer las características de desempeño y las limitaciones de un método y la identificación de las influencias que pueden cambiar esas características, y en qué*

*medida. Como alternativa, establece que la validación de métodos es el proceso de verificar que un método es apropiado para un propósito dado, es decir, para usarse en la solución de un problema analítico particular”.*

Según Rubén J. Lazos Martínez e Ignacio Hernández Gutiérrez, en el artículo: “LA VALIDACIÓN DE MÉTODOS: UN ENFOQUE PRÁCTICO”, propone los siguientes pasos para realizar la validación de un instrumento de medición. Los cuales se describen a continuación:

#### Paso 1. Identificar la función

Identificar con precisión la función que debe cumplir el instrumento, esto es de vital importancia, porque constituye a la referencia, a los resultados de validación, lo anterior mencionado se puede definir como la identificación del mensurando.

El sistema comparador realiza la calibración de un DUT por medio de comparaciones directas a nivel de tensión. La ecuación 5.1 (la cual se menciona más adelante) modela a partir de una expresión matemática, la sensibilidad del piranómetro DUT con respecto a un patrón.

#### Paso 2. Especificar los requisitos de la función y las características de la herramienta

En este paso se requiere identificar las características de las herramientas y los requisitos de la función, así como la necesidad de una expresión cuantitativa.

Para cumplir este punto, se ha dado a la tarea de realizar el estudio de la norma ISO 9847- Energía solar: calibración de piranómetros de campo en comparación con un piranómetro de referencia, para conocer los instrumentos y las características a cumplir para la construcción del sistema de comparación (solo se hace la comparación de los instrumentos para este trabajo, previamente CENAM realizó el estudio para la elaboración del sistema). En la tabla 4.1 se muestra la comparación de los instrumentos requeridos por la norma y los utilizados en el sistema comparador (los datos fueron obtenidos por sus respectivas hojas técnicas).

Tabla 4. 1. Comparación de instrumentos

Equipos solicitados por la norma ISO 9847	Equipos del sistema comparador	Estatus
Adquisidor de datos Precisión $\pm 0.1\%$ Mínimo tres canales	<b>Adquisidor de datos</b> <b>Precisión <math>\pm 0.1\%</math></b> <b>Cuatro canales</b>	<b>Cumple</b>
Piranómetro patrón El piranómetro de patrón debe de ser de una clase mayor al piranómetro de referencia	<b>Piranómetro patrón</b> <b>Se utiliza un piranómetro patrón secundario CMP10 de la marca Kipp &amp; Zonen</b>	<b>Cumple</b>
Plataforma móvil El ángulo de movimiento debe tener una precisión menor a $0.3^\circ$	<b>Plataforma móvil</b> <b>Precisión del ángulo es de <math>0.1^\circ</math></b>	<b>Cumple</b>
Fuente de luz Con una distribución espectral similar a la radiación solar 300 – 1000 nm	<b>Fuente de luz</b> <b>Fuente tipo LED</b> <b>Una parte del espectro solar</b> <b>350 – 800 nm</b>	<b>Cumple</b>

Al realizar el estudio de los equipos necesarios para la creación de este instrumento de comparación, se refleja el cumplimiento requerido por la norma e incluso mejorando algunas tecnologías.

### Paso 3. Determinar el desempeño de las características de la herramienta

En este paso se determina el desempeño de la herramienta para determinar las características descritas en el paso 2. Es recomendable compararse con un método alternativo o con otro laboratorio esto se hace por medio de la experimentación o realizando pruebas.

Para la validación del método de calibración por el subsistema rotacional, se ha creado el subsistema lineal, teniendo como finalidad intercomparar los resultados obtenidos por cada subsistema (siguiendo la misma metodología descrita más adelante), al finalizar el estudio de los datos se deberán de comparar con el certificado de calibración elaborado por CENAM y conocer si el sistema comparador muestra resultados positivos.

En el caso de que uno de los dos subsistemas no entregue datos positivos se deberán de hacer nuevas mediciones, y una vez más reanudar el estudio de los datos e inclusive como se está realizando la estimación de la incertidumbre.

#### Paso 4. Comparar los resultados del desempeño con los requisitos

Obtenidos los resultados del desempeño en el paso 3 se deben comparar los requisitos establecidos en el paso 2. En el caso de que los resultados den un desempeño desfavorable, se deberá de ajustar la herramienta y regresar al paso 3.

Los resultados obtenidos durante las pruebas muestran que ambos métodos han proporcionado resultados de desempeño similares entre sí, estos pueden ser revisados en el capítulo 6. En el caso de los instrumentos que conforman al sistema comparador, se ha demostrado el cumplimiento e incluso algunos de los instrumentos superan lo requerido por la norma haciendo que se cumpla este punto.

#### Paso 5. Expresar el resultado del proceso

Cuando lo resultados de desempeño han cumplido con todos los requisitos establecidos se puede declarar que la herramienta ha sido validada, además es necesario poner a disposición las evidencias que soportan los resultados obtenidos.

Siguiendo los pasos anteriores se puede mencionar que ambos métodos funcionan, y pueden ser validos por la metodología sugerida por los autores Rubén J. Lazos Martínez e Ignacio Hernández Gutiérrez.

Para el cumplimiento de este punto, se describirá el método de calibración usado para calibrar el piranómetro patrón por parte de CENAM, así como los métodos utilizados por el sistema comparador. Además, los resultados serán descritos en el capítulo 6.

## 4.2. Método absoluto para calibrar piranómetros

En este apartado se describe el método utilizado por CENAM para realizar calibraciones de piranómetros patrón, con trazabilidad directa al SI, a través del patrón primario de flujo radiante (radiómetro criogénico) método absoluto, este es el utilizado para calibrar el piranómetro patrón usado en el sistema comparador descrito antes.

Cuando se define el mensurando para la calibración de piranómetros, es importante establecer que el sensor del instrumento es un conjunto de detectores térmicos (a esto se les conoce como termopilas), los cuales están conectados en serie, en cuanto a la sensibilidad de la intensidad proporcionada por una fuente de luz, se mantiene baja y tampoco es posible medir con un rayo láser más pequeño a la área del sensor, esto debido a la alta dependencia espacial de la sensibilidad o la uniformidad de la respuesta del mismo detector. Por lo tanto, la irradiancia promedio en toda el área del detector es la magnitud comparada con el patrón y se expresa en unidades de irradiación promedio durante un ejercicio de calibración.

El método utiliza un detector piroeléctrico calibrado eléctricamente (Electrically Calibrated Pyroelectric Detector (ECPR)), los cuales son patrones de referencia radiométrica, estos al igual que los piranómetros se basan en detectores térmicos, la ventaja de los detectores piroeléctricos sobre los fenómenos termoelectricos, el detector piroeléctrico con un adecuado acondicionamiento puede lograr una alta sensibilidad a través del sistema de reducción de ruido por medio de filtros de bloqueo y es calibrado eléctricamente para mediciones de potencia utilizando un sensor recubierto con alta eficiencia de absorción de luz. El área expuesta de un ECPR se define por una máscara de metal que se puede medir con baja incertidumbre, por ejemplo, con una medición dimensional sin contacto.

Para realizar la medición del ECPR se utiliza un modulador de luz de entrada al sensor y una configuración experimental usando un “helicóptero” con una exposición a la luz de un 50%. En la Figura 4. 1 se muestra el esquema de medición utilizado.

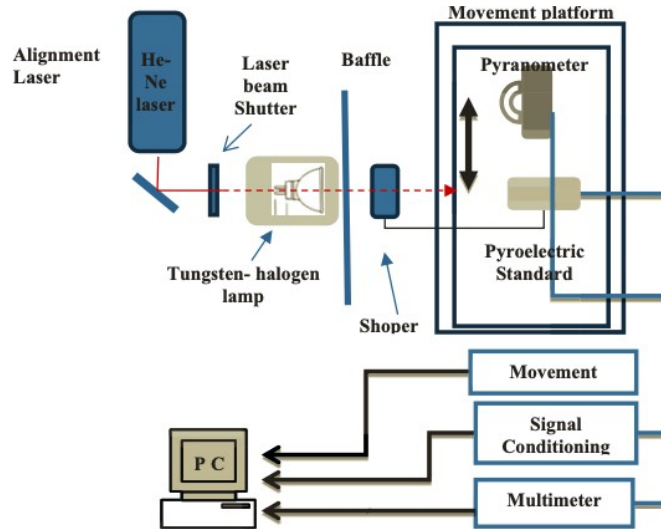


Figura 4. 1. Configuración experimental para una calibración de piranómetro

Este método está basado en la comparación de mediciones de una misma fuente de irradiancia para ambos sensores. Se emplea una fuente de frente plano con distribución de intensidad sin divergencia, con esto se busca que la irradiancia de la fuente sea constante para ambos sensores, independientemente del tamaño del área iluminada por la fuente. Al utilizar una fuente con filamento convencional de halógeno de tungsteno y un difusor MR11 o ME11, se busca la distribución simétrica radial de la intensidad a cierta distancia con un área de cobertura definida por la distancia normal de la fuente al plano del sensor.

Debido a la distribución de intensidad radial de la fuente, es necesario corregir la diferencia entre las áreas sensibles del piranómetro y el ECPR, esta corrección no tendrá efecto cuando ambos sensores tenga la misma área.

*“Para la medición propuesta, el sensor del plano del sensor del piranómetro debe estar alineado normal a la fuente e idealmente coplanar al plano del sensor patrón de referencia. En la práctica, la alineación se logra alineando la base de referencia del piranómetro y el plano del ECPR con un espejo plano que simula la exposición directa al sol, similar al uso del seguidor solar en exteriores. De esta manera, la calibración se lleva a cabo considerando solo la radiación directa de la fuente y la misma magnitud de irradiancia si ambos sensores tienen la misma distancia a la fuente” [4].*

Con el método absoluto se procedió a la calibración a diferentes distancias desde la fuente hasta el plano del sensor de un piranómetro de la marca Kipp & Zonen, modelo CMP6 contra el patrón ECPR. Ambos instrumentos fueron instalados como se muestra en la Figura 4.1.

Para el centrado del detector ECPR se utilizó un láser de 3 mm de diámetro, de la misma manera se usó para alinear al plano normal con el sensor de la fuente. Además, se localizó la máxima radiación y se verifica que la distribución de irradiancia con referencia a ese punto era simétrica. El piranómetro se alineó en un plano normal a la línea del detector fuente, usando la base de referencia y el láser se enfocó en la misma posición, desplazando el ECPR y centrando el láser en el piranómetro usando la plataforma móvil.

La alineación de los planos de los detectores se realizó con referencia al borde exterior del domo del piranómetro. La distancia normal del borde a la fuente se ajustó en el ECPR para garantizar el mismo valor de la irradiancia de la fuente.

La reproducibilidad lograda para una longitud fija usando el método propuesto es de 0.4 %, siendo la segunda contribución a la incertidumbre total; la primera contribución a la calibración del ECPR fue utilizado como referencia, teniendo una incertidumbre inferior a 0.5 %. Para los dos sensores se tiene un nivel de cobertura de  $k = 1$ . Para la calibración se utilizó una irradiancia de  $500 \text{ W/m}^2$  y a una temperatura de  $21 \text{ }^\circ\text{C}$ .

El modelo utilizado para estimar la incertidumbre fue basado bajo los patrones establecidos en la metodología de la GUM. En caso de tener dudas sobre cómo se estimó la incertidumbre, así como la corrección de áreas, se recomienda consultar el artículo “Unexplored Indoors method for pyranometers calibration traceable to SI.”

### 4.3. Procedimiento de Calibración

El piranómetro seleccionado para trabajar esta calibración es de la marca Kipp & Zonen serie CMP. Los piranómetros son radiómetros diseñados para medir la irradiancia en una superficie plana, normalmente procedente de la radiación solar o de lámparas.

## Equipo necesario para la llevar a cabo la calibración

- Sistema de comparación.
- Multiplexor Keithley 2700.
- Fuente de poder GwInstek GPD-33036.
- Distanciómetro
- Medidor de carátula.
- Piranómetro patrón.
- Long Travel Stage.
- Sistema de rotación.

## Acciones preliminares

Encender la lámpara a una tensión de 18.1 V (puede variar dependiendo de la altura), el ventilador de la lámpara a una tensión de 5 V y dejar estabilizar la lámpara durante 1 hora, si el laboratorio es estable en  $\pm 1$  °C. Para finalizar al motor del subsistema rotacional se le suministrar una tensión de 14 V.

Nota: si la tensión suministrada por la fuente es menor a la mencionada antes, el controlador puede calentarse.

## Conexión de instrumentos a fuente

En la fuente se establecen los rangos de tensión para cada equipo. En el canal 1 la tensión requerida para alimentar a la lámpara. En el canal 2 la tensión para el motor. Por último, en el canal 3 se conecta el ventilador de la lámpara. La fuente se conecta a la computadora por medio de un cable tipo b a USB.

## Conexión del subsistema rotacional a la computadora

El motor a pasos se debe conectar a su controlador por medio del conector DB9 a su vez el controlador se debe de conectar por un cable mini USB a USB.

## Conexión de piranómetros al multiplexor

Conectar el piranómetro patrón al canal 1 y el DUT se conecta al canal 2 del multiplexor del Keithley. Los canales tienen etiquetas para una conexión más rápida, también cuentan con cable de color rojo y negro (positivo y negativo respectivamente).después se enciende el multiplexor.

Nota: si no se muestran mediciones, es necesario verificar las conexiones.

## Conexión del subsistema lineal

El sistema se conecta utilizando un cable tipo b a USB a través de este cable se hace la conexión a la computadora.

## Condiciones ambientales para el desarrollo de la calibración.

- El laboratorio donde se realizará la calibración requiere de un sistema de aire acondicionado, para mantener controlada la temperatura a  $21\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ .
- Se requiere que el laboratorio se encuentre pintado de color negro mate con la finalidad de que la luz proveniente de alguna lámpara no refleje y afecte la calibración.
- Las fuentes de iluminación no requeridas durante la calibración deberán de estar apagadas.
- Puertas y ventanas deben de estar cerradas y de ser necesario cubrirlas para evitar la entrada de luz.

## Desarrollo de la calibración

A continuación, se describen dos métodos distintos para la calibración de piranómetros: el primer método utiliza el subsistema de rotación, el segundo método utiliza el subsistema lineal. Cabe mencionar que ambos métodos utilizan un motor a pasos para garantizar la fiabilidad de las mediciones. La Figura 4. 2. muestra de manera general los dos métodos de calibración.



Figura 4. 2. Procedimiento de calibración: Subsistema rotacional (derecha) y Subsistema Lineal (izquierda)

#### 4.4. Calibración de piranómetro por subsistema de rotación

El sistema de comparación piranométrica cuenta con un sistema mecánico para la colocación de los piranómetros, el cual tiene dos bases de montaje paralelas entre sí, dentro de cada base se colocaron dos ranuras, donde internamente se encuentra una tuerca (por ranura) la cual se mueve de manera horizontal para adaptarse al piranómetro.

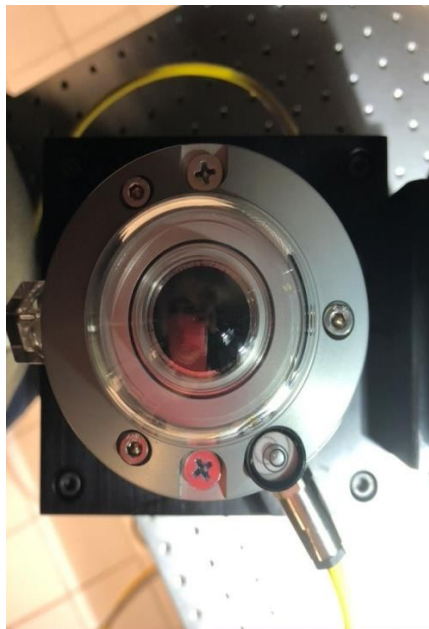
#### Instalación de piranómetros

La instalación dependerá del propósito de la medición, en el caso del laboratorio se requiere hacer mediciones de radiación global. Para esto se recomienda seguir estos pasos.

- Al comenzar la calibración se requiere verificar con un inclinómetro que la plataforma doble se entre a  $0^\circ$  con respecto a la horizontal.
- Montar el piranómetro patrón en la plataforma de comparador. La alineación con su nivel de referencia no es prioridad en este punto, pero si procurar que no esté excesivamente desviada de la horizontal, al igual que la plataforma de los piranómetros.

Nota: en caso de que el tornillo de soporte no coincida con la ranura vertical, se puede hacer el cambio con otro de los tornillos de nivelación.

- El piranómetro cuenta con dos orificios para tornillos de 5 mm, el cual se debe asegurar en primera estancia ligeramente con los tornillos y las tuercas internas de la plataforma doble.
- El radiómetro se nivela girando los dos tornillos para poner la burbuja del nivel centrada en el círculo marcado.
- Asegurar el piranómetro atornillándolo a la base de montaje, sin dejar de lado la nivelación. Al finalizar el montaje el piranómetro se verá como se muestra en la Figura 4.3.

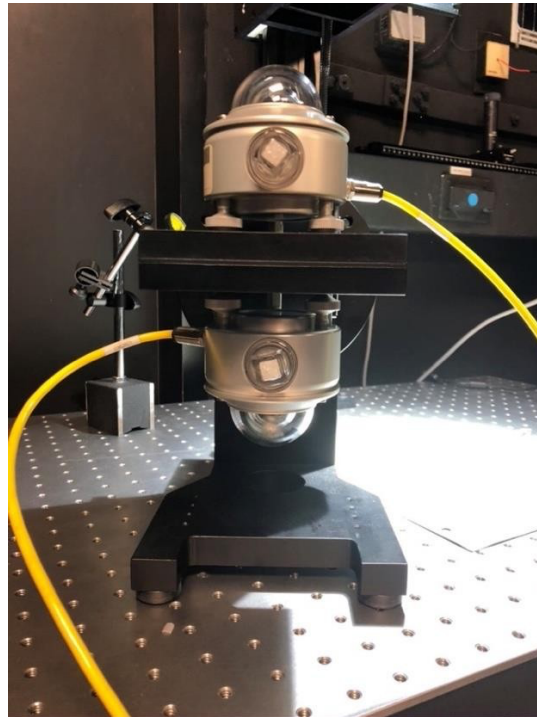


*Figura 4. 3. Montaje de piranómetro en plataforma giratoria*

- Girar la plataforma 180° para la instalación del DUT, se deben de seguir con el mismo procedimiento de instalación ya descrita arriba.

Se debe de contemplar que los cables de datos para los piranómetros se visualizan “encontrados” como se muestra en la Figura 4.4, esto se debe a la configuración en la instalación de los radiómetros. Esto se hace para que los cables no se entrelacen durante los giros y evitar un

accidente (se hace mención que el cable del piranómetro patrón cuenta con 4 pines y el cable del DUT tiene 2 pines).



*Figura 4. 4. Posición de cables*

### Centrado de piranómetros

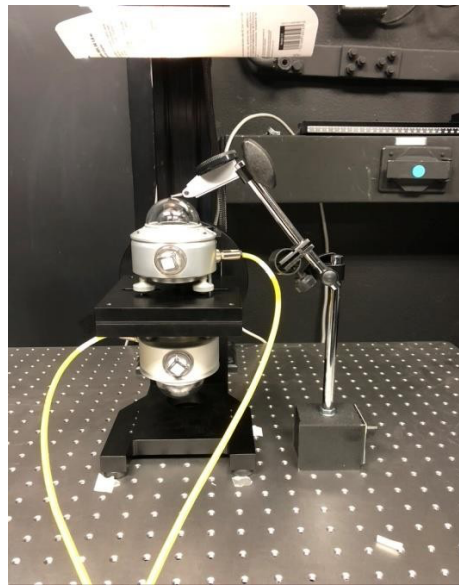
Con el distanciómetro se hará la alineación en el eje horizontal para conocer la desviación existente entre los centros de los piranómetros. El láser desprendido por el distanciómetro debe incidir en el anillo interior del piranómetro patrón, después se hace girar la plataforma 180° con esto el láser debe de incidir en el mismo punto del DUT.

### Nivelación de altura

La primera medición de altura se hará con el apoyo de un distanciómetro, comenzando con el piranómetro patrón. Se coloca el piranómetro debajo del distanciómetro, tomando esta distancia como referencia, después se hará girar la plataforma 180°, teniendo en cuenta que la altura debe ser la misma para ambos.

Nota: en caso de que uno se encuentre a mayor altura que el otro, se requiere modificar la altura con el mecanismo de perilla el cual controla la altura en las plataformas.

Al tener ambos piranómetros a la misma altura es necesario utilizar el medidor de carátula para obtener una medida más precisa. Esto se hace colocando el palpador en la parte superior del domo del piranómetro patrón obteniendo la altura de referencia. Después se hace girar la plataforma 180° para realizar la medida al DUT, con la finalidad de no sobrepasar los 100 micrómetros de altura entre ambos piranómetros. Esto se muestra en la Figura 4.5.



a)

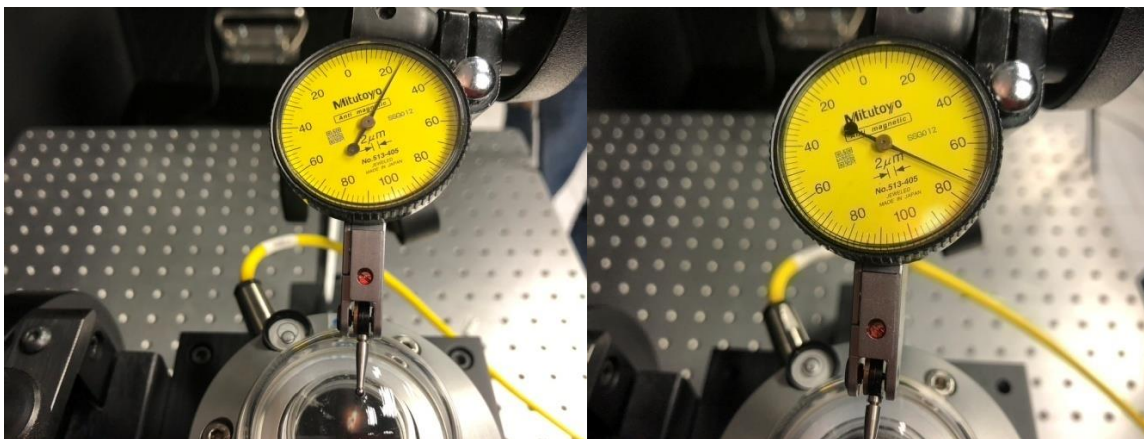


Figura 4. 5. a) Medición de altura subsistema rotacional, b) Comparación de altura por subsistema rotacional

## Punto de máximo de irradiancia

El punto máximo de irradiancia se debe establecer con el piranómetro patrón, dado que será el punto de partida para realizar la calibración, y así asegurar que ambos sensores sean irradiados en el mismo punto y con la misma intensidad. Esto se hace de la siguiente manera:

- Utilizar el subsistema de control para realizar una medición en el canal 1 del multiplexor. Esto solo se debe hacer una vez, y es para configurar el multiplexor y poder observar las lecturas en la pantalla del instrumento.
- Al tener los dos piranómetros instalados en la plataforma es necesario buscar el punto máximo de incidencia. Para realizar esta tarea se requiere poner el sistema de rotación debajo de la lámpara.

Nota: los siguientes puntos son para encontrar la máxima irradiación.

- Observar el subsistema de rotación desde un costado, con la finalidad de verificar si es necesario moverlo ya sea hacia adelante o atrás. Esto se realiza hasta encontrar el valor máximo en el eje vertical.
- Al terminar el paso anterior, se debe observar al subsistema de rotación de frente, esto con la finalidad de moverlo hacia la derecha o izquierda hasta encontrar el valor máximo (se debe tomar en cuenta que no tiene que moverse el eje vertical al momento de estar moviendo el eje horizontal). Se observa en todo momento el multiplexor, para monitorear las mediciones.

Nota. Si se desniveló al menos un piranómetro, repetir el proceso de nivelación descrito anteriormente.

En la posición del valor máximo, ajustar la tensión de la lámpara que deberá corresponder a la irradiancia deseada (se puede estimar la irradiancia con el valor nominal de la responsividad del piranómetro patrón).

### Creación de rutina para la calibración

Se utiliza el software para crear una rutina de calibración, esta debe de abarcar mediciones para ambos sensores.

La rutina comienza haciendo mediciones del piranómetro patrón, en la rutina se especifica la cantidad de mediciones necesarias para la calibración, se recomienda realizar mediciones cortas a partir de 10 hasta un máximo de 12 para ambos piranómetros. Se desarrollarán pocas mediciones 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 subsistema rotacional dará un giro de  $180^\circ$  contra sentidos de las manecillas del reloj para posicionar al DUT por debajo del haz de luz.

Después de terminar la rotación de  $180^\circ$ , se hará una pausa de 60 s durante este tiempo se detienen las mediciones, esto ayuda a que el piranómetro se estabilice bajo el haz de luz.

Con respecto al DUT se llevan a cabo el mismo número de mediciones que al piranómetro patrón, para tener la misma cantidad de valores.

Al terminar las mediciones del DUT el subsistema rotacional girará nuevamente a  $180^\circ$ , está vez al sentido de las manecillas del reloj para posicionar nuevamente al piranómetro patrón de bajo del haz de luz.

De igual manera existe una pausa de 60 s por los motivos mencionados anteriormente.

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

### Creación de archivos

Se generan y/o actualizan tres archivos al finalizar la medición: *Medicion\_resumen.txt*, *secuencias\_temporales.txt* y *Medicion\_valores.txt* que se ubican en el directorio “C:\Usuario\Comparador”. Si el usuario guardó la secuencia creada, también se encuentra en esta carpeta.

### 4.5. Calibración de piranómetro por subsistema lineal

Al sistema de comparación se le incorpora un subsistema de movimiento lineal, en sustitución del subsistema rotacional con finalidad de validar este último método de calibración, utilizando la misma metodología de calibración para ambos sistemas.

### Instalación de piranómetros

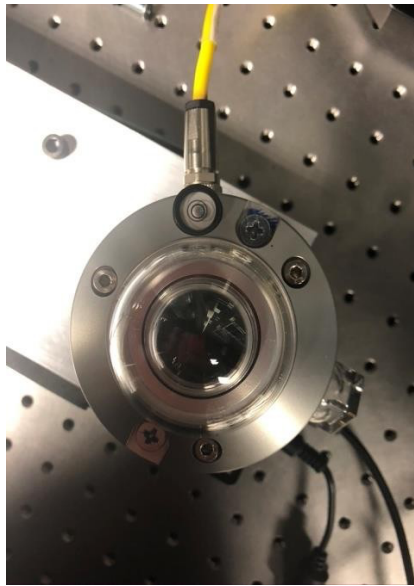
La instalación dependerá del propósito de la medición. En el caso del laboratorio se requiere hacer mediciones de radiación global. Para esto se recomienda seguir estos pasos.

- Montar el piranómetro patrón en la plataforma del subsistema lineal. La alineación con su nivel de referencia no es prioridad en este punto, pero si procurar que no esté excesivamente desviada de la horizontal, al igual que la plataforma de los piranómetros.

Nota: en caso de que un tornillo de nivelación no coincida con la plataforma, se puede hacer el cambio con el tornillo de soporte.

- El piranómetro cuenta con dos orificios para tornillos de 5 mm. El piranómetro se tiene que asegurar en primera estancia ligeramente con los tornillos. La plataforma cuenta con dos orificios que tienen la misma distancia a los del piranómetro.

- El radiómetro se nivela girando los dos tornillos de nivelación para poner la burbuja del nivel centrada dentro del círculo marcado.
- Asegurar el piranómetro atornillándolo bien a la base metálica. El montaje se muestra en la Figura 4.6.



*Figura 4. 6. Montaje de piranómetro en subsistema lineal*

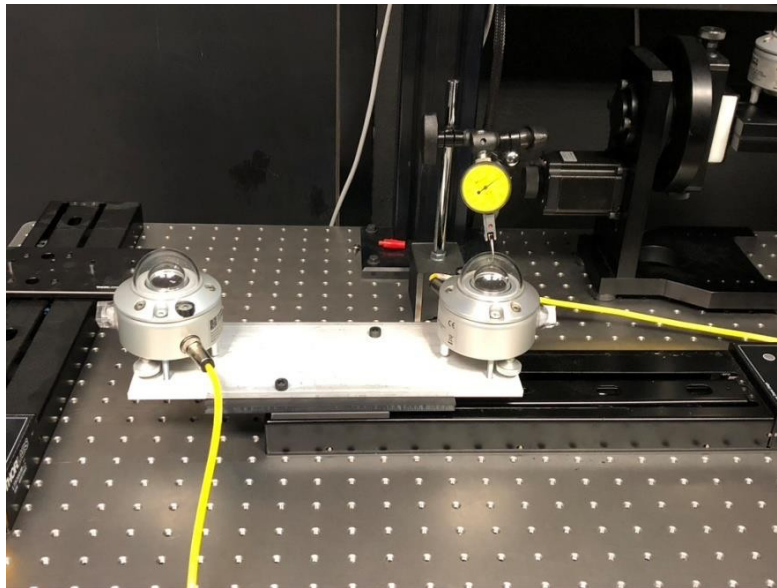
- Desplazar la plataforma 0,25 m para la instalación del DUT, se deberá seguir el mismo procedimiento de instalación descrita anteriormente.

### Nivelación de altura

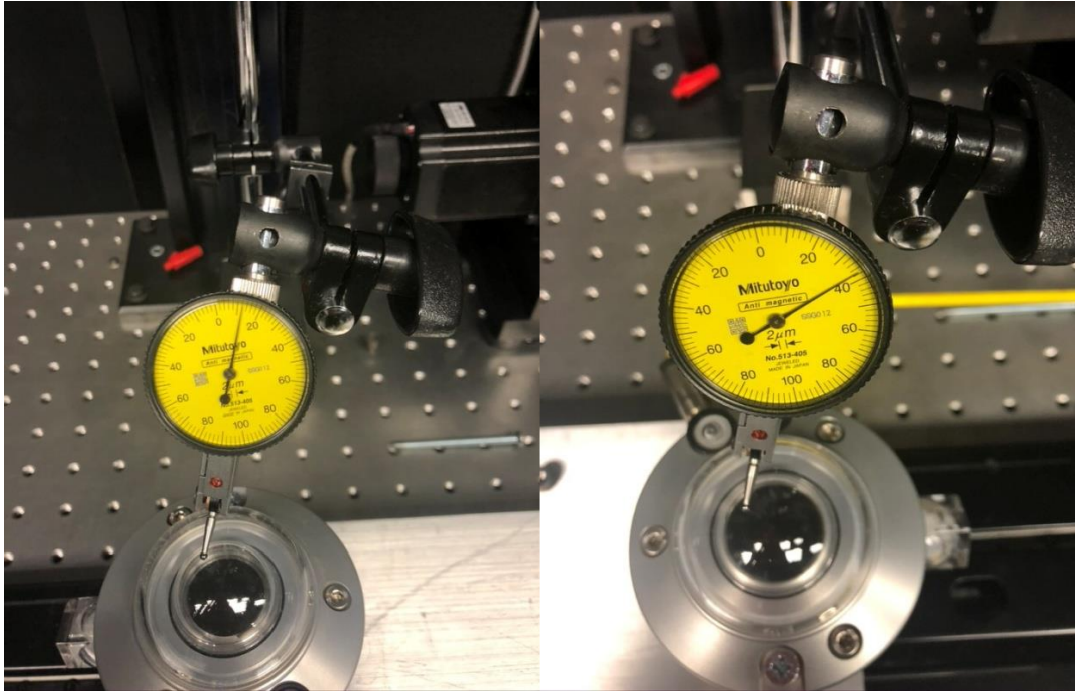
La primera medición de altura se hará con el apoyo de un distanciómetro, comenzando con el piranómetro patrón. Se coloca el piranómetro debajo del distanciómetro, tomando esta distancia como referencia, se desplazará la plataforma 0,25 m teniendo en cuenta que la altura debe ser la misma para ambos.

Nota: en caso de que un piranómetro patrón se encuentre a mayor altura que el DUT, se requiere modificar el tornillo fijo del DUT consiguiendo la misma altura.

Al tener ambos piranómetros a la misma altura es necesario utilizar el medidor de carátula para obtener una medida más precisa. Esto se hace colocando el palpador en la parte superior del domo del piranómetro patrón obteniendo la altura de referencia. Después se desplaza la plataforma 0,25 m para realizar la medida al DUT, con la finalidad de no sobrepasar los 100 micrómetros de altura entre ambos piranómetros. Esto se muestra en la Figura 4.7, donde a) es la muestra para comenzar con la medición y b) se ve hace referencia a no sobre pasar los 100 micrómetros.



a)



b)

Figura 4. 7 a) Medición de altura por subsistema lineal, b) Comparación de altura por subsistema lineal

### Punto de máximo de irradiancia

El punto máximo de irradiancia se debe establecer con el piranómetro patrón, dado que será el punto de partida para realizar la calibración, y así asegurar que ambos sensores sean irradiados en el mismo punto y con la misma intensidad. Esto se hace de la siguiente manera:

- Utilizar el subsistema de control para realizar una medición en el canal 1 del multiplexor. Esto solo se debe hacer una vez, y es para configurar el multiplexor y poder observar las lecturas en la pantalla del instrumento.
- Al tener los dos piranómetros instalados en la plataforma es necesario buscar el punto máximo de incidencia. Para realizar esta tarea se requiere poner el sistema de rotación debajo de la lámpara.

Nota: los siguientes puntos son para encontrar la máxima irradiación.

- Observar el subsistema lineal desde un costado, con la finalidad de verificar si es necesario moverlo ya sea hacia adelante o atrás. Esto se realiza hasta encontrar el valor máximo en el eje vertical.
- Al terminar el paso anterior, se debe observar al subsistema lineal de frente, esto con la finalidad de moverlo hacia la derecha o izquierda hasta encontrar el valor máximo (se debe tomar en cuenta que no tiene que moverse el eje vertical al momento de estar moviendo el eje horizontal). Se observa en todo momento el multiplexor, para estar monitoreando las mediciones.

Nota. Si se desniveló al menos un piranómetro, repetir el proceso de nivelación descrito anteriormente.

En la posición del valor máximo, ajustar la tensión de la lámpara que deberá corresponder a la irradiancia deseada (se puede estimar la irradiancia con el valor nominal de la responsividad del piranómetro patrón).

### Creación de rutina para la calibración

Se utiliza el software para crear una rutina de calibración, esta debe de abarcar mediciones para ambos sensores.

La rutina comienza haciendo mediciones del piranómetro patrón, en la rutina se especifica la cantidad de mediciones necesarias para la calibración, se recomienda realizar mediciones cortas a partir de 10 hasta un máximo de 12 para ambos piranómetros. Se desarrollarán pocas mediciones 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 subsistema lineal se desplazará hacia la izquierda para posicionar al DUT por debajo del haz de luz.

Después del desplazamiento, se hará una pausa de 60 s durante este tiempo se detienen las mediciones, esto ayuda a que el piranómetro se estabilice bajo el haz de luz.

Con respecto al DUT se llevan a cabo el mismo número de mediciones que al piranómetro patrón, para tener la misma cantidad de valores.

Al terminar las mediciones del DUT el sistema lineal se desplazará 0,25 m, esta vez a la derecha para posicionar nuevamente al piranómetro patrón de bajo del haz de luz.

De igual manera existe una pausa de 60 s por los motivos mencionados anteriormente.

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

### Creación de archivos

Se generan y/o actualizan tres archivos al finalizar la medición: *Medicion\_resumen.txt*, *secuencias\_temporales.txt* y *Medicion\_valores.txt* que se ubican en el directorio “C:\Usuario\Comparador”. Si el usuario guardó la secuencia creada, también se encuentra en esta carpeta.

## Capítulo 5. Estimación de incertidumbre de calibración de piranómetros por el método de comparación (comparador de piranómetros)

El método de análisis de la incertidumbre se basa en las directrices descritas en la GUM. El propósito aquí no es evaluar o validar la GUM, sino seguir explícitamente la notación, nomenclatura y los procedimientos descritos en el guía.

La GUM define a la incertidumbre como la duda sobre la validez del resultado de una medida y refleja la imposibilidad de conocer exactamente el valor del mensurando. Por otra parte, todas las mediciones llevan de manera implícita una incertidumbre, que de acuerdo con el Vocabulario Internacional de Metrología (VIM), “*es un parámetro que caracteriza la dispersión de los valores que pueden ser atribuidos razonablemente al mensurando [3]*”.

### 5.1. Mensurando

El principal propósito de las mediciones es determinar el valor de una magnitud, llamada el mensurando, el VIM define al mensurando como: “*El atributo sujeto a medición de un fenómeno, cuerpo o sustancia que puede ser distinguido cualitativamente y determinado cuantitativamente*” [3]. Definir el mensurando es importante para obtener mejores resultados de la medición. Una definición completa del mensurando incluye especificaciones sobre las magnitudes de entrada relevantes.

### 5.2. Esquema del proceso de análisis de la incertidumbre

La estimación de incertidumbres no es un trabajo sencillo en el que exista consenso. Por este motivo se sigue trabajando y mejorando las guías. En 1993 un grupo de trabajo presentó la primera edición de la GUM. En la cual se establecen las reglas generales para evaluar y expresar la incertidumbre en la medición.

Para fines de este trabajo se puede resumir la GUM en cinco pasos.

1. Determinar la ecuación de medición para la calibración.
2. Identificación de las fuentes de incertidumbre.
3. Cuantificación para cada variable en la ecuación.
4. Estimar la incertidumbre combinada.
5. Estimar la incertidumbre relativa expandida.

### Ecuación de medición

Para hacer una estimación de incertidumbre se debe de definir la ecuación de medición la cual pretende modelar el mensurando (magnitud que interesa medir). Este paso es el más difícil de hacer debido a que no es fácil encontrar un modelo que represente adecuadamente lo que se quiere determinar, entre mejor representado sea, mejor estimado se podrá obtener.

### Identificación de las fuentes de incertidumbre

Identificada la ecuación de medición con sus magnitudes de entrada, se identifican los factores que tienen una afectación significativa en la determinación del mensurando, pero que no forman parte del mismo. Es decir, aquellas que no pueden representar en la ecuación de medición pero que afectan al mensurando llamadas fuentes de incertidumbre.

### Cuantificación de las variables

En la GUM se distinguen dos métodos para cuantificar las fuentes de incertidumbre: El método de evaluación tipo A y el método de evaluación tipo B

#### Evaluación tipo A

Es el método de evaluación de la incertidumbre por medio del análisis estadístico de una serie de observaciones. La incertidumbre estándar para este tipo de evaluación se obtiene por medio de la ecuación 5.1

$$U(x_i) = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (5.1)$$

Donde;

S es el factor de las mediciones.

$\sqrt{n}$  es la raíz cuadrada del número de mediciones realizadas.

### Evaluación tipo B

En una evaluación de tipo B de la incertidumbre de una magnitud de entrada se usa información externa u obtenida por experiencia. Las fuentes de información pueden ser:

- Certificados de calibración.
- Manuales del instrumento de medición.
- Normas o literatura.
- Valores o mediciones anteriores.

La cuantificación de las fuentes de incertidumbre incluye la asignación de un valor y la determinación de la distribución a la cual se refiere en este valor. Las distribuciones que aparecen con más frecuencia son: distribución normal y distribución rectangular, las cuales se verán en la incertidumbre estándar.

### Incertidumbre estándar $u(X_i)$

Con el fin de combinar las contribuciones para la estimación de la incertidumbre que tienen distribuciones diferentes, es necesario representar los valores de las incertidumbres expandidas como incertidumbres estándar. Para ello se determina la desviación estándar de la distribución (son distribuciones probabilidad para los valores medidos) asignada a cada fuente.

Distribución normal:

La desviación estándar experimental de la media calculada a partir de los resultados de una medición repetida representa la incertidumbre estándar.

Cuando se dispone de valores de una incertidumbre expandida  $U$  (incertidumbre del instrumento) y la distribución del mensurando es o se supone normal, se divide  $u$  entre el factor de cobertura  $k$ .

$$u(X_i) = \frac{U}{k} \quad (5.2)$$

Distribución rectangular

Si la magnitud de entrada  $X_i$  tiene una distribución rectangular con el límite superior  $a_+$  y el límite inferior  $a_-$ , el mejor estimado para el valor de  $X_i$  está dado por:

$$U(x_i) = \frac{a_+ - a_-}{\sqrt{12}} = \frac{\text{Resolución}}{\sqrt{12}} \quad (5.3)$$

### Estimación de la incertidumbre estándar combinada

El resultado de la combinación de las contribuciones de todas las fuentes, es la incertidumbre estándar combinada  $u_i(\gamma)$ .

La contribución  $u_i(\gamma)$  de cada fuente de incertidumbre depende de la incertidumbre estándar  $U(X_i)$  de la propia fuente y del impacto de la fuente sobre el mensurando. Existe la posibilidad de que una pequeña variación de alguna de las magnitudes de influencia tenga un impacto importante en el mensurando y viceversa.

Se define a  $u_i(\gamma)$  como el producto de  $U(X_i)$  por su coeficiente de sensibilidad  $c_i$ :

$$u_i(\gamma) = c_i * U(X_i) \quad (5.4)$$

El coeficiente de sensibilidad está asociada a la estimación de entrada de  $X_i$ , es decir, es la derivada parcial de la función del modelo  $f$  con respecto a  $X_i$ , evaluada para las estimaciones de entrada  $X_i$ :

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial X_i}$$

El coeficiente de sensibilidad  $c_i$  describe el grado de la estimación de salida y se ve afectada por variaciones en la estimación de entrada  $X_i$ . Se puede evaluar a partir de la función  $f$  según la ecuación anterior.

Por último, se debe estimar la incertidumbre combinada, la cual se calcula como la raíz cuadrada de la suma de cuadrados de las aportaciones de cada magnitud de entrada. La ecuación 5.4, menciona cómo se debe calcular la incertidumbre combinada.

$$u_i(\gamma) = \sqrt{\sum_{X=1}^i (u(X_i) * C_i)^2} \quad (5.5)$$

### Estimación de la incertidumbre expandida

La incertidumbre expandida indica un intervalo, llamado intervalo de confianza, que representa una fracción de  $p$  de los valores que pueden probablemente tomar el mensurando. El nivel de confianza es seleccionado de manera tal que corresponda con un factor de cobertura como un número entero de desviaciones patrón en una distribución normal. Por ejemplo:  $k = 1$  corresponde a  $p = 68,45 \%$ ,  $k = 2$  corresponde a  $p = 95,45 \%$ ,  $k = 3$  corresponde a  $p = 98,73 \%$ .

La incertidumbre expandida, se calcula multiplicando la incertidumbre combinada ( $u(\gamma)$ ) por un factor de cobertura.

$$U_e = u(\gamma) * k \quad (5.6)$$

### 5.3. Ejercicio

En este ejercicio se muestra paso a paso como determinar la estimación de incertidumbre para el sistema comparador, siguiendo los pasos de la GUM. Además, todos los datos utilizados son obtenidos de las mediciones realizadas en CENAM y se encuentran en el Anexo A.

La ecuación de medición debe representar adecuadamente cómo se comporta la sensibilidad del DUT con respecto a la del patrón. Estas sensibilidades se pueden definir de la siguiente manera:

$$S_P = \frac{V_P}{I_P} \quad (5.7)$$

Donde:

$S_P$  es la sensibilidad del DUT

$V_P$  es la tensión de salida obtenida del patrón (*Volt*).

$I_P$  es la irradiancia a trabajar ( $W/m^2$ ).

Sensibilidad del DUT

$$S_{DUT} = \frac{V_{DUT}}{I_{DUT}} \quad (5.8)$$

Donde:

$S_{DUT}$  es la sensibilidad del DUT

$V_{DUT}$  es la tensión de salida obtenida del patrón (*Volt*).

$I_{DUT}$  es la irradiancia a trabajar ( $W/m^2$ ).

Después se debe despejar  $I_p$  de la ecuación 5.6 y sustituirla en 5.7

$$I_p = \frac{V_p}{S_p} \Rightarrow S_{DUT} = \frac{V_{DUT}}{V_p} \frac{V_p}{S_p} \quad (5.9)$$

Al realizar la división de la ecuación 5.9 se obtiene la ecuación de medición 5.10, dicha ecuación se puede utilizar para los subsistemas rotacional y lineal.

$$S_{DUT} = \frac{V_{DUT} * S_P}{V_P} \left( \mu V * m^2 / W \right) \quad (5.10)$$

Donde:

- $S_{DUT}$  es la sensibilidad del DUT.
- $V_{DUT}$  es la tensión de salida obtenida del DUT (*Volt*).
- $V_P$  es la tensión de salida obtenida del patrón (*Volt*).
- $S_P$  es la sensibilidad del patrón.

El mensurando (sensibilidad del piranómetro DUT, ecuación 5.10) está en función de las tres variables del lado derecho de la igualdad, llamadas magnitudes de entrada. Una vez identificado esto se procede a identificar las fuentes de incertidumbre.

Al realizar las mediciones del DUT y del patrón con ayuda del multiplexor, existe la probabilidad de que el instrumento tenga algún problema al obtener las mediciones, debido a la observación del instrumento a esto se le conoce como resolución y proporciona una fuente de incertidumbre para ambos piranómetros. Además de la resolución debido al uso del instrumento se hace una calibración al multiplexor y al piranómetro patrón para conocer si existe algún error al enviar las mediciones al servidor teniendo otra fuente de incertidumbre por calibración, Por último, El número de veces que se repite el experimento puede provocar una variación en las medidas por esta razón se debe contemplar otra fuente de incertidumbre por repetibilidad.

Para determinar la relación entre el instrumento y sus fuentes de incertidumbre se utilizó un diagrama de árbol, esta herramienta es muy útil porque permite tener un mejor control de todos los parámetros relacionados con el mensurando. Las fuentes de incertidumbre identificadas para los métodos de calibración descritos en el capítulo 3 se observan en la Figura 5.1.

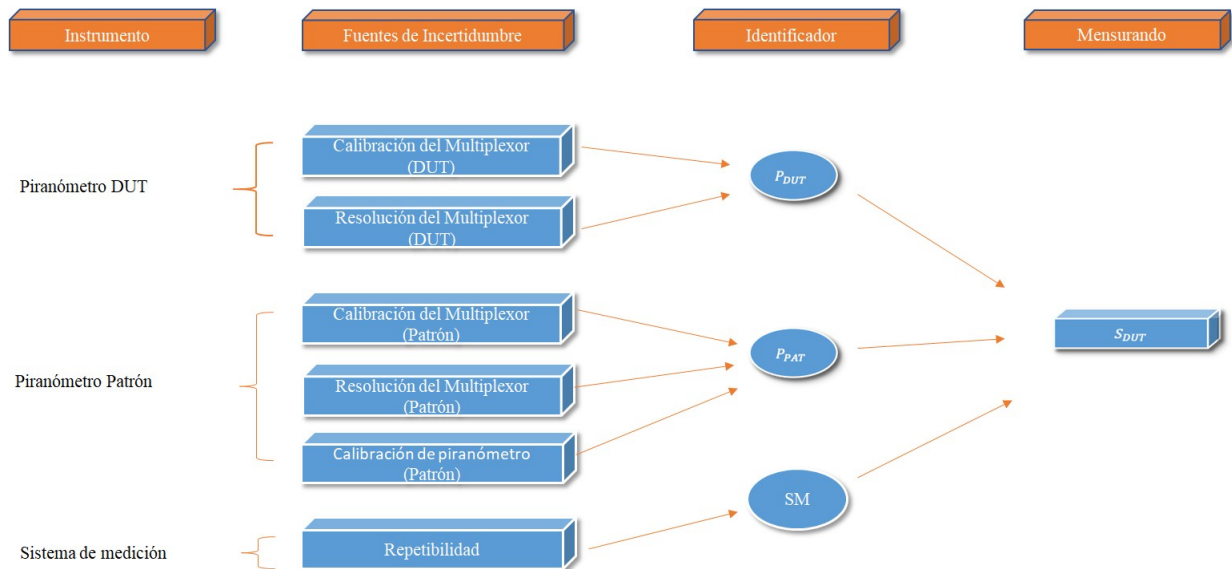


Figura 5. 1. Identificación de las fuentes de incertidumbre

Una vez identificadas todas las fuentes de incertidumbre, se debe de crear la tabla del Anexo B, con la finalidad de llevar un control de los siguientes parámetros: magnitud de entrada, valor estimado, incertidumbre original, tipo de distribución, incertidumbre estándar, coeficiente de sensibilidad, combinada y dimensión.

Los valores estimados ( $X_i$ ) de calibración y resolución del multiplexor fueron obtenidos por medio de su hoja de especificaciones, estos datos están en microvolts, en caso de que las dimensiones sean distintas se deberá de hacer la conversión. El valor estimado para el piranómetro patrón es tomado de su respectiva sensibilidad (este se encuentra en el certificado de calibración). Por último, para calcular el valor estimado de la repetibilidad se hace de la siguiente manera:

- Primero se calcula el factor como se muestra abajo.
  - Calcular el promedio de las tres medias para el piranómetro patrón ( $P_P$ ).
  - Repetir el paso de arriba con los datos del piranómetro DUT ( $P_{DUT}$ ).
  - Obtener el valor del coeficiente de sensibilidad del piranómetro patrón ( $CS_P$ ).

$$Factor = \frac{P_{DUT} * CS_P}{P_P} = \frac{(9408.347 \mu V)(9.142 \mu V * m^2/W)}{4690.598 \mu V} = 1.83 \times 10^{-2} \mu V * m^2/W$$

Una vez terminado el punto anterior, se procede analizar las incertidumbres originales ( $U$ ). Las cuales se calculan de la siguiente manera: comenzando con el multiplexor los datos obtenidos en los valores estimados para la calibración y la resolución son utilizados en la incertidumbre original, debido a que son constantes. Para calcular  $U$  de la calibración del piranómetro patrón se hace como se muestra a continuación:

- En el certificado de la calibración buscar el parámetro incertidumbre expandida, con  $K = 2$ , este indica el porcentaje de error que tiene el piranómetro, en este caso el valor reportado por CENAM es de 1.9%.

- Ahora, el 1.9% es multiplicado por coeficiente de sensibilidad (este valor esta en certificado de calibración) del piranómetro patrón. Abajo se muestra como se hacer la operación.

$$\begin{aligned} \text{Coeficiente de sensibilidad} * \text{incertidumbre expandida} &= (9.149 \mu V * m^2/W)(0.019) \\ &= 1.71 \times 10^{-1} \mu V * m^2/W \end{aligned}$$

Obtenidos los valores estimados e incertidumbres originales, se procede a la asignación un tipo de evaluación a las magnitudes de entrada o fuentes de incertidumbre. Como se indico en el apartado de cuantificación de variables existe la evaluación tipo A que son todos aquellos valores obtenidos por un medio estadísticos, es este tipo de evaluación se le asigna a la repetibilidad. A las otras magnitudes de entrada se les asigna una evaluación tipo B, porque son valores obtenidos de sus respectivas hojas de datos.

La tabla 5.1. Muestra cómo deben se agregados los datos obtenidos para los parámetros de valores estimados, incertidumbres originales y el tipo de evaluación.

Tabla 5. 1. Relación de fuentes de incertidumbre con distribuciones para el subsistema rotacional

N.º	Magnitud de entrada $X_i$ Fuentes de incertidumbre	Valor estimado $\bar{X}$	Dimensión	Incertidumbre original $U$	Tipo Evaluación
1a	Calibración del Multiplexor (DUT)	0.1	$\mu V$	$1 \times 10^{-1}$	B
1b	Resolución del Multiplexor (DUT)	0.1	$\mu V$	$1 \times 10^{-1}$	B
2a	Calibración de piranómetro (patrón)	9.149	$\mu V * m^2/W$	$1.74 \times 10^{-1}$	B
2b	Calibración del Multiplexor (patrón)	0.1	$\mu V$	$1 \times 10^{-1}$	B
2c	Resolución del Multiplexor (patrón)	0.1	$\mu V$	$1 \times 10^{-1}$	B
3	Repetibilidad	$1.83 \times 10^{-2}$	$\mu V * m^2/W$	$1.83 \times 10^{-2}$	A

El siguiente paso es realizar las estimaciones de incertidumbre estándar  $U(X_i)$  para la calibración y resolución del multiplexor, calibración del patrón y la repetibilidad de las mediciones.

Primero se asigna un tipo de distribución a cada magnitud de entrada, para todas las calibraciones se usa la distribución normal, esto porque es un valor obtenido a partir de mediciones. Ahora, para la resolución del multiplexor se usa la distribución rectangular, puesto que su valor de resolución no cambia. Por último, la repetibilidad es calculada por medio de una fuente de incertidumbre tipo A, porque las mediciones se realizaron en un ambiente controlado.

Para hacer la estimación de la incertidumbre estándar en la calibración del multiplexor se utiliza la ecuación 5.2 sustituyendo los valores de la incertidumbre original como se muestra abajo.

$$U(x_i) = \frac{U}{k} = \frac{1 \times 10^{-1} \mu V}{2} = 5 \times 10^{-2} \mu V$$

Este procedimiento se hace una vez, debido a que se usa el mismo multiplexor para obtener los datos el piranómetro patrón como para el DUT, por la misma situación el resultado será el mismo para ambos casos. Por otra parte a “K” se le asigna un valor de cobertura de 2 porque proporciona un intervalo de confianza de 95 % de que el resultado sea correcto.

También se hace este proceso para la calibración del piranómetro patrón y se utiliza la ecuación 5.2 para hacer esta estimación.

$$U(x_i) = \frac{U}{k} = \frac{1.74 \times 10^{-1} \mu V * m^2/W}{2} = 8.69 \times 10^{-2} \mu V * m^2/W$$

Para la resolución del multiplexor se utilizan los valores de la incertidumbre original y se sustituyen en la ecuación 5.3 como se muestra abajo.

$$U(x_i) = \frac{Resolución}{\sqrt{12}} = \frac{1 \times 10^{-1} \mu V}{\sqrt{12}} = 2.89 \times 10^{-2} \mu V$$

Este procedimiento se hace una vez, debido a que se usa el mismo multiplexor para obtener los datos el piranómetro patrón como para el DUT, por la misma situación el resultado será el mismo para ambos casos.

La última estimación de incertidumbre estándar es la proporcionada por la repetibilidad, parahacer esto se utiliza la ecuación 5.1, como se muestra abajo.

$$U(x_i) = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{1.83 \times 10^{-2} \mu V * m^2/W}{\sqrt{30}} = 1.06 \times 10^{-3} \mu V * m^2/W$$

La tabla 5.2 muestra los valores obtenidos para la incertidumbre estándar con respecto a calibraciones, resoluciones y repetibilidad usando el subsistema rotacional.

Tabla 5. 2. Incertidumbre estándar para subsistema rotacional

N.º	Magnitud de entrada $X_i$ Fuentes de incertidumbre	Tipo, Distribución	Incertidumbre estándar $U(X_i)$	Incertidumbre estándar $U(X_i)$	Dimensión
1a	Calibración del Multiplexor (DUT)	B, Normal	$U/K$	$5 \times 10^{-2}$	$\mu V$
1b	Resolución del Multiplexor (DUT)	B, Rectangular	$Resolución/\sqrt{12}$	$2.89 \times 10^{-2}$	$\mu V$
2a	Calibración de piranómetro (patrón)	B, Normal	$U/K$	$8.69 \times 10^{-2}$	$\mu V * m^2/W$
2b	Calibración del Multiplexor (patrón)	B, Normal	$U/K$	$5 \times 10^{-2}$	$\mu V$
2c	Resolución del Multiplexor (patrón)	B, Rectangular	$Resolución/\sqrt{12}$	$2.89 \times 10^{-2}$	$\mu V$
3	Repetibilidad	A, Evaluación Normal	$S/\sqrt{n}$	$1.06 \times 10^{-3}$	$\mu V * m^2/W$

Al finalizar las incertidumbres estándar, se debe de calcular los coeficientes de sensibilidad para cada fuente de incertidumbre. Esto se hace obteniendo las derivadas parciales para la ecuación 5.10, dando como resultado las ecuaciones 5.11, 5.12 y 5.13, las cuales indican la aportación para cada una de las fuentes de incertidumbre.

$$\frac{\partial S_{DUT}}{\partial V_{DUT}} = \frac{S_P}{V_P} \quad (5.11)$$

$$\frac{\partial S_{DUT}}{\partial S_P} = \frac{V_{DUT}}{V_P} \quad (5.12)$$

$$\frac{\partial S_{DUT}}{\partial V_P} = -\frac{V_{DUT} * S_P}{V_P^2} \quad (5.13)$$

Una vez realizadas las derivadas parciales para cada una de las magnitudes de entrada, se procede sustituir el valor promedio para su respectiva variable como se muestra a continuación.

Primero se calcula la aportación procedente por el piranómetro DUT, para la calibración y resolución del multiplexor utilizando la ecuación 5.11.

$$\frac{\partial S_{DUT}}{\partial V_{DUT}} = \frac{S_P}{V_P} = \frac{9.142 \mu V * m^2/W}{4690.598 \mu V} = 1.95 \times 10^{-3} m^2/W$$

Ahora se calcula la aportación procedente por el piranómetro patrón, para la calibración y resolución del multiplexor utilizando la ecuación 5.13.

$$\frac{\partial S_{DUT}}{\partial V_P} = -\frac{V_{DUT} * S_P}{V_P^2} = -\frac{(9408.347 \mu V)(9.142 \mu V * m^2/W)}{4690.598 \mu V} = -3.91 \times 10^{-3} m^2/W$$

Por último, se calcula la aportación procedente a la calibración del patrón utilizando la ecuación 5.12.

$$\frac{\partial S_{DUT}}{\partial S_P} = \frac{V_{DUT}}{V_P} = \frac{9408.347 \mu V}{4690.598 \mu V} = 2.01$$

Esta es la única aportación que no tiene dimensiones.

La repetibilidad tiene coeficiente de sensibilidad 1 porque es la suma cuadrática a las otras fuentes de incertidumbre, pero conserva las unidades del mensurando, debido a que esta parte está formada por mediciones.

La tabla 5.3 muestra las derivadas utilizadas en el subsistema rotacional, para los coeficientes de sensibilidad, así como los valores obtenidos para cada magnitud de entrada.

Tabla 5. 3. Coeficiente de sensibilidad para subsistema rotacional

N.º	Magnitud de entrada $X_i$ Fuentes de incertidumbre	Coeficiente de sensibilidad $c_i$	Coeficiente de sensibilidad $c_i$	Dimensión
1a	Calibración del Multiplexor (DUT)	$\frac{\partial S_{DUT}}{\partial V_{DUT}} = \frac{S_P}{V_P}$	$1.95 \times 10^{-3}$	$m^2/W$
1b	Resolución del Multiplexor (DUT)	$\frac{\partial S_{DUT}}{\partial V_{DUT}} = \frac{S_P}{V_P}$	$1.95 \times 10^{-3}$	$m^2/W$
2a	Calibración de piranómetro (patrón)	$\frac{\partial S_{DUT}}{S_P} = \frac{V_{DUT}}{V_P}$	2.01	1
2b	Calibración del Multiplexor (patrón)	$\frac{\partial S_{DUT}}{\partial V_P} = -\frac{V_{DUT} * S_P}{V_P^2}$	$-3.91 \times 10^{-3}$	$m^2/W$
2c	Resolución del Multiplexor (patrón)	$\frac{\partial S_{DUT}}{\partial V_P} = -\frac{V_{DUT} * S_P}{V_P^2}$	$-3.91 \times 10^{-3}$	$m^2/W$
3	Repetibilidad	1	1	1

Los valores obtenidos por los coeficientes de sensibilidad son utilizados para la estimación de la incertidumbre estándar combinada y se realiza como se especifica en la ecuación 5.4. También se deben de multiplicar las dimensiones de los coeficientes de sensibilidad por las dimensiones de la incertidumbre estándar, con la finalidad de que esta multiplicación muestre las mismas unidades del mensurando (esto es una manera de confirmar el resultado para las aportaciones de incertidumbre).

Contribución combinada de Calibración multiplexor (DUT). Los datos utilizados aquí son los mencionados en las tablas 5.2 y 5.3.

$$u_i(\gamma) = c_i * U(X_i) = (1.95 \times 10^{-3} m^2/W)(5 \times 10^{-2} \mu V) = 9.75 \times 10^{-5} \mu V * m^2/W$$

Este proceso se debe de repetir con las otras fuentes de incertidumbre. La tabla 5.4 muestra el aporte para cada magnitud de entrada, así como las dimensiones respectivas para este aporte.

Tabla 5. 4. Aporte de incertidumbre por magnitudes de entrada por subsistema rotacional

N.º	Magnitud de entrada $X_i$ Fuentes de incertidumbre	Contribución $c_i * U(X_i)$	Dimensión
1a	Calibración del Multiplexor (DUT)	$9.75 \times 10^{-5}$	$\mu V * m^2/W$
1b	Resolución del Multiplexor (DUT)	$5.63 \times 10^{-5}$	$\mu V * m^2/W$
2a	Calibración de piranómetro (patrón)	$1.74 \times 10^{-1}$	$\mu V * m^2/W$
2b	Calibración del Multiplexor (patrón)	$1.95 \times 10^{-4}$	$\mu V * m^2/W$
2c	Resolución del Multiplexor (patrón)	$1.13 \times 10^{-4}$	$\mu V * m^2/W$
3	Repetibilidad	$1.06 \times 10^{-2}$	$\mu V * m^2/W$

Una vez obtenidas las contribuciones de cada fuente de incertidumbre, se procede a calcular la incertidumbre estándar combinada como se menciona la ecuación 5.5.

$$u_i(\gamma) = \sqrt{\sum_{X=1}^i (U(X_i) * C_i)^2} =$$

$$\left( \sqrt{(9.75 \times 10^{-5})^2 + (5.63 \times 10^{-5})^2 + (1.74 \times 10^{-1})^2 + (1.95 \times 10^{-4})^2 + (1.13 \times 10^{-4})^2 + (1.06 \times 10^{-2})^2} \right)$$

$$(\mu V * m^2/W) = 1.75 \times 10^{-1} \mu V * m^2/W .$$

El valor de  $1.75 \times 10^{-1} \mu V * m^2/W$  muestra la incertidumbre combinada del mensurando para el subsistema rotacional, con un factor de cobertura con  $k = 1$ .

El siguiente paso es estimar la incertidumbre expandida con un factor de cobertura con  $k = 2$ , la ecuación 5.6 indica cómo hacer esto.

$$U_e = u(\gamma) * k = (1.75 \times 10^{-1} \mu V * m^2/W)(2) = 3.5 \times 10^{-1} \mu V * m^2/W$$

Para finalizar se debe cuantificar la incertidumbre expandida relativa, la cual se calcula como se muestra abajo.

$$U_{er} = \frac{(U_e)(100\%)}{\text{sensibilidad del DUT}} = \frac{(3.5 \times 10^{-1} \mu V * m^2/W)(100 \%)}{18.292 \mu V * m^2/W} = 1.91 \%$$

Este ejercicio fue desarrollado para ser una guía en la estimación de incertidumbre siguiendo las pautas marcadas por la GUM tomando las mediciones del subsistema rotacional, de igual manera se realizó este proceso para el subsistema lineal. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 5.5 y 5.6.

Tabla 5. 5. Proceso completo por el cual se obtuvo la estimación de incertidumbre para cada magnitud de entrada para el subsistema rotacional

N.º	Magnitud de entrada $X_i$	Valor estimado $X_i$	Incertidumbre original $U$	Tipo, Distribución	Incertidumbre estándar $U(X_i)$	Incertidumbre estándar $U(X_i)$	Coefficiente de sensibilidad $c_i$	Coefficiente de sensibilidad $c_{i1}$	Contribución $u(\gamma)$	Dimensión
1a	Calibración del Multiplexor (DUT)	0.1	$1 \times 10^{-1}$	B, Normal	$U/K$	$5 \times 10^{-2}$	$\frac{\partial S_{DUT}}{\partial V_{DUT}} = \frac{S_P}{V_P}$	$1.95 \times 10^{-3}$	$9.75 \times 10^{-5}$	$\mu V * m^2/W$
1b	Resolución del Multiplexor (DUT)	0.1	$1 \times 10^{-1}$	B, Normal	$Resol/\sqrt{12}$	$2.89 \times 10^{-2}$	$\frac{\partial S_{DUT}}{\partial V_{DUT}} = \frac{S_P}{V_P}$	$1.95 \times 10^{-3}$	$5.63 \times 10^{-5}$	$\mu V * m^2/W$
2a	Calibración de piranómetro (patrón)	9.149	$1.74 \times 10^{-1}$	B, Normal	$U/K$	$8.69 \times 10^{-2}$	$\frac{\partial S_{DUT}}{\partial S_P} = \frac{V_{DUT}}{V_P}$	2.01	$1.74 \times 10^{-1}$	$\mu V * m^2/W$
2b	Calibración del Multiplexor (patrón)	0.1	$1 \times 10^{-1}$	B, Normal	$U/K$	$5 \times 10^{-2}$	$\frac{\partial S_{DUT}}{\partial V_P} = -\frac{V_{DUT} * S_P}{V_P^2}$	$-3.91 \times 10^{-3}$	$1.95 \times 10^{-4}$	$\mu V * m^2/W$
2c	Resolución del Multiplexor (patrón)	0.1	$1 \times 10^{-1}$	B, Normal	$Resol/\sqrt{12}$	$2.89 \times 10^{-2}$	$\frac{\partial S_{DUT}}{\partial V_P} = -\frac{V_{DUT} * S_P}{V_P^2}$	$-3.91 \times 10^{-3}$	$1.13 \times 10^{-4}$	$\mu V * m^2/W$
3	Repetibilidad	$1.83 \times 10^{-2}$	$1.83 \times 10^{-2}$	A, Normal	$S/\sqrt{n}$	$1.06 \times 10^{-2}$	1	1	$1.06 \times 10^{-2}$	$\mu V * m^2/W$
<b>Incertidumbre estándar combinada</b>								<b><math>1.75 \times 10^{-1}</math></b>	<b><math>\mu V * m^2/W</math></b>	
<b>Incertidumbre expandida</b>								<b><math>3.5 \times 10^{-1}</math></b>	<b><math>\mu V * m^2/W</math></b>	
<b>Incertidumbre relativa expandida</b>								<b>1.91</b>	<b>%</b>	

Tabla 5. 6. Proceso completo por el cual se obtuvo la estimación de incertidumbre para cada magnitud de entrada para el subsistema línea

N.º	Magnitud de entrada $X_i$	Valor estimado $X_i$	Incertidumbre original $U$	Tipo, Distribución	Incertidumbre estándar $u(X_i)$	Incertidumbre estándar $u(X_i)$	Coefficiente de sensibilidad $c_i$	Coefficiente de sensibilidad $c_i$	Contribución $u(\gamma)$	Dimensión
1a	Calibración del Multiplexor (DUT)	0.1	$1 \times 10^{-1}$	B, Normal	$U/K$	$5 \times 10^{-2}$	$\frac{\partial S_{DUT}}{\partial V_{DUT}} = \frac{S_P}{V_P}$	$1.95 \times 10^{-3}$	$9.77 \times 10^{-5}$	$\mu V * m^2/W$
1b	Resolución del Multiplexor (DUT)	0.1	$1 \times 10^{-1}$	B, Normal	$Resol/\sqrt{12}$	$2.89 \times 10^{-2}$	$\frac{\partial S_{DUT}}{\partial V_{DUT}} = \frac{S_P}{V_P}$	$1.95 \times 10^{-3}$	$5.64 \times 10^{-5}$	$\mu V * m^2/W$
2a	Calibración de piranómetro (patrón)	9.149	$1.74 \times 10^{-1}$	B, Normal	$U/K$	$8.69 \times 10^{-2}$	$\frac{\partial S_{DUT}}{S_P} = \frac{V_{DUT}}{V_P}$	2.01	$1.75 \times 10^{-1}$	$\mu V * m^2/W$
2b	Calibración del Multiplexor (patrón)	0.1	$1 \times 10^{-1}$	B, Normal	$U/K$	$5 \times 10^{-2}$	$\frac{\partial S_{DUT}}{\partial V_P} = -\frac{V_{DUT} * S_P}{V_P^2}$	$-3.78 \times 10^{-3}$	$1.89 \times 10^{-4}$	$\mu V * m^2/W$
2c	Resolución del Multiplexor (patrón)	0.1	$1 \times 10^{-1}$	B, Normal	$Reso/\sqrt{12}$	$2.89 \times 10^{-2}$	$\frac{\partial S_{DUT}}{\partial V_P} = -\frac{V_{DUT} * S_P}{V_P^2}$	$-3.78 \times 10^{-3}$	$1.09 \times 10^{-4}$	$\mu V * m^2/W$
3	Repetibilidad	$1.83 \times 10^{-2}$	$1.83 \times 10^{-2}$	A, Normal	$S/\sqrt{n}$	$1.06 \times 10^{-2}$	1	1	$1.06 \times 10^{-3}$	$\mu V * m^2/W$
<b>Incertidumbre estándar combinada</b>								<b><math>1.75 \times 10^{-1}</math></b>	<b><math>\mu V * m^2/W</math></b>	
<b>Incertidumbre expandida</b>								<b><math>3.5 \times 10^{-1}</math></b>	<b><math>\mu V * m^2/W</math></b>	
<b>Incertidumbre relativa expandida</b>								<b>1.91</b>	<b>%</b>	

## Capítulo 6 - Resultados

A continuación, en este apartado se presentan los resultados obtenidos en la estimación de la incertidumbre para la calibración de piranómetros utilizando el subsistema de rotacional, y la comparación con los resultados obtenidos con el subsistema lineal. El primero es componente del sistema comparador y el segundo es el instrumento de comparación.

La tabla 6.1 muestra los resultados de calibración para el piranómetro DUT, realizada por el CENAM, los cuales hacen referencia a la irradiancia usada, responsividad (sensibilidad), incertidumbre expandida relativa, incertidumbre expandida, así como el factor de cobertura. Los cuales serán comparados con los resultados obtenidos durante la calibración usando los subsistemas rotacional y lineal.

Tabla 6. 1. Certificado de calibración para el DUT, Fuente: CENAM

Datos de piranómetro DUT CMP6 N.S. 140666 CNM-CC-520-046-2020			
Irradiancia ( $W/m^2$ )	Responsividad ( $\mu V * m^2/W$ )	Incertidumbre expandida relativa (%)	Incertidumbre expandida ( $\mu V * m^2/W$ )
500	18.292	1.9	0.35

El DUT fue calibrado a una irradiancia de  $500 W/m^2$ , por lo tanto, se debe de realizar la calibración con el subsistema rotacional y el lineal a la misma irradiancia y se deben obtener resultados similares a los presentados en el certificado de calibración. La tabla 6.2 muestra la irradiancia utilizada.

Tabla 6. 2. Irradiancia utilizada para la calibración

Irradiancia ( $W/m^2$ )		
Certificado	Subsistema rotacional	Subsistema lineal
500	500	500

La responsividad reportada en certificado es de  $18.292 \mu V * m^2/W$ , para calcular esto se utilizo la ecuación para describir el mensurando, tomando el valor promedio de las repeticiones,

para ambos subsistemas, así como la responsividad del piranómetro patrón, se sustituyen esos valores y se obtiene la sensibilidad del DUT. La tabla 6.3 muestra las diferencias en la responsividad reportada por CENAM y la obtenida por los subsistemas rotacional y lineal, la cual es de  $0.05 \mu V * m^2/W$ .

Tabla 6. 3. Resultados obtenidos para la responsividad

Responsividad ( $\mu V * m^2/W$ )		
Certificado	Subsistema rotacional	Subsistema lineal
18.292	18.350	18.350

La incertidumbre expandida relativa reportada en certificado con un factor de cobertura con  $k = 2$  es de 1.9 %, la tabla 6.4 muestra los resultados obtenidos para los subsistemas rotacional y lineal es mostrando una diferencia de 0.01 %, siendo este una diferencia tan pequeña que no podría ser tomada en cuenta en el caso de sólo tomar un dígito a la derecha del punto decimal.

Tabla 6. 4. Resultados obtenidos para la incertidumbre expandida relativa

Incertidumbre expandida relativa $k = 2$		
Certificado	Subsistema rotacional	Subsistema lineal
1.9 %	1.9 %	1.9 %

Por último, la incertidumbre expandida reportada en el certificado con un factor de cobertura de  $k = 2$  es de  $0.35 \mu V * m^2/W$ , en la tabla 6.5 se muestra los resultados obtenidos por los subsistemas rotacional y lineal, estos resultados muestran una igualdad en el porcentaje mostrado por el certificado, siendo esto un resultado bueno porque demuestra la existencia de una buena captura de datos durante la calibración.

Tabla 6. 5. Resultados obtenidos para la incertidumbre expandida

Incertidumbre expandida $k = 2$ ( $\mu V * m^2/W$ )		
Certificado	Subsistema rotacional	Subsistema lineal
0.35	0.35	0.35

La figura6.1 muestra las aportaciones porcentuales para cada magnitud de entrada para el subsistema rotacional, en esta gráfica se observa que el mayor aporte es por la calibración del

piranómetro patrón con 94%, la siguiente magnitud en aportar es la repetibilidad con 6%, en cuanto a las otras fuentes su aportación es tan pequeña que se pueden tomar como 0%.

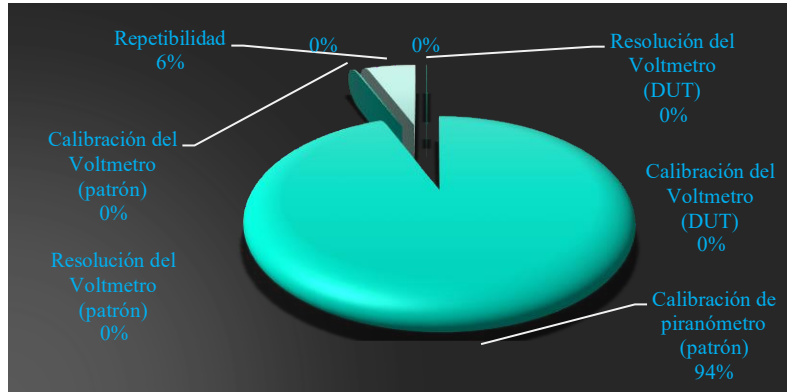


Figura 6. 1. Aportación de magnitud de entrada por subsistema rotacional

La figura 6.2 muestra las aportaciones porcentuales para cada magnitud de entrada para el subsistema lineal, en esta gráfica se observa que el mayor aporte es por la calibración del piranómetro patrón con 94%, la siguiente magnitud en aportar es la repetibilidad con 6%, en cuanto a las otras fuentes su aportación es tan pequeña que se pueden tomar como 0%.

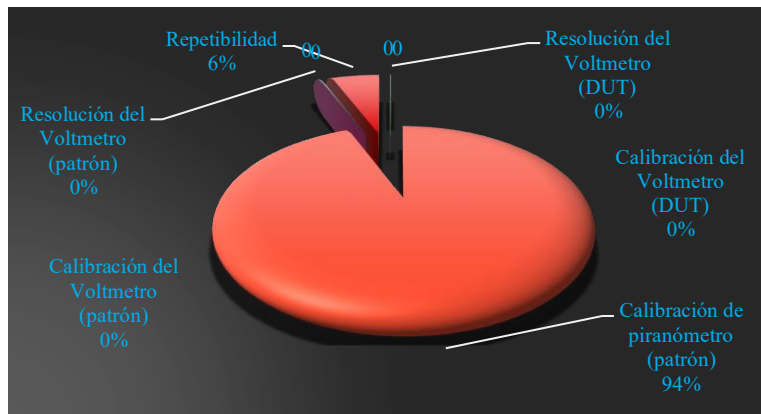


Figura 6. 2. Aportación de magnitud de entrada por subsistema lineal

Los resultados arrojados por la estimación de la incertidumbre expresados en las tablas y las gráficas muestran la existencia de una similitud en las aportaciones para cada magnitud de entrada, así como los datos obtenidos en la calibración realizada por los subsistemas rotacional y lineal.

## Conclusiones

Lo planteado en este trabajo permite arribar a las siguientes conclusiones:

La capacitación que se impartió en las instalaciones de Óptica y Radiometría en CENAM, bajo la dirección de los Doctores Héctor Alfonso Castillo y Juan Carlos Molina, fue de gran relevancia para el desarrollo de este trabajo, ya que en la UACM no se cuenta con los equipos e instalaciones necesarias para el desarrollo del sistema comparador. Además del aprendizaje en el uso del sistema comparador ya toma de mediciones en el multiplexor.

Para el desarrollo y validación del sistema comparador fue vital la estimación de las incertidumbres, entre ellas la más importante podemos mencionar la incertidumbre expandida relativa ya que permite conocer el porcentaje de error en la medición.

El método de calibración en su subsistema rotacional, es un sistema innovador que no había sido utilizado anteriormente como un sistema comparador, por lo tanto, requería ser validado. Lo cual fue realizado siguiendo lo expuesto por Rubén J. Lazos e Ignacio Hernández. Lo que permitió alcanzar de manera satisfactoria un valor de incertidumbre expandida relativa del 1,9 % para la validación de dicho sistema.

En el subsistema lineal fue de gran ayuda el uso de un equipo validado “Long Travel Stage”, el cual permitió tener recorridos más exactos, debido al ajuste del cero inicial (punto de partida) garantizando que los piranómetros siempre estarán en un punto de partida con una variación no mayor a 5 micrómetros durante las mediciones. Esto es muy importante porque hace posible la validación del subsistema rotacional. El valor de la incertidumbre expandida relativa del subsistema lineal también es del 1,9 %.

El modelo matemático elaborado para la estimación de la incertidumbre, permitió la relación entre las siguientes variables: calibración de piranómetro patrón, tensión de salida para los piranómetros DUT como patrón, permitiendo realizar una comparación entre los siguientes

parámetros: responsividad, incertidumbre expandida relativa e incertidumbre expandida, proporcionados por parte de CENAM.

La incertidumbre expandida relativa para ambos subsistemas muestra un resultado de 1,9 % con un factor de cobertura de  $k = 2$ , proporcionan un intervalo de confianza de 95,45 %, este porcentaje asegura la existencia de que el valor representado se encuentra dentro del intervalo de los resultados proporcionados.

Se observa que el valor proporcionado por repetibilidad es del 6%, esto es crucial porque sin importar quien use el sistema comparador obtendrá este porcentaje el cual no afectara el resultado. Es importante indicar que la baja incertidumbre en el término de repetibilidad puede deberse a la falta de datos experimentales durante el ejercicio de calibración con el piranómetro patrón. En pruebas posteriores, la reproducibilidad de los datos medidos produjo una aportación significativa a la incertidumbre de calibración.

Los resultados obtenidos por el subsistema rotacional y lineal muestran la existencia de poder competir contra otros laboratorios internacionales en la calibración de piranómetros, recordando que el sistema comparador muestra un 1,9 % en la estimación de incertidumbre contra el mejor resultado mostrado en el estado del arte, por parte de Fernando Nollas [22], quien reporta incertidumbres de 1,1 y 3,9 % o los resultados proporcionados por Francesco Mariottini [16] quien a su vez reporta un 2,08 %

Por lo tanto, los resultado mostrados en el capítulo 6, muestran la existencia de varias ventajas al realizar las calibraciones de piranómetros en laboratorios contra las calibraciones al aire libre, las cuales son: Tener una fuente de iluminación constante, no existen obstáculos que obstruyan la iluminación, la temperatura no es un factor a considerar durante las mediciones, esto debido al control de temperatura del laboratorio y el módulo de extracción de calor incorporado al sistema comparador, la disminución en el tiempo de la calibración e incertidumbres más bajas.

Esta tesis aporta información al laboratorio de la UACM, la cual será de gran utilidad para comenzar el proceso de acreditación ante la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) y acreditarse como laboratorio secundario en calibración de piranómetros.

## Índice de tablas

Tabla 4. 1. Comparación de instrumentos.....	38
Tabla 5. 1. Relación de fuentes de incertidumbre con distribuciones para el subsistema rotacional.....	65
Tabla 5. 2. Incertidumbre estándar para subsistema rotacional .....	67
Tabla 5. 3. Coeficiente de sensibilidad para subsistema rotacional .....	69
Tabla 5. 4. Aporte de incertidumbre por magnitudes de entrada por subsistema rotacional .....	70
Tabla 5. 5. Proceso completo por el cual se obtuvo la estimación de incertidumbre para cada magnitud de entrada para el subsistema rotacional.....	72
Tabla 5. 6. Proceso completo por el cual se obtuvo la estimación de incertidumbre para cada magnitud de entrada para el subsistema línea .....	73
Tabla 6. 1. Certificado de calibración para el DUT, Fuente: CENAM.....	74
Tabla 6. 2. Irradiancia utilizada para la calibración .....	74
Tabla 6. 3. Resultados obtenidos para la responsividad.....	75
Tabla 6. 4. Resultados obtenidos para la incertidumbre expandida relativa .....	75
Tabla 6. 5. Resultados obtenidos para la incertidumbre expandida .....	75

## Índice de figuras

Figura 2. 1. Calibración de piranómetros con trazabilidad al S.I.....	13
Figura 2. 2. Trazabilidad de normas .....	15
Figura 3. 1. Ilustra una vista general del comparador automático de piranómetros Figura recuperada de comparador automático de piranómetros, No. de patente MX/u/2019/000289.....	27
Figura 3. 2. Sistema de iluminación Figura recuperada de comparador automático de piranómetros, No. de patente MX/u/2019/000289 .....	28
Figura 3. 3. Mecanismo de alineación y rotación automática de los piranómetros Figura recuperada de comparador automático de piranómetros, No. de patente MX/u/2019/000289.....	30
Figura 3. 4. Modificación del Long Travel Stage .....	32
Figura 3. 5. Ventana de ejecución.....	34
Figura 3. 6. Ventana de operaciones e instrumentos.....	34
Figura 3. 7. Sistema rotacional (izquierda) y sistema lineal (derecha) .....	35
Figura 4. 1. Configuración experimental para una calibración de piranómetro .....	41
Figura 4. 2. Procedimiento de calibración: Subsistema rotacional (derecha) y Subsistema Lineal (izquierda).....	45
Figura 4. 3. Montaje de piranómetro en plataforma giratoria .....	46
Figura 4. 4. Posición de cables.....	47

Figura 4. 5. a) Medición de altura subsistema rotacional, b) Comparación de altura por subsistema rotacional .....	48
Figura 4. 6. Montaje de piranómetro en subsistema lineal .....	52
Figura 4. 7 a) Medición de altura por subsistema lineal, b) Comparación de altura por subsistema lineal.....	54
Figura 5. 1. Identificación de las fuentes de incertidumbre .....	63
Figura 6. 1. Aportación de magnitud de entrada por subsistema rotacional .....	76
Figura 6. 2. Aportación de magnitud de entrada por subsistema lineal .....	76

## Bibliografía

1. Driesse, A., Zaaiman, W., Riley, D., Taylor, N., & Stein, J. (2016). Investigation of Pyranometer and Photodiode Calibrations under Different Conditions. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/305851171\\_Investigation\\_of\\_Pyranometer\\_and\\_Photosodiode\\_Calibrations\\_under\\_Different\\_Conditions](https://www.researchgate.net/publication/305851171_Investigation_of_Pyranometer_and_Photosodiode_Calibrations_under_Different_Conditions).
2. Flores Campos, M. (2016). Estado de la Infraestructura de la Calidad para Energías Renovables y Eficiencia Energética en México. México. [Accessed 9 Aug. 2020]. Available at: [https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung\\_9/9.3\\_internationale\\_zusammenarbeit/doc\\_s/PTB\\_9.3\\_Study\\_Energy\\_Efficiency\\_Renewables\\_Mexico\\_SP.pdf](https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_9/9.3_internationale_zusammenarbeit/doc_s/PTB_9.3_Study_Energy_Efficiency_Renewables_Mexico_SP.pdf).
3. Guide to the expression of uncertainty in measurement, BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML, ISO TAG 4, Geneva, 1995.
4. H. A. Castillo Matadamas (2015) Unexplored Indoors method for pyranometers calibration traceable to SI. To cite this article: J. Phys.: Conf. Ser. 582 012051. [Accessed 7 Sep. 2020].
5. 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.[Accessed 10 Oct. 2020]. Available at: <http://www.nrel.gov/publications>.
6. Habte, A., Sengupta, M., Andreas, A., Reda, I., and Robinson, J. (2017) Radiometer calibration methods and resulting irradiance differences. Prog. Photovolt: Res. Appl. 25: 614– 622.doi: 10.1002/pip.2812.
7. Ibrahim Reda (2011) Method to Calculate Uncertainties in Measuring Shortwave Solar Irradiance Using Thermopile and Semiconductor. National Renewable Energy Laboratory Available at: <https://www.nrel.gov/pv/papers/2011-01-01-Method-to-Calculate-Uncertainties-in-Measuring-Shortwave-Solar-Irradiance-Using-Thermopile-and-Semiconductor.pdf>.
8. Ibrahim Reda, Daryl Myers, Tom Stoffel (2008) Uncertainty Estimate for the Outdoor Calibration of Solar Pyranometers: A Metrologies Perspective. Journal of Measurement Science Available at:<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19315775.2008.11721448>.

9. ISO 9846, "Solar energy – Calibration of a pyranometer using a pyr heliometer," ISO, 1993.
10. ISO 9847, "Solar energy – Calibration of field pyranometer by comparison to a reference pyranometer," ISO, 1992.
11. Janjai, S., Tohsing, K., Pattarapanitchai, S., & Detkhon, P. (2017). Verification of the ISO calibration method for field pyranometers under tropical sky conditions (pp. 1-4). Online: AIP Conference Proceedings. Retrieved from <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4975535>.
12. Kipp & Zonen, (2015) "Instruction manual for CMP11/22 pyranometer," Kipp & Zonen BV. Röntgenweg 1, Delft 2624, The Netherlands.
13. Kratzenberg, M. (2006). Uncertainty Calculations in Pyranometer Measurements and Application. Denver, Colorado: ASME. [Accessed 9 Oct. 2020]. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/267648401>.
14. LED ENGIN, high efficiency TIR lenses for lzp emitter family.
15. LED ENGIN, highest lumen density cool white emitter.
16. Marbán, R. and Pellecer, J., 2002. METROLOGÍA PARA NO-METRÓLOGOS. 2nd ed. Guatemala: Organización de los Estados Americano.
17. Mariottini, Francesco, Giorgio Belluardo, Martin Bliss, Patrick Isherwood, Ian R. Cole, and Tom Betts. 2019. "Assessment and Improvement of Thermoelectric Pyranometer Measurements". Figshare. <https://hdl.handle.net/2134/10060247.v1>.
18. Martínez Sánchez, D.E. Rodríguez Sarabia, E.A. Castillo Matadamas, H.A. Molina Vázquez, J.C. (2019). Comparador automático de piranómetros, No. de patente MX/u/2019/000289. México. Sistema de Información de la Gaceta de la Propiedad Industrial.
19. Martínez, R.J., Gutiérrez, I.H., & Metrología, C.N. (2004). la validación de métodos: un enfoque práctico. Retrieved from <https://www.cenam.mx/simposio2004/memorias/TA-090.pdf>.
20. Metrología Abreviada, traducción al español de 3a edición. Edición digital. <http://www.cem.es/sites/default/files/metrologia20abreviada.pdf>.
21. Myers D.R.; Reda, I.M.; Wilcox, S.M.; Stoffel, T.L. (2004). Uncertainty Analysis for Broadband Solar Radiometric Instrumentation Calibrations and Measurements: An Update. World Renewable Energy Congress VIII, 2004.
22. Myers, D., Stoffel, T., Reda, I., Wilcox, S., and Andreas, A. (2002). Recent Progress in Reducing the Uncertainty in and Improving Pyranometer Calibrations (pp. 44-50). ASME. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/228477789\\_Recent\\_Progress\\_in\\_Reducing\\_the\\_Un](https://www.researchgate.net/publication/228477789_Recent_Progress_in_Reducing_the_Un)

certainty\_in\_and\_Improving\_Pyranometer\_Calibrations.

23. Nollas, F., y G. Pérez Fogwill, 2019: Calibración de piranómetros s/n 955992 y 955993 del Servicio Meteorológico Nacional. Nota Técnica SMN 2019-58.
24. NREL-Annual. NREL Broadband Outdoor Radiometer Calibration (BORCAL) Reports. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
25. Paguatian Tutistar, Edison (2014). Modelo para calibrar piranómetro con la referencia mundial de radiación solar, utilizando un piranómetro con banda de sombra. *El Hombre y la Máquina*, (45),81-87. [fecha de Consulta 6 de febrero de 2021]. ISSN: 0121-0777. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=478/47838946010>.
26. Pérez Hernández, M. (2012). Estimación de incertidumbres. Guía GUM (pp. 113-130). España. Retrieved from [https://www.uv.es/meliajl/Docencia/WebComplementarios/GuiaGUM\\_e\\_medida.pdf](https://www.uv.es/meliajl/Docencia/WebComplementarios/GuiaGUM_e_medida.pdf).
27. Reda, b., Stoffe, T., & Myers, D. (2003). A method to calibrate a solar pyranometer for measuring reference diffuse irradiance (pp. 103-112). *ELSERVIER*. Retrieved from <https://www.journals.elsevier.com/solar-energy>.
28. S. Jiménez, N. Navas. Calibration by comparison Eppley pyranometers. *Revista Ingenieros Militares*, No.9, pp. 107-111. 2014.
29. Schmid, W. and Lazos Martínez, R., 2004. GUÍA PARA ESTIMAR LA INCERTIDUMBRE DE LA MEDICIÓN. 1st ed. El Marqués, Qro: CENAM, pp.1-27. [Accessed 13 May 2020]. Available at: [https://www.cenam.mx/publicaciones/gratuitas/descarga/default.aspx?arch=/GUIA\\_P\\_ESTIMAR\\_INCERTIDUMBRE\\_Med%202004\\_09\\_27.pdf](https://www.cenam.mx/publicaciones/gratuitas/descarga/default.aspx?arch=/GUIA_P_ESTIMAR_INCERTIDUMBRE_Med%202004_09_27.pdf).
30. Shuji, Y. (2014). *Pyranometer and Pyrheliometer Calibration Procedures*. Tokyo, Japan: EKO. [Accessed 5 Sep. 2020]. Available at: <http://www.eko.co.jp>.
31. Vignola, F., Michalsky, J. and Stoffel, T., 2019. *Solar and Infrared Radiation Measurements*, second edition. 2nd ed. New Mexico State University: CRC Press.
32. *Vocabulario Internacional de Metrología VIM*, 3ª edición 2008 (inglés).

## Anexo A (Informativo)

Resumen de mediciones con método de rotación y lineal					
Coeficiente	9.142		$\mu V * m^2/W$		
Factor Referencia	18.292		$\mu V * m^2/W$		
Irradiancia	Tipo de movimiento : Rotacional				
500 W/m <sup>2</sup>	Unidad: Volt				
	Media (REF)	Des Est (REF)	Media (DUT)	Des Est (DUT)	FACTOR
Calibración 1	0.004659852	2.15754E-07	0.009365804	1.08144E-06	18.37444197
Calibración 2	0.004701695	2.22084E-07	0.009416857	6.30909E-07	18.3101853
Calibración 3	0.004710246	2.34651E-07	0.009442379	1.19796E-06	18.32648145
Promedio	0.004690598	9.61837E-09	0.009408347	Promedio	18.33703624
Irradiancia	Tipo de movimiento : Lineal				
500 W/m <sup>2</sup>	Unidad: Volt				
	Media (REF)	Des Est (REF)	Media (DUT)	Des Est (DUT)	FACTOR
Calibración 1	0.004676258	9.95825E-08	0.009384772	3.89324E-07	18.3470599
Calibración 2	0.004669519	6.78E-08	0.009384772	3.89E-07	18.37353818
Calibración 3	0.004688636	3.82E-07	0.009412569	3.81E-07	18.35282282
Promedio	0.004678138	1.72961E-07	0.009394038	Promedio	18.35780697

## Anexo B (Informativo)

N.º	Magnitud de entrada $X_i$	Valor estimado o $X_i$	Incertidumbre original $U$	Tipo, Distribución	Incertidumbre estándar $U(X_i)$	Incertidumbre estándar $U(X_i)$	Coefficiente de sensibilidad $c_i$	Coefficiente de sensibilidad $c_i$	Contribución $c_i * U(X_i)$	Dimensión
1a	Calibración del Multiplexor (DUT)									
1b	Resolución del Multiplexor (DUT)									
2a	Calibración de piranómetro (patrón)									
2b	Calibración del Multiplexor (patrón)									
2c	Resolución del Multiplexor (patrón)									
3	Repetibilidad									