

CIATEQ, A. C. Centro de Tecnología Avanzada
Dirección de Posgrado



Metodología de calibración Dauik® para termómetros de radiación: una propuesta para la confiabilidad, precisión y trazabilidad metrológica

TESIS QUE PRESENTA

Ing. Margarita Kaplun Mucharrafille
Asesor: Dr. Omar Humberto Cruz Silva

Para obtener el grado de

Maestro en
Manufactura Avanzada

Zapopan, Jalisco
julio, 2021

CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR



GOBIERNO DE
MÉXICO



Zapopán, Jalisco, 28 de junio de 2021.

Mtro. Geovany González Carlos
Coordinador Académico de Posgrado
CIATEQ, A.C.

El abajo firmante, miembro del Comité Tutorial de la Ing. Margarita Kaplun Mucharrafile, una vez revisado su Proyecto Terminal de tesis/tesina, titulado "Metodología de calibración Dauik® para termómetros de radiación: una propuesta para la confiabilidad, precisión y trazabilidad metrológicas", **autorizo** que el citado trabajo sea presentado por el alumno para su revisión, con el fin de alcanzar el grado de **maestra**.

Sin otro particular por el momento, agradezco la atención prestada.

Dr. Omar Humberto Cruz Silva
Asesor



CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR



GOBIERNO DE
MÉXICO



CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



Aguascalientes, Aguascalientes, 18 de Julio del 2021.

Dra. María Guadalupe Navarro Rojero
Directora General
CIATEQ, A.C.

Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de Revisor del proyecto terminal del (la) alumno (a) **Margarita Kaplun Mucharrافیe**, cuyo título es:

**"Metodología de calibración Daik® para
termómetros de radiación: una propuesta para la confiabilidad, precisión y trazabilidad
metrológicas"**

Después de haberlo leído, corregido e intercambiado información con el (la) alumno(a), y realizado los cambios que le fueron sugeridos, puede ser autorizada su impresión, a fin de que se inicien los trámites correspondientes para su defensa.

Sin otro particular por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la Institución, agradezco la atención prestada.

Atentamente,

Firma

MI Jesus Alejandro Vazquez Pacheco



DEDICATORIA

Porque en realidad, si pueden ser las personas que más te inspiran, te quieren, te motivan, te hacen superar los momentos difíciles y con ello, volverte más fuerte y feliz. Porque han sido los motores de mi vida desde que supe que sería su mamá, para Beto y Nacho Quique, se las dedico con todo mi amor.

* * *

AGRADECIMIENTOS

Al concluir esta etapa tan interesante en mi vida, quiero extender mi más sincero agradecimiento a quienes hicieron posible que después de 20 años lograra concretar mis estudios de posgrado, el cual representaba un sueño y una meta profesional pospuesta por algunas prioridades que fueron surgiendo a lo largo de mi vida. A mis hijos, esposo y familia, por sus palabras de cariño, ánimo y aliento para no claudicar, a mis amigos y colegas cercanos que de una u otra manera estuvieron apoyándome durante esta etapa, así como a mi equipo de colaboradores de Kapter.

Agradezco de manera particular al Dr. Omar Humberto Cruz Silva, tutor de mi tesis, quien aceptó apoyarme para la realización del presente trabajo y que con conocimiento y paciencia, me apoyó en la planificación y desarrollo de este trabajo de investigación y me impulsó a concluirlo de manera exitosa.

Mi gratitud para el Dr. Daniel Cárdenas García por los conocimientos impartidos durante el Diplomado de Radiación Infrarroja que nos impartió en 2018, por aclarar y aportar cosas puntuales a mi investigación, como coautor del método aquí estudiado; al Dr. Alberto Rossa por apoyarme durante el tiempo que duró la maestría, brindándome tips y revisiones a los trabajos desarrollados durante el posgrado; al [M. José Luis Cravioto Urbina](#), quien por más de cinco años trabajó en un modelo polinomial (JLCU) para calibrar termómetros de radiación en los laboratorios de Kapter; a la Fis. Astrid Camila Riveros por su apoyo para desarrollar en conjunto la estimación de la incertidumbre del modelo matemático y al M. Felipe González Rojas por su soporte en el análisis estadístico para la validación del modelo.

Deseo reconocer la ayuda proporcionada por el CIATEQ, a mis maestros por sus conocimientos proporcionados durante el posgrado y que sirvieron de base para la publicación del artículo científico y demás conocimientos adquiridos y a mis compañeros con los que tuve el gusto de coincidir y compartir en diversas materias.

* * *

RESUMEN

Hoy en día, la aplicación de los termómetros de radiación y de las cámaras termográficas es muy extensa. Gracias a su posibilidad de realizar mediciones a distancia y de obtener perfiles de temperatura de las superficies medidas, son utilizados en diversas industrias y sectores. Estos instrumentos miden el valor de temperatura de la superficie de un objeto por medio de la radiación electromagnética que ésta emite y la emisividad efectiva de su superficie en el intervalo de longitudes de onda de trabajo del termómetro de radiación. Para poder usarlos de una forma correcta y confiable, es importante emplear métodos de medición y calibración adecuados, que permitan tanto a los laboratorios como a los usuarios finales, implementarlos y usarlos de manera sencilla y práctica.

El presente documento ofrece al lector una metodología estructurada, ampliada y específica, para calibrar termómetros de radiación, debajo del punto de solidificación de la plata, basado en principios de radiación infrarroja, a partir de las ecuaciones de aproximación de Cárdenas-Méndez, Sakuma-Hattori y Saunders-White; le permitirá obtener como resultado y con precisión, el error de medida entre el termómetro de radiación a calibrar y el termómetro de referencia, con trazabilidad metrológica e incertidumbre de medición asociada y se muestran los pasos para la resolución matemática de las magnitudes de influencia de incertidumbre.

Consciente de la necesidad que existe en el país de contar con laboratorios de calibración y ensayo que aseguren la trazabilidad en las mediciones y de que los usuarios cuenten con información con validez técnica, se aporta el presente trabajo, incluyendo un Diagrama de flujo para la calibración de un termómetro de radiación.

Palabras clave: Calibración de termómetros de radiación, Método de calibración de termómetros de radiación Cárdenas-Méndez y Método Saunders-White, Ciencias físico matemáticas, Electromagnetismo, Radiación infrarroja, visible y ultravioleta, Metodología, Método científico.

ABSTRACT

Nowadays, the application of infrared thermometers and thermographic cameras is widely used. Thanks to its possibility for performing long distance measurements and obtaining temperature profiles of the measured surfaces, they are used in diverse industries and sectors.

These instruments measure the value of the temperature on the surface of an object through the electromagnetic radiation that they emit and the effective emissivity of its surface in the wavelength interval of work form the infrared thermometer.

The current document shares with the reader a structured, expanded and specific methodology to calibrate radiation thermometers below the solidification point of silver, based on infrared radiation principles, based on the approximation equations of Cárdenas-Méndez, Sakuma-Hattori and Saunders-White; It will allow you to obtain as a result with precision, the measurement error between the radiation thermometer to be calibrated and the reference thermometer, with metrological traceability and associated measurement uncertainty and shows the steps for the mathematical resolution of the uncertainty influence quantities.

Aware of the need that exists in the country to have calibration and testing laboratories that ensure reliability in the conformity assessment and that users have information with useful technical validity for their application, we share this work, in which includes a flow chart for the calibration of a radiation thermometer.

Keywords: Calibration of radiation thermometers, Cárdenas-Méndez and Saunders-White radiation thermometer calibration method; Physical and mathematical sciences, Electromagnetism, Infrared, visible and ultraviolet radiation, Methodology, scientific method.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS	xii
GLOSARIO	xiv
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	3
1.3. JUSTIFICACIÓN	5
1.4. OBJETIVOS	6
1.4.1. Objetivo general.....	6
1.4.2. Objetivos específicos	6
1.5. HIPÓTESIS.....	7
2. MARCO TEÓRICO	8
2.1. FUNDAMENTOS DE TERMOMETRÍA DE RADIACIÓN.....	8
2.2. MODELOS DE TERMOMETRÍA DE RADIACIÓN	9
2.2.1. Modelo de Sakuma-Hattori	9
2.2.2. Modelo de Saunders-White	14
2.2.3. Modelo de Cárdenas-Méndez	22
2.2.4. Modelo de Cravioto Urbina.....	26
2.2.5. Argumentos de pertinencia de uso de los modelos	29
2.2.6. Planteamiento del Modelo Matemático Híbrido	32
2.3. ASPECTOS PRELIMINARES PARA LA CALIBRACIÓN DE UN TERMÓMETRO DE RADIACIÓN	44
2.3.1. Recabar información del termómetro de radiación a calibrar (IBC).....	44
2.3.2. Verificar si los datos del IBC constituyen una desviación al modelo matemático.....	47
2.3.3. Inspeccionar visualmente el IBC e ingresar al laboratorio	49
2.3.4. Planear los recursos para la calibración	50
2.3.5. Acondicionar el laboratorio	50
2.3.6. Preparar banco de calibración	51

3.	METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN DAUIK® PARA TERMÓMETROS DE RADIACIÓN	59
3.1.	INICIAR CON LAS ACTIVIDADES PRELIMINARES	59
3.2.	ACLIMATAR EL IBC	60
3.3.	PLANEAR LA SECUENCIA DE LAS MEDICIONES	60
3.4.	DEFINIR LA DISTANCIA DE MEDICIÓN, EFECTO DEL TAMAÑO DE LA FUENTE – ETF	62
3.5.	REALIZAR LAS MEDICIONES PREVIAS	65
3.6.	OBTENER LOS COEFICIENTES S-H Y COEFICIENTES S-W	67
3.7.	REALIZAR LAS MEDICIONES PARA LA CALIBRACIÓN	71
3.8.	ESTIMAR LA INCERTIDUMBRE POR PUNTO DE TEMPERATURA CALIBRADO	73
3.9.	PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN	75
3.10.	FLUJOGRAMA DE LA “METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN DAUIK® PARA TERMÓMETROS DE RADIACIÓN	77
4.	RESULTADOS	79
4.1.	ACTIVIDADES PRELIMINARES A LA CALIBRACIÓN.....	79
4.1.1.	Recabación de información del termómetro de radiación a calibrar (IBC)	79
4.1.2.	Verificación de posible desviación al modelo matemático.....	81
4.1.3.	Inspección visual del IBC e ingreso al laboratorio	81
4.1.4.	Planeación de los recursos para la calibración	82
4.1.5.	Acondicionamiento del laboratorio	83
4.1.6.	Preparación del banco de calibración	84
4.2.	ACTIVIDADES DE LA “METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN DAUIK® PARA LA CALIBRACIÓN DE TERMÓMETROS DE RADIACIÓN”	85
4.2.1.	Aclimatación del IBC	85
4.2.2.	Planeación de la secuencia de las mediciones	85
4.2.3.	Establecimiento del set point de las fuentes de radiación	87
4.2.4.	Definición de la distancia de medición – efecto del tamaño de la fuente – ETF	90
4.2.5.	Realizar las mediciones previas	94
4.2.6.	Obtención de los coeficientes de S-H Y S-W	96
4.2.7.	Mediciones para la calibración.....	99
4.2.8.	Estimación de incertidumbre por punto de calibración	104
4.2.9.	Resultados de la calibración.....	106

4.2.10. Análisis de resultados.....	108
4.3. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN DAUIK® PARA TERMÓMETROS DE RADIACIÓN Y DEL MODELO MATEMÁTICO	109
4.3.1 Resultados de calibración obtenidos con el modelo polinomial (JLCU) original.....	110
4.3.2 Resultados de calibración obtenidos con el Modelo de Aproximación Cárdenas-Méndez	113
4.3.3 Tabla comparativa de resultados entre modelos	116
4.3.4 Análisis de resultados de validación de metodología y modelo matemático.....	121
CONCLUSIONES	122
RECOMENDACIONES	124
APORTACIÓN DE LA TESIS.....	126
APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS.....	127
REFERENCIAS	128
ANEXOS	130

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución rectangular	18
Figura 2. Respuesta espectral en una longitud de onda de (0.75 a 5) μm : Triangular y gaussiana	19
Figura 3. Respuesta espectral en una longitud de onda de (5 a 5.5) μm : Gaussiana en intervalos pequeños.	20
Figura 4. Respuesta espectral en una longitud de onda de (7.5 a 25) μm : Rectangular con una meseta irregular	20
Figura 5. Respuesta espectral en una longitud de onda de (7.5 a 25) μm : Triangular irregular en intervalos grandes.....	21
Figura 6. Ejemplo de especificaciones técnicas de fabricante y accesorios	46
Figura 7. Ejemplos de instrumentos para monitorear condiciones ambientales.....	51
Figura 8. Arreglo experimental de un sistema de posicionamiento con desplazamiento longitudinal y radial, con tres fuentes de radiación.	52
Figura 9. Ejemplo de Sistema de posicionamiento con desplazamiento	53
Figura 10. Diagrama de flujo para obtener el valor de temperatura de referencia, cuando el termómetro patrón es uno de contacto.....	55
Figura 11. Diagrama de flujo para obtener el valor de temperatura de referencia, cuando el termómetro patrón es uno de radiación	56
Figura 12. Diagrama de flujo para obtener el valor de temperatura de referencia, cuando el patrón es una fuente calibrada con un termómetro de radiación de referencia.....	57
Figura 13. Pantalla de la función SOLVER de Excel.....	70
Figura 14. Ejemplo de gráfico de dispersión de los resultados de calibración.....	76
Figura 15. Flujograma de la "Metodología de calibración Dauik® para termómetros de radiación"	78
Figura 16. F-SG-004-04 - Información general, recepción y entrega de entrega de equipo	80
Figura 17. F-SG-004-05 - Inspección visual del IBC	82
Figura 18. Arreglo experimental en el laboratorio de temperatura de radiación de temperaturas bajas de Kapter®	85

Figura 19. Gráfico de los resultados de calibración.....	107
Figura 20. Gráfico de los resultados de calibración por el modelo polinomial en resultados experimentales.....	112
Figura 21. Gráfico de los resultados de calibración por el modelo de aproximación Cárdenas-Méndez, en resultados experimentales	114
Figura 22. Gráfico de propagación del error	115
Figura 23. Resultados de calibración comparando ambos modelos, en resultados experimentales	117
Figura 24. Resultados del análisis de error normalizado.....	119
Figura 25. Resultados del análisis del gráfico "h" de Mandel	120
Figura 26. Resultados del análisis del gráfico "k" de Mandel.....	120

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Magnitudes de influencia para la estimación de incertidumbre por el modelo Daniel Cárdenas, CENAM.....	26
Tabla 2. Magnitudes de influencia para la estimación de incertidumbre por el modelo Polinomial (JLCU)	29
Tabla 3. Cuadro comparativo entre modelos de aproximación derivados de la Ley de Planck	33
Tabla 4. Área efectiva de la fuente versus N, número de veces.....	63
Tabla 5. Secuencia de medición para las mediciones previas	67
Tabla 6. Secuencia de medición para las mediciones previas	68
Tabla 7. Señal virtual – IBC por punto de calibración	68
Tabla 8. Señal virtual TRAD – patrón por punto de calibración	69
Tabla 9. Diferencia entre señales virtuales	69
Tabla 10. Información a considerar para la utilización del SOLVER	70
Tabla 11. Secuencia de medición para las mediciones de la calibración	72
Tabla 12. Contenido de los resultados de la calibración	75
Tabla 13. Planeación de los Recursos de la Calibración.....	83
Tabla 14. Planeación de las mediciones.....	86
Tabla 15. Resultados “parciales” de la evaluación de la incertidumbre del control de temperatura de la fuente de radiación, Mod. Dauik 80.	89
Tabla 16. Resultados de la conversión de temperatura termodinámica del <i>TPatrón</i> a temperatura de radiancia por punto de calibración.....	90
Tabla 17. Efecto del tamaño de la fuente por punto de calibración.....	91
Tabla 18. Resolución óptica dada por el fabricante Fluke para el modelo 568.....	94
Tabla 19. Bitácora de mediciones previas, para el punto de calibración No. 3: 300°C	95
Tabla 20. Mediciones a dos diferentes emisividades: E=1 y E= 0.5, para el punto de calibración No. 3: 300 °C	96
Tabla 21. Obtención de los coeficientes <i>ASW</i> y <i>BSW</i>	96
Tabla 22. Mediciones previas, cálculo del error y conversión a K	97
Tabla 23. Obtención de señal virtual para el Termómetro de radiación IBC	97

Tabla 24. Obtención de señal virtual para el Termómetro de radiación patrón	98
Tabla 25. Obtención de diferencia entre señales virtuales y sumatoria de las mismas	98
Tabla 26. Estimación de los coeficientes A_c , B_c y C_c de Sakuma Hattori mediante la función SOLVER de Excel.....	99
Tabla 27. Bitácora de mediciones de calibración, para el punto de calibración No. 2: 37.5 °C	100
Tabla 28. Mediciones a dos diferentes emisividades: $E=1$ y $E= 0.5$, para el punto de calibración No. 2: 37.5 °C	101
Tabla 29. Concentrado de la información de las condiciones ambientales tanto individuales como de la calibración general.....	102
Tabla 30. Estimación de Incertidumbre y Resultados de la calibración	103
Tabla 31. Estimación de Incertidumbre por punto de calibración.....	105
Tabla 32. Resultados de la calibración	106
Tabla 33. Estimación de las magnitudes de influencia obtenidas por el modelo Polinomial (JLCU), en resultados experimentales.....	111
Tabla 34. Resultados de la calibración, obtenidas por el modelo Polinomial (JLCU), en resultados experimentales.	112
Tabla 35. Estimación de las magnitudes de influencia obtenidas por el modelo de aproximación Cárdenas-Méndez, en resultados experimentales.....	113
Tabla 36. Resultados de la calibración, obtenidas por el modelo de aproximación Cárdenas-Méndez, en resultados experimentales.	114
Tabla 37. Resultados comparativos de la calibración experimental entre modelos matemáticos	116

GLOSARIO

1

Ancho de banda estrecho: Se refiere a la extensión espacial de la respuesta espectral $R(\lambda)$.

Cadena de trazabilidad metrológica (2.42): Sucesión de patrones y calibraciones que relacionan un resultado de medida con una referencia.

Metrological traceability chain: Sequence of measurement standards and calibrations that is used to relate a measurement result to a reference.

Calibración (2.39): Operación que bajo condiciones específicas establece, en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas obtenidas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medición a partir de una indicación.

Calibration: Operation that, under specified conditions, in a first step, establishes a relation between the quantity values with measuring uncertainties provided by measurement standards and corresponding indications with associated measurement uncertainties and, in a second step, uses this information to establish a relation for obtaining a measurement result from an indication.

Coefficientes de Sensibilidad: Factor que se puede determinar de manera analítica al disponer de una función matemática f , que se puede derivar con respecto a cada una de las variables de entrada X_i , cuyas magnitudes se miden con unidades distintas a las de las variables de salida Y . Cuando la magnitud de las variables de entrada X_i se mide con la misma unidad de las variables de salida Y , los coeficientes de sensibilidad son adimensionales y los coeficientes se obtienen derivando parcialmente la f respecto a la variable X_i ; cuando las magnitudes de las variables

¹ Este glosario es una recopilación de las fuentes citadas, entre las que destacan: (Centro Español de Metrología, 2012), (Cárdenas García & Rodríguez Arteaga, Diplomado en Termometría de Radiación, Módulo 1: Conceptos básicos, 2017), (H. Preston, 1990).

de entrada X_i se miden con unidades distintas a la unidad con que se mide la magnitud de la variable de salida Y y no se cuenta con una función matemática a partir de la cual se puedan determinar dichos coeficientes, se procede a obtener sus valores de experimentos donde se producen cambios ΔX_i en las variables de entrada de X_i , para medir los cambios ΔY que se producen en la variable de salida Y como consecuencia de los cambios de ΔX_i y los coeficientes se obtienen del cambio de $\Delta Y / \Delta X_i$.

Cuerpo negro: Es un cuerpo teórico que absorbe toda la radiación que incide en su superficie, independientemente del contenido espectral de la radiación o de su dirección, lo cual lo convierte en un emisor lambertiano. Ningún otro objeto que se encuentre a la misma temperatura puede emitir más radiación térmica que él.

Ecuación semi empírica: En ingeniería y otras ciencias aplicadas, se entiende como una ecuación derivada de la experimentación y la observación empírica, de acuerdo con los hechos asumidos más que de la teoría.

Emisividad espectral direccional: Eficiencia para producir radiación térmica mediante el cociente de la radiancia espectral debida al flujo radiante emitido por una superficie que se encuentra a una temperatura T , a una longitud de onda λ dada, en la dirección (θ, ϕ) y la radiancia $L_{\lambda,b}(T)$ debida al flujo radiante emitido por un cuerpo negro que se encuentra a la misma temperatura y evaluada a la misma longitud de onda.

Error (2.16): Diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia.

Error of measurement, error: Measured quantity value minus a reference quantity value.

FWHM: De sus siglas en inglés Function of the full Width at Half Maximum - Función de la amplitud total de la mitad del máximo.

Incertidumbre de medición (2.26): Parámetro no negativo que caracteriza a la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza.

Measurement uncertainty: Non-negative parameter characterizing the dispersion of the quantity values being attributed to a measurand, based on the information used.

Indicación (4.1): Valor proporcionado por un instrumento o un sistema de medición.

Indication: Quantity value provided by a measuring instrument or a measuring system.

Ley de Radiación de Planck: Determina el valor de la radiancia espectral de un cuerpo negro al valor de una longitud de onda λ dada. Establece que la radiancia está en función de la temperatura del cuerpo negro (en kelvin) y para su cálculo se emplean la primera y segunda constante de radiación de Planck (c_{1L} y c_2).

Magnitud de influencia (2.52): Magnitud que, en una medición directa, no afecta a la magnitud que realmente se está midiendo, pero sí afecta a la relación entre la indicación y el resultado de medida.

Influence quantity: Quantity that, in a direct measurement, does not affect the quantity that is actually measured, but affects the relation between the indication and measurement result.

Medición (2.1): Proceso que consiste en obtener experimentalmente uno o varios valores que pueden atribuirse razonablemente a una magnitud.

Measurement: process of experimentally obtaining one or more quantity values that can reasonably be attributed to a quantity

Mensurando (2.3): Magnitud que se desea medir.

Measurand: Quantity intended to be measured.

Metrología (2.2): Ciencia de las mediciones y sus aplicaciones. Nota. La metrología incluye todos los aspectos teóricos y prácticos de las mediciones, cualesquiera que sean su incertidumbre de medida y su campo de aplicación.

Metrology: Science of measurement and its application.

Patrón de medición (5.1): Realización de la definición de una magnitud dada, con un valor determinado y una incertidumbre de medida asociada, tomada como referencia.

Measurement standard: Realization of the definition of a given quantity, with stated quantity value and associated measurement uncertainty, used as a reference.

Radiancia espectral direccional, $L_{\lambda,S}(T, \theta, \phi)$ de una superficie que está a temperatura, T : Flujo radiante Φ_S que proviene de dicha superficie, a una longitud de onda λ en la dirección (θ, ϕ) , por unidad de superficie radiante normal a esa dirección, por unidad de ángulo sólido $d\omega$ y por unidad del intervalo espectral $d\lambda$ alrededor de λ .

Resultado de medición (2.9): Conjunto de valores de una magnitud atribuidos a un mensurando, acompañados de cualquier otra información relevante disponible.

Measurement result: Set of quantity values being attributed to a measurand together with any other available relevant information.

Temperatura Termodinámica, T : Propiedad que describe el equilibrio térmico que se produce por el intercambio de energía interna; se calcula dividiendo la derivada de la energía interna entre la derivada de la entropía del sistema.

Temperatura de radiancia de una superficie: Es igual a la temperatura de un cuerpo negro que tiene el mismo valor de radiancia que el valor de la radiancia de la superficie, sobre un intervalo espectral dado.

Termómetro: Instrumento que mide el cambio en la propiedad termométrica de su sensor y lo asocia a un valor de temperatura.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Hoy en día, la aplicación de los termómetros de radiación y de las cámaras termográficas es muy extensa. Gracias a su posibilidad de realizar mediciones a distancia y de obtener perfiles de temperatura de las superficies medidas, son utilizados en diversos campos como: industrial, automotriz, aeronáutico, agrícola, forestal, agua e hidrocarburos, ensayos no destructivos, mantenimientos predictivos y preventivos, entre otros sectores y servicios.

La importancia de que estos instrumentos midan de manera eficiente radica en el hecho de que las lecturas obtenidas de ellos pudieran ser útiles para la toma de decisiones. Encontrar una homologación entre la forma de medición de los sensores de los instrumentos, la de los laboratorios de calibración y la del usuario final, permitiría construir una cadena de mediciones adecuadas, para la toma de dichas decisiones.

Existen diversos documentos como guías, procedimientos o normatividades, en temas de termometría de radiación, tanto internacionales como nacionales, (Cárdenas García & Rodríguez Arteaga, Diplomado en Termometría de Radiación, Módulo 1: Conceptos básicos, 2017), (Cárdenas García, Diplomado en termometría de radiación, Módulo 2, Medición, 2018), (Cárdenas García, Diplomado en Termometría de radiación, Módulo 3: Calibración, 2018), (Cárdenas García & Méndez Lango, Use of Radiometrically Calibrated Flat-Plate Calibrations in Calibration of Radiation Thermometers, 2015), (Cravioto Urbina, 2007), (ASTM, 2014), (Zhang, Tsai, & Machin, 2009), (Saunders & White, 2003), los cuales indican diversos aspectos a considerar para la medición y calibración de termómetros de radiación, sin embargo, algunos de ellos son aplicables solo a laboratorios primarios y quedan fuera del alcance de los laboratorios secundarios, o bien, es información muy especializada que requiere un conocimiento muy especializado para su aplicación, otros no son lo suficientemente explícitos o no muestran una guía clara

y estructurada para la calibración de estos instrumentos e inclusive, algunos de ellos se pudieran contradecir en ciertos conceptos.

De lo observado en los últimos ocho años de experiencia, se puede ver que no existen documentos específicos que describan a detalle y de una manera secuenciada las etapas requeridas para la calibración de termómetros de radiación.

Evaluando la viabilidad y factibilidad en la presente investigación, se menciona lo siguiente respecto al estado del arte:

- Respecto a las búsquedas internacionales PCT con fecha del 30 de julio de 2018, del 07 de diciembre de 2015 y del 12 de noviembre de 2014, muestran 4 documentos que podrían afectar la actividad inventiva, no de la metodología, pero sí del modelo matemático y el aparato donde se empleará para medir termómetros de radiación, sin embargo, dicho documento indica que los documentos encontrados son de categoría "A" por lo tanto no impiden la viabilidad del estudio que se plantea en el presente documento.
- Los siguientes tres documentos son de mi propia autoría: MX2013015367, publicado el 01 de diciembre de 2014; WO2017105206, publicado el 22 de junio del 2017; WO 2017164723, publicado el 28 de septiembre de 2017 y solo en uno de ellos se protegió una metodología de medición, sin embargo, no abarca lo incluido en la metodología aquí propuesta.
- Con base a un reporte de predicción de patentabilidad del modelo matemático y el aparato donde se empleará, con fecha diciembre de 2015, se demuestra que el objeto o tema de la búsqueda cumple con novedad, actividad inventiva y aplicación industrial, por lo que se demuestra viabilidad y factibilidad en el estudio.

Actualmente México cuenta con cinco laboratorios de calibración secundarios acreditados ante la Entidad Mexicana de Acreditación (ema), (EMA;, s.f.) para calibrar termómetros de radiación y aproximadamente seis laboratorios de calibración secundarios adicionales, que trabajan sólo con trazabilidad metrológica o acreditados con otro organismo. Dicha cantidad de laboratorios es insuficiente para el tamaño del mercado existente en México, siendo la principal demanda los servicios de calibración acreditados ante un organismo certificador. Por lo que existe una necesidad palpable de que existan más laboratorios de calibración de termómetros de radiación en nuestro país, que ofrezcan servicios de calibración acreditados, con trazabilidad metrológica, para ofrecer mayor competitividad a la industria mexicana.

A partir de octubre de 2018, es un requisito por parte del CENAM, Centro Nacional de Metrología, que los laboratorios que ofrezcan servicios de calibración de termómetros de radiación cuenten con un modelo matemático basado en constantes fundamentales y fenómenos físicos, así mismo, su ecuación de interpolación debe ser una aproximación a la Ley de Planck.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Al hablar de una metodología con estas características, nos referimos a lo siguiente: al ser estructurada permitirá que los metrólogos puedan seguir su secuencia de etapas y con ello lograr su objetivo respecto al mensurando; al ser ampliada brindará la posibilidad de abarcar diversos aspectos de la Radiación Infrarroja y con ello se podrá dar cumplimiento a los lineamientos establecidos tanto de organismos nacionales, como internacionales, incluye información no contenida en otros documentos como el desarrollo del cálculo y análisis de incertidumbres, el desarrollo puntual de las ecuaciones derivadas de la Ley de Planck, planeación de mediciones y secuencia específica para las mismas, aprovechamiento de los recursos del laboratorio, así como demás información requerida para el adecuado proceso de la calibración. Al ser específica implica que debe ser clara y suficientemente puntual, que les permita a los metrólogos llevarla a cabo y que a

través de ella se garantice la confiabilidad en las mediciones, brindando como resultado y con precisión, el error de medida entre el termómetro de radiación a calibrar y el termómetro de referencia, con trazabilidad metrológica e incertidumbre de medición asociada.

La diferencia de esta metodología, respecto a lo establecido en algunos documentos publicados como la Guía técnica de CENAM (Cárdenas García & CENAM, Guía Técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre en la calibración de termómetros de radiación, 2018), es que es más concreta y al no ser una "guía", no abarca todas las posibilidades que ahí se mencionan y permite su mejor entendimiento y aplicación. En el tema de la estimación de incertidumbres, abarcará aquellos aspectos que pudieran ser aplicables a cada laboratorio en concreto, permitiendo "tropicalizar" dicha estimación a las condiciones y arreglo experimental de cada laboratorio, además de lo considerado en el documento técnico del CENAM, (Cárdenas García, Magnitudes de influencia en la calibración de termómetros de radiación debajo del punto fijo de la plata, 2018). Adicional a ello, explica la obtención de cada una de las magnitudes de influencia, para con ello llegar a la incertidumbre combinada y expandida por punto de calibración, a través de la ecuación de aproximación de Cárdenas-Méndez. Hablando del mensurando, hace explícito al menos uno de los posibles mensurandos en termometría de radiación e indica de manera puntual, el cálculo del error de medida, el cual, por la forma en que se obtiene, cuenta con trazabilidad metrológica.

Por lo que se observan faltantes y vacíos para su uso dentro de los laboratorios de calibración secundarios, lo cual da lugar a la pertinencia de desarrollar una Metodología estructurada, ampliada y específica, para calibrar termómetros de radiación, basado en los documentos técnicos autorizados y en la experiencia técnica en laboratorios de calibración, la cual se integra de manera directa a los procedimientos técnicos del Sistema de Gestión de Calidad de los laboratorios de [Kapter®](#), con la posibilidad de aplicarse en cualquier laboratorio de calibración secundario que pretenda calibrar termómetros de radiación.

Se pretende integrar esta metodología mediante su validación experimental, aplicando el modelo matemático derivado de Cárdenas-Méndez y migrando del modelo matemático polinomial usado por [Kapter®](#) los últimos cinco años y como el nuevo modelo cuenta con fundamento físico y partiendo de la experiencia propia del laboratorio, se podría cubrir la demanda del mercado de solicitar servicios de calibración acreditados ante la Entidad Mexicana de Acreditación, emma, o cualquier otro organismo certificador.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Dada la alta competencia técnica requerida por los investigadores y científicos que deseen incursionar en el campo de la radiación infrarroja para calibrar termómetros de radiación, la propuesta de la presente "*Metodología de calibración Dauik® para termómetros de radiación*" toma relevancia desde varios aspectos.

Para contextualizar el término [Dauik®](#) y la razón por la que forma parte del nombre de la metodología aquí desarrollada, se menciona que es una marca de tecnología registrada, que incluye fuentes de radiación y sistemas de posicionamiento para termómetros de radiación y cámaras termográficas. Su nombre tiene un origen mixteco (aunque se usó una forma abreviada) y significa "Flechador de sol", analogía usada porque con los termómetros de radiación y cámaras fotográficas, siempre se está tratando de localizar el objeto más caliente, en este caso, el sol nuestro astro por excelencia.

El presente trabajo representa la recopilación de años de estudio y trabajo dentro de laboratorios de calibración en temperatura de no contacto. De tal manera, que sintetiza dichos conocimientos y experiencia en una metodología estructurada, ampliada y específica que ayudará al ámbito académico a tomarlos como puntos de partida para nuevas investigaciones respecto a calibraciones de termómetros de radiación; en el ámbito metrológico, servirá como una metodología útil y práctica para implementar un laboratorio de temperatura de no contacto; en el ámbito comercial, permitirá atender la alta demanda que se tiene actualmente no

solo en el sector industrial, sino por pandemia del COVID-19 aún latente, lo cual representa una aportación directa a la sociedad, al ofrecer una metodología que permita realizar mediciones de temperatura de radiancia confiables.

Esta metodología estructurada, ampliada y específica, que contiene un modelo matemático con fundamento físico, conseguirá que todos aquellos laboratorios de termometría de radiación que desearan implementarlo, tuviesen la posibilidad de acreditarse ante la Entidad Mexicana de Acreditación (ema) o ante cualquier otro organismo certificador.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar una metodología estructurada, ampliada y específica, para calibrar termómetros de radiación, basado en los documentos técnicos de CENAM 2018 y en la experiencia técnica en laboratorios de calibración, que garantice obtener mediciones confiables, brindando como resultado y con precisión, el error de medida entre el termómetro de radiación a calibrar y el termómetro de referencia, con trazabilidad metrológica e incertidumbre de medición asociada.

1.4.2. Objetivos específicos

- a. Validar la Metodología de calibración Davik® para termómetros de radiación, mediante pruebas experimentales dentro de un laboratorio de termometría de radiación.
- b. Hacer un análisis comparativo para la validación del modelo matemático implementado con esta metodología, con la finalidad de migrar de un modelo polinomial (JLCU) usado en un laboratorio secundario a una ecuación de interpolación aproximada a la ley de Planck, basado en los métodos de aproximación de Cárdenas-Méndez y Saunders-White.

- c. Implementar la propuesta metodológica en un software de hoja de cálculo para facilitar su uso en un laboratorio de calibración de termometría de radiación, incluyendo la estimación de incertidumbre.

1.5. HIPÓTESIS

A partir de una metodología estructurada, ampliada y específica, para calibrar termómetros de radiación e implementar en ella un modelo de aproximación a la Ley de Planck, basado en los documentos técnicos de CENAM 2018 y en la experiencia técnica en laboratorios de calibración, se pueden obtener mediciones confiables, brindando como resultado y con precisión, el error de medida entre el termómetro de radiación a calibrar y el termómetro de referencia, con trazabilidad metrológica e incertidumbre de medición asociada.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. FUNDAMENTOS DE TERMOMETRÍA DE RADIACIÓN

En este capítulo se desarrollan los fundamentos de termometría de radiación. Algunos de los **modelos utilizados para la resolución de la ecuación integral que caracteriza el problema fundamental de la termometría de radiación** son revisados. Particularmente los modelos de Sakuma-Hattori (S-H) , Cárdenas-Méndez (C-M) y Saunders-White (S-W) son detallados y explicados. Abordando también un modelo polinomial alterno José Luis Cravioto (JLCU) y que ha sido usado para los mismos fines. Al final de este capítulo, se hace una revisión de los aspectos preliminares al procedimiento de calibración de un termómetro de radiación en un laboratorio de metrología.

Existen varios modelos de aproximación derivados de la Ley de Planck (Zhang, Tsai, & Machin, 2009), que pueden ser usados en termometría de radiación y que cuentan con fundamentos de física, entre los que se encuentran el modelo de Saunders-White (Saunders & White, 2003), Cárdenas-Méndez (Cárdenas García & Méndez Lango, Use of Radiometrically Calibrated Flat-Plate Calibrations in Calibration of Radiation Thermometers, 2015), Rayleigh-Jeans y Wien (Zhang, Tsai, & Machin, 2009), Sakuma-Hattori (H. Preston, 1990), entre otros. De los cuales, se destaca la ecuación de Sakuma-Hattori, la cual, es una ecuación semi empírica que ha demostrado ser útil y precisa.

Adicional a estos modelos derivados de la Ley de Planck, existen modelos matemáticos alternos, que son usados dentro de la termometría de radiación y que han sido implementados y validados en laboratorios secundarios. Tal es el caso del modelo Polinomial de cuarto orden de Cravioto Urbina (Cravioto Urbina, 2007).

Cada modelo hace una aproximación a la Ley de Planck en diferentes zonas del espectro electromagnético y para diferentes temperaturas, intentando simplificar el problema fundamental de la radiación infrarroja. Sin embargo, los parámetros que son requeridos para su empleo, no siempre están disponibles para laboratorios

de metrología secundarios, por tal motivo, el presente capítulo tiene por objeto hacer una revisión general del uso de cuatro de dichos métodos para termometría de radiación en un laboratorio de metrología, de forma explícita y amplia, en particular la ecuación de aproximación de S-H, C-M, S-W y JLCU a partir de parámetros conocidos del termómetro bajo calibración, facilitando de esta manera su uso e implementación.

2.2. MODELOS DE TERMOMETRÍA DE RADIACIÓN

La temperatura de un cuerpo negro es determinada usando la termometría de radiación, resolviendo la siguiente ecuación integral:

$$S = \int_0^{\infty} R(\lambda)L_b(\lambda, T)d\lambda \quad (1)$$

donde S es la señal medida por el termómetro de radiación, $L_b(\lambda, T)$ es la función de Planck en una longitud de onda λ y temperatura T , y $R(\lambda)$ es la respuesta espectral del termómetro (incluye los factores de óptica, geometría y electrónica)

2.2.1. Modelo de Sakuma-Hattori

La ecuación de referencia de la longitud de onda puede expresarse de la siguiente manera:

$$S = \left(a_1 + \frac{a_2}{T} + \frac{a_3}{T^2} + \dots \right) \exp\left(\frac{-c_2}{\lambda_r T}\right) \quad (2)$$

donde λ_r es una longitud de onda de referencia fija y el factor en el primer paréntesis se conoce como el factor de corrección. λ_r es igual a la longitud de onda media, λ_0 y los parámetros a_i son iguales a los términos correspondientes en la ecuación de aproximación de S-W. (Saunders & White, 2003).

Uno de los modelos más utilizados en los últimos años para resolver ecuaciones integrales del tipo de la ecuación (1), es la aproximación de Sakuma-Hattori, debido a que este modelo evita el uso de integrales y facilita la estimación de

incertidumbre (Cárdenas García, Diplomado en termometría de radiación, Módulo 2, Medición, 2018).

La mayoría de las ecuaciones de interpolación para los termómetros de radiación pueden generarse eligiendo una forma funcional para la relación entre la longitud de onda efectiva y la temperatura, y sustituyendo esta relación en la ecuación (2):

$$S = a_1 \exp\left(\frac{-c_2}{\lambda_x T}\right) \quad (3)$$

donde λ_x es la longitud de onda efectiva extendida (Pavese, Molinar Min Beciet, & H. Preston, 1997) y es relativamente cercana al límite de la longitud de onda, λ_T (Saunders & White, 2003). El parámetro a_1 es tratado normalmente como un parámetro ajustable, y se puede demostrar que está dado por:

$$a_1 = c_1 \int_0^\infty \frac{R(\lambda)}{\lambda^5} d\lambda \quad (4)$$

considerando que el límite de la longitud de onda λ_T tiene una forma funcional:

$$\lambda_T = A + \frac{B}{T} \quad (5)$$

Siendo A y B constantes, se obtiene la siguiente ecuación de interpolación:

$$S = a_1 \exp\left(\frac{-c_2}{a_2 T + a_3}\right) \quad (6)$$

donde $a_2 \approx A$ y $a_3 \approx (B/2)$. Dando lugar a la ecuación de Sakuma-Hattori, la cual es matemáticamente equivalente a la ecuación original desarrollada por Jung y Verch (Saunders & White, 2003). En donde a_2 está cerca del centro de la longitud de onda de la respuesta espectral y a_3 describe la dependencia de la temperatura de la longitud de onda efectiva que se ha observado que aumenta a medida que el ancho de banda de la respuesta espectral aumenta. En el caso específico de una respuesta espectral con distribución rectangular, Sakuma y Kobayashi lograron relacionar esos parámetros con el FWHM (Function of the full Width at Half Maximum) - en función de la amplitud total de la mitad del máximo, mientras que Jung y Verch relacionaron el parámetro a_3 con el FWHM de un rectángulo y a la

variación de una respuesta gaussiana, aunque no existe una publicación formal de dicho análisis (Saunders & White, 2003).

Para anchos de banda amplios, no describe adecuadamente la curvatura de la longitud de onda efectiva limitante y se requieren términos adicionales. La ecuación de Sakuma-Hattori puede entonces ser generalizada como:

$$S = a_1 \exp\left(\frac{-c_2}{a_2 T + a_3 + a_4/T + a_5/T^2}\right) \quad (7)$$

en la cual, la serie en el denominador de la función exponencial se trunca después del número de términos necesarios para lograr la precisión deseada. El término a_4 puede ser útil para el ancho de banda de los termómetros de radiación, pero rara vez son del mayor orden requerido.

Los parámetros a_2, a_3, a_4, \dots pueden ser relacionados con $\lambda_0, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \dots$ mediante la expansión de ambos - en series de Taylor - (incluyendo el factor exponencial y [\(7\)](#) es una serie de potencia en $(1/T)$, entonces se igualan los coeficientes de las dos series. Fijando los coeficientes de $(1/T)^i$ igual en ambas series, se asegura que los parámetros serán válidos en un amplio rango de temperaturas. Con lo cual, los coeficientes se definen:

$$a_2 = \lambda_0 \left[1 - 6 \frac{\mu_2}{\lambda_0^2} + 21 \frac{\mu_3}{\lambda_0^3} - 14 \frac{(4\mu_4 - 9\mu_2^2)}{\lambda_0^4} + \dots \right], \quad (8)$$

$$a_3 = \frac{c_2}{2} \left[\frac{\mu_2}{\lambda_0^2} - 7 \frac{\mu_3}{\lambda_0^3} + 7 \frac{(4\mu_4 - 9\mu_2^2)}{\lambda_0^4} + \dots \right], \quad (9)$$

$$a_4 = \frac{c_2^2}{6\lambda_0} \left[\frac{\mu_3}{\lambda_0^3} - \frac{1}{2} \frac{(16\mu_4 - 39\mu_2^2)}{\lambda_0^4} + \dots \right]. \quad (10)$$

de donde, los términos en corchetes de [\(8\)](#)-[\(10\)](#) pueden ser expresados como series en $(\sigma/\lambda_0)^i$ y por lo tanto, la proporción de (σ/λ_0) es la que determina el número de términos requeridos de cada serie. Esta proporción es una cifra útil para la sensibilidad en cierto espectro. Para anchos de banda relativamente estrechos, es

suficiente con incluir sólo aquellos términos hasta μ_2 . Así, $\mu_2 = \sigma_2$ para todas las respuestas espectrales (8)-(10), con lo que se obtiene la sig. aproximación:

$$a_2 = \lambda_0 \left[1 - 6 \left(\frac{\sigma}{\lambda_0} \right)^2 \right], \quad (11)$$

$$a_3 = \frac{c_2}{2} \left(\frac{\sigma}{\lambda_0} \right)^2, \quad (12)$$

$$a_4 = 0. \quad (13)$$

puediendo observarse, que a_2 y a_3 sólo dependen de la longitud de onda y de la varianza de la respuesta espectral, independientemente de su forma. Esto brinda un simple criterio para comparar diferentes respuestas espectrales: siempre y cuando su longitud de onda media y su varianza sean las mismas, dos respuestas espectrales de forma diferente producirán los mismos parámetros para la interpolación de Sakuma-Hattori (y cualquier otra ecuación de interpolación que contenga momentos no superiores a μ_2). Los valores ajustados de a_2 y a_3 en [\(6\)](#) pueden ser usados para determinar λ_0 y μ para [\(11\)](#) y [\(12\)](#): $\lambda_0 = c_2 a_2 / (c_2 - 12 a_3)$, $\sigma = a_2 \sqrt{2 c_2 a_3} / (c_2 - 12 a_3)$. Las ecuaciones [\(11\)](#) y [\(12\)](#) brindan significados precisos a los coeficientes de la longitud de onda efectiva límite dada en [\(5\)](#).

La versión de Planck de [\(3\)](#) sería:

$$S = \frac{a_1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda_x T}\right) - 1} \quad (14)$$

donde se hace una aproximación muy pequeña, ignorando el factor multiplicador de $1/\lambda_x$ en la sig. ecuación de interpolación y pudiendo expresar la señal S , en términos de:

$$S = S(T; \lambda_0, \mu_2, \mu_3, \mu_4) \quad (15)$$

en la cual, se tiene la ventaja de que no es necesario conocer su respuesta espectral y teniendo en cuenta, que ésta sí influye en los valores de los parámetros

a_1, a_2, a_3, \dots Utilizando el hecho de que la ley de Planck es igual a la suma de una serie geométrica de ecuaciones de Wien,

$$\frac{c_1}{\lambda^5} \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{c_1}{\lambda^5} \exp\left(\frac{-c_2 n}{\lambda T}\right) \quad (16)$$

se puede demostrar que, para anchos de banda suficientemente estrechos (satisfaciendo la condición $c_2 \sigma^2 / 2\lambda_0^3 T \ll 1$), la versión de Planck de (7) contiene los mismos parámetros de la versión de Wien. Siendo la versión de Planck la siguiente ecuación:

$$S = \frac{a_1}{\exp\left[c_2 / \left(a_2 T + a_3 + \frac{a_4}{T} + \frac{a_5}{T^2} \dots\right)\right] - 1} \quad (17)$$

donde a_2, a_3, a_4 están dadas por la expansión en series de Taylor de (7), reescribiendo la ley de Planck así:

$$S = \frac{a_1}{\exp\left[c_2 \left(a_2 + a_3/T + \frac{a_4}{T^2} + \dots\right) / T\right] - 1} \quad (18)$$

Con $a_2 \approx a$, $a_3 \approx b/2$, $a_4 \approx c/3, \dots$ Siendo (17) y (18) ecuaciones exactas particularmente para altas temperaturas y longitudes de onda largas (Saunders & White, 2003).

Considerando que el límite de la longitud de onda λ_T tiene una forma funcional como se indica en (5), considerando A y B constantes y partiendo de la ecuación de interpolación (6), **podemos reescribir y simplificar la ecuación de Sakuma-Hattori:** (Cárdenas García, Diplomado en termometría de radiación, Módulo 2, Medición, 2018).

$$S(T) = \frac{C}{\exp\left(\frac{c_2}{AT + B}\right) - 1} \quad (19)$$

(19) nos permite empezar a relacionar parámetros del termómetro de radiación a calibrar; donde S es la señal medida por el termómetro de radiación, c_2 es la segunda constante de Planck igual a 0.014387752 m·K, T es la temperatura, (A, B,

C) son constantes que dependen de las características del termómetro de radiación. En el [Capítulo 3](#), se indicará a detalle cómo obtener estas constantes de **caracterización**, las cuales, una vez utilizadas para las mediciones se renombran como A_C, B_C y B_C . Por lo tanto, [\(19\)](#) es la ecuación del termómetro de radiación lineal.

2.2.2. Modelo de Saunders-White

Se indica que el problema matemático central es resolver la ecuación [\(1\)](#) y en primera instancia, la alternativa que Saunders y White (Saunders & White, 2003) toman para resolverlo es mediante el método de Coate (Zhang, Tsai, & Machin, 2009), el cual consiste en expandir en series de Taylor la función de Planck L_b entorno al valor λ_0 .

$$\begin{aligned}
 L_b(\lambda, T) = & L_b(\lambda_0, T) + (\lambda - \lambda_0) \left(\frac{\partial L_b(\lambda, T)}{\partial \lambda} \right)_{\lambda=\lambda_0} \\
 & + \frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2!} \left(\frac{\partial^2 L_b(\lambda, T)}{\partial \lambda^2} \right)_{\lambda=\lambda_0} \\
 & + \frac{(\lambda - \lambda_0)^3}{3!} \left(\frac{\partial^3 L_b(\lambda, T)}{\partial \lambda^3} \right)_{\lambda=\lambda_0} + \dots
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

Se define λ_0 como longitud de onda promedio de la respuesta espectral R_λ y se tiene la siguiente expresión:

$$\lambda_0 = \frac{\int_0^\infty \lambda R(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty R(\lambda) d\lambda}
 \tag{21}$$

Tratando el campo de radiación como ondas estacionarias, Wien derivó una fórmula para la distribución espectral de la radiación de cuerpo negro en 1896, llamada Ley de Wien, que es aplicable a la región de onda corta del espectro de cuerpo negro, pero se desvía hacia longitudes de onda largas. En los siguientes años, Planck intentó derivar rigurosamente la distribución de cuerpo negro y finalmente lo logró en 1900, utilizando la entropía estadística para obtener la

energía media de un oscilador. La contribución más importante de este trabajo fue la suposición contra-intuitiva de las energías discretas ($h\nu$) que el oscilador podría poseer. También en 1900, Rayleigh usó el teorema de la equiparación para mostrar que la emisión de cuerpo negro debe ser proporcional directamente a la temperatura, pero inversamente a la cuarta potencia de longitud de onda. Jeans obtuvo una expresión más completa en 1905. La fórmula de Rayleigh-Jeans era aplicable a temperaturas suficientemente altas y longitudes de onda largas, donde la Ley de Wien falló, pero estaba en desacuerdo con los experimentos en longitudes de onda cortas. (Zhang, Tsai, & Machin, 2009)

Al graficar la distribución de Planck para la radiación de un cuerpo negro en el vacío, ésta tiene un pico y se acerca a cero en longitudes de onda extremadamente cortas. Al derivar la función de Planck e igualarla a cero, se obtiene la Ley de Desplazamiento de Wien:

$$\lambda_{\text{máx}}T = c_3 \quad (22)$$

Donde $\lambda_{\text{máx}}$ es la longitud de onda correspondiente al pico radiante y c_3 es conocida como la tercera constante de radiación de Planck. Se puede observar en (22) que el pico de máxima emisión se desplaza hacia longitudes de onda menores a medida que la temperatura aumenta.

La sig. ecuación de la ley de Planck para la radiación de un cuerpo negro, considerando $L_{b,\lambda}d\lambda = -L_b, \nu d\nu$ la radiación espectral de un cuerpo negro en términos de longitud de onda se puede escribir:

$$L_{b,\lambda}(\lambda, T) = \frac{c_{1L}}{\lambda^5 \left(e^{c_2/\lambda T} - 1 \right)} \quad (23)$$

donde $c_{1L} = 2hc_0^2$ es la primera constante de radiación para radiancia espectral y $c_2 = hc_0/k$ es la segunda constante de radiación. Estrictamente hablando, la cavidad debe ser evacuada, porque cualquier medio, excepto el vacío, es dispersivo y la velocidad de la luz depende de la frecuencia.

En el límite de la longitud de onda larga, cuando $c_2/\lambda T \ll 1$, desde $e^x - 1 \approx x$ para $x \ll 1$, el RHS (Right-Hand Side) de (23) se aproxima así:

$$L_{b,\lambda}(\lambda, T) \approx \frac{c_{1L}T}{c_2\lambda^4} \quad (24)$$

Denominándose a (24) como la fórmula de Rayleigh-Jeans. En el límite de las longitudes de onda largas, la radiación espectral es directamente proporcional a la temperatura. La fórmula de Rayleigh-Jeans falla conforme la longitud de onda es reducida y se acerca al pico de emisión en la curva del cuerpo negro y en particular en la región de longitudes de onda cortas, dado que la ecuación de Rayleigh-Jeans predice una densidad de energía infinita en longitudes de onda iguales a cero. Lo cual es claramente una falla en la teoría para reflejar con exactitud la física subyacente y por eso se le llama "catástrofe ultravioleta".

En longitudes de onda cortas, cuando $c_2/\lambda T \gg 1$, el RHS de (23) puede ser aproximado por la denominada Ley de Wien:

$$L_{b,\lambda}(\lambda, T) = \frac{c_{1L}}{\lambda^5 e^{c_2/\lambda T}} \quad (25)$$

La importancia de esta ley recae en el hecho de que con ella se pueden obtener aproximadamente resultados correctos sobre todos los $\lambda = \lambda_{\text{máx}}$, con un error relativo de 0.7 %. Por lo tanto, para diversas aplicaciones industriales, la Ley de Wien es una excelente aproximación. Esta ley siempre predice la radiancia espectral. Cuando $\lambda > \lambda_{\text{máx}}$, el error empieza a aumentar; hacia longitudes de onda largas, esta ley se aproxima asintóticamente a $c_{1L}\lambda^{-5}$ y se vuelve independiente de la temperatura, lo cual es físicamente incorrecto. (Zhang, Tsai, & Machin, 2009)

Usando los beneficios de la Ley de Wien, es posible sustituir (21) en (20) y obtener una aproximación a la ley de Planck, obteniendo una serie que se presenta hasta cuarto orden en $c_2/\lambda_0 T$,

$$\begin{aligned}
 S(T) = & \left(\int_0^{\infty} R(\lambda) d\lambda \right) \frac{c_1}{\lambda_0^5} \exp\left(\frac{-c_2}{\lambda_0 T}\right) \\
 & \times \left[\left(1 + \frac{15\mu_2}{\lambda_0^2} - \frac{35\mu_3}{\lambda_0^3} + \frac{70\mu_4}{\lambda_0^4} \dots \right) \right. \\
 & - \left(\frac{6\mu_2}{\lambda_0^2} - \frac{21\mu_3}{\lambda_0^3} + \frac{56\mu_4}{\lambda_0^4} \dots \right) \left(\frac{-c_2}{\lambda_0 T} \right) \\
 & + \frac{1}{2} \left(\frac{\mu_2}{\lambda_0^2} - \frac{7\mu_3}{\lambda_0^3} + \frac{28\mu_4}{\lambda_0^4} \dots \right) \left(\frac{-c_2}{\lambda_0 T} \right)^2 \\
 & + \frac{1}{6} \left(\frac{\mu_3}{\lambda_0^3} - \frac{8\mu_4}{\lambda_0^4} \dots \right) \left(\frac{-c_2}{\lambda_0 T} \right)^3 \\
 & \left. + \frac{1}{24} \left(\frac{\mu_4}{\lambda_0^4} \dots \right) \left(\frac{-c_2}{\lambda_0 T} \right)^4 + \dots \right],
 \end{aligned} \tag{26}$$

Teniendo a c_1 y c_2 como la primera y segunda constante de Planck respectivamente. Las cantidades μ_i son los momentos centrales de la respuesta espectral y se obtiene:

$$\mu_i = \frac{\int_0^{\infty} (\lambda - \lambda_0)^i R(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} R(\lambda) d\lambda} \tag{27}$$

La respuesta espectral puede tener diferentes tipos de distribuciones, entre los que podemos mencionar: Rectangular, Triangular, Gaussiana, en función de dos deltas y triangular sesgada. Considerando los primeros cuatro momentos centrales dados en el FWHM (Por sus siglas en inglés – Full Width at Half Máximum), con μ_1 idénticamente a cero, considerando la misma media y varianza.

Si se considerara la distribución de la respuesta espectral con base a probabilidades, entendiendo que es igualmente probable para μ_i tomar cualquier valor dentro del intervalo, sería posible asignarle a la respuesta espectral una distribución uniforme o rectangular de valores posibles, ² como se muestra en la [Figura 1](#).

² Esta consideración se basa en la recomendación de la norma NMX-CH-140-IMNC: Vigente, Guía para la expresión de la Incertidumbre en las mediciones, en el punto 4.3.7 se indica que "...Si no existe

$$\begin{aligned} \mu_2 &= \frac{FWHM^2}{12} = \sigma^2 \\ \mu_3 &= 0 \end{aligned} \tag{28}$$

$$\mu_4 = \frac{FWHM^4}{80} = \frac{9\sigma^4}{5}$$

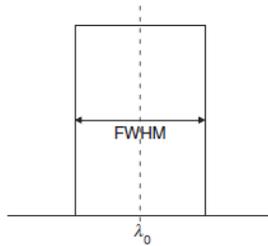


Figura 1. Distribución rectangular (Saunders & White, 2003)

donde σ^2 y σ^4 son valores de momentos centrales.

Sin embargo, al analizar gráficos de diferentes respuestas espectrales, en diferentes longitudes de onda y anchos de banda, se observa que la respuesta espectral no es rectangular y que su distribución varía dentro del infrarrojo, pudiendo observarse diferentes distribuciones como se muestra en las [Figuras: 2, 3, 4 y 5](#): (Heitronics Infrarot Messtechnik GmbH; 2014)

un conocimiento específico acerca de los posibles valores de X_i dentro del intervalo, uno puede únicamente suponer que es igualmente probable para X_i tomar cualquier valor dentro del intervalo (una distribución uniforme o rectangular de valores posibles). Entonces X_i , la esperanza o el valor esperado de X_i , es el punto medio del intervalo, $X_i = (\alpha_- - \alpha_+)/2$, con varianza asociada:

$$\mu^2(x_i) = (\alpha_+ - \alpha_-)^2/12$$

Si la diferencia entre los límites $(\alpha_- - \alpha_+)$, se denota por 2α , entonces la ecuación previa se convierte en:

$$\mu^2(x_i) = \frac{\alpha^2}{3} \dots "$$

a) Dentro del intervalo de $(0.75 \text{ a } 5) \mu\text{m}$ se observa entre triangular y gaussiana.

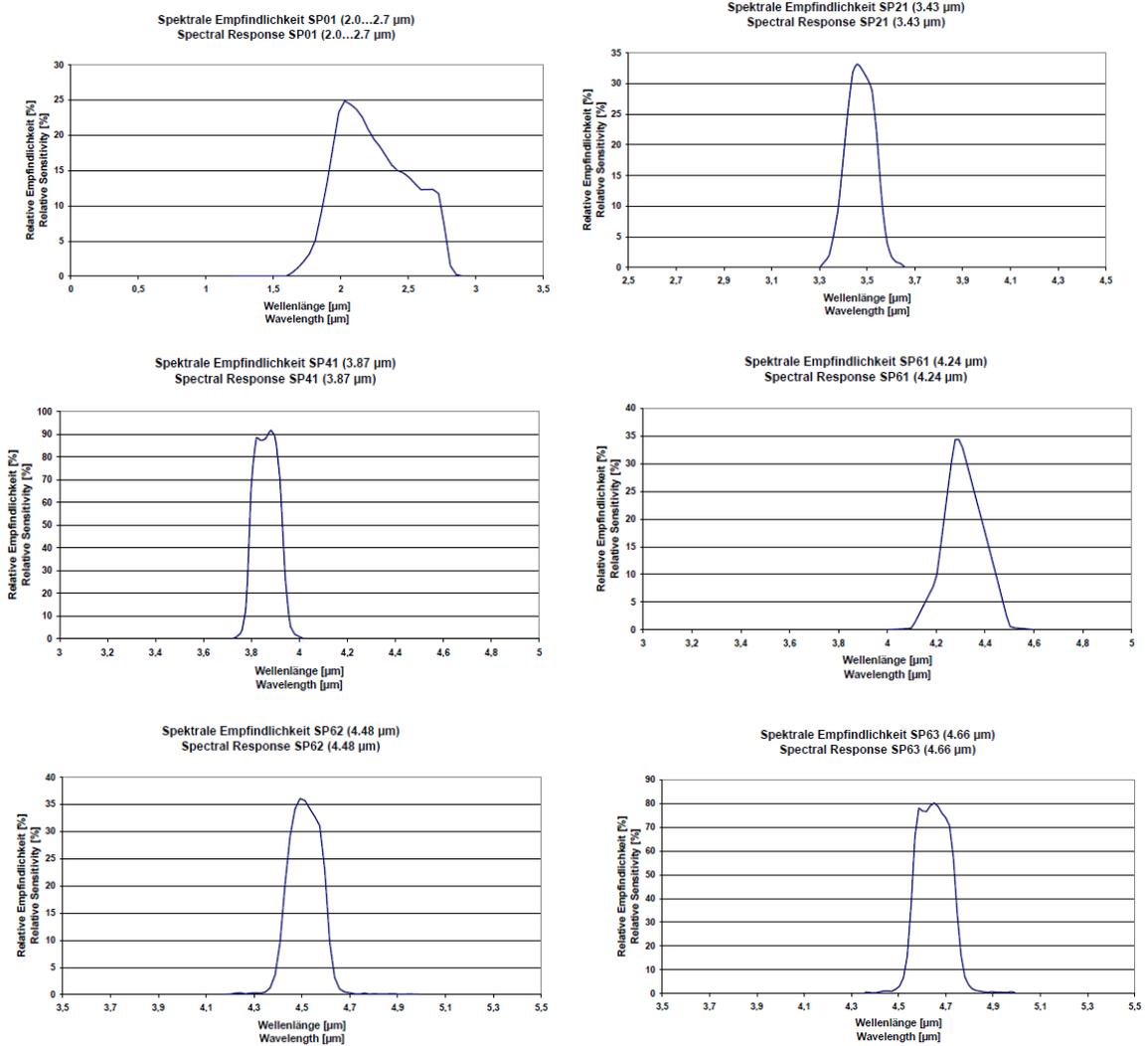


Figura 2. Respuesta espectral en una longitud de onda de $(0.75 \text{ a } 5) \mu\text{m}$: Triangular y gaussiana (Heitronics Infrarot Messtechnik GmbH, 2014)

b) Dentro del intervalo del $(5 \text{ a } 5.5) \mu\text{m}$ y $(7.5 \text{ a } 25) \mu\text{m}$ se observa gaussiana, pero en intervalos pequeños.

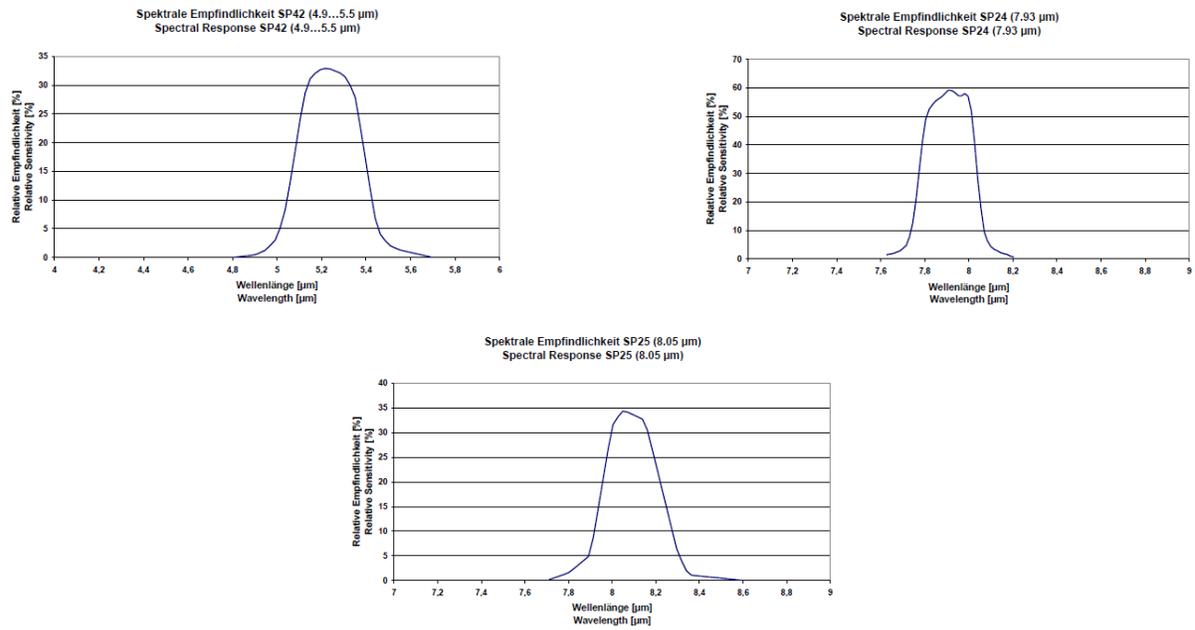


Figura 3. Respuesta espectral en una longitud de onda de (5 a 5.5) μm: Gaussiana en intervalos pequeños.
(Heitronics Infrarot Messtechnik GmbH;, 2014)

c) Dentro de la longitud de onda (7.5 a 25) μm se observa rectangular aunque con una meseta irregular, pero en intervalos medianos.

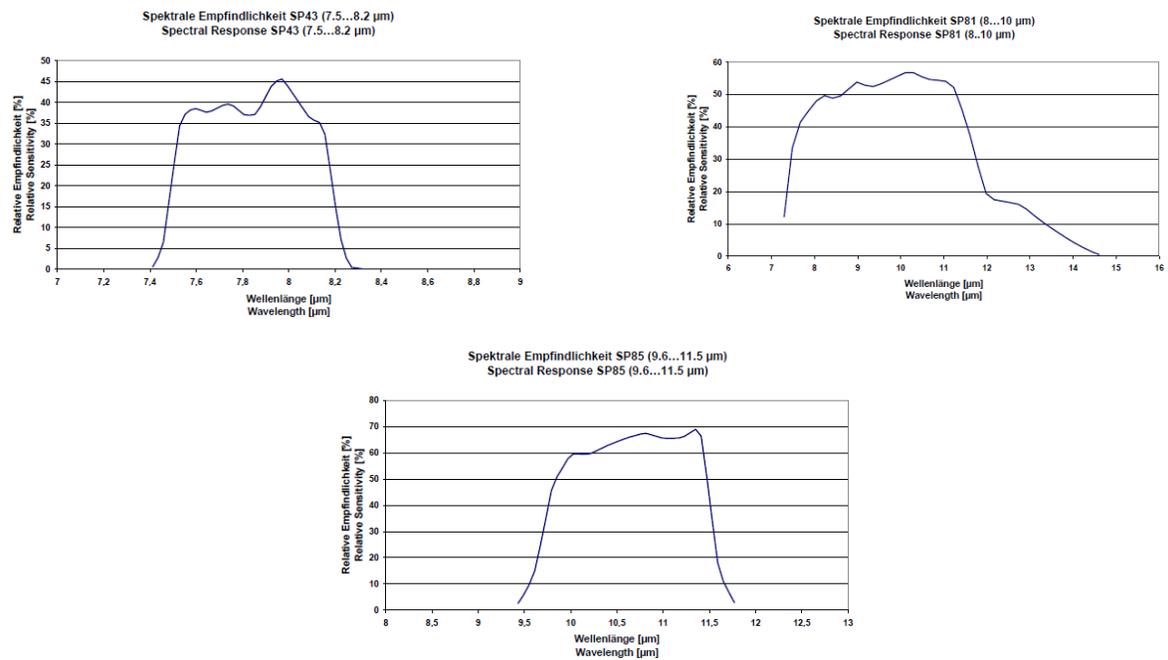


Figura 4. Respuesta espectral en una longitud de onda de (7.5 a 25) μm: Rectangular con una meseta irregular
(Heitronics Infrarot Messtechnik GmbH;, 2014)

d) Dentro del intervalo de $(7.5 \text{ a } 25) \mu\text{m}$ se observa triangular irregular en intervalos grandes.

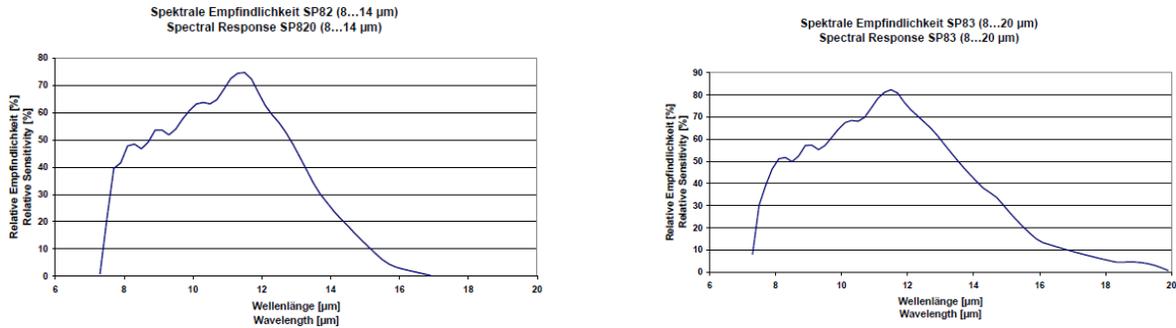


Figura 5. Respuesta espectral en una longitud de onda de $(7.5 \text{ a } 25) \mu\text{m}$: Triangular irregular en intervalos grandes (Heitronics Infrarot Messtechnik GmbH;, 2014)

De estos diferentes gráficos, se puede concluir que la forma o la distribución de la respuesta espectral $R(\lambda)$:

- Depende del ancho de banda.
- Depende de la longitud de onda.
- Su distribución tiene una variación espectral dentro de la zona NIR.
- Variará conforme la marca y modelo del termómetro de radiación.

Este método de aproximación se puede emplear en termometría de radiación y sus parámetros están directamente relacionados con la respuesta espectral del termómetro de radiación. Con anchos de banda suficientemente estrechos, se puede obtener una ecuación de interpolación totalmente caracterizada por dos cantidades conocidas: longitud de onda media y la varianza de la respuesta espectral (independientemente de la forma de la respuesta espectral). Habiendo establecido esta relación, es posible determinar los valores de los parámetros a través de cualquier combinación de mediciones de respuesta espectral y puntos fijos. De esta manera, la ecuación relaciona la señal del termómetro con la temperatura, unificando las metodologías para realizar la temperatura absoluta, utilizando el formalismo de la EIT-90 (Pavese, Molinar Min Beciet, & H. Preston, 1997) o por interpolación a través de puntos fijos. Dando como resultado, un método

práctico y eficiente para determinar la temperatura, (Saunders & White, 2003) principalmente para laboratorios primarios.

Para que este termómetro pueda ser calibrado mediante este modelo, es necesario que el fabricante proporcione su respuesta espectral R_λ .

2.2.3. Modelo de Cárdenas-Méndez

La temperatura de radiancia (de una superficie) (Witt & Incropera, 1988) es igual a la temperatura de un cuerpo negro que tiene el mismo valor de radiancia que el valor de la radiancia de la superficie, sobre un intervalo espectral dado.

Si una superficie tiene un valor de temperatura T , y un valor de radiancia espectral $L_{\lambda,s}$, que es función de T , entonces la temperatura de radiancia T_{RAD} de la superficie, en el intervalo de longitudes de onda λ_1 y λ_2 de acuerdo con la definición, está dada por:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda,b}(T_{RAD})d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda,s}(T)d\lambda \quad (29)$$

El modelo físico de un termómetro de radiación empieza considerando un detector que al recibir la radiación electromagnética proveniente de una superficie, que tiene un valor de temperatura T , da una señal eléctrica (corriente, diferencial de potencia, etc) proporcional a la cantidad de radiación. De manera general, la señal que se obtiene del detector muestra una curva tipo "S" como función de la radiación que recibe. (Cárdenas García, Diplomado en termometría de radiación, Módulo 2, Medición, 2018)

Utilizando la parte lineal de la curva tipo "S" se puede cumplir la sig. ecuación:

$$S(T) \propto \int_0^{\infty} R_{\lambda,DET} L_\lambda(T) d\lambda \quad (30)$$

$R_{\lambda,DET}$ es la respuesta espectral del detector.

La superficie de un detector recibe toda la radiación electromagnética de su hemisferio de visión. Típicamente, la superficie que se desea medir sólo ocupa una porción del hemisferio de visión del detector, por lo que se restringe el campo de visión con aperturas, lentes y/o espejos. De esta manera, se controla el intervalo de longitudes de onda de la radiación que llega al detector.

Tomando en cuenta lo antes mencionado, la ecuación del termómetro de radiación lineal cumple la siguiente igualdad:

$$S(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda} L_{\lambda}(T) d\lambda \quad (31)$$

Siendo R_{λ} la respuesta espectral del termómetro de radiación, que incluye: al detector, el filtro y todos los demás elementos, así como la parte geométrica relacionada con el campo de visión y un factor de conversión que permite que la señal S tenga las unidades eléctricas adecuadas.

Al usar el concepto de temperatura de radiancia:

$$S(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda} L_{\lambda,b}(T_{RAD}) d\lambda \quad (32)$$

Una primera aproximación se obtiene con el modelo de Cárdenas-Méndez. (Cárdenas García & Méndez Lango, Use of Radiometrically Calibrated Flat-Plate Calibrations in Calibration of Radiation Thermometers, 2015)

$$S(T) = R \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda,b}(T_{RAD}) d\lambda \quad (33)$$

“... Considerando que R_{λ} también es diferente de cero, en un rango de longitud de onda λ_1 y λ_2 , donde en la mayoría de los casos se hace una suposición razonable para lecturas directas de temperaturas bajas con IRTs...” (Cárdenas García, Diplomado en termometría de radiación, Módulo 2, Medición, 2018) relaciona dos magnitudes: La señal eléctrica S , que se obtiene del termómetro al medirla y la temperatura de radiancia de una superficie T_{RAD} .

Con (33) y considerando que de (19) $T = T_{RAD}$ se obtiene el modelo de Sakuma-Hattori, evitando así, el uso de integrales y facilitando la estimación de la incertidumbre:

$$R \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda,b}(T_{RAD})d\lambda = \frac{C}{\exp\left(\frac{c_2}{AT_{RAD} + B}\right) - 1} \quad (34)$$

Donde A, B, C son parámetros que dependen de las características del termómetro de radiación a calibrar y se renombran como A_c, B_c y C_c , de esta manera se simplifica y se considera la ecuación del termómetro de radiación lineal como:

$$S(T) = \frac{C_c}{\exp\left(\frac{c_2}{A_c T_{RAD} + B_c}\right) - 1} \quad (35)$$

De (35) se despeja T_{RAD} obteniéndola en función de la señal, S , útil cuando el **termómetro de radiación despliega valores de S:**

$$T_{RAD} = \frac{c_2}{A_c \ln\left(\frac{C_c}{S} + 1\right)} - \frac{B_c}{A_c} \quad (36)$$

Ahora bien, la mayoría de los termómetros de radiación de uso industrial, no despliegan valores de señal, S sino valores de T_{TR} , para lo cual se utiliza la aproximación de Saunders-White para simular las señales:

$$S(T_{TR}) = \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{A_{SW}T_{TR} + B_{SW}}\right) - 1} \quad (37)$$

Donde:

$$A_{SW} = \left(\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}\right) \left[1 - 2\left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2}\right)^2\right] \quad (38)$$

$$B_{SW} = \left(\frac{c_2}{6}\right) \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2}\right)^2 \quad (39)$$

Sustituyendo (37) en (36), se obtiene T_{RAD} **en función de la temperatura desplegada por el termómetro de radiación T_{TR}** , la cual más adelante se identificará como T_{IBC} :

$$T_{\text{RAD}} = \frac{c_2}{A_C \ln \left\{ C_C \left(\exp \left(\frac{c_2}{A_{\text{sw}} T_{\text{TR}} + B_{\text{sw}}} \right) - 1 \right) + 1 \right\}} - \frac{B_C}{A_C} \quad (40)$$

Siendo A_C, B_C, C_C los parámetros que dependen de las características del termómetro de radiación a calibrar.

Este modelo toma como base el documento Técnico del CENAM para considerar el número de magnitudes de influencia que se involucran en la calibración de los termómetros de radiación y adiciona "M" incertidumbres más, correspondientes al modelo matemático y a las atribuciones propias del laboratorio. De tal forma que considera mínimo 19 magnitudes para la estimación de la incertidumbre, de u_1 a u_M . (Cárdenas García, Magnitudes de influencia en la calibración de termómetros de radiación debajo del punto fijo de la plata, 2018)

Las magnitudes de influencia x_1 a x_{20} se enlistan en la [Tabla 1](#), donde las abreviaturas utilizadas son: TP (termómetro patrón), IBC (termómetro de radiación bajo calibración) y FR (fuente de radiación). Se considera que a partir de x_{21} se toman en cuenta aquellos factores propios del laboratorio, es decir, es la incertidumbre tropicalizada al propio laboratorio. Pudiendo llegar hasta la magnitud No. x_M . Algunas incertidumbres que se podrían considerar como propias del laboratorio son: Iluminación, corrientes de aire, alineación en el arreglo experimental, mediciones con aire acondicionado, entre otros.

Para poder cuantificar todas las incertidumbres propias del laboratorio x_M , es necesario que el personal del laboratorio haga las pruebas técnicas suficientes o requeridas, con la finalidad de encontrar un valor para dichas incertidumbres, establecer si se pueden considerar como constantes (es decir, siempre valdrán lo mismo) y considerar dicho valor en la estimación de la incertidumbre, es importante observar que pudiesen tener una aportación en centésimas, milésimas, etc, sin embargo no valen "0.00", por lo tanto formarían parte integral del modelo de estimación de incertidumbre del laboratorio.

Tabla 1. Magnitudes de influencia para la estimación de incertidumbre por el modelo Daniel Cárdenas, CENAM.

Componente	Magnitud
x_1	Promedio de lecturas del TP
x_2	Resolución de las lecturas del TP
x_3	Propagación del error de calibración del TP
x_4	Estabilidad de largo plazo del TP
x_5	Emisividad efectiva de la FR
x_6	Radiación reflejada en el área efectiva de la FR proveniente del ambiente
x_7	Intercambio de energía entre el área efectiva de la FR y el medio ambiente
x_8	Uniformidad espacial en temperatura del área efectiva de la FR
x_9	Estabilidad a corto plazo en temperatura del área efectiva de la FR
x_{10}	Efecto del tamaño de la fuente del IBC
x_{11}	No linealidad del IBC
x_{12}	Temperatura de referencia del detector del IBC
x_{13}	Cambio en la respuesta de los componentes electrónicos y ópticos del IBC debida a los cambios de temperatura del medio ambiente
x_{14}	Atenuación de la radiación que recibe el IBC debida a la absorción atmosférica
x_{15}	Razón de ganancia de los amplificadores del IBC
x_{16}	Ruido de la señal del IBC
x_{17}	Promedio de las lecturas del IBC
x_{18}	Resolución de las lecturas del IBC
x_{19}	Repetibilidad del error del IBC
x_{20}	Modelo matemático implementado por el laboratorio
x_M	Incertidumbre tropicalizada al propio laboratorio

(Cárdenas García, Magnitudes de influencia en la calibración de termómetros de radiación debajo del punto fijo de la plata, 2018)

2.2.4. Modelo de Cravioto Urbina

Este modelo toma relevancia por el hecho de que es un modelo matemático que ha sido empleado y validado en el laboratorio de metrología secundario en Temperatura de no contacto de [Kapter®](#).

[Kapter®](#) es un centro de Ingeniería de base tecnológica que está ubicado en Antiguo Camino a Copalita No. 2877, Col. Villas del Valle, en Zapopan, Jalisco, México, CP. 45220 y su sitio web es: www.kapter.mx. En este centro de ingeniería se

desarrolla Innovación y Tecnología, siendo el único fabricante en México de tecnología en radiación infrarroja para medición y calibración, toda ella patentada y con marca registrada Dauik®, como: Fuentes de radiación con cavidad de cuerpo negro y de placa radiante que trabajan en intervalos de temperatura de (-20 a +1000) °C, Sistemas de posicionamiento lineales y radiales, así como tecnología específica que resuelve problemáticas concretas a través de la radiación infrarroja en diferentes ramos.

Esta versatilidad de [Kapter®](#), le ha permitido ser el único laboratorio de temperatura de no contacto en México que ha fabricado su propio equipamiento, logrando con ello tener una amplia gama de fuentes de radiación y sistemas de posicionamiento, que le permiten ofrecer servicios de medición acorde a las necesidades de los usuarios. El modelo Cravioto Urbina ha sido utilizado en los laboratorios de Kapter® por más de 5 años y ha sido utilizado para calibrar más de 250 equipos de medición como: Termómetros de radiación y cámaras termográficas.

Este modelo de JLCU (Cravioto Urbina, 2007), es una propuesta de modelación matemática de termómetros de radiación para intervalos de longitud de onda y temperatura predefinidos. Plantea el uso de una ecuación polinomial de cuarto orden [\(41\)](#) para obtener la radiancia en una temperatura dada, así como su derivada. [\(41\)](#) puede ser invertida para obtener de ella la Temperatura en una radiancia dada [\(43\)](#), así como su derivada.

$$L_B(T) = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + a_4T^4 \quad (41)$$

$$\frac{dL_B(T)}{dT} = a_1 + 2a_2T + 3a_3T^2 + 4a_4T^3 \quad (42)$$

$$T(L_B) = b_0 + b_1L + b_2L^2 + b_3L^3 + b_4L^4 \quad (43)$$

$$\frac{dT(L_B)}{dL} = b_1 + 2b_2L + 3b_3L^2 + 4b_4L^3 \quad (44)$$

donde: L_B es la radiancia de la fuente, T es la temperatura de la superficie radiante de la fuente, a & b son los coeficientes del polinomio.

Este modelo matemático propone una modelación en una herramienta computacional, en la cual se modela la radiancia, L_B a través de la temperatura de referencia medida, T basado en la Ley de Planck.

Dado que la Ley de Planck aplica para cuerpos negros teóricos, se determina la temperatura corregida a una emisividad dada, en función de la radiancia, L_B a la temperatura, T medida, pudiendo medir con ello, en la práctica, un diferencial, ΔL_B , afectado por la emisividad, ε .

$$T_{\text{corregida}}(\varepsilon) = T \left(L_B + \frac{\Delta L_B}{\varepsilon} \right) \quad (45)$$

donde:

$T_{\text{corregida}}(\varepsilon)$ = Temperatura de referencia en K, corregida a emisividad, ε

ε = Emisividad efectiva de la fuente de radiación

L_B = Radiancia de la fuente a la temperatura de la junta de referencia

ΔL = Diferencia de radiancia generado entre la temperatura de referencia a la del objeto a medir

Este modelo toma como base la norma ASTM E2847-14 (ASTM, 2014) para determinar el número de magnitudes de influencia que se involucran en la calibración de los termómetros de radiación y adiciona un par más correspondientes al modelo matemático, de tal forma que considera 14 magnitudes para la estimación de la incertidumbre, de u_1 a u_{14} . Estas magnitudes de influencia se enlistan en la [Tabla 2](#)

Tabla 2. Magnitudes de influencia para la estimación de incertidumbre por el modelo Polinomial (JLCU)

<i>U1: Temperatura</i>
<i>U2: Emisividad de la Fuente</i>
<i>U3: Radiación amb. Reflejada</i>
<i>U4: Intercambio de calor de la fuente</i>
<i>U5: Cond. Ambiental Background</i>
<i>U6: Uniformidad Fuente</i>
<i>U7: SSE - Efecto del Tamaño de la fuente</i>
<i>U8: Temperatura Background</i>
<i>U9: Radiación extraviada</i>
<i>U10: Ruido ambiental</i>
<i>U11: Resolución</i>
<i>U12: Repetibilidad en las mediciones</i>
<i>U13: Diferencial de Energía (L)</i>
<i>U14: Modelo</i>

(Cravioto Urbina, 2007)

2.2.5. Argumentos de pertinencia de uso de los modelos

Se parte de las ecuaciones derivadas de la Ley de Planck estudiadas en este [capítulo 2](#) y de lo establecido en la Guía Técnica de CENAM vigente, (Cárdenas García & CENAM, Guía Técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre en la calibración de termómetros de radiación, 2018) en donde se indica que: **“El modelo de medición debe estar basado en la ley de radiación de Planck tal como se establece en la EIT-90”** y éste debe ser derivado de cualquiera de las ecuaciones de un termómetro de radiación: monocromático, de banda finita o de radiación total. Y si el modelo tiene parámetros ajustables, éstos deben tener significado físico.

Dicho esto, se puede decir que se tienen tres opciones para calibrar un termómetro de radiación que proporciona valores de señal, S y que tiene fundamento físico.

Opción 1. Usar la ecuación integral completa – **mostrada en (1)**

Este modelo involucra las magnitudes de L y S y por lo tanto, **no se puede emplear porque ninguna de las dos es conocida por el laboratorio.**

Opción 2. Usar una ecuación sin integral – **mostrada en (19)**

El modelo involucra las magnitudes de S y T y se deben determinar las constantes A, B, C que dependen de las características del termómetro de radiación, lo cual implica involucrar al menos tres puntos de calibración para su utilización. **La ventaja de este método es que no se requiere tener caracterizado el IBC. Se puede usar cuando el termómetro a calibrar despliega valores de, S .**

Opción 3. Usar una ecuación integral más simple – **mostrada en (33).**

El modelo asume que R_λ es constante, involucra las magnitudes de S y T_{RAD} y requiere uno o dos puntos de calibración para su utilización. Es factible para ser usada por un laboratorio de calibración, ya sea que el termómetro a calibrar despliegue valores de S o T .

Conclusiones para su posible uso en un laboratorio de calibración secundario:

- Si se tuviera completamente caracterizado el IBC, se pudiera conocer su **respuesta espectral**. Desafortunadamente casi nunca se cuenta con esos datos, ni acceso experimental a ellos. **Por eso, se trabaja con las ecuaciones de aproximación y el precio que se paga por ello es aumentar el número de puntos de calibración.**
- Como es **más sencillo aumentar el número de puntos de calibración, que caracterizar el termómetro** de radiación a calibrar (IBC), es más útil utilizar la aproximación de **Sakuma-Hattori**. La desventaja que se tiene con este modelo, es que éste relaciona la señal, S y la temperatura, T y la mayoría de los termómetros de radiación comerciales, no proporcionan valores de señal, sino de temperatura; sin embargo, **si el termómetro de radiación a calibrar proporciona dicha información, se puede emplear el método de manera directa.**

- El modelo de **Saunders-White** mostrado en el punto [2.2.2](#) sería de utilidad si los fabricantes de termómetros de radiación comerciales proporcionaran siempre **que la respuesta espectral R_λ** del termómetro a calibrar, sin embargo, en la mayoría de los casos, sólo ocurre en termómetros de radiación grado laboratorio, por lo que no sería viable para un laboratorio de calibración secundario que ofrece servicios principalmente a la industria, quienes emplean termómetros de radiación de menores especificaciones y por lo tanto, carecen de una descripción detallada por parte del fabricante.
- Pese a que se ha implementado, validado y usado con éxito el modelo de Cravioto Urbina (Cravioto Urbina, 2007) en laboratorios de calibración secundarios, es un modelo matemático que no cumple con los requisitos establecidos en la Guía Técnica de CENAM vigente, lo cual se observa en la estructura de su modelo matemático planteado en [\(45\)](#), el cual no tiene una forma planckiana. Por lo tanto, no puede ser usado para la medición y calibración de termómetros de radiación, independientemente de los buenos resultados que se han obtenido de él.

Se han mostrado diversas alternativas de ecuaciones de aproximación y sin embargo, no es factible emplear solo una de manera directa, por lo que, para lograr calibrar un termómetro de radiación sólo con su información disponible, es preciso recurrir a una combinación entre ellas; **de la información que normalmente se conoce y es útil para su calibración es la longitud de onda, λ** . Considerando las tres opciones viables, tenemos que la [Opción 2](#) y la [Opción 3](#) son aproximaciones viables para un laboratorio de calibración secundario.

Dada esta problemática, **se considera la viabilidad de plantear un modelo matemático híbrido**, obteniendo de cada una de ellas sus beneficios y aprovechando sus características.

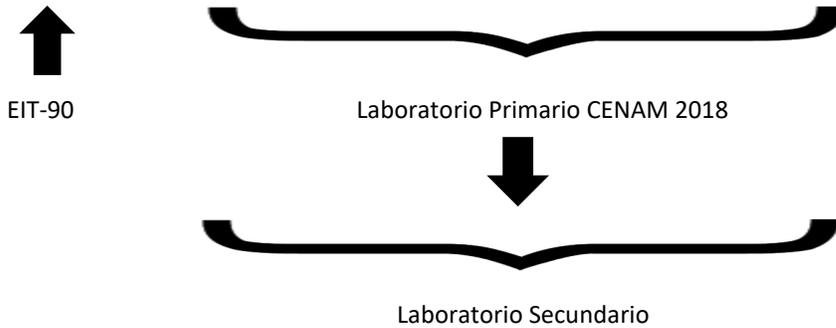
2.2.6. Planteamiento del Modelo Matemático Híbrido

Como se ha mostrado, existen una serie de ecuaciones de diversos investigadores que pudieran apoyar para modelar la ecuación de aproximación a ser usada por los laboratorios de calibración secundarios, sin embargo, su uso requiere una capacitación técnica muy especializada del personal que llevará acabo esta tarea. Por esta razón, se presenta esta sección, como una guía para ordenar las diferentes propuestas y llegar a "La ecuación de aproximación" que le permitirá al laboratorio modelar el comportamiento de un termómetro de radiación lineal.

En primer lugar, se evalúa la pertinencia de aplicar alguno de los modelos arriba mencionados o bien, de aquellos disponibles en la literatura y que están basados en fundamentos de la física, en la ley de Planck. Para poder elegir sobre la idoneidad del modelo, hay que conocer la información del IBC que tenemos disponible y así determinar la aplicabilidad de cada alternativa. Para mostrar esto de forma explícita y sintetizada, se desarrolló un **cuadro comparativo de los modelos de aproximación derivados de la Ley de Planck**, el cual se muestra en la [Tabla 3](#).

Tabla 3. Cuadro comparativo entre modelos de aproximación derivados de la Ley de Planck

MODELO FÍSICO	FUNDAMENTAL	Cárdenas-Méndez (es aproximación de Fundamental)	Sakuma-Hattori (es aproximación de CM)	SH Saunders-White (es aproximación de CM)
Ecuación del modelo	$S = c_{1L} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{R_{\lambda}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} d\lambda$	$S = R c_{1L} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} d\lambda$	$S = \frac{C}{\exp\left(\frac{c_2}{AT+B}\right) - 1}$	$S = \frac{C_{SW}}{\exp\left(\frac{c_2}{A_{SW}T + B_{SW}}\right) - 1}$
Método de solución para obtener S	Númérico	Númérico	Analítico	Analítico
Variables de entrada para obtener S	$\lambda_1, \lambda_2, R_{\lambda}, T$	$\lambda_1, \lambda_2, R, T$	A, B, C, T	$\lambda_1, \lambda_2, R, T$
Constantes	c_{1L}, c_2	c_{1L}, c_2	c_2	c_{1L}, c_2
Consideraciones	Se debe conocer R_{λ} en todo el intervalo de integración.	Si se conoce al menos una pareja (S,T), se puede obtener R.	Se requieren al menos tres parejas (S,T) para obtener los coeficientes.	Si se conoce una pareja (S,T) se puede obtener R y a partir de ello obtener los coeficientes de Saunders-White. Esta aproximación es útil para asignar señales a las temperaturas obtenidas con termómetros de radiación que no pueden proporcionar valores de señal. En ese caso, se acostumbra a tomar C_{SW} igual a 1.
Cálculo de T	Númérico (función implícita)	Númérico (función implícita)	$T = \frac{c_2}{A \ln\left(\frac{C}{S} + 1\right)} - \frac{B}{A}$	$T = \frac{c_2}{A_{SW} \ln\left(\frac{C_{SW}}{S} + 1\right)} - \frac{B_{SW}}{A_{SW}}$



(Cárdenas García, Cuadro comparativo entre modelos con aproximación a la Ley de Planck, 2021)

La [Tabla 3](#) es de utilidad porque muestra el modelo fundamental de la Ley de Radiación de Planck definido en la EIT 90 (H. Preston, 1990) –columna indicada con una flecha-, la forma en que ésta se puede resolver u obtener, sus variables de entrada para obtener la señal, S, las consideraciones que se deben tener para su implementación y la forma en que se obtiene la temperatura, T. En realidad, todos conceptos vistos previamente en el presente [Capítulo 2](#).

Y se hace una comparación entre el modelo fundamental de la Ley de Radiación de Planck con tres aproximaciones derivadas de éste: Modelo de Cárdenas-Méndez, el cual a su vez conlleva aproximaciones con el modelo de Sakuma-Hattori y el modelo de Saunders-White. Los cuales, para ser usados de manera directa, se deben emplear para calibrar termómetros de radiación que

desplieguen valores de S , y en su mayoría, son instrumentos de medición de alta exactitud y son calibrados principalmente por laboratorios primarios, para el caso de México nos estamos refiriendo al CENAM; aunque esto no excluye a que dichas actividades puedan ser realizadas por los laboratorios secundarios, ya que dependerá de su arreglo experimental. Ahora bien, como nuestro interés es poder utilizar uno de estos modelos en un laboratorio secundario, se realizan sustituciones, despejes, simplificaciones para poder emplearlas únicamente con la información disponible del termómetro bajo calibración (IBC), esto le dará cierta versatilidad al modelo, para poder manejar sus diferentes variables como entradas a las ecuaciones.

Tomando en cuenta lo establecido en la guía técnica de CENAM (Cárdenas García & CENAM, Guía Técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre en la calibración de termómetros de radiación, 2018) **sobre las características que debe tener el modelo de medición**, se mencionan **las siguientes ecuaciones** que describen a los diferentes tipos de termómetros de radiación:

1. Para termómetros de radiación monocromáticos, la radiancia que mide un termómetro de radiación es la radiancia espectral:

$$L_{\lambda}(T) = \frac{c_{1L}}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (46)$$

2. Para termómetros de radiación de banda finita, con respuesta espectral en el intervalo de λ_1 a λ_2 , la radiancia medida es:

$$L_{\lambda_1, \lambda_2}(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_{1L}}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} d\lambda \quad (47)$$

3. Para termómetros de radiación total, con respuesta espectral $\lambda \in [0, \infty)$ en el intervalo de λ_1 a λ_2 , la radiancia medida es:

$$L(T) = \int_0^{\infty} \frac{c_{1L}}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} d\lambda = \frac{\pi^4 c_{1L}}{15 c_2^4} T^4 \quad (48)$$

En general, el tipo de **termómetro de radiación más común a recibir** por un laboratorio de calibración secundario **es el de banda finita**, el cual se describe en [\(47\)](#) y por las variables de entrada disponibles, se observa la pertinencia de utilizar **el modelo de Cárdenas-Méndez (C-M), con las diferentes aproximaciones mostradas**. En caso de que se desee utilizar como fundamento la ecuación relacionada con un termómetro de radiación monocromático o total, se deben establecer las correspondientes consideraciones según [\(46\)](#) y [\(48\)](#) que los diferencian de [\(47\)](#).

Una vez establecido que **el modelo de Cárdenas-Méndez (C-M), con las diferentes aproximaciones es el modelo que servirá de soporte para el planteamiento del modelo matemático o ecuación de aproximación a utilizar en el laboratorio**, se introducen los siguientes **cinco conceptos generales**, que parten de la Ley de radiación de Planck **y que le servirán al lector de base para el planteamiento de su modelo**: (Cárdenas García & Rodríguez Arteaga, Diplomado en Termometría de Radiación, Módulo 1: Conceptos básicos, 2017), (Cárdenas García, Diplomado en Termometría de radiación, Módulo 3: Calibración, 2018)

- a) Temperatura de radiancia (de una superficie)
- b) Temperatura de radiancia (de un objeto) para la propagación de Incertidumbre
- c) Estimación de la temperatura de referencia de la fuente
- d) Mensurando
- e) Emisividad efectiva de la superficie radiante

El propósito de explicar a detalle estos conceptos, es:

- a) Determinar el valor de la radiancia espectral de un cuerpo negro al valor de una longitud onda λ dada.
- b) Calcular la temperatura de radiancia de una superficie, la cual se utilizará como la temperatura de referencia del laboratorio.
- c) Calcular la temperatura de radiancia de un objeto, que servirá para propagar la incertidumbre de medición a lo largo del intervalo de calibración, independiente del número de puntos en el que haya sido calibrado. Esto es útil una vez que el IBC es usado en sus aplicaciones cotidianas y no bajo condiciones de laboratorio controladas.
- d) Definir de manera explícita el mensurando para que una vez entendido, se pueda calcular con unidades consistentes.
- e) Calcular la emisividad efectiva de la superficie radiante, la cual es utilizada dentro del modelo matemático como en una de las magnitudes de influencia del modelo de incertidumbre.

Se explican a continuación para su mejor entendimiento:

a) Temperatura de radiancia (de una superficie):

Para estimar la **Temperatura de radiancia, T_{RAD} de una superficie**, es útil recurrir a una de las aproximaciones de **Saunders-White** (Saunders & White, 2003), la cual se encuentra dentro de la aproximación de Sakuma-Hattori; esto se sugiere en la expresión (49) que se deriva de (37), sustituyendo $S(T_{TR})$ por T_{RAD} , ya que representa una alternativa adecuada para la calibración de los termómetros de radiación comerciales que son recibidos por los laboratorios : (Cárdenas García, Diplomado en termometría de radiación, Módulo 2, Medición, 2018)

$$T_{RAD} = \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{A_{SW}T_{TR} + B_{SW}}\right) - 1} \quad (49)$$

donde la temperatura, T_{RAD} del termómetro de radiación, se relaciona con los coeficientes de Saunders-White A_{SW} y B_{SW} y la Temperatura desplegada por el termómetro de radiación T_{TR} , en donde se observa que A_{SW} y B_{SW} son parámetros sólo dependientes de la longitud de onda λ_1 y λ_2 y la segunda constante de Planck, c_2 y se calculan con las ecuaciones [\(38\)](#) y [\(39\)](#).

Así se puede conocer la **temperatura de Radiancia de una superficie**, T_{RAD} la cual se utilizará como la temperatura de referencia del laboratorio, sin necesidad de recurrir a la resolución de ninguna ecuación que contenga integrales y considerando que se cuenta sólo con la información del termómetro de radiación a calibrar.

b) Temperatura de radiancia (de un objeto) para la propagación de incertidumbre:

Aplicando la definición de temperatura de radiancia, T_{RAD} de una superficie igual a T , en el intervalo de longitudes de onda λ_1 y λ_2 , igualando [\(33\)](#) a [\(35\)](#) se obtiene la ecuación de aproximación Sakuma-Hattori y Cárdenas Méndez, como la ecuación del termómetro de radiación lineal:

$$R \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda,b}(T_{RAD}) d\lambda = \frac{C_C}{\exp\left(\frac{c_2}{A_C T_{RAD} + B_C}\right) - 1} \quad (50)$$

Recordando que A_C, B_C, C_C son parámetros que dependen de las características del termómetro de radiación, como se había mencionado previamente.

De [\(36\)](#) se obtiene la forma para calcular T_{RAD} , la cual será útil para calibrar un termómetro de radiación lineal que despliega valores de señal, S . Y a partir de [\(36\)](#) y [\(37\)](#) se obtiene la ecuación de aproximación para obtener la **temperatura de radiancia del objeto que se mide**, T_{RAD} , descrita en [\(40\)](#).

Para que una superficie que tiene temperatura, T y que está rodeada de, n fuentes de radiación, T_j el concepto de emisividad espectral nos permite calcular la radiancia, L : (Cárdenas García, Diplomado en termometría de radiación, Módulo 2, Medición, 2018)

$$L_{\lambda}(T) = \varepsilon_{\lambda}L_{\lambda,b}(T) + \sum_{j=1}^n g_j(1 - \varepsilon_{\lambda})L_{j,\lambda}(T_j) \quad (51)$$

Donde las g_j son factores geométricos tales que la suma de todos ellos cubre todo el campo de visión del termómetro de radiación, lo cual es útil para obtener la ecuación de medición que relaciona la señal S , la temperatura T , la emisividad espectral de una superficie ε_{λ} y la temperatura de los objetos que proporcionan la radiación de fondo, para ello, se sustituye (51) en (33) y se obtiene:

$$S(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda} \left[\varepsilon_{\lambda}L_{\lambda,b}(T) + \sum_{j=1}^n g_j(1 - \varepsilon_{\lambda})L_{j,\lambda}(T_j) \right] d\lambda \quad (52)$$

Tomando en cuenta las aproximaciones de Sakuma-Hattori se evita el uso de las integrales para conocer la señal, S la cual se iguala a la sumatoria de dos ecuaciones que involucran a, T y T_{AM} y ambas siendo afectadas por le emisividad efectiva, ε .

$$S(T) = \frac{\varepsilon C_C}{\exp\left(\frac{c_2}{A_C T + B_C}\right) - 1} + \frac{(1 - \varepsilon) C_C}{\exp\left(\frac{c_2}{A_C T_{AM} + B_C}\right) - 1} \quad (53)$$

Considerando el efecto del tamaño de la fuente, σ como un factor geométrico que también afecta a la señal, S y el concepto de temperatura de radiancia se despejan la temperatura, T que corresponde a la T de una superficie:

$$T = \frac{c_2}{A_C \ln \left[\frac{\frac{\varepsilon}{\exp\left(\frac{c_2}{A_C T_{RAD} + B_C}\right) - 1} + \frac{\sigma(1-\varepsilon)}{\exp\left(\frac{c_2}{A_C T_{AM} + B_C}\right) - 1} + 1}{\sigma} \right]} - \frac{B_C}{A_C} \quad (54)$$

La importancia de (54) es que proporciona un modelo matemático para calcular la temperatura de la superficie, T con trazabilidad metrológica. Lo cual se logra, si y sólo si, los valores de, T_{RAD} , T_{AM} , ε y σ son trazables y con ello se da cumplimiento en lo establecido en la EIT-90 (H. Preston, 1990) y para que el termómetro IBC pueda ser calibrado utilizando el modelo matemático (54), es deseable que el fabricante proporcione el intervalo del rango espectral de operación de su detector, para con ello conocer λ_1 y λ_2 .

c) *Estimación de la temperatura de referencia de la fuente:* (Cárdenas García, Diplomado en Termometría de radiación, Módulo 3: Calibración, 2018)

Para estimar esta **temperatura de referencia de la fuente** se utiliza la ecuación de **Sakuma-Hattori** con la aproximación de **Saunders-White**, en el intervalo de longitudes de onda del IBC y se considera la lectura de su indicador, T_{TR} como en (37).

Si el laboratorio utiliza un patrón del tipo de "contacto" el cual mide una temperatura termodinámica, requerirá utilizar una ecuación de aproximación para convertir esta temperatura termodinámica a temperatura de radiancia (55), con la finalidad de poder ser usada para calcular el mensurando. Para lograr esto, se define que:

$T_{RAD} = T_{Patrón}$ y T es la temperatura medida por el termómetro de contacto patrón.

Entonces, conociendo la emisividad efectiva de la fuente, la temperatura ambiental, el efecto del tamaño de la fuente y utilizando el concepto de temperatura de radiancia, se obtiene la siguiente igualdad:

$$\frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{A_{SW}T_{Patrón} + B_{SW}}\right) - 1} = \frac{\sigma\varepsilon_{\lambda_1\lambda_2}}{\exp\left(\frac{c_2}{A_{SW}T + B_{SW}}\right) - 1} + \frac{\sigma(1 - \varepsilon_{\lambda_1\lambda_2})}{\exp\left(\frac{c_2}{A_{SW}T_{AM} + B_{SW}}\right) - 1} \quad (55)$$

Reescribiendo (55) tenemos la ecuación de aproximación a ser usada por un laboratorio de calibración e inclusive por el usuario final y será considerada como el modelo matemático a emplear en la “Metodología de calibración Dauik® para Termómetros de radiación”

$$T_{Patrón} = \frac{c_2}{A_{SW} \ln \left[\frac{1}{\frac{\sigma\varepsilon_{\lambda_1\lambda_2}}{\exp\left(\frac{c_2}{A_{SW}T + B_{SW}}\right) - 1} + \frac{\sigma(1 - \varepsilon_{\lambda_1\lambda_2})}{\exp\left(\frac{c_2}{A_{SW}T_{AM} + B_{SW}}\right) - 1} + 1} \right]} - \frac{B_{SW}}{A_{SW}} \quad (56)$$

Teniendo que, $T_{Patrón}$ es la temperatura de radiancia de la fuente y está en función de:

T = Temperatura del termómetro de contacto patrón (previamente calibrado), asociada a la temperatura de la superficie radiante de la fuente.

T_{AM} = Temperatura ambiental tomada del termohigrómetro usado (previamente calibrado)

ε = Emisividad efectiva de la fuente (previamente estimada o medida)

σ = Efecto del tamaño de la fuente (previamente estimado o medido)

De igual manera que con (54), la importancia de (56) es que proporciona un modelo matemático para calcular la temperatura de radiancia de la fuente, $T_{Patrón}$ con trazabilidad metrológica. Lo cual se logra, si y sólo si, los valores de, T , T_{AM} , ε y σ son trazables y con ello se da cumplimiento en lo establecido en la EIT-90. (H. Preston, 1990).

d) Mensurando en la calibración de termómetros de radiación.

El mensurando es lo que se quiere medir, por lo tanto, se debe definir la ecuación con la que se va a calcular y para ello, es importante considerar el tipo de

información que es de utilidad para el usuario final. Partiendo de que normalmente en un certificado de calibración se reporta el error de medición que existe entre su termómetro de radiación y el termómetro patrón del laboratorio, se sugiere establecer el siguiente **Mensurando: El error de las indicaciones dadas por el termómetro T_{IBC} que se calibra, al medir la temperatura de radiancia, $T_{Patrón}$, de una fuente de radiación que se obtiene con un termómetro patrón.**

$$\text{Error de medición} = T_{IBC} - T_{Patrón} \quad (57)$$

Nótese que para poder hacer el cálculo del *Error de medición*, ambas temperaturas deben ser Temperaturas de radiancia, por eso la importancia de plantear en modelo matemático en [\(56\)](#).

e) *Emisividad efectiva de la superficie radiante:*

Este valor de emisividad efectiva es requerido para poder estimar la temperatura de referencia o temperatura patrón, $T_{Patrón}$ y dependiendo el tipo de radiador se considera de la siguiente manera:

Calibrador plano: La emisividad efectiva de la superficie se obtiene a partir de su emisividad espectral y de la respuesta espectral del IBC.

$$\text{Emisividad espectral: } \varepsilon_{\lambda,S}(T) = \frac{L_{\lambda,S}(T)}{L_{\lambda}(T)} \quad (58)$$

donde,

$L_{\lambda,S}(T)$ es la radiancia espectral de la superficie, debida a la radiación emitida por ésta, que se encuentra a la temperatura, T en kelvin, a una longitud de onda, λ dada.

$L_{\lambda}(T)$ es la radiancia espectral de un radiador de cuerpo negro calculada con la ley de radiación de Planck, a la misma temperatura, T de la superficie y la misma longitud de onda λ .

Cavidad: La emisividad efectiva se obtiene a partir de las dimensiones geométricas, la emisividad espectral, el gradiente de temperaturas de las superficies internas y de a respuesta espectral del IBC.

$$\text{Emisividad efectiva: } \varepsilon_{ef}(\varepsilon_{\lambda}, \lambda_1, \lambda_2, T) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda}(T) \cdot L_{\lambda}(T) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda}(T) d\lambda} \quad (59)$$

$$\varepsilon_{\lambda_1\lambda_2} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\varepsilon_{\lambda}}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T} - 1\right) \right]} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T} - 1\right) \right]} d\lambda} \quad (60)$$

donde,

$\varepsilon_{\lambda}(T)$ son los valores medidos de la emisividad espectral de la fuente, para longitudes de onda comprendidas entre λ_1 y λ_2 , a la temperatura, T en kelvin, de dicha fuente,

$L_{\lambda}(T)$ es la radiancia espectral calculada con la ley de radiación de Planck a la temperatura T que se usó para medir la emisividad espectral de la fuente,

λ_1 y λ_2 son las longitudes de onda que delimitan la región espectral de interés, siendo en la Guía técnica, (Cárdenas García & CENAM, Guía Técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre en la calibración de termómetros de radiación, 2018), la banda espectral de los termómetros de radiación que intervienen en la calibración y aplica tanto para el termómetro de radiación patrón, como para el termómetro a calibrar, IBC.

Con el modelo matemático establecido en (56) y sus ecuaciones derivadas y definidas en el presente [Capítulo 2](#), se desarrolla una hoja de cálculo para implementar el “*Modelo de calibración Dauik® para termómetros de radiación*”, en la cual, se calculan todas las operaciones matemáticas que están inmersas en la calibración para la determinación del error de medición y la estimación de la incertidumbre.

La hoja de cálculo se desarrolló en Excel, por ser un programa accesible y que nos permite realizar operaciones matemáticas avanzadas. Los objetivos de esta hoja de cálculo son: permitir agilizar los procesos de calibración, evitar errores y entregar resultados confiables.

La hoja de cálculo se desarrolló en [Kapter®](#) y cuenta con la siguiente estructura y con los siguientes contenidos:

- a) Cálculo de los coeficientes de Sakuma-Hattori y Saunders-White.
- b) Modelado de la gráfica de la propagación de incertidumbre.
- c) Modelación de la emisividad espectral en la longitud de onda en donde fue medida.
- d) Bitácora de mediciones previas, en donde se incluyen en 3 puntos de calibración: 3 repeticiones de mediciones de: Temperatura ambiental, Temperatura Background, Temperatura del detector, humedad relativa, medición a 2 diferentes emisividades y el ETF.
- e) Bitácora de mediciones de calibración, en donde se incluyen en todos puntos de calibración: 10 repeticiones de mediciones de: Temperatura ambiental, Temperatura Background, Temperatura del detector, humedad relativa, medición a 2 diferentes emisividades y el ETF (en aquellos puntos que no coincidieron con las mediciones previas).
- f) Estimación de incertidumbre por punto de calibración, en donde se consideran los cálculos para todas las magnitudes de influencia indicadas en el punto [2.2.3](#) por punto de calibración; en esta sección de la hoja de cálculo, los coeficientes de sensibilidad, se pueden calcular o no, dependiendo de las unidades, ya que éstos nos permiten homologar unidades. Una vez que se hace la estimación de la incertidumbre total por punto, ésta se expande con un factor de seguridad de $k = 2$ y este valor es el que se reporta en los resultados de la calibración.
- g) Se realiza un resumen de las mediciones de la calibración, de las variables a utilizar en el modelo, de las "M" incertidumbres de medida estimadas, de las condiciones ambientales que se tuvieron durante la calibración.

- h) Y por último se construye la tabla de resultados, en donde se hace explícito el mensurando, con su respectiva gráfica de error de medida vs. punto de calibración.

Algunas de las estimaciones de incertidumbre indicadas en [f\)](#), requieren calcular la derivada parcial de [\(56\)](#). Dichos cálculos matemáticos se hicieron mediante un programa de uso libre en internet: WolframAlpha, (WolframAlpha, 2021). Se sugiere que dicha hoja de cálculo, que va a corresponder al libro completo de la calibración, cuente con los datos de identificación del IBC para que ésta pueda ser rastreable en cualquier momento ya sea durante o posterior a la calibración.

2.3. ASPECTOS PRELIMINARES PARA LA CALIBRACIÓN DE UN TERMÓMETRO DE RADIACIÓN

Los laboratorios de ensayo y calibración basan sus operaciones en los lineamientos establecidos en la norma ISO/IEC17025: vigente (ISO, 2017) y llevan a cabo una serie de actividades preliminares a la calibración, que les permiten cumplir con los requisitos establecidos en dicha normatividad para su competencia, imparcialidad y operación coherente, así como conocer el IBC a calibrar.

En la parte operativa, algunas de las **actividades preliminares que realizan los laboratorios de ensayo y calibración se enlistan a continuación**, las cuales son enumerativas más no limitativas, ya que dependen del Sistema de Gestión de Calidad del laboratorio, así como de la magnitud en cuestión. Para termometría de no contacto, se mencionan las siguientes:

2.3.1. Recabar información del termómetro de radiación a calibrar (IBC)

Los laboratorios de calibración en esta materia reciben termómetros de radiación para su medición y/o calibración, contando con poca información del mismo, el laboratorio parte de la información que el fabricante proporciona en sus especificaciones técnicas. Dentro de la información disponible podemos mencionar la banda espectral o longitud de onda, las lecturas de temperatura del display y el intervalo de medición.

Se recomienda recabar la mayor información posible de diferentes fuentes:

- Fabricante: Intervalo de temperatura, rango espectral o intervalo de longitud de onda, tipo de control de emisividad (fija o ajustable), resolución óptica (D:S), distancia de enfoque, funciones de valores (mínimo, máximo, promedio), exactitud o precisión, respuesta espectral, % del efecto del tamaño de la fuente, accesorios.
- Cliente: Marca, Modelo, No. Serie, No. Identificación, puntos de calibración, valor de emisividad a calibrar (deseable $\varepsilon = 1$), datos para elaborar el certificado de calibración (Nombre y domicilio), condiciones especiales para la calibración y regla de decisión (en caso de aplicar).

Esto se ejemplifica en la [Figura 6](#), donde se muestran gráficamente tanto el termómetro de radiación, como sus accesorios, así como una tabla descriptiva de sus especificaciones técnicas, en donde se resalta la información más relevante para la calibración de un IBC.

Es deseable contar con la mayor cantidad de información posible, sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, esta información puede ser escasa, ya que no es proporcionada al por los fabricantes.



Descripción

Termómetro digital portátil Dual: Infrarrojo y de Contacto, 800 °C. con emisividad ajustable, conexión USB y Software. Modelo Fluke 568 Código: FLUKE-568

Características

Termómetro Digital Infrarrojo y de Contacto con Software 800°C - Fluke 568

- » Medidas de -40 °C a 800 °C (-40 °F a 1472 °F)
- » Acceso a funciones avanzadas mediante teclas y pantalla de matriz de puntos
- » Resolución de 50:1
- » Compatibilidad con termopar tipo K
- » Emisividad ajustable y tabla de materiales incorporada para medida de gran variedad de superficies
- » Captura de múltiples puntos de medida (hasta 99)
- » Dos niveles de retroiluminación
- » Alarmas visuales y acústicas para medidas fuera de los límites que haya establecido
- » Funciones de valores mínimos, máximos, diferenciales y promedio
- » Mediciones directas mediante sonda de contacto tipo termopar K de punta redondeada que se incluye con el termómetro
- » Precisión de medición del 1%
- » Interfaz en 6 idiomas
- » Software integrado FlukeView® Forms para análisis de datos y tendencias
- » Conexión USB
- » Amplíe la duración de la batería alimentando el termómetro digital a través de la conexión USB de un portátil
- >> Rango espectral de 8 a 14 μm

Figura 6. Ejemplo de especificaciones técnicas de fabricante y accesorios
(Fluke, 2013)

2.3.2. Verificar si los datos del IBC constituyen una desviación al modelo matemático

Dentro de lo establecido en la Guía Técnica de CENAM (Cárdenas García & CENAM, Guía Técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre en la calibración de termómetros de radiación, 2018), hay parámetros y especificaciones que se deben considerar dentro del modelo matemático, lo cual debe ser cumplido para considerarse “dentro del modelo”; en caso de que alguno de ellos no pudiese cumplirse por diversos factores propios o ajenos al laboratorio, se consideran como desviaciones al modelo.

A continuación, se presentan algunas posibles desviaciones que se pudieran presentar de manera cotidiana:

- a) Requerimiento: Realizar mediciones de temperatura de radiancia, es decir, ajuste de la emisividad $\varepsilon = 1$ (propio del IBC o por solicitud del usuario final)

Esto es una limitante para muchos de los termómetros comerciales, ya que un número considerable de ellos, cuentan con un filtro de densidad neutral, limitando su posibilidad de ajuste en emisividad, ya que esta es fija, principalmente en 0.90, 0.95 o 0.98. Este valor fijo de emisividad principalmente responderá a la aplicación del instrumento.

Por lo tanto, cualquier IBC que no pueda ser calibrado en $\varepsilon = 1$ representará una desviación al modelo y se deben realizar los ajustes al modelo para su debida compensación. Normalmente estos ajustes implican comprobaciones experimentales poder solventar dicha desviación.

- b) Requerimiento: Que el IBC trabaje en un intervalo de longitud de onda, λ igual a la λ del termómetro patrón o del recubrimiento de la fuente de radiación. (propio del IBC)

Al definir el alcance de calibración en un laboratorio, normalmente se acota la longitud de onda de trabajo λ , la cual se define principalmente por la longitud de onda del recubrimiento de la fuente de radiación o en caso de que el termómetro patrón sea de radiación, se limita a su longitud de onda, ejemplo: $\lambda_{\text{Termómetro patrón}} = (8 \text{ a } 14) \mu\text{m}$. Por lo tanto, el intervalo de la longitud de onda del IBC, λ_{IBC} debe coincidir con dicha λ para que todo el sistema "observe" lo mismo.

Si se da el caso de que no coincidan, ejemplo: $\lambda_{\text{IBC}} = (7.5 \text{ a } 13) \mu\text{m}$ esto representará una desviación al modelo y se deben realizar los ajustes al modelo para su debida compensación, ya que no se puede otorgar trazabilidad a calibraciones de termómetros que operen con bandas de respuesta espectral distintas, a menos que la emisividad efectiva de la fuente radiante sea mayor que 0.999, para cada una de las bandas de respuesta de los termómetros.

El laboratorio deberá sustentarlo con mediciones de su emisividad espectral que cubran los intervalos espectrales en que operan el termómetro de radiación patrón y los termómetros de radiación que se calibran con esa fuente y demostrar que su personal tiene capacidad para calcular las correcciones que fueran necesarias a las mediciones de temperaturas de radiancia obtenidas con el termómetro de radiación patrón, para adecuarlas a las mediciones de temperaturas de radiancia hechas con los termómetros de radiación que se calibran a los intervalos espectrales con que operan.

Una posibilidad para hacer esta compensación matemática es con las ecuaciones [\[56\]](#), [\[59\]](#) y [\[60\]](#) y contrastando los resultados con experimentación para validar esta desviación.

- c) Requerimiento: Accesorios requeridos para la calibración (propio del laboratorio)

Algunos accesorios son requeridos para la calibración, como pudieran ser las aberturas con enfriamiento, que son útiles para definir el área efectiva de la fuente radiante de referencia. Estas aberturas deben ser de color negro para evitar efectos de mejora aparente de emisividad de la fuente de radiación y reflejos de otras fuentes de radiación y se indica que para evitar su calentamiento por la fuente de radiación, se deben utilizar aberturas con enfriamiento.

En caso de que el laboratorio no pudiese cumplir con las especificaciones requeridas para las aberturas, por ejemplo: Que usara aberturas sin enfriamiento, pero si con aislamiento, se deben llevar a cabo pruebas experimentales para solventar estos cambios y demostrar que no existe afectación en su uso.

Es posible que las desviaciones al método generen una contribución desconocida al resultado de la medición, por ello, es importante realizar la experimentación y darle un peso a cada una de ellas, para considerarlas dentro de las magnitudes de incertidumbre propias del laboratorio.

2.3.3. Inspeccionar visualmente el IBC e ingresar al laboratorio

Para poder dar ingreso del IBC al laboratorio, éste debe ser revisado previamente mediante una inspección visual, la cual tiene por objetivo conocer su estado actual y verificar que no esté roto o presente algún daño que pudiese afectar la calibración. Se revisa el estado del filtro o lente (el cual debería estar limpio y en caso de no estarlo, se debe tener la autorización del usuario final para su limpieza con accesorios de óptica), los botones y su funcionamiento y se hace una medición a un objeto cercano del cual se conozca su temperatura, para evaluar si el IBC está midiendo de manera correcta.

Una vez que se asegura que el IBC se encuentra en condiciones de ser calibrado, se turna al metrólogo para su ingreso al laboratorio.

2.3.4. Planear los recursos para la calibración

- a) Respecto al IBC: Considerar lo relativo a su preparación respecto a identificación, limpieza, etc.

- b) Respecto a los recursos del laboratorio: Con base a los puntos de calibración, se eligen las fuentes de radiación a emplear, los patrones y equipos auxiliares, así como los sistemas adicionales requeridos como son el sistema de posicionamiento, accesorios, etc.

- c) Respecto al capital humano: Es importante visualizar que los metrólogos deben estar debidamente capacitados en la metodología y el modelo matemático que el laboratorio decida emplear, conocer la normatividad correspondiente y la legislación vigente de cada país. Cada metrólogo debe contar con su hoja de vida o Currículum Vitae y debe especificar los cursos relacionados a la radiación infrarroja con los que cuenta y que le permitirán realizar mediciones adecuadas a la magnitud; se recomienda evidenciar con constancia, diploma o reconocimiento que avale dicha capacitación, así como el temario del mismo. – Considerar la capacidad instalada del laboratorio –

2.3.5. Acondicionar el laboratorio

Para iniciar con la calibración, se requiere que el laboratorio se encuentre dentro de condiciones de humedad relativa dentro del intervalo de $50 \% \pm 30 \%$ y la temperatura del laboratorio se debe declarar sin ambigüedades en el certificado de calibración. (Cárdenas García & CENAM, Guía Técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre en la calibración de termómetros de radiación, 2018)

Se debe implementar un control de las condiciones ambientales, entre lectura y lectura de temperatura y de las variaciones de temperatura durante todo el ciclo de calibración. De tal manera que la temperatura del laboratorio se encuentre estable y que ésta no afecte la temperatura del detector del IBC. Este control se

puede implementar dentro de la hoja de cálculo que se desarrolló, en las secciones de: Bitácora de mediciones previas y Bitácora de mediciones de calibración.

Para realizar este monitoreo de condiciones ambientales se sugiere utilizar instrumentos para tales fines como pudiera ser un higo-termómetro, termo-higrómetro o bien un datalogger como los mostrados en la [Figura 7](#).



Figura 7. Ejemplos de instrumentos para monitorear condiciones ambientales (Flir Systems, 2019)

2.3.6. Preparar banco de calibración

El arreglo experimental de un laboratorio de termometría de no contacto debe contener como mínimo:

- Sistema de Posicionamiento
- Fuente de radiación
- Termómetro patrón
- Equipos auxiliares

Características de los diferentes elementos del arreglo experimental:

- Referente al sistema de posicionamiento

Se debe contar con sistemas fijos o móviles, que aseguren que las mediciones pueden ser repetibles y reproducibles. Deberá permitir que los IBC's se instalen apuntando hacia el centro de la fuente, con su dirección de medición coincidente

con el eje de geometría de la cavidad de una fuente tipo cavidad de cuerpo negro o con la normal que emerge del centro de la superficie de un radiador plano. Un ejemplo del arreglo experimental se muestra en la [Figura 8](#).

En el caso de que el termómetro patrón sea de radiación, se requiere un sistema de desplazamiento. Y en cualquiera de los casos, se debe medir la temperatura del fondo de la cavidad o de la superficie radiante.

Cada uno de los termómetros se coloca a una distancia de medición igual a la distancia focal de sus sistemas ópticos. (Cárdenas García & CENAM, Guía Técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre en la calibración de termómetros de radiación, 2018)

Su sujeción debe permitir que no se pierda la posición ajustada, orientada a la fuente de radiación. Algunos sistemas de posicionamiento con desplazamiento se muestran en la [Figura 9](#).



Figura 8. Arreglo experimental de un sistema de posicionamiento con desplazamiento longitudinal y radial, con tres fuentes de radiación. (Kapter, 2013)



Sistema lineal



Sistema radial

Figura 9. Ejemplo de Sistema de posicionamiento con desplazamiento (Kapter, 2016)

b) Referente a las fuentes de radiación.

b.1) Especificaciones y funcionamiento.

Las fuentes de radiación con las que puede contar un laboratorio pueden ser de dos tipos: Cavity o placa radiante; ambas pueden aportar diferentes beneficios o desventajas, por lo que es importante analizar las especificaciones técnicas de los fabricantes.

Las fuentes de radiación aportan magnitudes de influencia significativas para los resultados de la calibración, por lo tanto, se deben identificar y en mayor medida, cuantificar. Dentro de sus características metrológicas que pudiesen influenciar en dichos resultados se encuentran: Emisividad efectiva de la fuente de radiación, dimensiones efectivas de la fuente (área y diámetro), % de señal que produce, banda de respuesta espectral, distancia de medición a la pared del fondo, uniformidad de la temperatura de la fuente.

c) Referente a los termómetros patrón o de referencia a utilizar y al esquema de calibración a elegir, se muestran diagramas de flujo como guía en las [Figuras: 10, 11 y 12:](#)

Existen tres esquemas de calibración posibles: (Cárdenas García & CENAM, Guía Técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre en la calibración de termómetros de radiación, 2018)

c.1 Con trazabilidad a la calibración de un termómetro de contacto patrón.

c.2 Con trazabilidad a la calibración de un termómetro de radiación patrón.

c.3 Con trazabilidad a una fuente calibrada con un termómetro de radiación de referencia.

Dependiendo el esquema de calibración elegido por el laboratorio:

c.1 Con trazabilidad a la calibración de un termómetro de contacto patrón, se sigue el diagrama de flujo de la [Figura 10](#), para obtener el valor de temperatura de referencia, cuando el termómetro patrón es uno de contacto y el IBC que se calibra se encuentra ajustado con $\varepsilon = 1$.

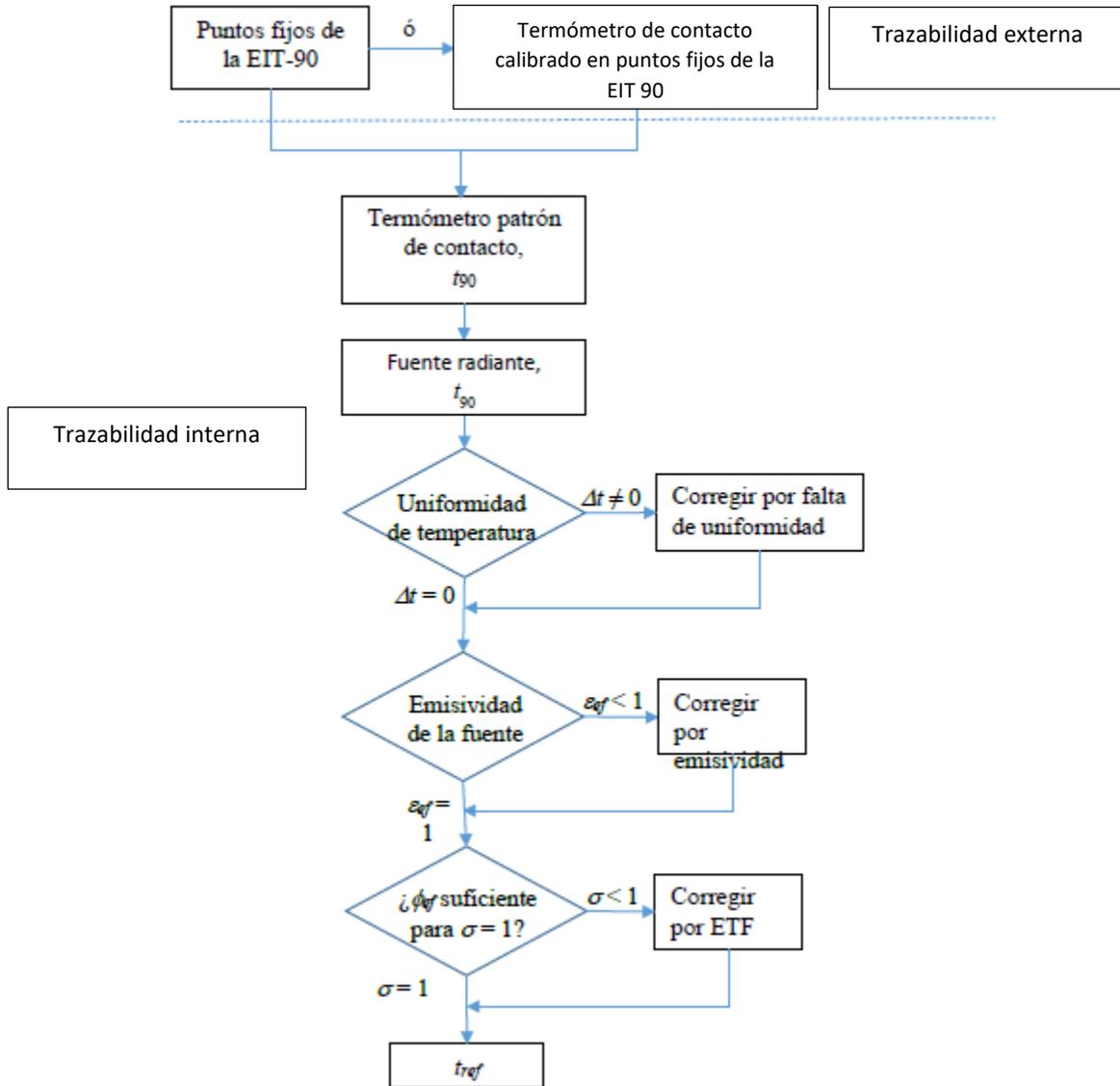


Figura10. Diagrama de flujo para obtener el valor de temperatura de referencia, cuando el termómetro patrón es uno de contacto (Cárdenas García & CENAM, Guía Técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre en la calibración de termómetros de radiación, 2018)

c.2 Con trazabilidad a la calibración de un termómetro de radiación patrón, se sigue el diagrama de flujo de la [Figura 11](#), para obtener el valor de temperatura de referencia, cuando el termómetro patrón es uno de radiación y el IBC se encuentra ajustado con $\epsilon = 1$.

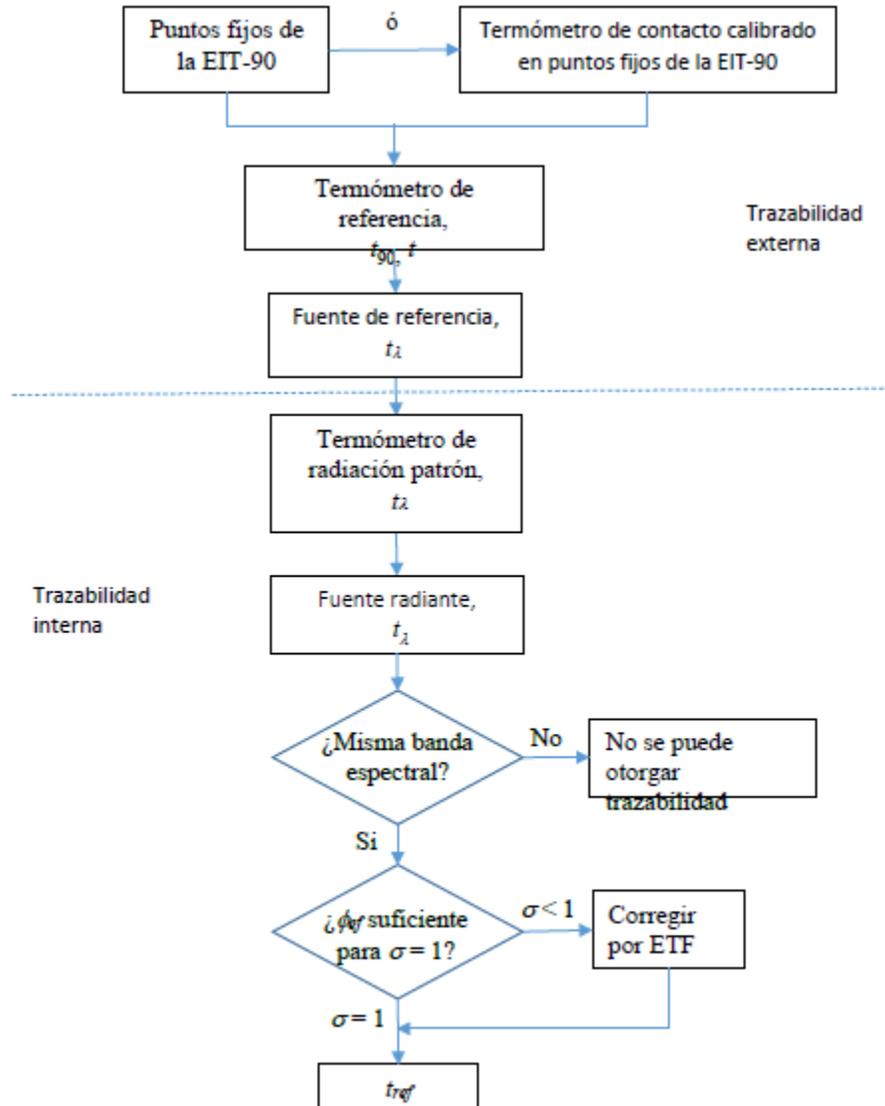


Figura 11. Diagrama de flujo para obtener el valor de temperatura de referencia, cuando el termómetro patrón es uno de radiación (Cárdenas García & CENAM, Guía Técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre en la calibración de termómetros de radiación, 2018)

c.3 Con trazabilidad a una fuente calibrada con un termómetro de radiación de referencia, se sigue el diagrama de flujo de la [Figura 12](#), para obtener el valor de temperatura de referencia, cuando el patrón es una fuente calibrada con un termómetro de radiación de referencia.

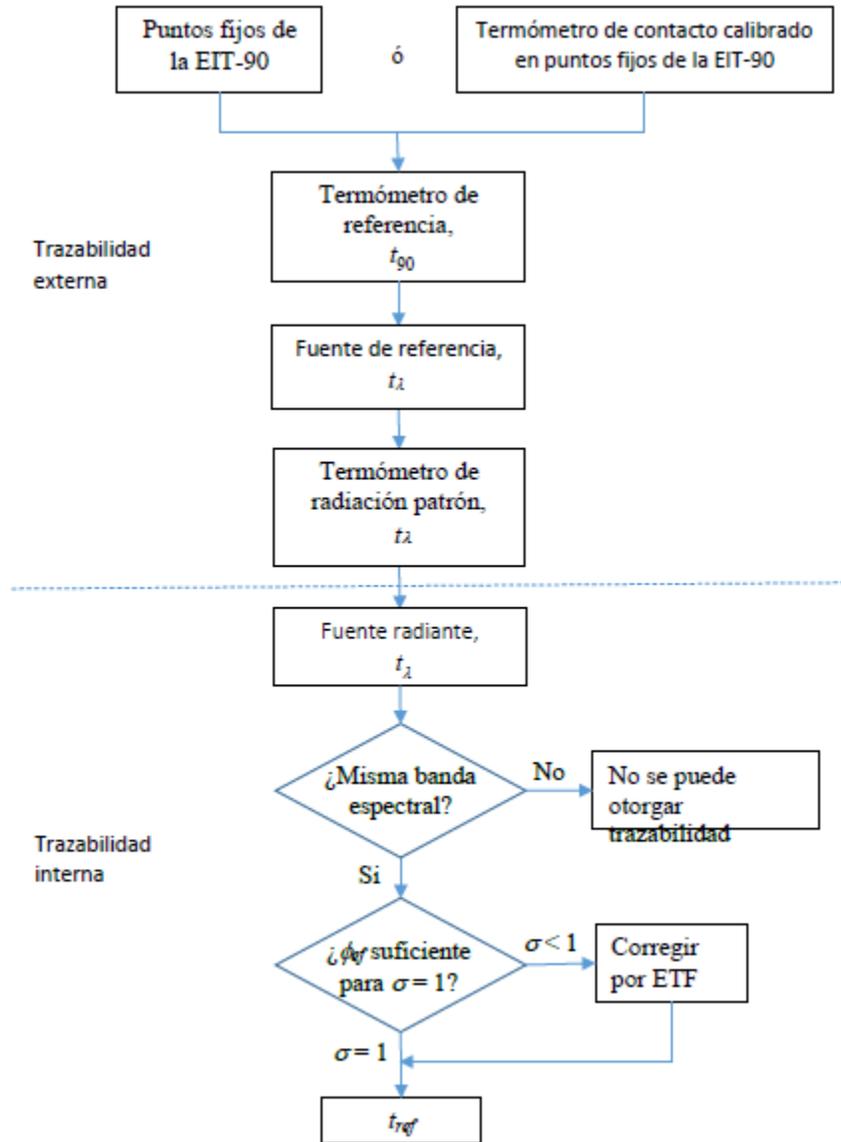


Figura 12. Diagrama de flujo para obtener el valor de temperatura de referencia, cuando el patrón es una fuente calibrada con un termómetro de radiación de referencia.

(Cárdenas García & CENAM, Guía Técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre en la calibración de termómetros de radiación, 2018)

d) Referente a los equipos auxiliares y sistemas.

Se considerarán como todos aquellos equipos e instrumentos de medición que se pueden emplear para obtener información que será usada antes y durante la calibración, como podría ser: regla graduada, flexómetro, aberturas, sonda de RTD para medición de la temperatura del detector, software adquisidor de datos y

cualquier otro que pueda ser de utilidad para fortalecer el sistema de mediciones del laboratorio.

Para concluir el [Capítulo 2](#), se establece de manera explícita, que el método de calibración mayormente considerado en esta metodología es por comparación de los valores indicados por el termómetro de radiación que se calibra, T_{IBC} y los valores de temperatura de radiancia de la fuente que se determinan con las temperaturas medidas por el termómetro patrón, $T_{patrón}$. (Cárdenas García & CENAM, Guía Técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre en la calibración de termómetros de radiación, 2018)

Los pasos a seguir para llevar a cabo el proceso de calibración y la estimación de incertidumbre se describen a detalle en el siguiente [Capítulo 3](#).

3. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN DAUIK® PARA TERMÓMETROS DE RADIACIÓN

Una vez que se ha dispuesto de lo necesario con respecto al instrumento a calibrar (IBC), sobre el banco de calibración e instalaciones, se procede a realizar propiamente dicho, el proceso de calibración. Particularmente, se pone énfasis en establecer la emisividad del IBC en 1, para que sus mediciones cuenten con trazabilidad metrológica. (Cárdenas García & CENAM, Guía Técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre en la calibración de termómetros de radiación, 2018)

Dada la complejidad de los cálculos matemáticos de la "Metodología de Calibración Dauik® para termómetros de radiación" y la robustez de la hoja de cálculo desarrollada para la presente metodología, es recomendable que todas las operaciones y mediciones, los registros de las mismas y las evidencias, se lleven a cabo de manera digital y se hagan acorde a lo establecido en el Sistema de Gestión de Calidad del laboratorio. Para lo cual, se sugiere que el computador cuente con un disco duro de estado sólido, procesador core i5 o mejor, con mínimo 8.00 GB en RAM instalada, con un sistema operativo de 64 bits y procesador basado en x64 y memoria de 1 Tbyte. Dicho computador puede estar equipado con herramientas computacionales comerciales, tales como: Excel, Matlab, Mathematica o alguno similar para el procesamiento de la información del modelo matemático propuesto.

Los siguientes pasos forman parte de la "*Metodología de Calibración DAUIK® para termómetros de radiación*", objetivo del presente trabajo:

3.1. INICIAR CON LAS ACTIVIDADES PRELIMINARES

Las actividades preliminares se describen de manera explícita en la sección [2.3](#) del [Capítulo 2](#).

3.2. ACLIMATAR EL IBC

Se requieren como mínimo 24 horas previas a su calibración (Cárdenas García & CENAM, Guía Técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre en la calibración de termómetros de radiación, 2018), para que el IBC se aclimate a las condiciones del laboratorio. Por lo que se sugiere, que una vez que éste ha sido aceptado por el metrólogo para su calibración, se almacene en un espacio específico y designado para ello.

3.3. PLANEAR LA SECUENCIA DE LAS MEDICIONES

Para eficientar las mediciones se sugiere realizar una tabla en donde se muestren los puntos de calibración, las fuentes de radiación disponibles y el tipo de medición a realizar: previa o calibración, para poder observar gráficamente la mejor secuencia de mediciones. Hay que tomar en cuenta los recursos disponibles en el laboratorio y sus características metrológicas para hacer una planeación de las mediciones requeridas para llegar a los resultados de calibración.

Para emplear la presente metodología, es necesario realizar dos tipos de mediciones: (estas mediciones no se solicitan de manera explícita en los documentos técnicos, sin embargo, es información requerida para el cálculo de los diferentes coeficientes tanto de S-H como de S-W, cálculo de señales, estimaciones de incertidumbre para el IBC, entre otros usos)

- a) Previas
- b) Calibración

Para obtener resultados estadísticamente significativos, se deben tomar mínimo 3 repeticiones por punto de temperatura, ya que de cada repetición se obtienen estadísticos como: promedio, desviación estándar, entre otros. Entonces, considerando el tiempo disponible para realizar el proceso de calibración, los tiempos de entrega establecidos por el laboratorio, así como los costos finales del servicio, se recomienda que para las mediciones previas se realicen 3 repeticiones y para las mediciones de calibración se realicen 10 repeticiones.

Un número mayor o menor de repeticiones dependerá del arreglo experimental y condiciones ambientales del laboratorio; cada laboratorio es diferente y cuenta con características propias, por lo que se deben realizar experimentos en el laboratorio para evaluar la significancia estadística de hacer un número mayor o menor de repeticiones para las mediciones de calibración y con base a ello, determinar el número de repeticiones idóneo, que represente resultados efectivos en las mediciones, eficientando el tiempo y los recursos del laboratorio.

Con la información disponible, se genera una tabla para visualizar el orden de las mediciones; normalmente tanto las cavidades de cuerpo negro, como las placas radiantes de las fuentes de radiación son metálicas, lo cual ocasiona que una vez que hayan adquirido cierta cantidad de energía, ésta se quedará almacenada en ellos por un determinado tiempo; por esta razón, es recomendable realizar las mediciones de la siguiente manera:

- a) Para temperaturas superiores a las ambientales, se recomienda calibrar de menores a mayores temperaturas.
- b) Para temperaturas inferiores a las ambientales, se recomienda calibrar de mayores a menores, con la finalidad de permitir que los materiales vayan adquiriendo energía o liberándola, pero de una manera más orgánica.

La metodología **considera como máximo 6 puntos de calibración y 3 como mínimo; sin embargo, el número de puntos a ofrecer de manera regular es de 5 y se calibran con el IBC ajustado en una $E=1$** , por lo tanto, se tiene que para realizar las siguientes actividades, el tiempo aproximado para cada paso del proceso de calibración sería:

1. Aclimatar el IBC – 24 h
2. Mediciones previas – de 4 a 6 h
3. Mediciones de calibración – de 4 a 8 h

Esto nos lleva a tener un tiempo de entrega mínimo entre (2.5 a 3) días.

Nota: Este tiempo es aproximado, ya que dependerá de la infraestructura del laboratorio.

3.4. DEFINIR LA DISTANCIA DE MEDICIÓN, EFECTO DEL TAMAÑO DE LA FUENTE – ETF

Normalmente, los fabricantes de termómetros de radiación proporcionan la resolución óptica del termómetro de radiación, la cual está dada por una relación unidimensional $D:S$, siendo, D la distancia de medición y S , el tamaño del diámetro (spot) a observar por el termómetro a dicha distancia. Aparentemente esta es la información a la cual se deberían llevar a cabo las mediciones y en donde los fabricantes aseguran las mediciones de temperatura, sin embargo, en muchas ocasiones, esta resolución óptica no siempre es representativa a la realidad y por esta razón se deben realizar las pruebas del Efecto del tamaño de la fuente (ETF) para corroborar dicha información.

Debe conocerse la distancia focal de los termómetros de radiación que se calibran, los diámetros de sus campos visuales a esa distancia y los valores del parámetro, σ del ETF asociado a esos diámetros. Esto tiene el propósito de poder determinar si el diámetro efectivo que se utilizará en las calibraciones es suficientemente grande para realizarlas con una influencia mínima del ETF, de acuerdo con la [Tabla 4](#).

³Tabla 4. Área efectiva de la fuente versus N , número de veces

Número de veces que debe ser el diámetro del área efectiva de la fuente en función del parámetro σ del campo visual del termómetro de radiación	
Σ	N
0.9000	5
0.9159	4
0.9370	3
0.9646	2
0.9938	1

El área efectiva de la fuente se considera insuficiente para llevar a cabo la calibración cuando a la distancia de medición se recorre el campo visual de un termómetro de radiación a lo largo del diámetro del área efectiva de la fuente y en ella no se observa una región donde las indicaciones de los termómetros de radiación permanecen aparentemente invariables, por lo regular, sólo se obtiene un valor máximo en el centro de ese diámetro.

Para conocer la zona de valor máximo de la fuente de radiación, ésta se puede calibrar en su centro y caracterizar en los diferentes cuadrantes para conocer su comportamiento y establecer con esta información, la zona de medición idónea por representar el valor máximo de temperatura.

Para conocer el ETF se sugiere realizar la siguiente prueba para cada punto de medición:

- a) Se eligen las distancias indicadas por el fabricante, pudiendo ser una, dos o tres, dependiendo la marca y modelo del IBC. Adicional a estas distancias, se sugiere incluir más distancias (dentro y fuera de lo especificado por el fabricante) con la finalidad de conocer al IBC y poder calibrarlo en donde

³ Se usará la notación $\sigma = 1$ para indicar que para un campo visual dado se cumple la condición de 100 % de señal máxima. De igual manera, se usará la notación $\sigma = 0.9$ para indicar a un campo visual para el cual sólo se obtiene el 90 % de la señal máxima, etc.

- éste presente su mejor relación de D:S. Ej. Si el fabricante proporciona 3 distancias de referencia, se pudieran considerar otras 3 distancias para conocer su comportamiento y elegir la distancia de medición adecuada.
- b) Para obtener resultados estadísticamente significativos, se recomienda realizar tres mediciones de temperatura por distancia elegida y en cada una de ellas, se calcula la señal virtual, SV y se obtiene su promedio y su desviación estándar.
 - c) Se calcula el % de la señal con los promedios obtenidos y se relaciona con la lectura inmediata anterior. Para calcular el valor de, σ se aplica el siguiente cociente: $Prom \sigma_n / Prom \sigma_1$ y se grafica para observar visualmente cómo se comporta el IBC respecto a las distancias y el ETF.
 - d) Una vez graficado, se analiza a qué distancia(s) la variación de temperatura es menor. Lo cual indicaría que la fuente de radiación no está teniendo un efecto sobre el IBC y por lo tanto es una distancia adecuada para realizar las diferentes mediciones.
 - e) Se promedian los valores de, σ calculados y se comparan con los indicados en la Tabla 2, con la finalidad de saber el número de veces que el diámetro del área efectiva de la fuente radiante debería ser y con ello establecer la distancia de medición y su, σ . Se debe conocer el diámetro efectivo de la fuente de radiación, para poder comparar contra resultados calculados.
 - f) Se establece una distancia de calibración y los efectos del tamaño de la fuente se considerarán en la sección de magnitudes de influencia.

En la guía técnica de CENAM (Cárdenas García & CENAM, Guía Técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre en la calibración de termómetros de radiación, 2018), se establece que la fracción de la señal producida tiende al 100 % de la señal máxima cuando el campo medido es cada vez más grande, o aparentemente más grande por reducir la distancia de medición.

Se define al parámetro siguiente para caracterizar al ETF con respecto a la señal máxima que se produce en su detector al medir una temperatura de radiancia dada:

$$\sigma(T_{\sigma}, T_{\sigma=1}, T_L) = \frac{S(T_{\sigma}) - S(T_L)}{S(T_{\sigma=1}) - S(T_L)} \quad (61)$$

donde:

$S(T_{\sigma})$ es el valor calculado de la señal del detector del termómetro de radiación que corresponde a la temperatura indicada por el termómetro de radiación, pero menor que la que corresponde a la señal máxima,

$S(T_{\sigma=1})$ es el valor calculado de la señal máxima, que corresponde también al valor máximo de la temperatura indicada por el termómetro de radiación al recibir el 100 % de la energía emitida por una fuente hemisférica o suficientemente grande, tal que no se producen más cambios en las indicaciones por aumentar el diámetro de la fuente,

$S(T_L)$ es el valor calculado de la señal del detector que corresponde a la temperatura del laboratorio, indicada por el termómetro de radiación.

Los valores de $S(T)$ para $(T_{\sigma}, T_{\sigma=1}$ y $T_L)$, se pueden calcular con la ecuación de Sakuma-Hattori descrita en las secciones anteriores.

3.5. REALIZAR LAS MEDICIONES PREVIAS

La metodología propone utilizar un modelo matemático que conlleva el uso de parámetros llamadas: A_C, B_C, C_C derivados del modelo de Sakuma-Hattori (S-H), como se puede observar en [\(35\)](#), [\(36\)](#) o [\(40\)](#), los cuales se obtienen al caracterizar el IBC. Los documentos técnicos del CENAM hacen hincapié en el uso de dichos parámetros, mas no dejan de forma explícita la forma de calcularlos. Por ello, **aquí se da una guía para poder conocerlos**, ya que serán de utilidad, incluso para poder estimar los coeficientes de Saunders-White (S-W): A_{SW}, B_{SW}, C_{SW} .

Una vez definida la distancia de calibración, se inicia con la caracterización del IBC, lo cual representa realizar mediciones previas a la calibración. Es decir, implica hacer mediciones en varios puntos de temperatura dentro de su intervalo de operación. El número de puntos depende: del tamaño del intervalo de operación, del modelo analítico, en particular, de las magnitudes de entrada e influencia y del impacto que tengan en el desempeño del IBC. Para poder realizar los cálculos se

requieren mínimo **tres** puntos de medición, los cuales serán suficientes para conocer su comportamiento y estos tres puntos pueden ser: el mínimo, el intermedio y el máximo, de tal forma que se abarque todo el intervalo de calibración solicitado por el usuario final.

Durante el proceso de las mediciones previas, se hacen las siguientes pruebas:

- a) Tres repeticiones de mediciones que incluyen: Temperatura ambiental, temperatura Background, temperatura del detector, horario de las mediciones, temperatura patrón, temperatura IBC y humedad relativa.
- b) Efecto del tamaño de la fuente como se indica en el [3.4](#), con la finalidad de conocer la distancia óptima de medición, así su ETF y su señal virtual.
- c) Medición en dos diferentes emisividades: $E = 1$ y $E = 0.5$, con la finalidad de calcular posteriormente la señal virtual del IBC en ese Punto de calibración.

La información de las mediciones de estos tres incisos se recaba dentro de la hoja de cálculo y se procesan en la pestaña 1: Cálculo de los coeficientes de S-H y S-W, en la pestaña 2: Propagación de incertidumbre y en la pestaña 4: Bitácora de mediciones previas.

Partiendo del arreglo experimental explicado en el punto [2.3.6](#) y una vez que se cuenta con todos los instrumentos de medición listos para su utilización se inicia con la toma de lecturas. Para darle aleatoriedad a las mediciones, se muestra la siguiente secuencia en la [Tabla 5](#), la cual permitirá adquirir los datos, por repetición, en un tiempo de entre (1 a 2) min:

Tabla 5. Secuencia de medición para las mediciones previas

1ra. medición:	T amb	→	T background	→	T detector	→	Hora	→	T patrón	→	T IBC
2da. medición:							Hora	←	T patrón	←	T IBC
3ra. medición:	T amb	→	T background	→	T detector	→	Hora	→	T patrón	→	T IBC
Prom. Mediciones:	T amb		T background		T detector				T patrón		T IBC
											% Humedad Relativa

Elaboración propia

Las mediciones previas se repiten hasta que se han calibrado los tres puntos planeados.

3.6. OBTENER LOS COEFICIENTES S-H Y COEFICIENTES S-W

Como se mencionó en el punto anterior, es necesario conocer los parámetros que caracterizan al IBC, así que una vez que se han realizado las mediciones previas, estaremos en condiciones de obtener los coeficientes de S-H y S-W. Para lo cual se considera lo siguiente: (Cárdenas García, Diplomado en termometría de radiación, Módulo 2, Medición, 2018)

- A. Cuando se trata de un termómetro de radiación que proporciona señal, como el descrito en (36), los coeficientes de S-H consideran lo siguiente:
 - Tres coeficientes o parámetros A_C, B_C, C_C .
 - Estos valores de A_C, B_C, C_C se pueden encontrar experimentalmente al obtener las señales correspondientes de al menos tres valores conocidos de temperatura.

- B. Cuando se trata de un termómetro de radiación que proporciona valores de temperatura de radiancia, como el descrito en (35), los coeficientes de S-H se obtienen en dos pasos:
 - Primero se obtienen los coeficientes A_{SW} y B_{SW} para simular las señales correspondientes a las lecturas del termómetro de radiación.
 - Segundo, se obtienen los coeficientes A_C, B_C, C_C .

En la hoja de cálculo, se sugiere crear una pestaña independiente para el cálculo de estos coeficientes, para lo cual se requiere:

1. Con el rango espectral del IBC se calculan los coeficientes A_{SW} , B_{SW} y C_{SW} .
2. Con la información obtenida en las mediciones previas, se obtienen los parámetros: A_C , B_C , C_C . Se sugiere realizar un [tabla tipo 6](#) que contenga la siguiente información:

Tabla 6. Secuencia de medición para las mediciones previas

No.	Punto de Calibración	Lectura Termómetro Patrón	Lectura Termómetro de radiación IBC	$T_{TRI} - T_{ref}$	T_{RADI} se convierte a K	T_{TRI} se convierte a K
	Nominal / °C	$t_{ref} / °C = t_{RADI} / °C$	$t_{TRI} / °C$	Error / °C	T_{RADI} / K	T_{TRI} / K
1						
2						
3						

Elaboración propia

3. Partiendo de los coeficientes A_{SW} , B_{SW} y C_{SW} calculados, se obtiene la señal virtual para cada uno de los puntos de calibración del IBC T_{TRI} / K y se plasman en una [Tabla 7](#) como:

Tabla 7. Señal virtual – IBC por punto de calibración

No.	Nominal / °C	T_{TRI} / K	Señal Virtual - IBC
1			
2			
3			

Elaboración propia

4. De igual manera, se calcula la señal virtual para cada uno de los puntos de calibración del termómetro patrón T_{RADI} / K y se plasman en una [Tabla 8](#):

Tabla 8. Señal virtual TRAD – patrón por punto de calibración

No.	Nominal / °C	T _{RADI} / K	Señal T _{TRAD} – patrón
1			
2			
3			

Elaboración propia

5. Ya que se cuenta con ambas señales virtuales, se hace una [Tabla 9](#) para obtener la diferencia entre ellas (en valores absolutos) y se saca la sumatoria de la diferencia de las señales, como se muestra a continuación:

Tabla 9. Diferencia entre señales virtuales

No.	Nominal / °C	Señal Virtual - IBC	Señal TRAD - patrón	Diferencia entre Señales
1				
2				
3				
Suma				

Elaboración propia

6. Con ayuda de la función “SOLVER” de Excel (o con la herramienta matemática que se tenga disponible), se busca minimizar la sumatoria de la diferencia de las señales, aproximándola lo más posible a cero (restricción). Para ello, se seleccionan las celdas en verde, correspondiente a la estimación inicial para: A_C, B_C, C_C , y se igualan a A_{SW}, B_{SW} y C_{SW} previamente calculadas, esto con la finalidad de que el programa computacional “encuentre” la solución que mejor satisfaga a nuestra restricción de que la SUMA DE LA DIFERENCIA DE SEÑALES = 0: celda azul. Ver [Tabla 10](#) e [Figura 13](#) para visualizar los campos disponibles en la pantalla del SOLVER.

Tabla 10. Información a considerar para la utilización del SOLVER

Coeficientes Sakuma-Hattori	Estimación Inicial	Unidades	Señal Virtual - IBC	Señal TRAD - patrón	Dif. Señales
Ac		μm			
Bc		$\mu\text{m K}$			
Cc		u.a.			
				Suma	

Resolución vía SOLVER

Restricción

Elaboración propia

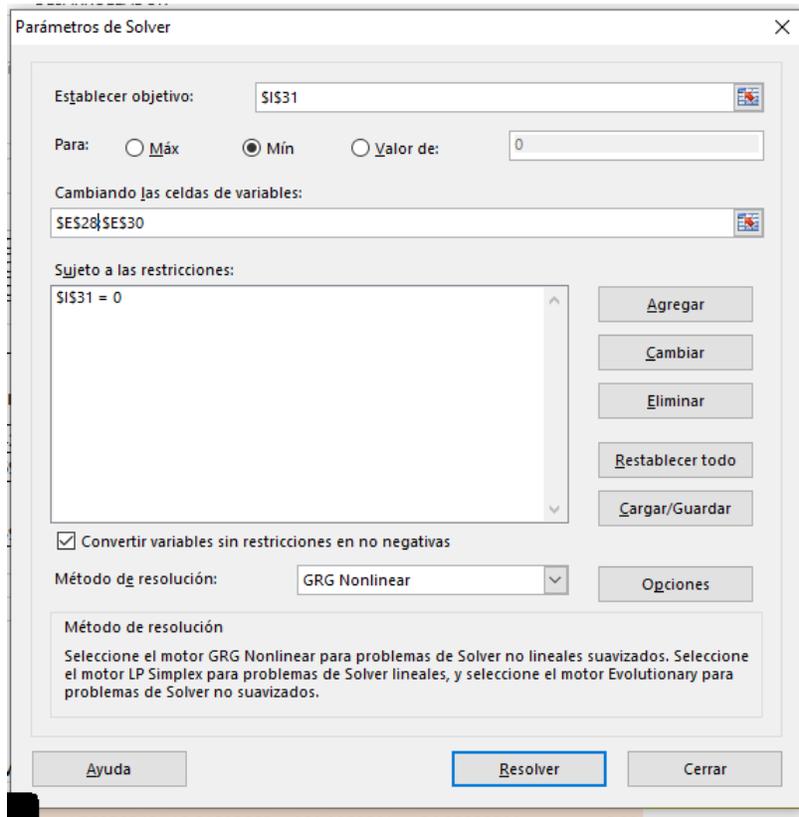


Figura 13. Pantalla de la función SOLVER de Excel
Elaboración propia

Al ejecutar la función "SOLVER" se obtienen los valores de A_c, B_c, C_c que mejor satisfacen la restricción dada.

Una vez que dichos coeficientes son calculados, es importante mantenerlos a la mano, tanto los de Saunders-White, como los de Sakuma-Hattori, ya que ellos serán usados para las estimaciones de incertidumbre y para obtener la Ecuación de Interpolación para la propagación del Error. (IMNC, 2002) & (Cárdenas García, Magnitudes de influencia en la calibración de termómetros de radiación debajo del punto fijo de la plata, 2018)

3.7. REALIZAR LAS MEDICIONES PARA LA CALIBRACIÓN

Las mediciones para la calibración abarcan todos los puntos solicitados por el usuario final e implican un mayor número de mediciones. La finalidad de tener un mayor número de mediciones es tener información suficiente y poder tener una muestra significativa de datos. Los documentos técnicos no restringen ni el número máximo de mediciones, ni la secuencia de mediciones, por lo que aquí se da una referencia para esta parte del proceso.

Ya caracterizado el IBC con las mediciones previas, se procede a hacer la calibración, conforme la agenda establecida en el punto 3.1.b y en la distancia ya definida y que se vuelve a corroborar con la prueba del ETF.

En este proceso de mediciones de calibración, se realizan las siguientes mediciones por punto de calibración:

1. Efecto del tamaño de la fuente como se indica en el [3.4](#), en los puntos faltantes de dicha prueba.
2. Diez repeticiones de mediciones, en todos los puntos de calibración, que incluyen: Temperatura ambiental, temperatura Background, temperatura del detector, horario de las mediciones, temperatura patrón, temperatura IBC y humedad relativa.
3. Medición en dos diferentes emisividades: $E = 1$ y $E = 0.5$, en los puntos faltantes de dicha prueba.

Partiendo del arreglo experimental explicado en el punto [2.3.6](#) y una vez que se cuenta con todos los instrumentos de medición listos para su utilización se inicia con la toma de lecturas. Para darle aleatoriedad a las mediciones, se muestra la siguiente secuencia de la [Tabla 11](#), la cual permitirá adquirir los datos, por repetición, en un tiempo de entre (1 a 2) min:

Tabla 11. Secuencia de medición para las mediciones de la calibración

1ra. medición:	T amb	→	T background	→	T detector	→	Hora	→	T patrón	→	T IBC
2da. medición:							Hora	←	T patrón	←	T IBC
3ra. medición:	T amb	→	T background	→	T detector	→	Hora	→	T patrón	→	T IBC
4ta. medición:							Hora	←	T patrón	←	T IBC
5ta. medición:	T amb	→	T background	→	T detector	→	Hora	→	T patrón	→	T IBC
6ta. medición:							Hora	←	T patrón	←	T IBC
7ma. medición:	T amb	→	T background	→	T detector	→	Hora	→	T patrón	→	T IBC
8va. medición:							Hora	←	T patrón	←	T IBC
9na. medición:	T amb	→	T background	→	T detector	→	Hora	→	T patrón	→	T IBC
10ma. medición:							Hora	←	T patrón	←	T IBC
Prom. Mediciones:	T amb		T background		T detector				T patrón		T IBC
											% Humedad Relativa

Elaboración propia

Las mediciones para la calibración se repiten hasta que se han calibrado todos los puntos de temperatura requeridos.

Una vez que se han terminado de realizar todas las mediciones tanto las previas, como las de calibración y el cálculo de los coeficientes de S-H y SW, se procede a recopilar toda la información para su posterior análisis con apoyo de la hoja de

cálculo, la cual servirá para la estimación de incertidumbre de medida, el error de medida, gráficos y demás información que deba ser calculada.

Se sugiere concentrar la información de: IBC, método, termómetro patrón, Fuente de Radiación, bitácora de mediciones de las condiciones ambientales y de las lecturas de la calibración en una pestaña adicional en la hoja de cálculo.

3.8. ESTIMAR LA INCERTIDUMBRE POR PUNTO DE TEMPERATURA CALIBRADO

Una vez que se ha terminado la calibración del IBC y se han recopilado todos los datos, continuando con el uso de la hoja de cálculo desarrollada, se debe estimar el valor de incertidumbre de medida en cada punto de calibración. Para lo cual, nos basaremos en el documento técnico del CENAM, (Cárdenas García, Magnitudes de influencia en la calibración de termómetros de radiación debajo del punto fijo de la plata, 2018) aunque no es el único documento que se pudiera usar como referencia, ya que existen documentos internacionales que se pueden usar como guía para la estimación de incertidumbre para termómetros de radiación.

En la calibración de un termómetro de radiación que despliega directamente un valor de temperatura, su lectura de temperatura se compara con una temperatura de referencia T , trazable a la Escala Internacional de Temperatura de 1990, la cual es función de varias magnitudes, como se muestra en el modelo en [\(62\)](#):

$$T = T(x_1, \dots, x_{19}, x_{20}, \dots, x_M; T_{TP1}, T_1, \dots, T_{TPN}, T_N) \quad (62)$$

Siendo x_1 a x_{19} las magnitudes de influencia que se deben evaluar en las calibraciones de termómetros de radiación debajo del punto de la plata. x_{20} a x_M son las magnitudes de influencia particulares de cada laboratorio de calibración y que toman en cuenta las diferencias entre el modelo de medición utilizado y su realización experimental. Las N parejas (TP_i, T_i) son los valores medidos cuando el

termómetro patrón calibrado en N puntos de temperatura, TP_i es el valor de temperatura medido por el termómetro patrón cuando fue calibrado y T_i es el valor con el que se comparó en su calibración.

De acuerdo con (Cárdenas García & CENAM, *Guía Técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre en la calibración de termómetros de radiación*, 2018), la incertidumbre combinada de la temperatura de referencia está dada por:

$$u^2(T) = \sum_{i=1}^M u_i^2 \quad (63)$$

Donde u_i es la incertidumbre asociada con la magnitud de influencia x_i .

Las magnitudes de influencia x_1 a x_M se enlistan en la Tabla 1, donde se enlistan cada una de ellas.

La forma de calcular cada una de las magnitudes de influencia, se desglosa en el [Anexo 1](#).

La estimación de incertidumbre de medida se hace para cada uno de los puntos de calibración, de tal forma que una vez que se han hecho todas las estimaciones, se recopilan en una tabla específica, dentro de la hoja de cálculo, en donde se indican las 21 o más, magnitudes de influencia, su estimación, su incertidumbre combinada y la incertidumbre expandida.

Es necesario que el laboratorio identifique, dentro de su presupuesto de incertidumbre, cuáles son las magnitudes de incertidumbre más significativas dentro del arreglo experimental, de tal forma que pueda establecer oportunidades de mejora para disminuirlas y con ello, lograr ofrecer al usuario final un valor de incertidumbre expandido competitivo en el mercado.

3.9. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN

La norma ISO/IEC-17025:2017 (ISO, 2017) específica que **los resultados deben presentarse de cierta forma que describan el significado de la calibración**. Lo cual se puede lograr haciendo explícito el mensurando.

La presentación de los resultados de la calibración puede expresarse de diversas maneras, sin embargo, la más común y que cumple con lo requerido en la segunda parte de la definición de calibración que dice: "... utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medición a partir de una indicación." se muestra en la [Tabla 12](#):

Tabla 12. Contenido de los resultados de la calibración

No. de Punto de Calibración	Temperatura Termómetro Patrón (°C)	Temperatura IBC (°C)	Error de medida (°C)	± U de medida (°C)
	Lectura del patrón empleado	Lectura del termómetro de radiación bajo calibración	$(T_{IBC} - T_{patrón})$	Se expresa expandida, con un nivel de confianza de $k = 2$
1				
2				
3				
4				
5				

Elaboración propia

La información mostrada en la [Tabla 12](#), se acompañan con un gráfico de temperatura por punto de medición del tipo "dispersión" contra su error, graficando en cada punto su incertidumbre de medición asociada, como se muestra en la [Figura 14](#).

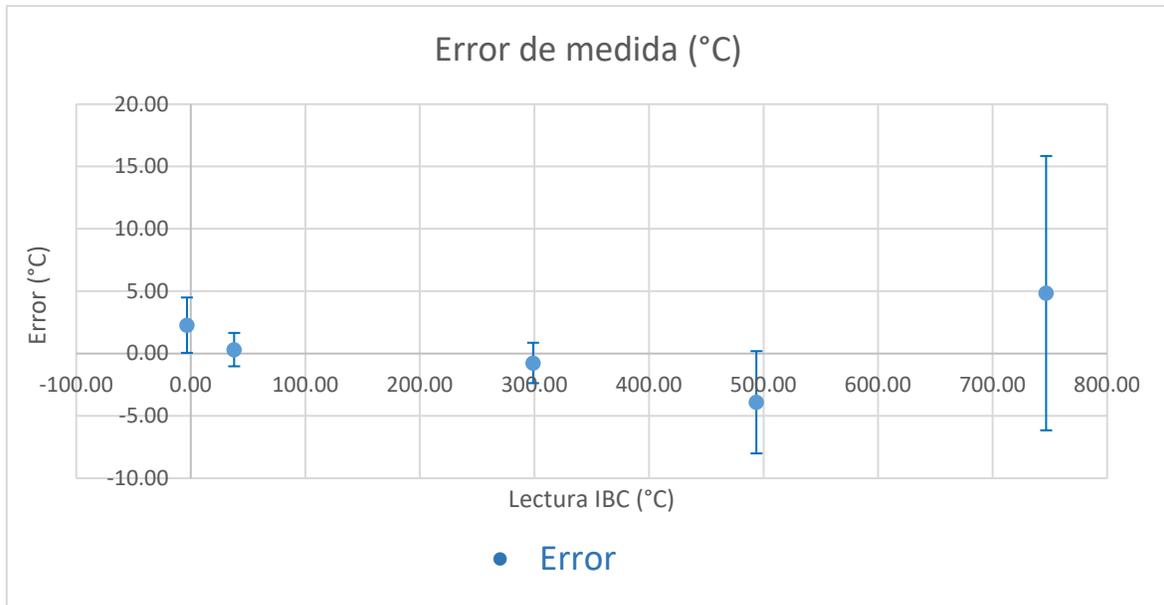


Figura 14. Ejemplo de gráfico de dispersión de los resultados de calibración
Elaboración propia

Normalmente los resultados de una calibración se plasman en documentos denominados: Informes de Calibración o Certificados de Calibración. Si el laboratorio es una entidad acreditada ante un organismo certificador, estaría facultado para ofrecer servicios con acreditación y con los logotipos del organismo acreditador; caso contrario, podrá ofrecer servicios sólo con trazabilidad metrológica.

Los laboratorios de calibración y ensayos trabajan bajo los estándares de la norma ISO/IEC17025:2017 - Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración, (ISO, 2017) en donde se estipula a detalle lo que debe contener el certificado de calibración de un instrumento de medición. Ver ejemplo de un Certificado de calibración TIPO en el [Anexo 2](#).

Al finalizar los diferentes cálculos y análisis de datos, es importante revisar que la información plasmada en la tabla de resultados de calibración, estén dentro de lo establecido por el laboratorio como sus capacidades de medición –CMC- y servirán de pauta para verificar que los resultados de calibración son acordes a lo que el laboratorio puede ofrecer con su arreglo experimental disponible.

La última versión de la norma ISO/IEC17025:2017 - Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración, (ISO, 2017) especifica la pertinencia de establecer los lineamientos para declarar conformidad en los resultados, en caso de ser solicitada por el usuario final. Dicho documento no establece cómo determinarla, sin embargo, existen documentos de carácter nacional o internacional que pueden servir de guía para establecer la regla de decisión conforme a los resultados de la calibración obtenidos.

3.10. FLUJOGRAMA DE LA “METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN DAUIK® PARA TERMÓMETROS DE RADIACIÓN

A continuación, en la [Figura 15](#) se muestra la secuencia de la “*Metodología de calibración Dauik® para termómetros de radiación*” en la cual se indica el inicio de la calibración con el óvalo verde.

En el flujograma se muestran a mano izquierda los pasos a seguir, iniciando con las actividades preliminares (celda gris) y una vez que éstas se han llevado a cabo, toman lugar las etapas de la metodología (celdas azules). Cada una de estas etapas tiene una “información de salida”, la cual se muestra a mano derecha (celdas rosas).

Una vez concluidas todas las etapas de la metodología se termina el proceso de calibración, el cual está indicado con un óvalo amarillo.

Los resultados de la calibración de la experimentación realizada para validar la “*Metodología de calibración Dauik® para termómetros de radiación*”, se encuentran desglosados en el siguiente [Capítulo 4](#). Resultados

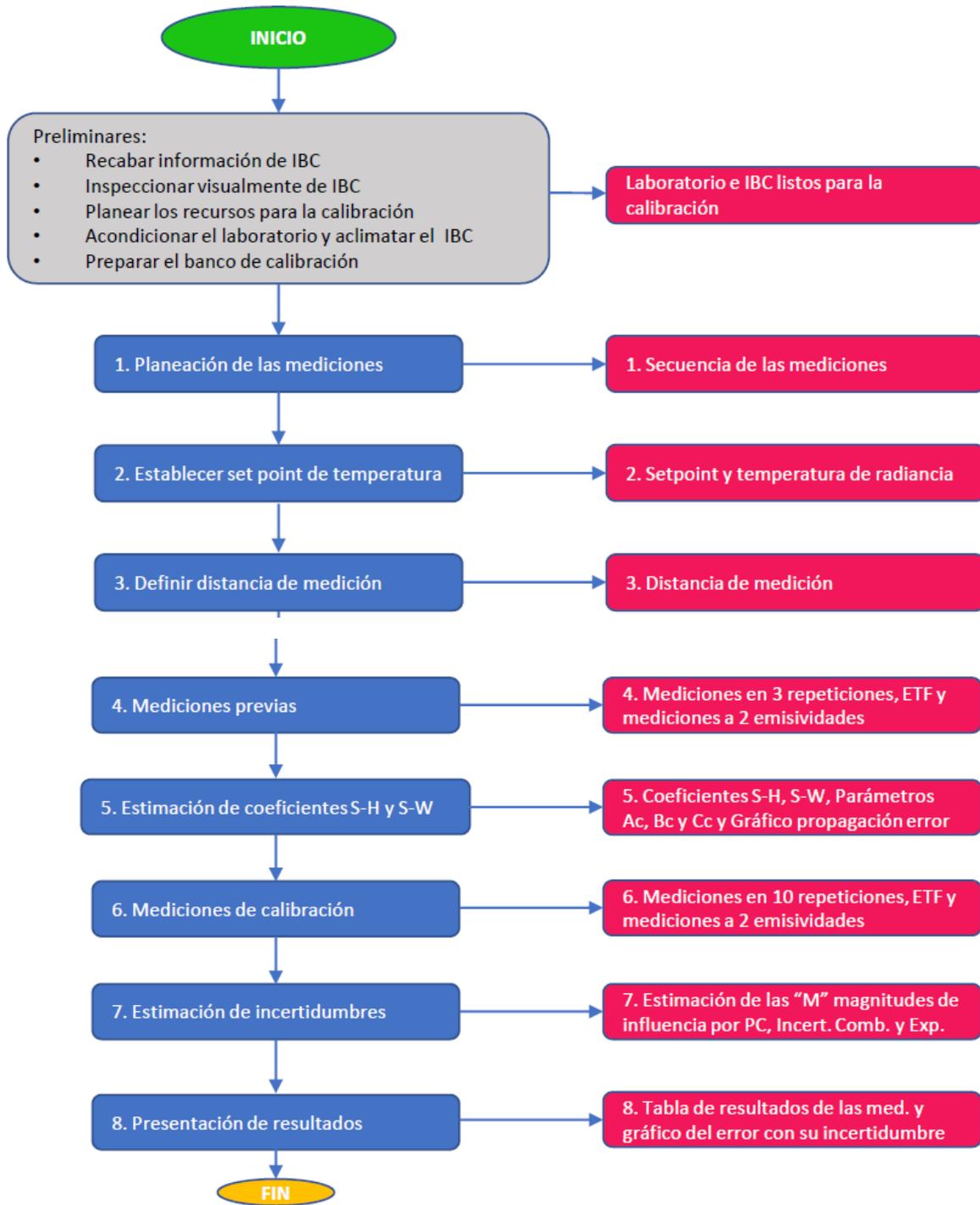


Figura 15. Flujograma de la "Metodología de calibración Dauik® para termómetros de radiación"
Elaboración propia

4. RESULTADOS

Con la finalidad de implementar la “*Metodología de calibración Davik® para termómetros de radiación*” propuesta en esta tesis, se realizó un experimento en los laboratorios de calibración de temperatura de no contacto de [Kapter®](#) (Persona moral: Brikap, S.A. de C.V.). **A continuación, se describe la secuencia del proceso de calibración de un termómetro de radiación**, marca: Fluke, modelo: 568, no. serie: 24670058, que opera en un intervalo de medida: (-40 a + 800) °C y resolución óptica: 50:1, con emisividad ajustable y ajustada a 1; cuenta con 1% de precisión y un rango espectral: (8 a 14) μm . Por sus características y el arreglo experimental del laboratorio no se consideraron desviaciones al método.

La calibración se llevó a cabo el 2021-02-27 dentro de la orden de servicio No.000487, en los siguientes puntos de calibración: (-6, 37.5, 300, 500, 750) °C y condiciones ambientales promedio: 23.72 °C \pm 0.24 °C y 37% HR \pm 1.9% y condiciones de Background promedio: 25.12 °C \pm 0.24 °C, las cuales fueron medidas con 2 termohigrómetros calibrados. El arreglo experimental utilizado consta de un sistema de posicionamiento lineal y uno radial, ambos marca: [Davik®](#) y 5 fuentes de radiación de los siguientes modelos: [Davik® 80](#), [Davik® 19](#), [Davik® 300](#), [Davik® 550](#) y [Davik® 750](#), todas debidamente calibradas en los laboratorios de [Kapter®](#) y se utilizaron dos patrones de contacto marca Omega: uno del tipo RTD y otro termopar, igualmente calibrados y con trazabilidad a patrones nacionales.

4.1. ACTIVIDADES PRELIMINARES A LA CALIBRACIÓN

A continuación se describen las actividades preliminares que se realizaron para la calibración:

4.1.1. Recabación de información del termómetro de radiación a calibrar (IBC)

Con ayuda del formato F-SG-004-04, (ver [Figura 16](#)) se recabaron las siguientes especificaciones técnicas del IBC con No. Serie: 24670058:

- Tipo de IBC: Termómetro de radiación
- Marca: Fluke
- Modelo: 578
- Intervalo de medida: (-40 a + 800) °C
- Resolución óptica: 50:1
- Emisividad ajustable: E = 1
- Precisión: 1%
- Rango espectral: (8 a 14) μm
- Puntos de calibración: (-6, 37.5, 300, 500, 750) °C

Kapter
 Expertos en termografía
 Persona moral: BRICAP S.A. de C.V.

LABORATORIO DE METROLOGÍA: MAGNITUD TEMPERATURA

Información general, recepción y entrega de equipo

No. Revisión: F-SG-004-04-03
 Inicio de vigencia: 2020-05-23
 Prioridad: Alta
 Página: 1 de 1

Recepción del IBC

Cliente: A TEC MEXICO Teléfono: 31658801 No. Orden de Servicio: 000487
 Domicilio: Antiguo Camino a Popalita C.P.: 45220 E-mail: mkm@ctecmexico.com
 Colonia: #2877 Col. Villas del Valle Estado: Jalisco RFC: KAMM7906301MA
 Municipio: Zapopan Contacto: Lic. Mario Portillo

Inspección Visual y Verificación del IBC

	Enciende		Funciona		Estuche		Manual		Cables		Tarjeta Almacenamiento		Baterías		Observaciones
	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No	
Calibración	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No	Desgaste de uso
Caracterización	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No	

Autorización del cliente: [Firma] Recibido por el laboratorio: LPA
 Fecha: 2021-02-26 Fecha: 2021-07-26

Datos de Certificado de Calibración

Equipo: Termómetro de R Emisividad: Variable 1 5 a 7 Días hábiles a partir de la recepción: 2021-03-09
 Marca: Fluke Banda Espectral: 8 a 14 μm Vigencia: N/A Puntos de Calibración:
 Modelo: 568 IR Resolución del detector: N/A Resolución Óptica (D:S): 50:1
 No. Serie: 24690058 ID: LTR-08 Resolución del IBC: 0.1°C
 Nombre: Brickap S.A. de C.V.
 Domicilio: Antiguo Camino a Popalita #2877, Col. Villas del Valle, Zapopan Jal. C.P. 45220.

(6, 100, 300, 500, 750) °C

Figura 16. F-SG-004-04 - Información general, recepción y entrega de entrega de equipo
 Elaboración propia

4.1.2. Verificación de posible desviación al modelo matemático

Por las características del IBC y el arreglo experimental del laboratorio, no se consideraron desviaciones al método. Ya que el IBC puede ser ajustado a $E=1$ y su rango espectral está dentro del intervalo de emisividad espectral de las fuentes de radiación.

4.1.3. Inspección visual del IBC e ingreso al laboratorio

Se revisa de manera externa y visualmente se identifica el estado del IBC. Se verifica que éste no tenga daño en el filtro, los botones, que cuente con baterías y en general, que se encuentre en condiciones adecuadas para su calibración.

Se realiza una prueba sencilla para asegurar que las mediciones que está realizando son coherentes al objeto medido. Esta prueba consiste en medir algún objeto cercano del que se conozca su temperatura y verificar si ésta es del orden de la que está midiendo el IBC.

Todos los detalles se asientan en el formato de Inspección visual F-SG-004-05. (ver [Figura 17](#)) y derivados de los resultados de esta inspección, se procedió a ingresar el IBC al laboratorio.

Kapter Expositos en Termografía

Tarjeta de Identificación
Laboratorio de Metrología
Magnitud Temperatura

Orden de Servicio: 0000487
Fecha de Recepción del Laboratorio: 2021-02-26
Fecha de Inspección Visual: 2021-02-26
Página: 1 de 2

PRESTATERMINADO S. DE C. I.

IDENTIFICACIÓN

Cliente: ATEC MÉXICO
Instrumento: Termómetro de Radiación
No. Serie: 24670058
No. Inventario: ITR-08
Observaciones: Desgaste de uso

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL IBC

Resolución óptica D:S 50:1

Intervalo de medición -40 °C a +80 °C

Puntos a calibrar (-6, 37.5, 80, 500, 750) °C

Emissividae FIXA Valor: VARIABLE Valor: 1

Banda Espectral 8 mm a 14 mm

Resolución 0.1 °C

ESTADO DEL SERVICIO

En Calibración Terminado

Calibrado por: LEPA Autorización de salida por: mkm

148-0014 11-10-2010-001

Kapter Expositos en Termografía

Inspección Visual
Laboratorio de Metrología
Magnitud Temperatura

Orden de Servicio: 0000487
Fecha de Recepción del Laboratorio: 2021-02-26
Fecha de Inspección Visual: 2021-02-26
Página: 2 de 2

PRESTATERMINADO S. DE C. I.

INSPECCIÓN VISUAL

Enciende	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> No	
Batería cargada	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> No	
Tipo de alimentación	Batería <input checked="" type="checkbox"/>	Corriente alterna (CA) <input type="checkbox"/>	
Cable de alimentación de CA	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> No	No Aplica <input type="checkbox"/>
Incluye baterías	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> No	No Aplica <input type="checkbox"/>
Cuenta con cargador de baterías	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> No	No Aplica <input type="checkbox"/>
Sensible a diferentes temperaturas	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> No	No Aplica <input type="checkbox"/>
Funcionan los botones	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> No	No Aplica <input type="checkbox"/>
Funciona la pantalla	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> No	No Aplica <input type="checkbox"/>
Lente dañado	<input type="checkbox"/> SI	<input checked="" type="checkbox"/> No	No Aplica <input type="checkbox"/>
Existe corrosión de gas	<input type="checkbox"/> SI	<input checked="" type="checkbox"/> No	
Presenta golpes o ralladuras	<input type="checkbox"/> SI	<input checked="" type="checkbox"/> No	
Hay daño por salpicadura de agua	<input type="checkbox"/> SI	<input checked="" type="checkbox"/> No	
Existe evidencia de condensación	<input type="checkbox"/> SI	<input checked="" type="checkbox"/> No	
Existe evidencia de polvo	<input type="checkbox"/> SI	<input checked="" type="checkbox"/> No	
Cuenta con Manual	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> No	
Cuenta con estuche	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> No	
Cuenta con tapa/protector de lente	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> No	
Cuenta con lector de tarjetas	<input type="checkbox"/> SI	<input checked="" type="checkbox"/> No	No Aplica <input checked="" type="checkbox"/>
Incluye memoria externa	<input type="checkbox"/> SI	<input checked="" type="checkbox"/> No	No Aplica <input checked="" type="checkbox"/>
Cuenta con cable USB	<input type="checkbox"/> SI	<input checked="" type="checkbox"/> No	No Aplica <input checked="" type="checkbox"/>
Cuenta con cable de video	<input type="checkbox"/> SI	<input checked="" type="checkbox"/> No	No Aplica <input checked="" type="checkbox"/>
Cuenta con otro accesorio (especificar)	<u>Ninguno</u>		
Observaciones	<u>Desgaste de uso</u>		

148-0014 11-10-2010-001

Figura 17. F-SG-004-05 - Inspección visual del IBC
Elaboración propia

4.1.4. Planeación de los recursos para la calibración

Con base a la información recabada del IBC en el punto 4.1.1, se hace una planeación general de los recursos para realizar la calibración, considerando lo siguiente y se llena la [Tabla: 4.1](#) Planeación de los recursos de la calibración.

- Respecto al IBC: Se consideró lo relativo a su preparación respecto a identificación, limpieza, etc.
- Respecto a los recursos del laboratorio: Con base a los puntos de calibración ya seleccionados, se eligen las fuentes de radiación a emplear, los patrones y equipos auxiliares, así como los sistemas adicionales requeridos como son el sistema de posicionamiento, accesorios, etc.
- Respecto al capital humano: Para este ejercicio de calibración se eligieron a dos técnicos metrólogos.

Tabla 13. Planeación de los Recursos de la Calibración

Planeación de los Recursos de la Calibración		
No. Item	Recursos a planear e información relevante a la calibración	Información del arreglo experimental del laboratorio y del IBC para la calibración
1	Elección de fuente de radiación, considerando su intervalo de temperatura y su rango espectral	Mod. Dauik 19, Dauik 80, Dauik 300, Dauik 550: recubrimiento con emisividad espectral calibrada. Mod. Dauik 750: superficie oxidada, con emisividad efectiva calculada experimentalmente.
2	Emisividad efectiva de la fuente de radiación	0.994 para los modelos: Dauik 19, Dauik 80, Dauik 300, Dauik 550 0.983 para el modelo: Dauik 750
3	Emisividad de calibración del IBC	E=1 – Dentro de método E≠1 – Desviación al método
4	Datos del patrón con su error e incertidumbre	Se obtienen de certificado de calibración
5	Metrólogos asignados a la actividad	Ing. Luis Fernando Rodríguez Arreguín Ing. Margarita Kaplun Mucharrafille

Elaboración propia

4.1.5. Acondicionamiento del laboratorio

Con base a los límites de condiciones ambientales establecidos en la Guía Técnica de CENAM, (Cárdenas García & CENAM, Guía Técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre en la calibración de termómetros de radiación, 2018): Temperatura ambiente y Humedad relativa, se acondicionan los laboratorios de [Kapter®](#):

Las condiciones promedio que se obtuvieron durante la calibración fueron:

- a) Temperatura ambiente: $23.72 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.24 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- b) % Humedad relativa: $37\% \pm 1.9\%$

4.1.6. Preparación del banco de calibración

Con base a los recursos asignados y especificados en la [Tabla 13](#) y la secuencia de las mediciones indicada en la [Tabla 14](#), se procedió a preparar todos los elementos del banco de calibración, para su disponibilidad durante la calibración.

El arreglo experimental se muestra en la [Figura 18](#), en el cual se muestran los elementos clave del mismo: con equipos, instrumentos y sistema de posicionamiento y se describen a continuación:

- 1) Termómetro de Radiación Patrón, Marca. Heitronics, calibrado con trazabilidad a patrones nacionales. Instalado sobre un sistema de posicionamiento lineal, Marca Dauik.
- 2) Termohigrómetro para medición de temperatura ambiental y % humedad relativa.
- 3) IBC: Termómetro de radiación bajo calibración, Marca. Fluke, Mod. 568.
- 4) Sistema de posicionamiento con regla graduada y soporte giratorio
- 5) Sonda RTD para medición de temperatura del detector
- 6) Termohigrómetro para medición de temperatura Background
- 7) Termómetro patrón de lectura directa, Mca. Omega, No. ID. LTR-16, Lector Mca. Keythley, No. ID. LTR-12. Conjunto de sensor + lector calibrado con trazabilidad a patrones nacionales.
- 8) Fuente de Radiación con cavidad de cuerpo negro, Marca. Dauik, Mod. Dauik 80. Calibrado con trazabilidad a patrones nacionales.
- 9) Pantalla de PC con aplicación para adquisición de datos y monitoreo del comportamiento de la cavidad de cuerpo gris de la Fuente de Radiación.

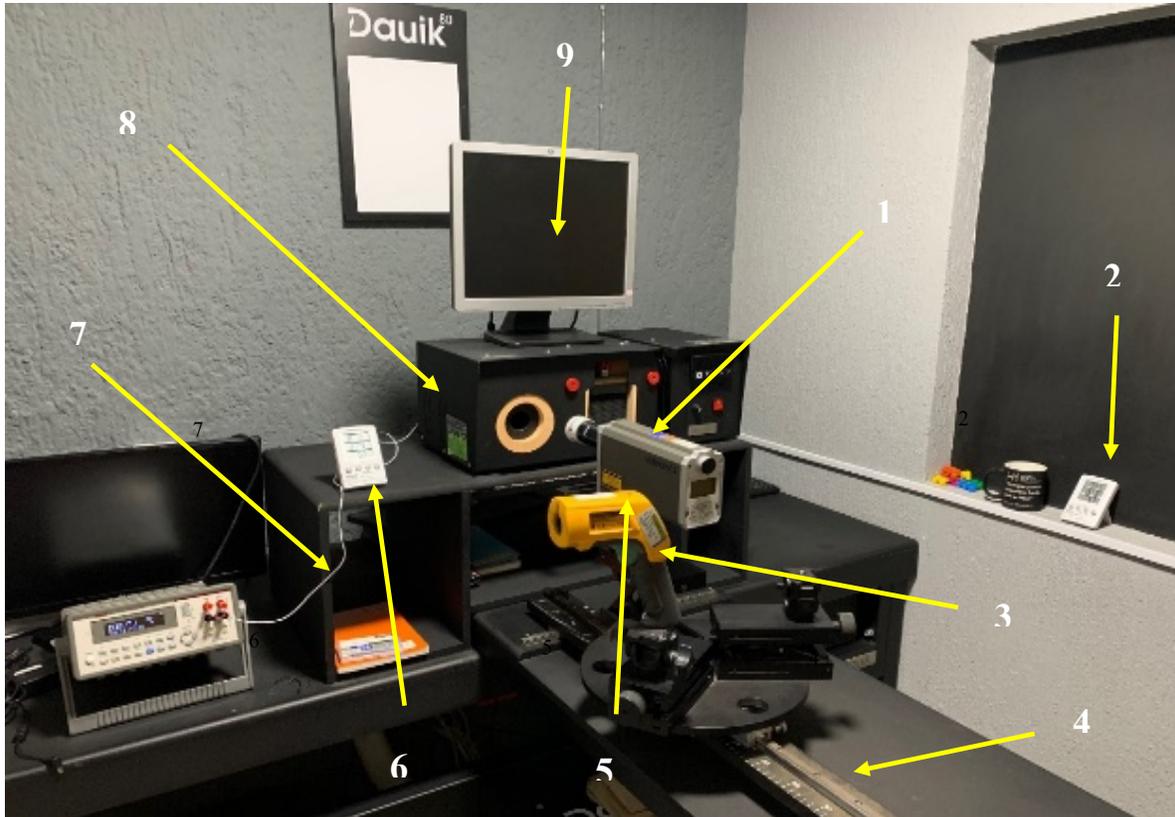


Figura 18. Arreglo experimental en el laboratorio de temperatura de radiación de temperaturas bajas de [Kapter®](#)
Elaboración propia.

4.2. ACTIVIDADES DE LA “METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN DAUIK® PARA LA CALIBRACIÓN DE TERMÓMETROS DE RADIACIÓN”

A continuación, se describen las actividades de la metodología que se realizaron durante la calibración:

4.2.1. Aclimatación del IBC

Una vez que se ingresó el IBC al laboratorio, se empezó a contabilizar el tiempo de 24 h para su aclimatación, con la finalidad de que adquiriera las condiciones ambientales del laboratorio.

4.2.2. Planeación de la secuencia de las mediciones

Con base a los recursos asignados en el punto [4.1.4](#), se genera la planeación de las mediciones con ayuda de una [Tabla 14](#), con la finalidad de visualizar una

secuencia efectiva en las mediciones por punto de calibración, tomando en cuenta las mediciones previas y de calibración a realizar, número de mediciones, fuente de radiación a emplear, tiempo en días para la medición y el orden de las mismas.

Tabla 14. Planeación de las mediciones

No. Item	Planeación de las mediciones					
		No. Punto Calibración	1	2	3	4
2	Temperatura (°C)	-6	37.5	300	500	750
3	Medición	P+C	C	P+C	C	P+C
4	No. mediciones	3+10	10	3+10	10	3+10
5	Fuente Radiación	Dauik 80	Dauik 19	Dauik 300	Dauik 550	Dauik 750
6	Día de medición	1	2	1	2	1
7	Orden	1ro.	1ro.	2do.	2do.	3ro.

P = Mediciones Previas

C = Calibración

Elaboración propia

Resumiendo, así que en el primer día se medirán los puntos No.1, 3 y 5, empezando por el punto mínimo de -6 °C, luego por el intermedio de 300 °C y finalizando con el máximo de 750 °C, con el uso de las fuentes de radiación: Mod. Dauik® 80, Dauik® 300 y Dauik® 750 respectivamente. Ese mismo día se realiza el número de mediciones requeridas para las mediciones previas y de calibración y lo que conlleva con base a la metodología.

El segundo día se vuelven a acondicionar el laboratorio y se continúan con las mediciones de los puntos faltantes No. 2 y 4, empezando con el menor de 37.5 °C y finalizando con el último punto de 500 °C, con el uso de las fuentes de radiación: Mod. Dauik® 19 y Dauik® 550. Este día se realiza el número de mediciones requeridas para las mediciones de calibración y lo que conlleva con base a la metodología.

4.2.3. Establecimiento del set point de las fuentes de radiación

Cada modelo de fuente de radiación existente en el mercado cuenta con sus propias especificaciones técnicas, entre las que se encuentra el tipo de controlador de temperatura, pudiendo ser de tipo Rampa, PID, entre otros. Es importante conocer los equipos de medición con los que se cuenta, para poder eficientar las mediciones. En el caso de las fuentes de radiación de la Mca. Dauik® con las que cuenta Kapter®, todos cuentan con controladores de temperatura tipo PID, lo que permite hacer un acercamiento suavizado a la temperatura de calibración deseada y con ello, no exceder el calentamiento del metal de la cavidad de cuerpo negro o de placa radiante de las fuentes.

Independientemente de la marca y modelo de la fuente de radiación, el laboratorio debe establecer el mecanismo que utilizará para establecer el set point en cada uno de los puntos de temperatura en que se realizarán las mediciones.

Comúnmente, existe una diferencia entre la indicación de la temperatura del display contra la temperatura de su sensor interno, correspondiente a su controlador de temperatura; en muchas ocasiones se debe a la posición interna de dicho sensor y el tiempo de respuesta de éste a su controlador. Esta diferencia debe ser compensada con la finalidad de que la fuente radiante alcance la temperatura de referencia más próxima a la temperatura nominal a calibrar (ya compensada en caso de ser termómetro de contacto mediante su transformación a temperatura de radiancia).

Las fuentes de radiación cuentan con características metrológicas como: Error de medición, incertidumbre de medición, uniformidad, inestabilidad, entre otras que permiten conocer su comportamiento. Para conocerlas, es recomendable calibrarlas o caracterizarlas, para de esta manera conocerlas a detalle y realizar las compensaciones necesarias, y así alcanzar la temperatura deseada para realizar la calibración.

En este aspecto, se debe tomar en cuenta el esquema de calibración a utilizar conforme el punto [2.3.6.c\)](#). Ya que dependiendo de ello, la temperatura de referencia pudiera obtenerse del termómetro de radiación patrón, de las lecturas del display de la fuente o bien, por el termómetro de contacto patrón y cualquiera de ellos se debe corregir con sus datos de calibración, para que la temperatura a establecer en el set point sea la más cercana a lo requerido.

Dependiendo del tipo de sensor a considerar como temperatura de referencia, se hace una segunda compensación:

1. Si el patrón es del tipo de termómetro de radiación, su lectura se corrige con sus datos de calibración y se emplea de manera directa como temperatura de referencia para el cálculo del mensurando: error de medida: $T_{Patrón}$
2. Si el patrón es del tipo de contacto - Termopar o RTD – ésta lectura de temperatura termodinámica, se debe corregir con sus datos de calibración y se debe convertir a temperatura de radiancia. Lo cual se logra, calculando un flujo de energía entrante y saliente de la fuente de radiación, para ello se puede recurrir a la ecuación [\(56\)](#).
3. Para usar [\(56\)](#), la temperatura termodinámica ya corregida, que se obtiene del termómetro de contacto patrón, T se convierte a K y se sustituye en la ecuación, con la finalidad de obtener la temperatura de referencia para el cálculo del mensurando: error de medida: $T_{Patrón}$

De las características metrológicas de las fuentes de radiación, se toma el valor de su error de medida de su certificado de calibración correspondiente, el cual se obtiene de restar el valor de temperatura promedio contra la lectura Indicador control (ver [Tabla 15](#)) y con ello, poder hacer la corrección en el display se hacen los cálculos requeridos para establecer el set point de las fuentes de radiación. El valor del error considerado se indica con una flecha en la misma tabla, para su fácil localización.

Tabla 15. Resultados “parciales” de la evaluación de la incertidumbre del control de temperatura de la fuente de radiación, Mod. Dauik 80.

Punto Calibración	A.3 Resultados de la evaluación de la incertidumbre del control de temperatura de la fuente de radiación, Mod. Dauik 80.						
1 2 3	Lectura Indicador Control No. Serie:004-2014	Temperatura patrón t_{90} (°C)	Valor de temperatura promedio (°C)	Desviación máxima entre el valor de temp. promedio y la Temperatura patrón t_{90} (°C)		Incertidumbre Fuente Radiación U_f (Tb) (°C); k = 2	
				VP	Error de medida		
	-7.03	-6.97	-7.03	No aplica	-0.05		0.34
	24.59	24.31	24.59	No aplica	0.28		0.95
	42.53	42.46	42.53	No aplica	0.07	1.41	

Elaboración propia

Y como el laboratorio de [Kapter®](#) cuenta con un termómetro patrón de contacto, se realizó la conversión de su temperatura termodinámica, a temperatura de radiancia, con el objetivo de alcanzar el set point deseado. Esto se realizó para todos los puntos calibrados. Los resultados se muestran en la [Tabla 16](#).

- Ejercicio de uno de los cálculos de temperatura de contacto a temperatura de radiancia:

Temperatura nominal: 300 °C

Punto de calibración: 300.96 °C, equivalente a 574.11 K

$T_{RAD} = 572.77 K$, equivalente a **299.62 °C** -> Esta temperatura ahora ya es temperatura de radiancia y con ello, es la lectura a la que se desea llegar con la fuente de radiación, es decir, con este valor y el valor del error del indicador del display ya aplicado, se alcanza el set point elegido.

Tabla 16. Resultados de la conversión de temperatura termodinámica del $T_{Patrón}$ a temperatura de radiancia por punto de calibración

No. Punto de Calibración	Punto de Calibración (°C)	Temperatura termodinámica (°C)	Temperatura de radiancia (°C)
1	-6.00	-5.85	-5.66
2	37.50	37.69	37.60
3	300.00	300.96	299.62
4	500.00	500.12	497.79
5	750.00	750.97	741.93

Elaboración propia

4.2.4. Definición de la distancia de medición – efecto del tamaño de la fuente – ETF

Se realiza la prueba del ETF en cada uno de los puntos de calibración y la información se recaba en una tabla como la mostrada en la [Tabla 17](#), que contiene la siguiente información: No. punto de calibración, temperatura nominal, 6 distancias de prueba de medición y en cada distancia se hacen 3 repeticiones, las cuales se ingresan en las celdas azules de la tabla indicada.

Así mismo, se muestra un gráfico que en el eje de las X contiene los datos de la distancia de medición en m, contra el promedio de las señales virtuales, denominada Prom. Sigma, σ con la finalidad de visualizar gráficamente cómo se ve afectada la señal del IBC cuando la distancia se incrementa.

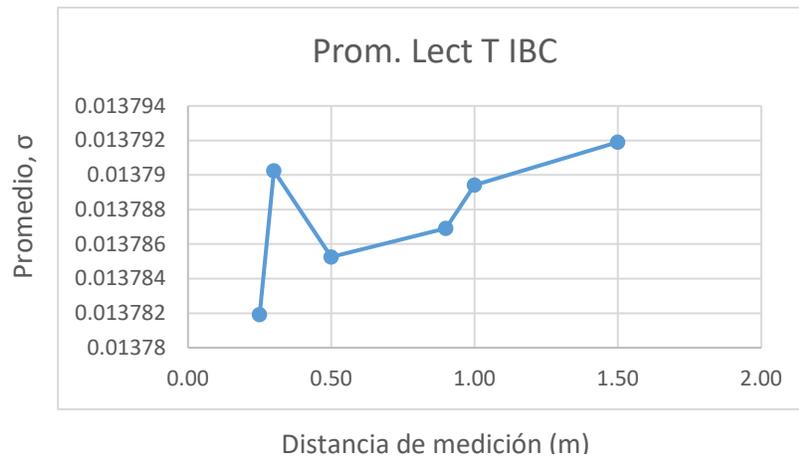
La hoja de cálculo está programada para calcular automáticamente las señales virtuales del promedio de las repeticiones realizadas. Esta se realiza en la pestaña de Bitácora de mediciones previas y se realizan tanto en la actividad de mediciones previas y de calibración. Estas señales se promedian para obtener el efecto del tamaño de la fuente, σ , así como la $U\sigma$ y el porcentaje de dicha señal. Datos que serán utilizados dentro de la estimación de incertidumbre.

En la siguiente [Tabla 17](#) se muestran los resultados del efecto que tiene el tamaño de la fuente, en la señal recibida por el IBC y la información recabada para tales fines. Esto se realiza por punto de calibración.

Tabla 17. Efecto del tamaño de la fuente por punto de calibración
Elaboración propia

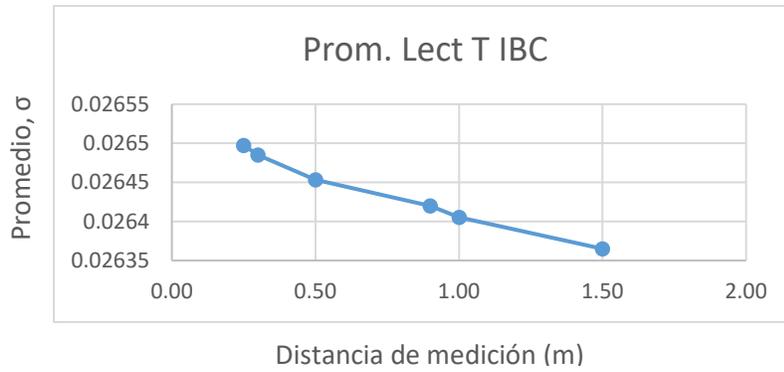
No. 1 Punto de calibración: - 6 °C

No. Lectura	Prom. Lect. IBC	Distancia (m)	Lect T IBC 1	Lect T IBC 2	Lect T IBC 3	SV1	SV2	SV3	Prom. Sigma	u Sigma	%	Sigma
1	-3.0	0.25	-3.00	-3.0	-3.0	0.0137819	0.0137819	0.0137819	0.0137819	0.0881917	1	
2	-3.0	0.30	-3.00	-2.9	-3.0	0.0137819	0.0138069	0.0137819	0.0137902	0.0333333	1.0006041	
3	-3.0	0.50	-2.99	-3.0	-3.0	0.0137844	0.0137869	0.0137844	0.0137852	0.057735	1.0002415	
4	-3.0	0.90	-2.98	-2.98	-2.98	0.0137869	0.0137869	0.0137869	0.0137869	0.0333333	1.0003623	
5	-3.0	1.00	-2.97	-2.97	-2.97	0.0137894	0.0137894	0.0137894	0.0137894	0.0881917	1.0005435	
6	-3.0	1.5	-2.96	-2.96	-2.96	0.0137919	0.0137919	0.0137919	0.0137919	3.14E-16	1.0007247	
										0.0881917		1.00072



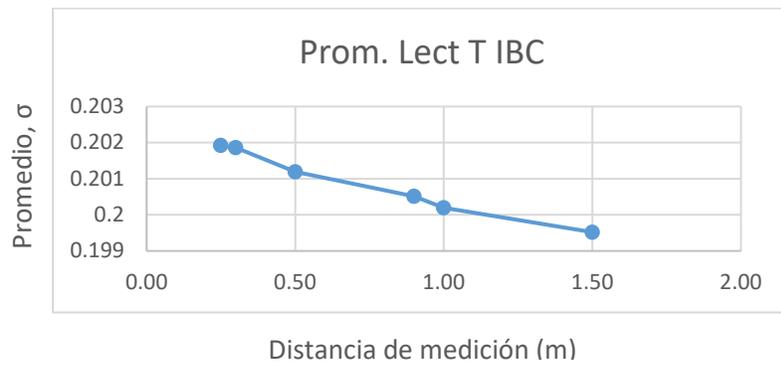
No. 2 Punto de calibración: 37.5 °C

No. Lectura	Prom. Lect. IBC	Distancia (m)	Lect T IBC 1	Lect T IBC 2	Lect T IBC 3	SV1	SV2	SV3	Prom. Sigma	u Sigma	%	Sigma
1	38.2	0.25	38.2	38.2	38.2	0.0264974	0.0264974	0.0264974	0.0264974	0	1	
2	38.2	0.30	38.2	38.1	38.2	0.0264974	0.0264606	0.0264974	0.0264851	0.0333333	0.9995369	
3	38.1	0.50	38.1	38.1	38.1	0.0264532	0.0264532	0.0264532	0.0264532	0	0.9983331	
4	38.0	0.90	38.0	38.0	38.0	0.0264201	0.0264201	0.0264201	0.0264201	0	0.997084	
5	38.0	1.00	38.0	38.0	38.0	0.0264054	0.0264054	0.0264054	0.0264054	0	0.9965291	
6	37.8	1.50	37.8	37.8	37.8	0.026365	0.026365	0.026365	0.026365	0	0.9950041	
										0		0.99500



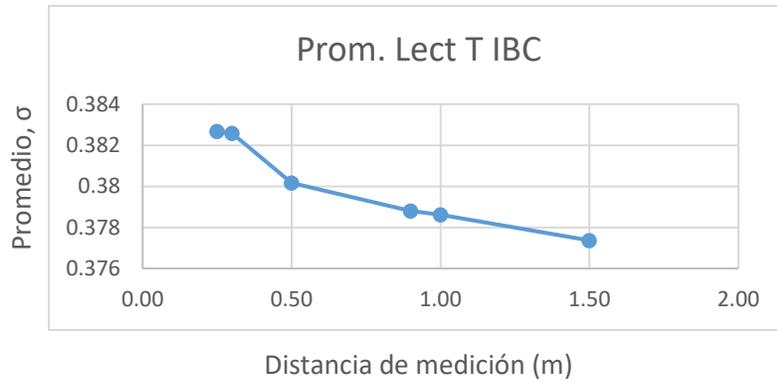
No. 3 Punto de calibración: 300 °C

No. Lectura	Prom. Lect. IBC	Distancia (m)	Lect TIBC 1	Lect TIBC 2	Lect TIBC 3	SV1	SV2	SV3	Prom. Sigma	u Sigma	%	Sigma
1	299.2	0.25	299.2	299.1	299.4	0.2018919	0.201804	0.2020678	0.2019212	0.0881917	7.6204132	
2	299.2	0.30	299.2	299.1	299.2	0.2018919	0.201804	0.2018919	0.2018626	0.0333333	7.6182004	
3	298.4	0.50	298.3	298.4	298.5	0.2011008	0.2011887	0.2012765	0.2011887	0.057735	7.5927661	
4	297.6	0.90	297.6	297.6	297.7	0.200486	0.200486	0.2005738	0.2005152	0.0333333	7.567351	
5	297.3	1.00	297.3	297.1	297.4	0.2002226	0.2000471	0.2003104	0.2001933	0.0881917	7.5552031	
6	296.5	1.50	296.5	296.4	296.6	0.1995207	0.199433	0.1996084	0.1995207	0.057735	7.5298167	
										0.1054093		0.98811



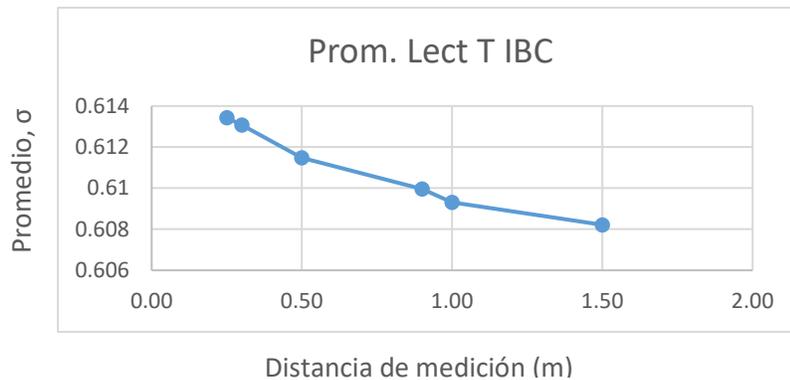
No. 4 Punto de calibración: 500 °C

No. Lectura	Prom. Lect. IBC	Distancia (m)	Lect TIBC 1	Lect TIBC 2	Lect TIBC 3	SV1	SV2	SV3	Prom. Sigma	u Sigma	%	Sigma
1	494.3	0.25	494.3	494.3	494.3	0.3826723	0.3826723	0.3826723	0.3826723	0	1	
2	494.2	0.30	494.3	494.0	494.3	0.3826723	0.3823892	0.3826723	0.3825779	0.1	0.9997534	
3	491.7	0.50	491.7	491.7	491.7	0.3801712	0.3801712	0.3801712	0.3801712	4.019E-14	0.9934641	
4	490.2	0.90	490.2	490.2	490.2	0.3788025	0.3788025	0.3788025	0.3788025	0	0.9898874	
5	490.0	1.00	490.0	490.0	490.0	0.3786137	0.3786137	0.3786137	0.3786137	0	0.9893941	
6	488.7	1.50	488.7	488.7	488.7	0.3773676	0.3773676	0.3773676	0.3773676	0	0.9861377	
										0		0.98614



No. 5 Punto de calibración: 750 °C

No. Lectura	Prom. Lect. IBC	Distancia (m)	Lect T IBC 1	Lect T IBC 2	Lect T IBC 3	SV1	SV2	SV3	Prom. Sigma	u Sigma	%	Sigma
1	747.0	0.25	747.0	747.0	747.0	0.6134276	0.6134276	0.6134276	0.6134276	0	1	
2	746.6	0.30	747.0	746.8	746.0	0.6134276	0.6132541	0.61256	0.6130805	0.305505	0.9994343	
3	744.8	0.50	744.8	744.8	744.8	0.6114749	0.6114749	0.6114749	0.6114749	0	0.9968167	
4	743.0	0.90	743.0	743.0	743.0	0.6099546	0.6099546	0.6099546	0.6099546	0	0.9943384	
5	742.3	1.00	742.3	742.3	742.3	0.6093026	0.6093026	0.6093026	0.6093026	0	0.9932755	
6	741.0	1.50	741.0	741.0	741.0	0.6082154	0.6082154	0.6082154	0.6082154	0	0.9915033	
										0		0.99150



De la prueba de ETF puede observarse lo siguiente:

- Gráficamente se observa que entre 0.25 m y 0.30 m la variación de temperatura tiene menores variaciones. Aunque se podría considerar inclusive hasta 0.90 m para hacer las mediciones de la calibración.
- Partiendo de la información de la Resolución óptica del IBC se sabe que tiene un D:S = 50:1, con la siguiente relación mostrada en la [Tabla 18](#):

Tabla 18. Resolución óptica dada por el fabricante Fluke para el modelo 568

spot (m)	distancia (m)
0.019	0.3
0.018	0.9
0.042	1.5

Elaboración propia

En donde se indica que es válido medir a 0.30 m, 0.90 m y 1.5 m de distancia, de las cuales, se podrían considerar las dos primeras, por lo obtenido en la prueba de ETF, en donde se observa que no existe variación significativa en las lecturas de temperatura.

- Considerando la información de la [Tabla 17](#) y sacando el promedio de los sigmas calculados = 0.9923, se concluye que el número de veces que el diámetro debería ser mayor es: $N = 1$.
- La fuente de radiación tiene un diámetro efectivo de medición de 0.038 m, por lo que si se determina medir a una distancia de 0.30 m, el IBC estaría observando un diámetro de 0.019 m, lo cual representaría un $N = 2$, por lo tanto, es adecuado medir en dicha distancia.
- Siendo así, que la calibración se llevará a cabo a una distancia de 0.30 m.

4.2.5. Realizar las mediciones previas

Partiendo de los puntos de calibración, se eligen los tres puntos para las mediciones previas, entonces, si los puntos de calibración son: (-6, 37.5, 300, 500, 750) °C, se eligieron el punto mínimo, intermedio y máximo para realizar las mediciones previas: (-6, 300, 750) °C.

Toda la información de las mediciones previas se recaba en la hoja de cálculo desarrollada, en la pestaña: Bitácora mediciones previas, en la cual se capturan: Las mediciones de las tres repeticiones, las mediciones para el efecto del tamaño de la fuente, los datos de la calibración del patrón y sus interpolaciones para las correcciones del mismo, las mediciones a diferentes emisividades. Se identifican con azul las celdas que deben llenarse. Esto se muestra en la [Tabla 19](#).

A continuación, se muestra la información recabada durante las mediciones previas para el punto intermedio de 300 °C:

- a) Prueba del efecto del tamaño de la fuente: Tanto la información recabada, como los cálculos y gráfico se muestran en la [Tabla 17](#), tercer punto de calibración.
- b) Bitácora de mediciones previas, para el punto de calibración No. 3: 300 °C, del primer día de mediciones.

Tabla 19. Bitácora de mediciones previas, para el punto de calibración No. 3: 300°C

No. Serie IBC:	24670058									
Medio de reproducción:	Dauik 300									
No. Certificado de calibración:	LTR-000271 (C-M)									
Fecha mediciones:	2021-02-26									
T nominal:	300.0 °C				ε ef. fuente =	0.993		ε IBC =	1	
No. medición	Tamb (°C)	T background (°C)	T detector (°C)	Hora Software (PC)	T8 (cavidad) (°C)	Patrón (°C)	Error patrón (°C)	Patrón corregido (°C)	IBC (°C)	Error (°C)
1	24.20	26.10	26.60							
1				11h09	298.60	300.92	-0.41	301.33	299.00	-2.33
2				11h10	299.00	300.94	-0.41	301.35	299.00	-2.35
2	24.20	26.20	26.70							
3; Var. Ciclo 2 y 1	0.00			11h10	299.00	300.91	-0.41	301.32	298.90	-2.42
Promedio	24.20	26.15	26.65		298.87	300.92	-0.41	301.33	298.97	-2.37
Var. Avance Pta. Calib.	0.00	0.10		Calibró:	Ing. Fernando Rodriguez e Ing. Margarita Kaplun					
Observaciones:	Ejercicio de calibración para validación de nuevo método con ecuación de aproximación de Cárdenas-Méndez									
distancia:	0.30 m			Humedad:	46.0%	LTR-18				
D:S	50:1									
Spot:	0.019									
Cálculo de interpolación para: ERROR E INCERTIDUMBRE DEL PATRÓN			Datos de calibración del PATRÓN							
T patrón (°C)	error (°C)	incertidumbre (°C)	LTR-13	1. Cert. calibración CIDESI: LTE201114 @ 2. Cert. calibración TENKO: TK-CT-435-2020 @		Fecha Calib.	T.Patrón			
249.980	-0.350	0.22	T patrón (°C)	Mipatrón contacto (°C)	error (°C)	U (°C)	2020-11-02 Termopar			
349.990	-0.470	0.22	249.980	249.630	-0.35	0.220				
300.92	-0.41	0.22	349.990	349.520	-0.47	0.220				

Elaboración propia

- c) Medición en dos diferentes emisividades: E = 1 y E = 0.5, como se muestra en la [Tabla 20](#). Esto se obtiene ajustando el valor de emisividad en el display del IBC, en caso de que este lo permita. Si éste no tiene dicha función, se puede hacer un cálculo virtual para conocer el valor de la temperatura, cuando $\epsilon = 0.5$.

Tabla 20. Mediciones a dos diferentes emisividades: E=1 y E= 0.5, para el punto de calibración No. 3: 300 °C

No. PC	3
T nominal (°C)	300.00
T IBC E = 1 (°C)	298.97
T IBC E = 0.5 (°C)	463.40

Elaboración propia

Estos pasos se realizaron para los tres puntos seleccionados para las mediciones previas.

4.2.6. Obtención de los coeficientes de S-H Y S-W

Estos coeficientes, como se mencionó en el [Capítulo 3](#), se requieren para la estimación de incertidumbre y para la propagación del error. Y para calcularlos, se utilizó la información obtenida en las mediciones previas y la hoja de cálculo, en la pestaña 1 y 2: Obtención S-H y Propagación de Incertidumbre.

Para calcularlos se requieren varios pasos, los cuales se muestran a continuación:

- Primero: Se obtienen los coeficientes A_{SW} y B_{SW} con la información mostrada en la [Tabla 21](#)

Tabla 21. Obtención de los coeficientes A_{SW} y B_{SW}

Constantes Planck	Valor	Unidades
$C_{1L} =$	119104295	W $\mu\text{m}^4 \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1}$
$C_2 =$	14388	$\mu\text{m K}$

Información de Longitud de Onda					
$\lambda_1 =$	8	μm	$\lambda_2 - \lambda_1 =$	6	μm
$\lambda_2 =$	14	μm	$\lambda_1 + \lambda_2 =$	22	μm
			$(\lambda_2 - \lambda_1) / (\lambda_1 + \lambda_2) =$	0.272727273	μm

Coeficientes de Saunders-White		
$A_{SW} =$	9.36363636	μm
$B_{SW} =$	178.363636	$\mu\text{m K}$
$C_{SW} =$	1	u.a.

Elaboración propia

- Segundo: Se obtienen los coeficientes A_c , B_c y C_c .

Para lo cual, se recaba la información de las mediciones previas en la pestaña 1 de la hoja de cálculo, se calcula el error entre la lectura del termómetro de radiación IBC y la temperatura del patrón; ambas temperaturas se convierten a Kelvin. Ver información en la [Tabla 22](#).

Tabla 22. Mediciones previas, cálculo del error y conversión a K

No.	Punto de Calibración	Lectura Termómetro Patrón	Lectura Termómetro de radiación IBC	$T_{TRI} - T_{ref}$	T_{RADI} se convierte a K	T_{TRI} se convierte a K
	Nominal / °C	$t_{ref} / °C = t_{RADI} / °C$	$t_{TRI} / °C$	Error / °C	T_{RADI} / K	T_{TRI} / K
1	-6	-5.86	-2.97	2.89	267.2948	270.1833
2	300	301.33	298.97	-2.36	574.4845	572.1167
3	750	750.97	746.60	-4.37	1024.1189	1019.7500

Elaboración propia

Partiendo de los coeficientes A_{SW} , B_{SW} y C_{SW} calculados y mostrados en la [Tabla 21](#), se obtiene la señal virtual para cada uno de los puntos de calibración para el termómetro de radiación IBC: T_{TRI} / K , ver [Tabla 23](#).

Tabla 23. Obtención de señal virtual para el Termómetro de radiación IBC

No.	Nominal / °C	T_{TRI} / K	Señal Virtual - IBC
1	-6	270.1833	0.004953351
2	300	572.1167	0.080298318
3	750	1019.7500	0.295037667

Elaboración propia

y se calcula la señal virtual para cada uno de los puntos de calibración para el termómetro de radiación patrón: T_{RADI} / K , ver [Tabla 24](#).

Tabla 24. Obtención de señal virtual para el Termómetro de radiación patrón

No.	Nominal / °C	T _{RADI} / K	Señal T _{RAD} - patrón
1	-6	267.2948	0.0048
2	300	574.4845	0.0812
3	750	1024.1189	0.2950

Elaboración propia

Ya que se cuenta con ambas señales virtuales, recabadas en la [Tabla 23](#) y [Tabla 24](#), se obtiene la diferencia entre ellas (en valores absolutos) y se saca la sumatoria de la diferencia de las señales, ver [Tabla 25](#).

Tabla 25. Obtención de diferencia entre señales virtuales y sumatoria de las mismas

Nominal / °C	Señal Virtual - IBC	Señal TRAD - patrón	Dif. Señales
-6	0.004953351	0.004835729	0.0001176222
300	0.080298318	0.081151112	0.0008527941
750	0.295037667	0.295037664	2.37E-09
		Suma	0.000735

Elaboración propia

Se ejecuta la función "SOLVER" del Excel y se obtienen los valores de Ac, Bc y Cc que satisfacen mejor la restricción, la cual es que la $\sum \text{Diferencia señales} = 0$ y estos corresponderán a los parámetros de caracterización del IBC que se utilizarán para la estimación de incertidumbre.

Se complementa la información de la [Tabla 25](#) con los coeficientes de S-H y la estimación de los mismos se coloca en verde para mejor visualización en la [Tabla 26](#), los cuales son estimados con la función "SOLVER" mencionada y la "RESTRICCIÓN" en una celda azul, ambos indicados con una flecha.

Tabla 26. Estimación de los coeficientes Ac, Bc y Cc de Sakuma Hattori mediante la función SOLVER de Excel

Coeficientes Sakuma-Hattori	Estimación	Unidades	Señal Virtual - IBC	Señal TRAD - patrón	Dif. Señales
Ac	9.393724805	µm	0.004953351	0.0048357	0.00011762
Bc	193.8316612	µm K	0.080298318	0.0811511	0.00085279
Cc	0.983092612	u.a.	0.295037667	0.2950377	2.373E-09
				Suma	0.00097042



Elaboración propia

4.2.7. Mediciones para la calibración

Partiendo de los puntos de calibración, se eligen los dos puntos faltantes de calibración, en este caso sería el: (37.5 y 500) °C. Ya que un día antes después de las mediciones previas se realizó la calibración correspondiente con sus 10 repeticiones.

Toda la información de las mediciones de calibración se recaba en la hoja de cálculo desarrollada, en la pestaña: Bitácora mediciones calibración, en la cual se capturan: Las mediciones de las diez repeticiones, los datos de la calibración del patrón y sus interpolaciones para las correcciones del mismo, las mediciones a diferentes emisividades. Se identifican con azul las celdas que deben llenarse. Esto se muestra en la [Tabla 27](#).

Continuando con la información de los resultados de la calibración, ahora se considera el segundo punto de calibración: 37.5 °C:

- a) Prueba del efecto del tamaño de la fuente: Tanto la información recabada, como los cálculos y gráfico se muestran en la [Tabla 17](#), segundo punto de calibración y se recaba en la pestaña de bitácora mediciones previas.
- b) Bitácora de mediciones de calibración, para el punto de calibración No. 2: 37.5 °C, del segundo día de mediciones.

Tabla 27. Bitácora de mediciones de calibración, para el punto de calibración No. 2: 37.5 °C

No. Serie IBC:	24670058									
Medio de reproducción:	Dauik 19									
No. Certificado de calibración:	LTR-000271 (C-M)									
Fecha mediciones:	2021-02-27									
T nominal:	37.5 °C				ε ef. fuente =	0.994		ε IBC =	1	
No. medición	Tamb (°C)	T background (°C)	T detector (°C)	Hora Software (PC)	T8 (cavidad) (°C)	Patrón (°C)	Error patrón (°C)	Patrón corregido (°C)	IBC (°C)	Error (°C)
1	22.50	22.20	22.70							
1				14h14	N/A	37.71	0.37	37.34	38.00	0.66
2				14h14	N/A	37.70	0.37	37.33	38.00	0.67
2	22.50	22.20	22.70							
3; Var. Ciclo 2 y 1	0.00			14h14	N/A	37.69	0.37	37.32	37.90	0.58
4				14h15	N/A	37.68	0.37	37.31	37.90	0.59
3	22.50	22.20	22.70							
5; Var. Ciclo 3 y 2	0.00			14h15	N/A	37.68	0.37	37.31	37.90	0.59
6				14h15	N/A	37.68	0.37	37.31	37.90	0.59
4	22.50	22.20	22.70							
7; Var. Ciclo 4 y 3	0.00			14h15	N/A	37.68	0.37	37.31	37.90	0.59
8				14h16	N/A	37.69	0.37	37.32	37.90	0.58
5	22.50	22.30	22.90							
9; Var. Ciclo 5 y 4	0.00			14h16	N/A	37.70	0.37	37.33	37.90	0.57
10				14h16	N/A	37.70	0.37	37.33	37.90	0.57
Promedio	22.50	22.22	22.74		#j DIV/0!	37.69	0.37	37.32	37.92	0.60
Var. durante Pto. Calib.	0.00	0.10		Calibró:	Ing. Fernando Rodríguez e Ing. Margarita Kaplun					
Observaciones:	Ejercicio de calibración para validación de nuevo método con ecuación de aproximación de Cárdenas-Méndez									
distancia:	0.30 m			Humedad:	43.0%		LTR-18			
D:S	50:1									
Spot:	0.019 m									
Cálculo de interpolación para: ERROR E INCERTIDUMBRE DEL PATRÓN			Datos de las calibraciones de los patrones							
T patrón (°C)	error (°C)	Incertidumbre (°C)	LTR-16		1. Cert. calibración CIDESI: LTE201116 @		Fecha Calib.	T.Patrón	Lector ID.	
20.010	0.310	0.084					2020-10-22	RTD	LTR-12	
40.020	0.380	0.084	T patrón (°C)		Mipatrón contacto (°C)	error (°C)	U (°C)			
37.69	0.37	0.084	20.010		20.320	0.31	0.084			
			40.020		40.400	0.38	0.084			

Elaboración propia

- c) Medición en dos diferentes emisividades: $E = 1$ y $E = 0.5$, como se muestra en la [Tabla 28](#). Esto se obtiene ajustando el valor de emisividad en el display del IBC, en caso de que este lo permita. Si éste no tiene dicha función, se puede hacer un cálculo virtual para conocer el valor de la temperatura, cuando $\epsilon = 0.5$.

Tabla 28. Mediciones a dos diferentes emisividades: E=1 y E= 0.5, para el punto de calibración No. 2: 37.5 °C

No. PC	2
T nominal (°C)	37.5
T IBC E = 1 (°C)	37.92
T IBC E = 0.5 (°C)	50.10

Elaboración propia

Estos pasos se realizaron para todos los puntos de calibración seleccionados y una vez realizadas todas las mediciones tanto previas como de calibración, dentro de la hoja de cálculo en la pestaña: Bitácora mediciones calibración, toda esta información se junta en una tabla.

La información recabada de las condiciones ambientales que se tuvieron durante la calibración y entre mediciones (ciclos), se muestran en la [Tabla 29](#), con la finalidad de asegurar que las mediciones estuvieron dentro de los parámetros establecidos en la Guía Técnica de CENAM (Cárdenas García & CENAM, Guía Técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre en la calibración de termómetros de radiación, 2018).

A continuación se muestra la [Tabla 29](#), con las condiciones ambientales promedio que se registraron durante toda la calibración y que servirán para las estimaciones de incertidumbre y para el llenado del certificado de calibración

Tabla 29. Concentrado de la información de las condiciones ambientales tanto individuales como de la calibración general

CONCENTRADO DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES, INDIVIDUALES Y DE LA CALIBRACIÓN GENERAL													
No. PC		1			2				3				
No. Mediciones	No. Ciclo	Var. / Ciclo / min (Tolerancia 0.1°C)	Var. Duración Pto. Calib. (Tolerancia 2%)	Temperatura Ambiente (Esp. 23°C +/- 5°C)	% Humedad Relativa (Esp. 50% +/- 30%)	Var. / Ciclo / min (Tolerancia 0.1°C)	Var. Duración Pto. Calib. (Tal. 2%)	Temperatura Ambiente (Esp. 23°C +/- 5°C)	% Humedad Relativa (Esp. 50% +/- 30%)	Var. / Ciclo / min	Var. Duración Pto. Calib. (Tal. 2%)	Temperatura Ambiente (Esp. 23°C +/- 5°C)	% Humedad Relativa (Esp. 50% +/- 30%)
De la 1 a la 10	Ciclo 2 y 1	0.00	0.10	22.24	43.0%	0.00	0.00	22.50	43.0%	0.00	0.10	24.72	45.0%
	Ciclo 3 y 2	-0.10				0.00				0.00			
	Ciclo 4 y 3	0.00				0.00				0.10			
	Ciclo 5 y 4	0.00				0.00				-0.10			
Promedio calibración completa		T. Ambiente (Esp. 23°C +/- 5°C)	23.72	0.24	± Incertidumbre	T. Background	25.12	0.24	± Incertidumbre	% H. R. (Esp. 50% +/- 30%)	0.37	1.91	± Incertidumbre

CONCENTRADO DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES, INDIVIDUALES Y DE LA CALIBRACIÓN GENERAL												
4				5				6				
Var. / Ciclo / min	Var. Duración Pto. Calib. (Tal. 2%)	Temperatura Ambiente (Esp. 23°C +/- 5°C)	% Humedad Relativa (Esp. 50% +/- 30%)	Var. / Ciclo / min	Var. Duración Pto. Calib. (Tal. 2%)	Temperatura Ambiente (Esp. 23°C +/- 5°C)	% Humedad Relativa (Esp. 50% +/- 30%)	Var. / Ciclo / min	Var. Duración Pto. Calib. (Tal. 2%)	Temperatura Ambiente (Esp. 23°C +/- 5°C)	% Humedad Relativa (Esp. 50% +/- 30%)	
-0.10	0.10	24.02	47.0%	0.00	0.20	24.20	46.0%	0.00	0.00	0.00	0.0%	No aplica en este servicio
0.00				-0.10				0.00				
0.00				-0.10				0.00				
0.00				0.00				0.00				

Elaboración propia

Paso seguido, dentro de la hoja de cálculo en la pestaña No. 6: CALIB, se ha programado para recopilar información contenida en el mismo libro de Excel, de lo siguiente:

- a) Termómetro a calibrar IBC
- b) Modelo matemático
- c) Termómetro Patrón
- d) Fuente de Radiación
- e) Concentrado de lecturas ambientales, Background y del detector durante la calibración y se obtienen sus promedios con sus incertidumbres.
- f) Concentrado de lecturas del Termómetro patrón corregido y del IBC y se obtienen sus promedios.
- g) Estimación de incertidumbre con sus 21 magnitudes de influencia por punto de calibración
 Nota: Este paso se realiza de manera posterior a las mediciones de calibración.
- h) Resultados de la calibración: Tabla de resultados y Gráfico del error de medida.
 Nota: Este paso se realiza de manera posterior a la Estimación de incertidumbre.

y toda ella y en el orden descrito, se concentra en una tabla, con la finalidad de observar en una sola hoja, el panorama completo de la calibración. Ver [Tabla 30](#) Estimación de Incertidumbre y Resultados de la calibración.

Tabla 30. Estimación de Incertidumbre y Resultados de la calibración

		FECHA: 2021-02-27		Orden de servicio No. 000487		
Información del Termómetro a calibrar IBC:						
Na. Punta Calib.	1	2	3	4	5	6
Punta Calib. (°C)	-6.00	37.50	300.00	500.00	750.00	
Resolución (°C)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	
Emisividad IBC	1	1	1	1	1	
Resolución Óptica (Si aplica)	50:1	50:1	50:1	50:1	50:1	
Información del modelo matemático:						
Na. Mod. Inicial	3	3	3	3	3	
Na. Mod. Calib.	10	10	10	10	10	
Distancia	0.30 m	0.30 m	0.30 m	0.30 m	0.30 m	
Spot (Si aplica)	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	
Información del Termómetro Patrón TP:						
Patrón usado	TERMOM CNTCT	TERMOM CNTCT	TERMOM CNTCT	TERMOM CNTCT	TERMOM CNTCT	TERMOM CNTCT
Resolución	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
Deriva	0.0003	0.0006	0.4403	0.8976	0.1283	
Emisividad	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
U Incertidumbre	0.09 °C	0.08 °C	0.22 °C	0.79 °C	0.80 °C	
Información de la Fuente de Radiación FR:						
Modelo	Dsuik 80	Dsuik 19	Dsuik 300	Dsuik 550	Dsuik 750	
Set Point	-5.85 °C	37.63 °C	300.96 °C	500.12 °C	750.37 °C	
Radio cavidad - r	0.02 m	0.02 m	0.02 m	0.02 m	0.02 m	
Prof. Cavidad - L	0.18 m	0.18 m	0.18 m	0.18 m	0.18 m	
Grasafenda - d	0.04 m	0.04 m	0.04 m	0.04 m	0.04 m	
Cond. Térmica - k	16.30 W/mK	205.00 W/mK	205.00 W/mK	205.00 W/mK	14.30 W/mK	
Espec-tral (Emissible)	0.893	0.906	0.951	0.944	No disponible	
Efectiva	0.994	0.994	0.993	0.993	0.983	
Uniformidad	0.022 °C	0.19 °C	0.16 °C	0.16 °C	0.052 °C	
Estimación de Incertidumbre (°C)						
Cont. de "u" por punto calibración	1	2	3	4	5	
u1	0.0016	0.0035	0.1149	0.0456	0.0200	
u2	0.0029	0.0029	0.0029	0.0029	0.0029	
u3	0.0427	0.0420	0.1100	0.3974	0.4000	
u4	0.0003	0.0006	0.4403	0.8976	0.1283	
u5	1.0622	0.3923	0.5277	1.6342	5.3187	
u6	0.0004	0.0002	0.0002	0.0001	0.0003	
u7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
u8	0.0424	0.0142	0.0294	0.1073	1.0812	
u9	0.0184	0.0149	0.0635	0.0381	0.0158	
u10	0.0241	0.0322	0.1045	0.1867	0.3176	
u11	0.0534	0.0131	0.0092	0.0092	0.0092	
u12	0.0623	0.0463	0.0267	0.0230	0.1366	
u13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
u14	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
u15	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
u16	0.1637	0.1637	0.1637	0.1637	0.1675	
u17	0.0133	0.0133	0.2201	0.0800	0.0680	
u18	0.0289	0.0289	0.0289	0.0289	0.0289	
u19	0.0696	0.4433	0.0467	0.6450	0.0297	
u20	0.2575	0.2571	0.2578	0.2669	0.6374	
u21	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	
U est. Comb. final	1.1 °C	0.67 °C	0.81 °C	2.1 °C	5.5 °C	
U Expandido	2.2 °C	1.3 °C	1.6 °C	4.1 °C	11 °C	

No aplica en este servicio

Elaboración propia

4.2.8. Estimación de incertidumbre por punto de calibración

Para realizar la estimación de incertidumbre por punto, se puede consultar el [Anexo 1](#), que contiene las formulaciones matemáticas correspondientes al cálculo de cada una de las magnitudes de influencia.

La hoja de cálculo en la pestaña No. 6: CALIB, en la parte derecha de la [Tabla 30](#), incluye los cálculos para las 21 magnitudes de influencia consideradas, para cada uno de los puntos de calibración. Dentro de estos cálculos se encuentra el cálculo de:

- a) Las incertidumbres típicas con sus factores
- b) Los coeficientes de sensibilidad con sus respectivos grados de libertad.
- c) La incertidumbre combinada
- d) La incertidumbre expandida
- e) El % de cada una de las contribuciones por magnitud, con la finalidad de poder obtener el presupuesto de incertidumbre de dicha calibración.

Aquí se presenta la [Tabla 30](#), como el resumen de los resultados obtenidos para la estimación de la incertidumbre de medida del punto de calibración No.3: 300 °C, en donde se concentran los cálculos de las magnitudes de influencia consideradas en el modelo.

En la sección [2.2.3](#) dentro de la Metodología de Cárdenas-Méndez, se muestran las magnitudes de influencia desde la x_1 a x_{21} y en la [Tabla 1](#) de dicha sección, se enlistan y se muestra su correspondencia. Así mismo, dentro del [Anexo 1](#) se describen de manera detallada y se explica la forma de estimarlas.

Tabla 31. Estimación de Incertidumbre por punto de calibración

⁴ Punto Calibración No.3

PC: 300.00°C

Estimación de Incertidumbre por punto de calibración											
No.	Incertidumbre			u típica	Unidades	G.L	Coeficientes Sensibilidad	Ci	Unidades	U	% Contribución
	U	Unidades	Factor								
u1	0.3635	°C	3.16227766	0.1149	°C	9	1	1	°C	0.1149	2.00%
u2	0.01	°C	3.46410162	0.0029	°C	1.00E+06	1	1	°C	0.0029	0.00%
u3	0.2200	°C	2	0.1100	°C	241.5167	1	1	°C	0.1100	1.84%
u4	0.4403	°C	1	0.4403	°C	1.00E+06	1	1	°C	0.4403	29.42%
u5	0.0055	---	2	0.0028	----	241.5167	190.785	1	°C	0.5277	42.26%
u6	0.1357	---	2	0.0679	°C	241.5167	0.00226	1	°C	0.0002	0.00%
u7	0.1483	---	3.16227766	0.0469	°C	9	1.9E-15	1	°C	0.0000	0.00%
u8	0.0510	°C	1.73205081	0.0294	°C	1.00E+06	1	1	°C	0.0294	0.13%
u9	0.1100	°C	1.73205081	0.0635	°C	1.00E+06	1	1	°C	0.0635	0.61%
u10	0.0882	---	1	0.0882	----	1.00E+06	1.18508	1	°C	0.1045	1.66%
u11	0.0020	---	2	0.0010	----	1.00E+06	9.2159	1	°C	0.0092	0.01%
u12	0.1392	°C	1.7321	0.0804	°C	2.42E+02	0.33203	1	°C	0.0267	0.11%
u13	0.0011	---	1	0.0011	----	1.00E+06	0.00038	1	°C	0.0000	0.00%
u14	0.0003	---	1	0.0003	----	1.00E+06	0.00038	1	°C	0.0000	0.00%
u15	0.0001	---	1	0.0001	----	1.00E+06	0.00038	1	°C	0.0000	0.00%
u16	6.42E-33	---	1.73205081	3.71E-33	----	2	4.4E+31	1	°C	0.1637	4.07%
u17	0.6961	°C	3.16227766	0.2201	°C	9	1	1	°C	0.2201	7.35%
u18	0.1000	°C	3.46410162	0.0289	°C	1.00E+06	1	1	°C	0.0289	0.13%
u19	0.0809	°C	1.73205081	0.0467	°C	1.00E+06	1	1	°C	0.0467	0.33%
u20	0.2578	°C	1	0.2578	°C	1.00E+06	1	1	°C	0.2578	10.08%
u21	0.0010	°C	1.73205081	0.0006	°C	1.00E+06	1	1	°C	0.0006	0.00%

Incertidumbre combinada: **0.81**

Incertidumbre expandida: **1.6**

Elaboración propia

La estimación de incertidumbre de medida de todos los puntos de temperatura calibrados se muestra en la [Tabla 31](#).

⁴ Las celdas coloreadas de azul, son las contribuciones atribuidas al IBC.

4.2.9. Resultados de la calibración

Finalmente, y como la parte más importante de la calibración son los resultados de la misma, esto porque reflejan el cálculo del mensurando de manera explícita y otorgan resultados con trazabilidad metrológica, cumpliendo con lo establecido en las normatividades tanto nacionales como internacionales, principalmente la norma ISO/IEC-17025:2017 (ISO, 2017) aplicable a los laboratorios de ensayo y calibración.

A continuación se presenta la [Tabla 32](#), en la que se presenta la información concreta de las mediciones, la cual incluye:

- a) Temperatura del Termómetro Patrón, $T_{Patrón}$, expresada en °C (Temp. de radiancia)
- b) Temperatura del Termómetro calibrado, T_{IBC} , expresada en °C (Temp. de radiancia)
- c) Error de medida, expresada en °C que se obtiene al restar la $T_{IBC} - T_{Patrón}$ (Temp. de radiancia)
- d) Incertidumbre de medida asociada, expresada en °C, expandida con un nivel de confianza de $k = 2$, en \pm por punto de calibración y con dos cifras significativas.
- e) Distancia de medición, expresada en m.

Tabla 32. Resultados de la calibración

No. de Punto de Calibración	Temperatura Termómetro Patrón (°C)	Temperatura IBC (°C)	Error de medida (°C)	\pm U de medida (°C)	Distancia (m)
1	-5.66	-3.38	2.28	2.2	0.30
2	37.6	37.92	0.32	1.4	0.30
3	299.62	298.87	-0.75	1.6	0.30
4	497.79	493.88	-3.91	4.1	0.30
5	741.93	746.78	4.85	11	0.30

Elaboración propia

Una vez establecida la información de la [Tabla 32](#), se graficaron los resultados de la calibración con un gráfico de dispersión ver [Figura 19](#), en donde se grafica en el eje de la "X" valores de temperatura y en el eje de las "Y" el error de medida; y en cada punto graficado se le asocia su incertidumbre de medida hacia arriba y hacia abajo.

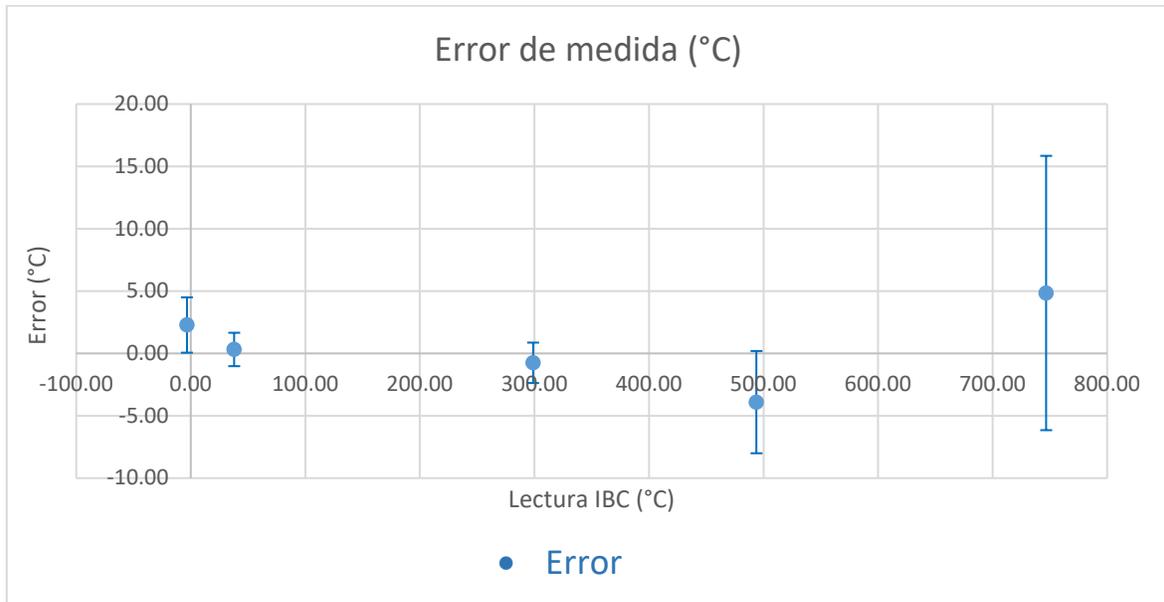


Figura 19. Gráfico de los resultados de calibración
Elaboración propia

De la [Tabla 32](#) y su gráfico de dispersión de la [Figura 19](#), se observa que el termómetro calibrado tiene un menor error entre las temperaturas de 37.5 °C a 300 °C y su mayor error en el punto de 750 °C; así mismo se observa que sus incertidumbres asociadas aumentan de 0 °C hacia abajo y posteriormente este comportamiento se invierte de 0 °C hacia arriba.

Antes de plasmar los resultados de la calibración en su certificado de calibración correspondiente, se hizo una revisión completa de los diferentes cálculos y análisis que se realizaron durante todo el proceso de calibración, para asegurar que toda la información considerada a lo largo del proceso es correcta y corresponde a cada etapa de la metodología. Así mismo, se revisó a detalle la información contenida en la [Tabla 32](#), que estuviera expresada a dos decimales y que la

incertidumbre se expresara a dos cifras significativas y el gráfico de la [Figura 19](#) también se revisó, observando concordancia entre lo graficado y la tabla de resultados.

Una vez que nos aseguramos que los resultados de la calibración son correctos, estos se plasmaron en un Certificado de Calibración, Ver ejemplo de un Certificado de calibración TIPO en el [Anexo 2](#), el cual contiene 3 páginas con la siguiente información:

- a) Página 1. Información general del usuario final, del termómetro calibrado, de las condiciones del laboratorio durante la calibración, de los patrones utilizados, metrólogos e información general del laboratorio [Kapter®](#).
- b) Página 2. Información general tanto de la normatividad empleada como del área de calidad de [Kapter®](#).
- c) Página 3. Información de los resultados de la calibración, la [Tabla 32](#) y su gráfico de dispersión de la [Figura 19](#), detalles generales del modelo matemático empleado, condiciones generales o especiales de la calibración y regla de decisión.

4.2.10. Análisis de resultados

Haciendo un recuento de los aspectos más importantes de los resultados observados en la primera parte de este capítulo se menciona lo siguiente:

- a) Las temperaturas de radiancia calculadas y utilizadas para establecer el setpoint de las fuentes de radiación coinciden con las lecturas del termómetro patrón reportadas en la Tabla de resultados, lo cual permite calcular el mensurando de manera correcta.
- b) La distancia efectiva de medición se consideró en 0.30 m.
- c) De la estimación de incertidumbre por punto, se deduce y desde el punto de vista cuantitativo, que las magnitudes de incertidumbre más significativas dentro del arreglo experimental del laboratorio de [Kapter®](#) para este

ejercicio de calibración realizado, son: u_4 , u_5 y u_{20} , lo cual representa una oportunidad de mejora para el laboratorio.

- d) De la [Tabla 32](#) y su gráfico de dispersión de la [Figura 19](#), se observa que:
- d.1) En puntos de calibración de (-6 y 750) °C el error de medida del IBC es mayor.
 - d.2) En el intervalo de medición de (-37.5 q 300) °C, el IBC tiene un menor error de medida, lo que podría deducirse en que tiene un mejor comportamiento para realizar mediciones de temperatura de radiancia.
 - d.3) Las incertidumbres asociadas aumentan de 0 °C hacia abajo y posteriormente este comportamiento se invierte de 0 °C hacia arriba.
 - d.4) Los valores de incertidumbre asociado, en conjunto con el error de medida y la temperatura del IBC están dentro de las especificaciones técnicas del IBC.

4.3. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN DAUIK® PARA TERMÓMETROS DE RADIACIÓN Y DEL MODELO MATEMÁTICO

La trazabilidad metrológica es fundamental y se considera desde la medición de la temperatura de radiancia, la medición de temperatura de una superficie, hasta la estimación de incertidumbre. En donde los componentes de ésta, se derivan de la ecuación empírica desarrollada por Cárdenas-Méndez y en concordancia con lo establecido por el CENAM.

Pese a que la ecuación de aproximación de Cárdenas-Méndez es establecida por el Centro Nacional de Metrología – CENAM, es indispensable que cuando los laboratorios de calibración realizan cambios sustanciales que pueden tener repercusiones en los resultados de las mediciones, hagan una validación o comprobación de dichos cambios, para con ello seguir asegurando la validez en sus resultados.

Para la validación de la metodología aquí propuesta y del modelo matemático implementado, se comparan dos modelos matemáticos:

- a) Modelo polinomial (JLCU) (Cravioto Urbina, 2007) que conlleva una ecuación polinomial de cuarto orden empleado en laboratorios de termometría de radiación durante cinco años y,
- b) Modelo de aproximación Cárdenas-Méndez (Cárdenas García & Méndez Lango, Use of Radiometrically Calibrated Flat-Plate Calibrations in Calibration of Radiation Thermometers, 2015), que conlleva la Ecuación de aproximación de Cárdenas-Méndez derivada de la ecuación fundamental de Radiación y para realizar dicha comprobación, se realizó la calibración descrita en el punto [4.1 del Capítulo 4](#), haciendo las debidas consideraciones para poder emplear ambos modelos matemáticos.

4.3.1 Resultados de calibración obtenidos con el modelo polinomial (JLCU) original

(Cravioto Urbina, 2007)

Como parte principal de los resultados de calibración, se considera la estimación de incertidumbre por punto de medición, ya que ésta se asocia al error de medida calculado.

Esta información se ve reflejada, por punto de medición, en la [Tabla 33](#), en donde en la primera columna se describe la Magnitud de Influencia y su valor por punto de calibración en las columnas subsecuentes. Así como su incertidumbre combinada y expandida con un factor de incertidumbre de $k = 2$.

Tabla 33. Estimación de las magnitudes de influencia obtenidas por el modelo Polinomial (JLCU), en resultados experimentales.

Estimación de Incertidumbre (°C)					
Contribución de Incertidumbre por punto calibración	1	2	3	4	5
<i>U1: Temperatura</i>	0.04	0.04	0.11	0.40	0.40
<i>U2: Emisividad de la Fuente</i>	0.02	0.02	0.00	0.00	0.03
<i>U3: Radiación amb. Reflejada</i>	0.05	0.05	0.06	0.02	0.02
<i>U4: Intercambio de calor de la fuente</i>	0.00	0.00	0.15	0.06	0.03
<i>U5: Cond. Ambiental Background</i>	0.03	0.03	0.03	0.06	0.06
<i>U6: Uniformidad Fuente</i>	0.03	0.02	0.42	0.07	0.22
<i>U7: SSE - Efecto del Tamaño de la fuente</i>	0.01	0.01	0.08	0.16	0.26
<i>U8: Temperatura Background</i>	0.10	0.10	0.13	0.11	0.11
<i>U9: Radiación extraviada</i>	0.01	0.02	0.05	0.10	0.16
<i>U10: Ruido ambiental</i>	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
<i>U13: Diferencial de Energía (L)</i>	0.20	0.13	1.32	2.85	4.56
<i>U14: Modelo</i>	0.57	0.54	0.38	0.02	0.03
<i>U11: Resolución</i>	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
<i>U12: Repetibilidad en las mediciones</i>	0.01	0.01	0.22	0.08	0.07
Incertidumbre Expandida =	±1.2	±1.1	±3.0	±5.8	±9.2

Elaboración propia

Los resultados de la calibración se plasman en la [Tabla 34](#), estableciendo el mensurando entre la temperatura del patrón y entre la temperatura del IBC, ambos medidos experimentalmente y se grafican en la [Figura 20](#) en su respectivo gráfico de dispersión, en donde se observa gráficamente la incertidumbre de medición que se le asocia por este modelo, a la medición de temperatura.

Tabla 34. Resultados de la calibración, obtenidas por el modelo Polinomial (JLCU), en resultados experimentales.

No. de Punto de Calibración	Temperatura Termómetro Patrón (°C)	Temperatura IBC (°C)	Error de medida (°C)	± U de medida (°C)	Distancia (m)
1	-5.85	-3.63	2.22	1.2	0.30
2	37.32	37.55	0.23	1.1	0.30
3	300.96	299.28	-1.68	3.0	0.30
4	500.85	494.61	-6.24	5.8	0.30
5	742.06	747.79	5.73	9.2	0.30

Elaboración propia

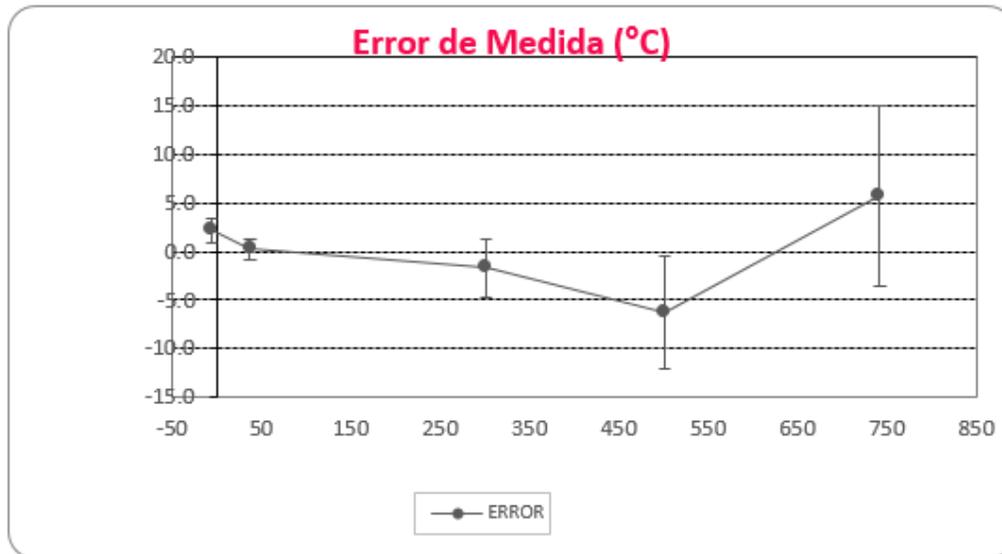


Figura 20. Gráfico de los resultados de calibración por el modelo polinomial en resultados experimentales

Elaboración propia

4.3.2 Resultados de calibración obtenidos con el Modelo de Aproximación Cárdenas-Méndez

(Cárdenas García & Méndez Lango, Use of Radiometrically Calibrated Flat-Plate Calibrations in Calibration of Radiation Thermometers, 2015)

Esta sección parte de lo establecido en el punto [4.3.1](#), como aspecto principal de los resultados de calibración. La información relativa se ve reflejada, por punto de medición, en la [Tabla 35](#), la que describe en términos generales lo descrito en el punto [4.3.1](#).

Tabla 35. Estimación de las magnitudes de influencia obtenidas por el modelo de aproximación Cárdenas-Méndez, en resultados experimentales.

Estimación de Incertidumbre (°C)					
Contribución de Incertidumbre por punto calibración	1	2	3	4	5
u_1	0.0016	0.0035	0.1149	0.0456	0.0200
u_2	0.0029	0.0029	0.0029	0.0029	0.0029
u_3	0.0427	0.0420	0.1100	0.3974	0.4000
u_4	0.0003	0.0006	0.4403	0.8976	0.1283
u_5	1.0622	0.3923	0.5277	1.6342	5.3187
u_6	0.0004	0.0002	0.0002	0.0001	0.0003
u_7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
u_8	0.0424	0.0142	0.0294	0.1073	1.0812
u_9	0.0184	0.0149	0.0635	0.0381	0.0158
u_{10}	0.0241	0.0322	0.1045	0.1867	0.3176
u_{11}	0.0534	0.0131	0.0092	0.0092	0.0092
u_{12}	0.0623	0.0463	0.0267	0.0230	0.1366
u_{13}	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
u_{14}	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
u_{15}	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
u_{16}	0.1637	0.1637	0.1637	0.1637	0.1675
u_{17}	0.0133	0.0133	0.2201	0.0800	0.0680
u_{18}	0.0289	0.0289	0.0289	0.0289	0.0289
u_{19}	0.0696	0.4433	0.0467	0.6450	0.0297
u_{20}	0.2575	0.2571	0.2578	0.2669	0.6374
u_{21}	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006
U est. Comb. final	±1.11	±0.67	±0.8	±2.1	±5.5
U Expandida	±2.2	±1.3	±1.6	±4.1	±11

Elaboración propia

Los resultados de la calibración se plasman en la [Tabla 36](#), estableciendo el mensurando entre la temperatura del patrón y entre la temperatura del IBC, ambos medidos experimentalmente y se grafican en la [Figura 21](#) en su respectivo gráfico de dispersión, en donde se observa gráficamente la incertidumbre de medición que se le asocia por este modelo, a la medición de temperatura.

Tabla 36. Resultados de la calibración, obtenidas por el modelo de aproximación Cárdenas-Méndez, en resultados experimentales.

No. de Punto de Calibración	Temperatura Termómetro Patrón (°C)	Temperatura IBC (°C)	Error de medida (°C)	± U de medida (°C)	Distancia (m)
1	-5.66	-3.38	2.28	2.2	0.30
2	37.6	37.92	0.32	1.4	0.30
3	299.62	298.87	-0.75	1.6	0.30
4	497.79	493.88	-3.91	4.1	0.30
5	741.93	746.78	4.85	11	0.30

Elaboración propia

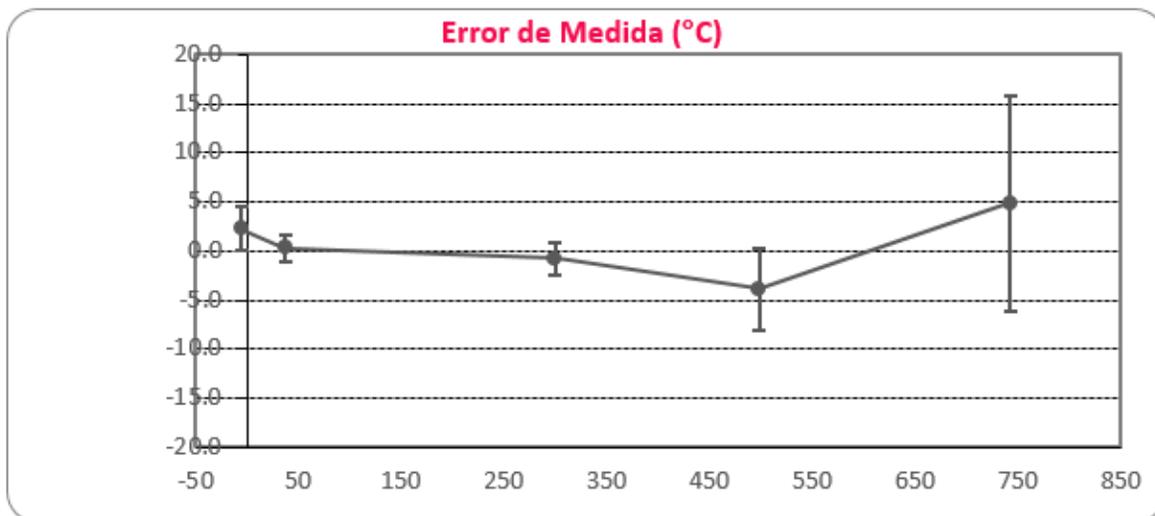


Figura 21. Gráfico de los resultados de calibración por el modelo de aproximación Cárdenas-Méndez, en resultados experimentales

Elaboración propia

Como un resultado complementario de este modelo matemático, se obtuvo un gráfico de la propagación de la incertidumbre del termómetro calibrado, ver [Figura 22](#). El cual se obtuvo a través de los resultados experimentales y de los cálculos realizados en la hoja de cálculo pestaña 2: Interpolación, con apoyo de los coeficientes de S-H y S-W determinados en las mediciones previas y de dichas lecturas.

La finalidad de este gráfico es que el usuario final pueda medir cualquier superficie de medición y conocer el comportamiento de su termómetro de calibración en un intervalo de temperatura dado. La línea azul graficada corresponde al error de la medición de temperatura medida T_{TR} por el cliente con su IBC y las áreas rojas corresponden a la incertidumbre de medición que se propaga, casi de manera "continua", en todo el intervalo de medición dado.

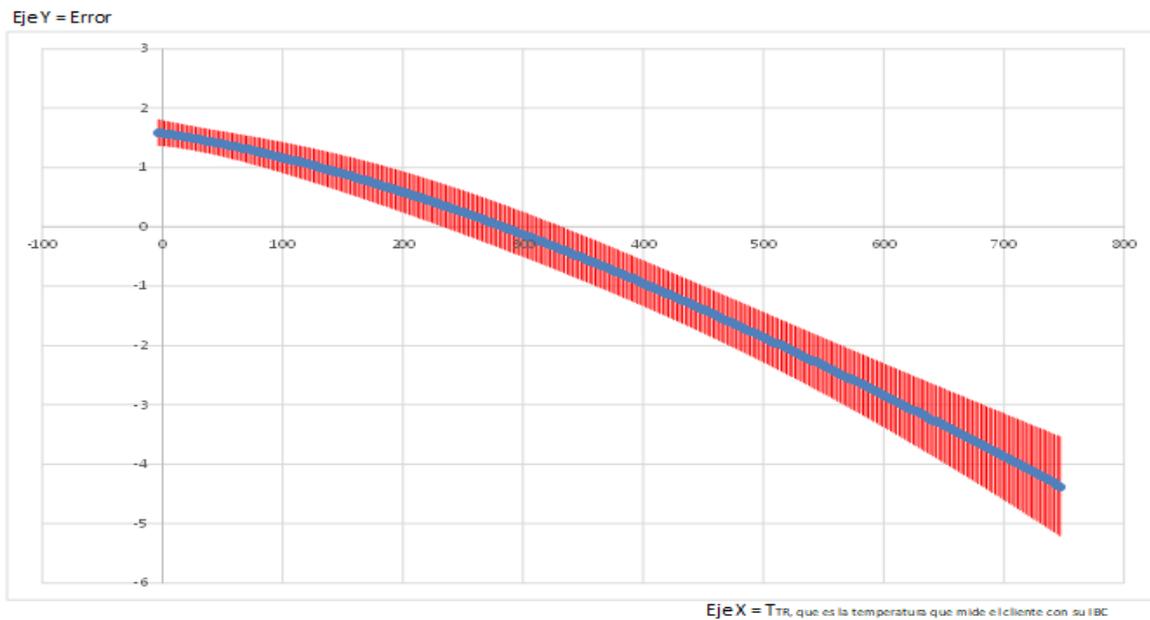


Figura 22. Gráfico de propagación del error
Elaboración propia

De esta manera, independientemente del número de puntos de calibración que se hayan medido, se tiene un panorama mayor del termómetro del cliente o usuario final.

4.3.3 Tabla comparativa de resultados entre modelos

Una vez obtenidos los resultados de calibración mostradas en los puntos [4.3.1](#) y [4.3.2](#), se procede a comparar los resultados entre ambos modelos, con la finalidad hacer un estudio estadístico y darle validez a los resultados de medición.

La intención de realizar esta comparación entre modelos matemáticos, es poder migrar del modelo polinomial usado originalmente dentro de los laboratorios de [Kapter®](#), al modelo Planckiano basado en la Ley de radiación de Planck desarrollado en la Metodología de Calibración [Dauik®](#) para termómetros de radiación. De tal manera, que la migración entre modelos, tenga un sustento estadístico y sus resultados de medición sean válidos para su uso dentro de un laboratorio de calibración.

- a) Se hace la comparación de los Resultados de la calibración de ambos modelos matemáticos y se plasman en la [Tabla 37](#) y se grafican dentro del mismo gráfico de dispersión, ver [Figura 23](#), con la finalidad de observar el comportamiento de ambos modelos matemáticos.

Tabla 37. Resultados comparativos de la calibración experimental entre modelos matemáticos

RESULTADO DE LA CALIBRACIÓN MÉTODO Cárdenas-Méndez					RESULTADO DE LA CALIBRACIÓN MÉTODO Polinomial (JLCU)				
Termómetro Patrón (°C)	IBC (°C)	Error de medida (°C)	± U de medida (°C)	Distancia (m)	Termómetro Patrón (°C)	IBC (°C)	Error de medida (°C)	± U de medida (°C)	Distancia (m)
-5.66	-3.38	2.28	2.2	0.30	-5.85	-3.63	2.22	1.2	0.30
37.60	37.92	0.32	1.3	0.30	37.32	37.55	0.23	1.1	0.30
299.62	298.87	-0.75	1.6	0.30	300.96	299.28	-1.68	3.0	0.30
497.79	493.88	-3.91	4.1	0.30	500.85	494.61	-6.24	5.8	0.30
741.93	746.78	4.85	11	0.30	742.06	747.79	5.73	9.2	0.30

Elaboración propia

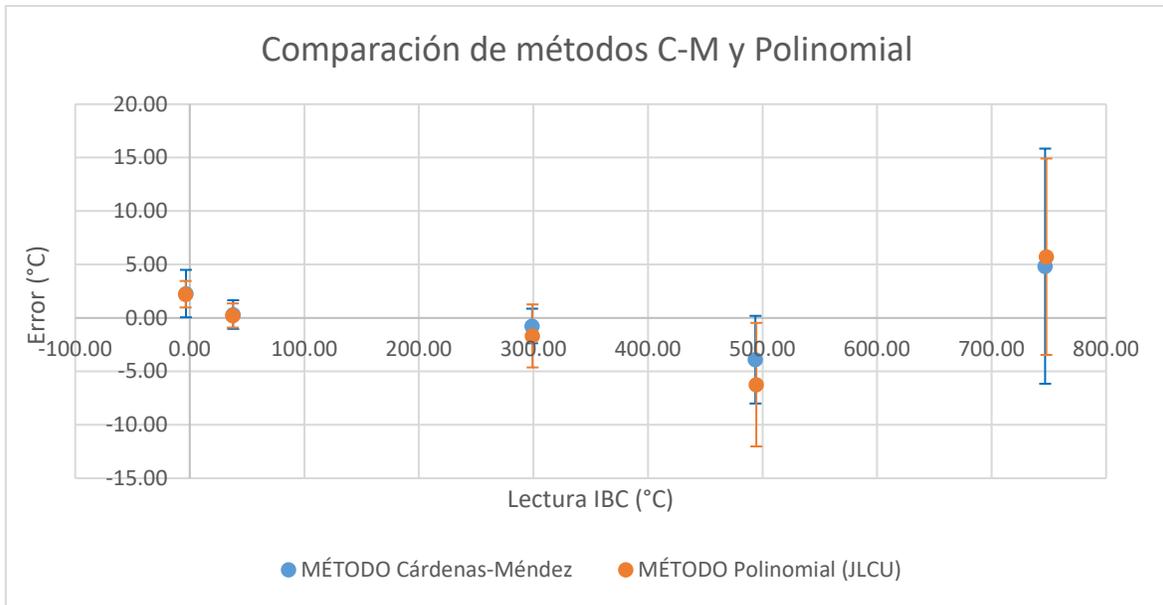


Figura 23. Resultados de calibración comparando ambos modelos, en resultados experimentales
Elaboración propia

- b) Para darle sustento estadístico a la comparación hecha entre los resultados obtenidos, se procede a hacer la validación estadística de los resultados, para lo cual, se utilizaron las siguientes herramientas estadísticas: Error Normalizado y gráficos de Mandel: h y k.

La prueba del error normalizado es útil porque involucra los errores y la incertidumbre del método, lo cual permite conocer los posibles errores del método e investigar sobre la incertidumbre de la calidad del mismo.

El motivo de haber elegido estas pruebas estadísticas es por el tipo de información estadística que se puede obtener de ellas, principalmente la repetibilidad y reproducibilidad de las mediciones, así como la variabilidad que pudiese existir entre las mediciones y su tendencia central. Así mismo permiten conocer la significancia entre las mediciones.

En este caso, como se está evaluando al instrumento de medición IBC y en este caso específico el IBC es un termómetro de radiación, se considera su

exactitud de la medición dividida entre tres, para evaluar su significancia y así saber si los resultados muestran o no diferencias significativas.

b.1 Prueba de error normalizado, para el análisis se consideró lo siguiente:

- Los resultados de ambos modelos matemáticos se consideran que son del mismo orden y sus incertidumbres de medición fueron evaluados en $k = 2$.
- Se consideró que las diferencias de los puntos de calibración en el IBC son despreciables al ser muy próximas en cada uno de los modelos.
- Las condiciones ambientales y arreglo experimental para ambos métodos fue similar y su contribución se considera en cada uno de los métodos matemáticos usados.
- De acuerdo con los datos procesados y los resultados de la prueba de Error normalizado se obtiene la siguiente [Figura 24](#), en donde se observan los resultados. Dicha Figura cuenta con una tabla comparativa y con un gráfico de Error Normalizado, donde se observan de manera visual los resultados de la prueba. Siendo el ± 1 sus límites de control.

Lectura IBC (°C)	Error Método C-M	U Método C-M	Error Método Polinomial	U Método Polinomial (JLCU)	Error normalizado
entre (-3.38 y -3.63) °C	2.28	2.22	2.22	1.24	-0.04
entre (37.92 y 37.55) °C	0.32	1.34	0.23	1.13	-0.07
entre (298.87 y 299.28) °C	-0.75	1.62	-1.68	2.95	-0.16
entre (493.88 y 494.61) °C	-3.91	4.10	-6.24	5.78	0.00
entre (746.78 y 747.79) °C	4.85	11.00	5.73	9.19	0.00

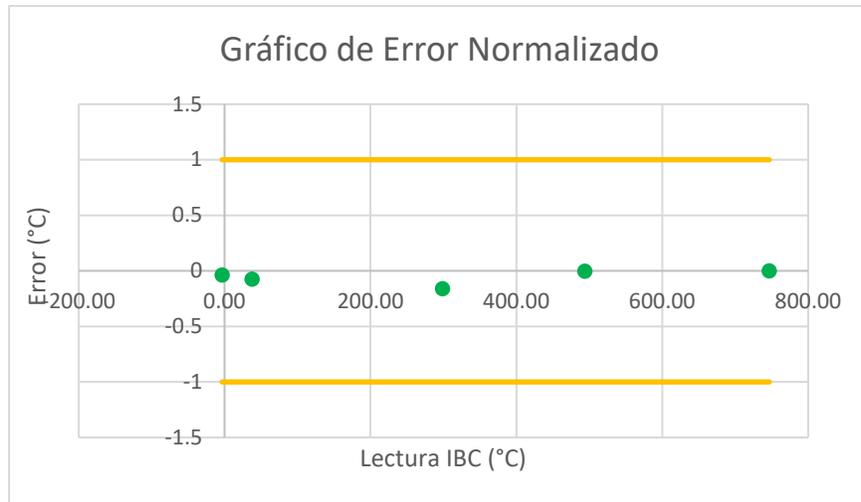


Figura 24. Resultados del análisis de error normalizado
Elaboración propia

b.2 Prueba de Gráficos de Mandel: h y k, para el análisis se consideró lo siguiente:

- Se consideraron los valores críticos de $P = 5$ (participantes o puntos de calibración).
- Se evaluaron los valores críticos de h & k de Mandel.
- De acuerdo con los datos procesados y los resultados de la prueba de Gráficos de Mandel: "h" se obtiene la siguiente [Figura 25](#), en donde se observan los resultados. Dicha Figura cuenta con una tabla comparativa y con un gráfico de Mandel: "h", donde se observan de manera visual los resultados de la prueba. Siendo los valores críticos permitidos entre 1% al 5%.

Método	Tabla de coef "h" por participante				
	1	2	3	4	5
CM	0.707	0.707	0.707	0.707	-0.707
Polinomial	-0.707	-0.707	-0.707	-0.707	0.707

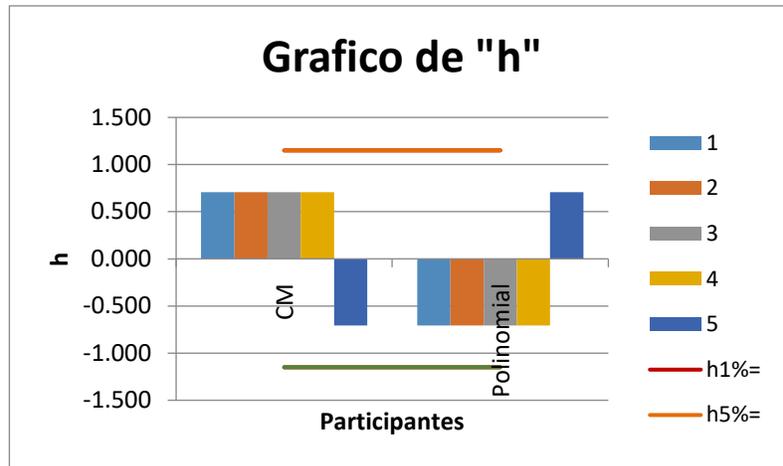


Figura 25. Resultados del análisis del gráfico "h" de Mandel
Elaboración propia

- De acuerdo con los datos procesados y los resultados de la prueba de Gráficos de Mandel: "k" se obtiene la siguiente [Figura 26](#), en donde se observan los resultados. Dicha Figura cuenta con una tabla comparativa y con un gráfico de Mandel: "k", donde se observan de manera visual los resultados de la prueba. Siendo los valores críticos permitidos entre 1% al 5%.

Método	Tabla de coef "k" por participante				
	1	2	3	4	5
CM	0.972	1.079	1.165	0.966	1.068
Polinomial	1.027	0.914	0.802	1.033	0.927

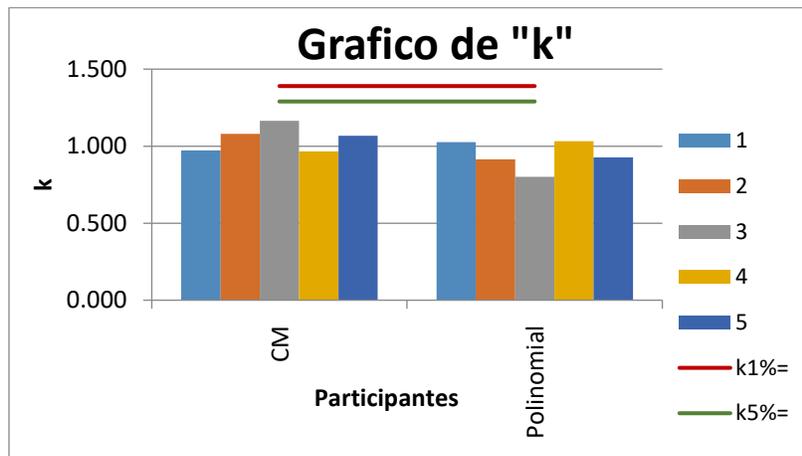


Figura 26. Resultados del análisis del gráfico "k" de Mandel
Elaboración propia

4.3.4 Análisis de resultados de validación de metodología y modelo matemático

- a) En todos los puntos de temperatura probados, los resultados entre ambos modelos matemáticos se pueden considerar consistentes, es decir, no existen diferencias significativas entre los resultados o que las diferencias existentes son cubiertas por la incertidumbre de medición.

- b) De la [Figura 24](#) se concluye que todos los resultados se encuentran dentro de los límites del error normalizado, por lo tanto no muestran diferencias significativas entre sí.

- c) De la [Figura 25](#), se observan que los valores de “h” que ofrecen información de tendencia central y que comparan las medias de los 2 modelos matemáticos evaluados en los 5 puntos de calibración, son consistentes al no mostrar diferencias significativas. Esto se demuestra en el gráfico de la Figura indicada, teniendo los resultados valores menores a los críticos permitidos al 1% y 5%.

- d) De la [Figura 26](#), se observan que los valores de k ofrecen información de dispersión de los datos, es decir, comparan las desviaciones estándar de los 2 modelos matemáticos evaluados en los 5 puntos de calibración y se concluye que son consistentes al no mostrar diferencias significativas. Esto se demuestra en el gráfico de la Figura indicada, teniendo los resultados valores menores a los críticos permitidos al 1% y 5%.

CONCLUSIONES

Al definir la "*Metodología de calibración Dauik para termómetros de radiación*" e implementar en ella el modelo de aproximación a la Ley de Planck, se observa que:

1. La propuesta metodológica proporciona una forma estructurada, ampliada y específica, para calibrar termómetros de radiación.
2. Por su sustento y fundamento físico, garantiza la obtención de mediciones confiables de temperatura.
3. Contiene los pasos mínimos requeridos para el cálculo de los diferentes coeficientes de Sakuma-Hattori y Saunders-White, requeridos para la implementación del modelo matemático en la hoja de cálculo.
4. Proporciona como resultado y con precisión, el error de medida entre el termómetro de radiación a calibrar y el termómetro de referencia, con incertidumbre de medición asociada y trazabilidad metrológica.
5. Brinda el procedimiento para la estimación de incertidumbres por punto de medición, facilitando el cálculo de cada una de sus magnitudes de influencia y obteniendo así, tanto la incertidumbre combinada, como la expandida.
6. Incluye un software de hoja de cálculo que permite realizar, mediante métodos de álgebra computacional, los cálculos requeridos en el modelo matemático, de manera automática, agilizándolos, evitando errores y tiempos de proceso.
7. De su validación, mediante pruebas experimentales dentro de los laboratorios de termometría de radiación de Kapter®, empleando el modelo de Cárdenas-Méndez, se demostró la viabilidad para migrar del modelo Polinomial usado originalmente por el laboratorio al modelo Planckiano.

Del análisis comparativo entre los dos modelos para calibración de termómetros de radiación: Polinomial y Planckiano, se concluyó que:

1. Pese a que los resultados obtenidos con el modelo Planckiano sí se ven afectados por emplear un mayor número de magnitudes de influencia para la estimación de incertidumbre, se deduce que las incertidumbres de medida resultantes son del mismo orden y están cubiertas por las especificaciones del termómetro a calibrar.
2. Los resultados entre ambos modelos se pueden considerar consistentes, es decir, no existen diferencias significativas entre los resultados de sus medias y las desviaciones estándar de los dos modelos, evaluados en los 5 puntos de calibración o que las diferencias existentes son cubiertas por la incertidumbre de medición.

RECOMENDACIONES

Derivado de los resultados obtenidos y de las conclusiones planteadas, se sugieren las siguientes recomendaciones:

1. Hacer una planeación respecto al capital humano con que cuenta el laboratorio, ya que esta magnitud de temperatura, específicamente de no contacto, requiere que el personal se encuentre capacitado y cuente con el perfil técnico para realizar las calibraciones. Por lo que se requiere que se tomen capacitaciones específicas para lograr las competencias técnicas del personal.
2. Para lograr una adecuada implementación de la magnitud, es importante que la dirección correspondiente considere los recursos económicos necesarios para contar con la infraestructura requerida para realizar este tipo de mediciones. Así como el equipo de cómputo necesario para el procesamiento.
3. Evaluar las capacidades de medición del laboratorio debido a los tiempos de entrega a los clientes o usuarios finales, ya que este método conlleva mayor tiempo tanto para aclimatar el IBC, como de las propias mediciones.
4. Modificar la oferta técnica del laboratorio, debido a que las incertidumbres que el laboratorio podrá ofrecer, posiblemente serán mayores a las ofertadas en el pasado.
5. Definir el alcance de servicio que se desea ofrecer, ya sea nacional o internacional, debido a que es probable que al ser comparados con otros modelos de calibración, como el indicado en la norma ASTM E2847-14 (ASTM, 2014), los resultados de calibración pudieran verse afectados por el número de magnitudes de influencia considerados en el método de Cárdenas-Méndez propuesto. (Cárdenas García, Magnitudes de influencia en la calibración de termómetros de radiación debajo del punto fijo de la plata, 2018)

6. Al elegir un ensayo de aptitud internacional (dado que no existe en México para esta magnitud de temperatura de no contacto) es importante considerar los aspectos mencionados en esta sección.
7. Establecer puntualmente cómo se van a trabajar las desviaciones al modelo y cuantificarlas.
8. Dados los resultados de comparación obtenidos entre el método polinomial (JLCU) de José Luis Cravioto y el método Cárdenas-Méndez, se recomienda que el método polinomial (JLCU) sea revisado y se hagan los cambios necesarios para que pueda emplearse como un método apropiado en esta magnitud, ya que los resultados de ambos métodos son muy consistentes y estadísticamente equivalentes.

APORTACIÓN DE LA TESIS

El presente documento ofrece al lector una "*Metodología de calibración Dauik® para termómetros de radiación*", estructurada, ampliada y específica, para calibrar estos instrumentos debajo del punto de solidificación de la plata, basado en principios de radiación infrarroja y experiencia fundamentada, a partir de las ecuaciones de aproximación de Cárdenas-Méndez y Saunders-White, contenidas en la normatividad vigente en México hasta el 2021. Le permitirá obtener como resultado y con precisión, la temperatura medida por un termómetro de radiación, con trazabilidad metrológica e incertidumbre de medición asociada, que considera la evaluación de sus magnitudes de influencia. Aporta una manera sistemática para aplicar la ecuación de aproximación de Cárdenas-Méndez, en las mediciones y calibraciones que se deseen realizar en los laboratorios de calibración, mediante un software de hoja de cálculo que permite realizar los cálculos de manera eficiente y rápida.

APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS

Aporta conocimientos especializados en radiación infrarroja para la comunidad científica, los cuales han sido obtenidos mediante la recopilación y el análisis de diversas referencias bibliográficas, experimentación en laboratorios de radiación infrarroja e inclusive, de los propios autores del método aquí empleado, por ejemplo, el Dr. Daniel Cárdenas, coautor del método Cárdenas-Méndez. Dada la problemática actual que se tiene respecto a la forma adecuada para la calibración de los termómetros de radiación y a la dificultad que conllevan estos temas por la complejidad de los mismos, y que la información disponible es variada y dispersa, esta investigación pretende ser una guía didáctica para diferentes perfiles profesionales, interesados en el tema de la radiación infrarroja y que deseen realizar mediciones y calibraciones en dicho campo de la ciencia. Así mismo, consciente de la necesidad que existe en el país de contar con laboratorios de calibración y ensayo que aseguren la confiabilidad en la evaluación de la conformidad y de que los usuarios cuenten con información con validez técnica útil para su aplicación, se aporta el presente trabajo.

REFERENCIAS

- ASTM. (2014). *ASTM E2847-14 Standard test method for calibration and accuracy verification of wideband infrared thermometers*. ASTM International.
- Cárdenas García, D. (2018). *Diplomado en termometría de radiación, Módulo 2, Medición*. Querétaro: CENAM.
- Cárdenas García, D. (2018). *Diplomado en Termometría de radiación, Módulo 3: Calibración*. Querétaro: CENAM.
- Cárdenas García, D. (2018). *Magnitudes de influencia en la calibración de termómetros de radiación debajo del punto fijo de la plata*. Querétaro: CENAM.
- Cárdenas García, D. (2021, Abril). Cuadro comparativo entre modelos con aproximación a la Ley de Planck. Querétaro, Qro, México.
- Cárdenas García, D., & CENAM, G. d. (2018). *Guía Técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre en la calibración de termómetros de radiación*. Querétaro: CENAM.
- Cárdenas García, D., & Méndez Lango, E. (2015). *Use of Radiometrically Calibrated Flat-Plate Calibrations in Calibration of Radiation Thermometers*. New York: Springer Science+Business Media.
- Cárdenas García, D., & Rodríguez Arteaga, H. (2017). *Diplomado en Termometría de Radiación, Módulo 1: Conceptos básicos*. Querétaro: CENAM.
- Centro Español de Metrología;. (2012). *VIM: Vocabulario Internacional de Metrología: conceptos, fundamentos y generales, y términos asociados (3a. ed.)*. Centro Español de Metrología. Retrieved from <https://www.cem.es/sites/default/files/vim-cem-2012web.pdf>
- Cravioto Urbina, J. L. (2007). *Modelación matemática de termómetros de radiación*. Querétaro, Qro.
- EMA;. (s.f.). *Entidad Mexicana de Acreditación*. Obtenido de Listado de laboratorios de calibración: <http://catalogo.consultaema.mx:75/busqueda-laboratorios-de-calibracion>
- Flir Systems. (2019). *Extech*. Retrieved from <http://www.extech.com>
- Fluke. (2013). *Manual de Termómetro de Radiación*.
- H. Preston, T. (1990). *The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) - Metrología*. IOP Science. Ottawa: Springer Verlag. Retrieved from <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0026-1394/27/1/002/pdf>

- Heitronics Infrarot Messtechnik GmbH;. (2014). *Infrarot strahlungsthermoemter KT 19 II: bedienungsanleitung*. Heitronics Infrarot Messtechnik.
- IMNC. (2002). *NMX-CH-140-IMNC Guía para la expresión de la incertidumbre en las mediciones*. CDMX: IMNC.
- ISO. (2017). *ISO/IEC 17025 Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración*. ISO.
- Kapter. (2013). Arreglo experimental con sistema de posicionamiento y fuentes de radiación. Zapopan, Jalisco.
- Kapter. (2016). Arreglo experimental de un sistema de posicionamiento con desplazamiento longitudinal y radial, con tres fuentes de radiación. Zapopan, Jalisco, México.
- Pavese, F., Molinar Min Beciet, G., & H. Preston, T. (1997). *The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) - Metrología*. Springer Verlag. Retrieved from <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0026-1394/27/1/002/pdf>
- Saunders, P., & White, D. R. (2003). *Physical basis of interpolation equations for radiation thermometry*. Measurement Standards Laboratory . Lower Hutt: IOP Science. Retrieved 2020, from <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0026-1394/40/4/309>
- Witt, D. P., & Incropera, F. P. (1988). Physics of Thermal Radiation. In *Theory and practice of Thermal Radiation*. John Wiley & Sons.
- WolframAlpha. (2021). *WolframAlpha Computational Intelligence*. Retrieved from <https://www.wolframalpha.com>
- Zhang, Z., Tsai, B., & Machin, G. (2009). *Radiometric temperature measurements: volume 42 (Vol. 42)*. Academic Press.

ANEXOS

Anexo 1. Estimación de incertidumbre con base al Modelo Cárdenas-Méndez y CENAM 2018

En la calibración de un termómetro de radiación que despliega directamente un valor de temperatura, su lectura de temperatura se compara con una temperatura de referencia T , trazable a la Escala Internacional de Temperatura de 1990, la cual es función de varias magnitudes como se ve en la [Ecuación \(1\)](#). (Cárdenas García, *Magnitudes de influencia en la calibración de termómetros de radiación debajo del punto fijo de la plata, 2018*)

$$T = T(x_1, \dots, x_{19}, x_{20} \dots, x_M; T_{TP1}, T_1, \dots, T_{TPN}, T_N) \quad \text{Ecuación (1)}$$

Siendo x_1 a x_{19} las magnitudes de influencia que se deben evaluar en las calibraciones de termómetros de radiación debajo del punto de la plata. x_{20} a x_M son las magnitudes de influencia particulares de cada laboratorio de calibración y que toman en cuenta las diferencias entre el modelo de medición utilizado y su realización experimental. Las N parejas (TP_i, T_i) son los valores medidos cuando el termómetro patrón calibrado en N puntos de temperatura, TP_i es el valor de temperatura medido por el termómetro patrón cuando fue calibrado y T_i es el valor con el que se comparó en su calibración.

De acuerdo con (IMNC, 2002), la incertidumbre combinada de la temperatura de referencia está dada por la [Ecuación \(2\)](#):

$$u^2(T) = \sum_{i=1}^M u_i^2 \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde u_i es la incertidumbre asociada con la magnitud de influencia x_i .

Las magnitudes de influencia x_1 a x_{21} se enlistan en la tabla No. 3, donde las abreviaturas utilizadas son: TP (termómetro patrón), IBC (termómetro de radiación bajo calibración) y FR (fuente de radiación). Se considera que a partir de x_{21} se

toman en cuenta aquellos Factores propios del laboratorio, es decir, es la incertidumbre tropicalizada al propio laboratorio. Pudiendo llegar hasta la x_M . Ejemplo de incertidumbres propias del laboratorio: Iluminación, corrientes de aire, alineación en el arreglo experimental, mediciones con aire acondicionado, entre otros.

Las magnitudes de influencia se describen a continuación:

1. Promedio de lecturas del $T_{Patrón}$: x_1

Se obtiene al medir el valor de temperatura de la FR repetidamente. Considerando una distribución gaussiana, la incertidumbre u_1 se calcula de la siguiente manera como se indica en la [Ecuación \(3\)](#):

$$u_1 = \sqrt{\text{var}(x_1)} \quad \text{Ecuación (3)}$$

2. Resolución de las lecturas del $T_{Patrón}$: x_2

Los valores de temperatura medidos por el $T_{Patrón}$ están cuantizados a un intervalo mínimo de x_2 . Considerando una distribución rectangular, la incertidumbre u_2 es igual a la desviación estándar indicada en la [Ecuación \(4\)](#):

$$u_2 = \sqrt{\frac{x_2^2}{12}} \quad \text{Ecuación (4)}$$

3. Propagación del error de calibración del $T_{Patrón}$: x_3

El valor promedio de temperatura y su incertidumbre medidos con el $T_{Patrón}$ se corrigen con la información del error e incertidumbre proveniente de su calibración. El valor corregido de x_1 está en la [Ecuación \(5\)](#):

$$T_{Patrón} = T_{Patrón}(x_1; T_{Patrón1}, T_1, \dots, T_{PatrónN}, T_N) \quad \text{Ecuación (5)}$$

y la incertidumbre de la propagación está dada por la [Ecuación \(6\)](#):

$$u_3 = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial T}{\partial T_{Patrón i}} \right)^2 u^2(T_{Patrón i}) + \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial T}{\partial T_i} \right)^2 u^2(T_i)} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Considerando que en la [Ecuación \(6\)](#) ya no aparece el término u_1^2 porque ya se consideró anteriormente.

4. Estabilidad de largo plazo del $T_{Patrón}$: x_4

Se obtiene del historial de las calibraciones y verificaciones del $T_{Patrón}$. Si un $T_{Patrón}$ tiene una deriva D en un porcentaje por día del valor medido $T_{TPatrón}$ y han transcurrido Q días desde su calibración, entonces se calcula como en la [Ecuación \(7\)](#):

$$u_4 = \sqrt{D \cdot Q \cdot T_{Patrón}} \quad \text{Ecuación (7)}$$

5. Emisividad efectiva de FR: x_5

Se parte de que FR no es un cuerpo negro y tiene una emisividad espectral que depende de la longitud de onda, ocasionando que la temperatura de su área efectiva no sea igual a su temperatura de radiancia en la región espectral de respuesta del termómetro bajo calibración (IBC). En la [Ecuación \(8\)](#) se tiene que la incertidumbre de la temperatura de radiancia es función de la incertidumbre de la emisividad efectiva ε :

$$u_5 = \sqrt{\left(\frac{\partial T_{Patrón}}{\partial \varepsilon} \right)^2 u^2(\varepsilon)} \quad \text{Ecuación (8)}$$

O bien, se puede obtener mediante la caracterización de la emisividad espectral de una muestra pintada con el mismo recubrimiento que la FR, la cual tiene una incertidumbre asociada y con este valor, se aplica la ecuación de emisividad efectiva.

6. Radiación reflejada en el área efectiva de la FR proveniente del ambiente:

x_6

Es la contribución a la radiación que llega al IBC, proveniente de la FR, debido a que la FR no es un cuerpo negro. Suele ser significativa cuando la FR tiene una emisividad baja y se hacen calibraciones a temperaturas menores que las del ambiente. Su incertidumbre está en función de la variación de la temperatura del medio ambiente considerada en la [Ecuación \(9\)](#):

$$u_6 = \sqrt{\left(\frac{\partial T_{Patrón}}{\partial T_{AM}}\right)^2 u^2(T_{AM})} \quad \text{Ecuación (9)}$$

7. Intercambio de energía entre el área efectiva de la FR y el medio ambiente:

x_7

Se debe a que el área efectiva de la FR no se encuentra a la misma temperatura que el medio ambiente. Tiene contribuciones debidas a la conducción, convección y radiación. Su incertidumbre es función de la variación de la temperatura del medio ambiente indicada en [Ecuación \(10\)](#):

$$u_7 = \sqrt{\left(\frac{\partial T_{Patrón}}{\partial x_7}\right)^2 \left(\frac{dx_7}{dT_{AM}}\right)^2 u^2(T_{AM})} \quad \text{Ecuación (10)}$$

8. Uniformidad espacial en temperatura del área efectiva de la FR: x_8

Se debe a que el área efectiva de la FR no emite (ni refleja) la misma cantidad de radiación en todos los puntos. Esto ocasiona que se obtengan diferentes valores de temperatura con termómetros de radiación que tienen campos de visión diferentes. Si $u_u(T_{Patrón})$ es la incertidumbre de la uniformidad en el campo de visión del $T_{Patrón}$ y $u_u(IBC)$ es la incertidumbre en la uniformidad en el campo de visión del IBC, se tiene la siguiente [Ecuación \(11\)](#):

$$u_8 = \sqrt{u_u^2(T_{Patrón}) + u_u^2(T_{IBC})} \quad \text{Ecuación (11)}$$

9. Estabilidad a corto plazo en temperatura del área efectiva de la FR: x_9
 Se debe a que cada punto del área efectiva de la FR no emite (ni refleja) la misma cantidad de radiación a lo largo del tiempo de medición durante la calibración. Está relacionada principalmente con el lazo de control de temperatura de la FR. La resolución normal de un lazo de control es $\pm x_9$ °C. Por lo tanto, la [Ecuación \(12\)](#) se define como:

$$u_9 = \sqrt{\frac{x_9^2}{3}} \quad \text{Ecuación (12)}$$

10. Efecto del tamaño de la fuente del IBC: x_{10}

La radiación medida afuera o adentro del cono de visión ideal, esté influida por el tamaño de la fuente de radiación que se mide, es decir, el efecto de tamaño de fuente (ETF). Su contribución a la incertidumbre de la temperatura de referencia está dada en la [Ecuación \(13\)](#): (siendo σ_c la función del efecto de tamaño de fuente del IBC)

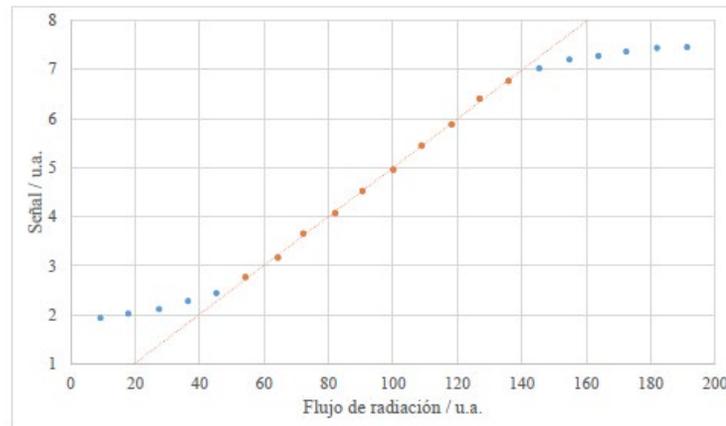
$$u_{10} = \sqrt{\left(\frac{\partial T_{IBC}}{\partial \sigma_c}\right)^2 u^2(\sigma_c)} \quad \text{Ecuación (13)}$$

11. No linealidad del IBC: x_{11}

El modelo físico de un termómetro de radiación considera a un detector que al recibir la radiación electromagnética proveniente de una superficie, que tiene un valor de temperatura T, da una señal eléctrica (corriente, diferencia de potencial, etc.) proporcional a la cantidad de radiación.

De manera general, la señal que se obtiene del detector de un termómetro de radiación, muestra una curva tipo "S", como función de la radiación que recibe. Dentro del proceso de calibración, se utiliza la parte lineal de la curva, como se muestra en la [Gráfica 1](#). (Cárdenas García, Diplomado en termometría de radiación, Módulo 2, Medición, 2018)

Gráfica 1. Señal del detector de un termómetro de radiación



Utilizando la parte lineal de la curva, se establece la [Ecuación \(14\)](#) para que se cumpla lo siguiente:

$$S(T) \propto \int_0^{\infty} R_{\lambda DET} L_{\lambda}(T) d\lambda \quad \text{Ecuación (14)}$$

Siendo $R_{\lambda DET}$ la respuesta espectral del detector.

La superficie de un detector recibe toda la radiación electromagnética de su hemisferio de visión y típicamente la superficie que se desea medir sólo ocupa una porción del hemisferio de visión del detector, por lo que se restringe el campo de visión del detector con unas aperturas "físicas" que se tiene en el laboratorio y tienen un diámetro definido, para controlar la radiación recibida.

El intervalo de longitudes de onda de la radiación que llega al detector se controla por medio de filtros y dicho intervalo de longitudes normalmente se especifica en la ficha técnica de los IBC; cuando no se especifica, se puede probar mediante el termómetro de radiación patrón, para conocer el comportamiento del IBC.

Todo lo anterior se toma en cuenta en la [Ecuación \(15\)](#) correspondiente a un termómetro de radiación lineal:

$$S(T) \propto \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda} L_{\lambda}(T) d\lambda \quad \text{Ecuación (15)}$$

Siendo R_{λ} la respuesta espectral del termómetro de radiación (que incluye al detector, el filtro y todos los demás elementos, como la parte geométrica relacionada con el campo de visión y un factor de conversión que permite que S tenga las unidades eléctricas adecuadas)

Usando el concepto de temperatura de radiancia, se determina que la ecuación del termómetro de radiación lineal se indica en la [Ecuación \(16\)](#):

$$S(T) = \frac{C}{\exp\left(\frac{c_2}{AT_{RAD} + B}\right) - 1} \quad \text{Ecuación (16)}$$

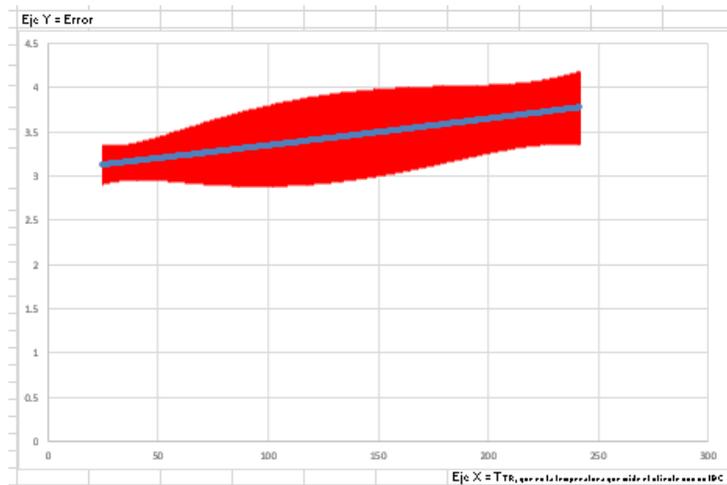
Aunque, se puede decir que la señal que proporciona el IBC es lineal con respecto de la radiancia de la FR, la desviación de la linealidad depende principalmente de las características del detector, aunque también pueden influir las características del circuito electrónico que manipula la señal del detector. En la [Ecuación \(17\)](#) se está considerando que NL es la no-linealidad, la señal corregida es: $S = NL \cdot S_{\text{corregida}}$, entonces, la incertidumbre de la corrección es $u(S)$ y se obtiene de la siguiente manera:

$$u_{11} = \sqrt{\left(\left.\frac{\partial S}{\partial T}\right|_{T=X_{17}}\right)^2 \left(\frac{u(S)^2}{S}\right)} \quad \text{Ecuación (17)}$$

En (Cárdenas García, Magnitudes de influencia en la calibración de termómetros de radiación debajo del punto fijo de la plata, 2018) se indica que de manera normal, para termómetros de radiación en el intervalo de (8 a 14) μm , se tiene $\frac{u(S)}{S} = 0.002$

Con la ecuación de Interpolación para la propagación del Error, que se muestra en el siguiente [Gráfico 2](#), se puede observar el comportamiento del IBC en su intervalo de calibración.

Gráfica 2. Comportamiento del IBC en su intervalo de calibración



12. Temperatura de referencia del detector del IBC: x_{12}

Para los detectores que trabajan a temperatura ambiente, la señal neta detectada es igual a la diferencia entre la señal debida a la radiancia de la fuente radiante y la señal a una temperatura de referencia. Típicamente, la temperatura de referencia es la temperatura del detector, que puede ser considerada aproximadamente igual a la temperatura ambiente en los

termómetros de radiación más económicos, o la temperatura de una superficie de referencia en sistemas de chopper. No se genera una señal cuando la temperatura de radiancia de la fuente es igual a la temperatura de referencia. Ver [Ecuación \(18\)](#).

$$u_{12} = \sqrt{\left(\frac{\frac{\partial S}{\partial T} \Big|_{T=T_{DET}}}{\frac{\partial S}{\partial T} \Big|_{T=X_{17}}}\right)^2 \left(\frac{u(S)^2}{S}\right)} \quad \text{Ecuación (18)}$$

13. Cambio en la respuesta de los componentes electrónicos y ópticos del IBC debida a los cambios de temperatura del medio ambiente: x_{13}

Los componentes electrónicos que manipulan la señal del detector y los componentes ópticos por los que viaja la radiación, cambian su respuesta en función de cambios en su temperatura debidos a cambios en la temperatura del medio ambiente. El efecto neto en el valor de temperatura de radiancia debido al cambio en la temperatura ambiente proviene del cambio en: la radiación ambiente, la responsividad del detector, el factor de amplificación de la señal detectada, la transmitancia del filtro. Pudiéndose calcular como se indica en la [Ecuación \(19\)](#).

En (Cárdenas García, Magnitudes de influencia en la calibración de termómetros de radiación debajo del punto fijo de la plata, 2018) se considera que de manera normal, $\frac{u(S)}{S} = 0.0011$.

$$u_{13} = \sqrt{\left(\frac{S}{\frac{\partial S}{\partial T} \Big|_{T=X_{17}}}\right)^2 \left(\frac{u(S)^2}{S}\right)} \quad \text{Ecuación (19)}$$

14. Atenuación de la radiación que recibe el IBC debida a la absorción atmosférica: x_{14}

En el laboratorio, la radiación que viaja de la fuente al termómetro cruza la atmósfera. La atmósfera no es perfectamente transparente a la radiación, lo que causa una atenuación en la radiación y por lo tanto, una disminución en la señal del detector. Esto tiene un efecto en la calibración, si se utiliza un termómetro de radiación patrón que se coloca a una distancia de la fuente diferente que la del termómetro de radiación bajo calibración (IBC) y se puede calcular como se indica en la [Ecuación \(20\)](#).

En (Cárdenas García & Méndez Lango, Use of Radiometrically Calibrated Flat-Plate Calibrations in Calibration of Radiation Thermometers, 2015), se establece un valor normal $\frac{u(S)}{S} = 0.0003$ para una distancia entre la FR y el termómetro patrón igual a 1 (un) metro.

$$u_{14} = \sqrt{\left(\frac{S}{\frac{\partial S}{\partial T}_{T=TFR}}\right)^2 \left(\frac{u(S)}{S}\right)^2} \quad \text{Ecuación (20)}$$

15. Razón de ganancia de los amplificadores del IBC: x_{15}

La radiancia cambia exponencialmente con la temperatura, por lo que puede rebasarse el intervalo de respuesta del detector y requerirse varias etapas de amplificación. Típicamente las etapas de amplificación no mantienen una razón de ganancia exacta. Se puede calcular mediante la [Ecuación \(21\)](#).

En (Cárdenas García & Méndez Lango, Use of Radiometrically Calibrated Flat-Plate Calibrations in Calibration of Radiation Thermometers, 2015), se establece, que de manera normal, para termómetros de radiación en el intervalo de (8 a 14) μm , se tiene una $\frac{u(S)}{S} = 0.0001$.

$$u_{15} = \sqrt{\left(\frac{S}{\frac{\partial S}{\partial T}}\right)^2 \left(\frac{u(S)^2}{S}\right)} \quad \text{Ecuación (21)}$$

16. Ruido de la señal del IBC: x_{16}

El ruido de la señal del IBC es la variación que no se debe a la variación de la radiancia del área de la FR que es cubierta por el campo de visión del IBC. El ruido limita la menor diferencia de temperatura que se puede medir. Entre menor sea el ruido, menor será la diferencia de temperatura que se puede detectar. Cuando se evalúa el ruido, se deben eliminar los efectos de algunas magnitudes como la repetibilidad del error del IBC. Su incertidumbre puede tomarse de las especificaciones del IBC, o determinarse experimentalmente y se calcula mediante la [Ecuación \(22\)](#):

$$u_{16} = \sqrt{\frac{\text{var}(S)}{\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)^2}} \quad \text{Ecuación (22)}$$

17. Promedio de las lecturas del IBC: x_{17}

El promedio de las lecturas del IBC x_{17} , se obtiene al medir el valor de temperatura de la FR repetidamente. Su incertidumbre u_{17} , considerando una distribución gaussiana está dado por la [Ecuación \(23\)](#):

$$u_{17} = \sqrt{\text{var}(x_{17})} \quad \text{Ecuación (23)}$$

18. Resolución de las lecturas del IBC: x_{18}

Los valores de temperatura medidos por el IBC, están cuantizados a un intervalo mínimo x_{18} . La incertidumbre u_{18} considerando una distribución rectangular está dada por la [Ecuación \(24\)](#):

$$u_{18} = \sqrt{\frac{x_{18}^2}{12}} \quad \text{Ecuación (24)}$$

19. Repetibilidad del error del IBC: x_{19}

Esta incertidumbre se calcula con la [Ecuación \(25\)](#) y se da al repetir la calibración del IBC y se considera igual a la diferencia entre los errores obtenidos en el mismo punto de calibración que se repite dos veces, tomando una distribución rectangular. Si los errores de cada calibración son e_1 y e_2 , entonces la incertidumbre es:

$$u_{19} = \sqrt{\frac{(e_1 - e_2)^2}{12}} \quad \text{Ecuación (25)}$$

20. Modelo matemático: x_{20}

Derivado de que se emplean diversas interpolaciones para estimar las magnitudes de influencia, se le asigna una corrección por efecto de las interpolaciones, y se hace calcula con el método de los residuos, cuadrados de residuos y la suma de los mismos y se grafican.

T (°C)	Corrección (°C)	Corrección interpolada (°C)	Residuos (°C)	Cuadrados de residuos (°C ²)	Suma cuadrados de residuos (°C ²)	N-m-1	U (°C)
-----------	--------------------	-----------------------------------	------------------	--	--	-------	-----------

Se consideran dentro de esta u_{20} los cálculos de interpolación de: Uniformidad de la FR, estabilidad de la FR, error del $T_{Patrón}$, T_{AM} (ambiental) y $T_{DETECTOR}$.

Posterior a ello, se hace el cálculo de la incertidumbre típica y se establece la sig. Tabla, de la cual se obtiene su sumatoria conforme el tratamiento de incertidumbres y es la que se toma en cuenta para el cálculo de la incertidumbre total:

	u (°C)	u típica
1. Uniformidad de la FR:		
2. Estabilidad de la FR:		
3. Error del patrón:		
4. TAM Background		
5. T ambiental		
Sumatoria:		

21. Incertidumbre tropicalizada al propio laboratorio: x_{21}

Se considera que a partir de x_{21} se toman en cuenta aquellos factores propios del laboratorio, es decir, es la incertidumbre tropicalizada al propio laboratorio. Pudiendo llegar hasta la x_M . Ejemplo de incertidumbres propias del laboratorio: Iluminación, corrientes de aire, alineación en el arreglo experimental, mediciones con aire acondicionado, entre otros.

Pese a los esfuerzos realizados por los diferentes actores en el campo metrológico, para estimar con exactitud el valor de la incertidumbre asociada a la medición y considerando todas las posibles magnitudes de influencia, se da el caso de que pudiesen existir inclusive, aspectos no considerados en el presente documento, por lo cual, de igual manera que se hizo en el punto anterior, se le asigna un valor arbitrario a estos factores.

$$u_M = 0.001 \text{ } ^\circ\text{C} \tag{Ecuación (26)}$$

Incertidumbre estándar combinada final:

La incertidumbre estándar combinada final de la temperatura del IBC $u_\Sigma(T)$ se calcula mediante la fórmula:

$$u_\Sigma(T) = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=M} (u_i)^2} \tag{Ecuación (27)}$$

Donde:

$u_\Sigma(T)$ Incertidumbre combinada de la temperatura medida de un IBC

La incertidumbre expandida del valor de temperatura del IBC está determinada por el factor de cobertura $k(p)$ con una probabilidad de confianza $p = 0,95$, $(k(0,95)) = 2$ y se calcula mediante la fórmula:

$$U = k(p) \cdot u_{\Sigma}(T)$$

Ecuación (28)

Anexo 2. Certificado de calibración TIPO



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
 Laboratorio de Metrología
 Magnitud Temperatura
 Servicio sólo con Trazabilidad

Certificado No. **LTR-000271**
 Orden de servicio: **000487**
 Fecha de recepción: **2021-02-26**
 Fecha de calibración: **2021-02-27**
 Fecha de emisión: **2021-03-08**
 Página: **1 de 3**

Datos del propietario

Nombre: **Brikap S.A. de C.V.**
 Domicilio: **Antiguo camino a Copalita no. 2877, Col. Villas del Valle, Zapopan, Jal. C.P. 45220**

Datos del instrumento **Datos generales de la calibración**

<p>Nombre: Termómetro de Radiación</p> <p>Marca: Fluke</p> <p>Modelo: 568IR</p> <p>No. de serie: 24670058</p> <p>No. de ID: LTR-08</p> <p>Intervalo de medición: -40 °C a +800 °C</p> <p>Resolución: 0.1 °C</p> <p>Emisividad: Variable = 1</p> <p>Banda espectral: 8 a 14 µm</p> <p>Resolución óptica: 50:1</p>	<p>Procedimiento utilizado: FL-LT-001 e IN-LT-001-02</p> <p>Método utilizado: Comparación contra termómetro de contacto patrón</p> <p>Norma de referencia: CENAM. (2018). Guía técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre en la calibración de termómetros de Radiación. Querétaro: CENAM.</p> <p>Patrón de referencia: Patrón nacional de temperatura (CENAM)</p> <p>Realización: Laboratorio de metrología, división temperatura en KAPTER®</p> <p>Temperatura ambiental de medida: 23.54 °C +/- 0.10 °C</p> <p>Medio de reproducción de Temperatura: Dauik 19®, Dauik 80®, Dauik 300®, Dauik 500® & Dauik 750®</p> <p>Emisividad: 1</p> <p>Banda espectral: 8 a 14 µm</p> <p>Incertidumbre: Se indica en la tabla anexa y se expresa con un factor k=2</p>
--	---

Descripción de patrones utilizados

No.	Detalles del instrumento	Marca	Modelo	Res.	Incertidumbre	Vencimiento
1	Termómetro de contacto No. ID: LTR-13, Lector LTR-12 Certificado de calibración CIDESI: LTE201114 / TENKI: TNET-435-2020 Intervalo de calibración: 0°C a +800°C Carta de trazabilidad, rev.12	Keithley Instruments, Inc.	2110-120	0.01 °C	± 0.18 °C	2021-10-22
2	Termómetro de contacto No. ID: LTR-16, Lector LTR-12 Certificado de calibración CIDESI: LTE201116 Intervalo de calibración: -20°C a +80°C Carta de trazabilidad, rev.12	Keithley Instruments, Inc.	2110-120	0.01°C	± 0.084°C	2021-10-22

Ing. Luis Fernando Rodríguez Arreguín
 Realizó: Técnico Metrólogo

Ing. Margarita Kaplun Mucharraille
 Aprobó: Responsable de Laboratorio

Antiguo Camino a Copalita No.2877.
 Fracc. Villas del Valle, Zapopan, Jalisco.
 Tel. 33-3834-4733 y 33-3165-8801.
 contacto@kapter.mx

Este documento es válido en original y/o formato digital con los correspondientes accesos y firmas.
 Se recomienda evitar la reproducción parcial del mismo, para evitar errores en la interpretación de los resultados.
 Para cualquier queja y/o sugerencia relacionada con este servicio, favor de acceder a nuestro
 sitio web: www.kapter.mx y/o escribirnos a: calidad@kapter.mx

BKP-CA (Confidencial) / F-LT-001-04, REV.08(2020-12-28)



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

Laboratorio de Metrología
Magnitud Temperatura
Servicio sólo con Trazabilidad

Certificado No. **LTR-000271**
Orden de servicio: **000487**
Fecha de recepción: **2021-02-26**
Fecha de calibración: **2021-02-27**
Fecha de emisión: **2021-03-08**
Página: **2 de 3**

OBSERVACIONES GENERALES

1. **Sistema de unidades:** El resultado de las mediciones objeto de este certificado está expresado en términos del Sistema Internacional de Unidades (SI). Los patrones nacionales de medida son las referencias con los cuales se realizan experimentalmente dichas unidades en México.
2. **Requisitos del certificado de calibración:** Cumple con los requerimientos de la norma internacional ISO/IEC-17025:2017 y su equivalente nacional: NMX-EC-17025-IMNC-2018.
3. **Expresión de incertidumbre de medida:** La incertidumbre de medida se obtuvo multiplicando la incertidumbre estándar combinada por un factor de cobertura $k = 2$, el cual corresponde a un nivel de confianza de aproximadamente 95.45 %, bajo la suposición de que la función de densidad de probabilidad del mensurando es normal. La incertidumbre de la medición fue estimada de acuerdo a la norma NMX-CH-140-IMNC-2002: Guía para la expresión de la Incertidumbre en las Mediciones, equivalente al documento JCGM-100:2008 (GUM 1995 with minor corrections) Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement. BIPM. First edition - September. Vigente.
4. **Las normas de referencia utilizadas para la estimación de incertidumbre son:** Guía Técnica de CENAM (2018). Guía técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre en la calibración de termómetros de Radiación. Querétaro: CENAM, IMNC. (2002); NMX-CH-140-IMNC Guía para la expresión de la incertidumbre en las mediciones; CDMX: IMNC., de las se toman en cuenta cuáles son los componentes de incertidumbre y se consideran algunos componentes adicionales del análisis del Laboratorio. La estimación de incertidumbre se calcula con base a la ecuación de medición del modelo físico descrito en la IT-LT-001-02.
5. **Contribuciones a la incertidumbre de medida:** El valor de la incertidumbre de la medición mostrado no incluye la estabilidad a largo plazo, deriva, ni efectos del transporte del instrumento bajo calibración. Incluye las contribuciones por parte del Laboratorio y las contribuciones por parte de la IBC.
6. **Trazabilidad Metroológica:** Este término, usado en el presente Certificado de Calibración es concordante con el concepto de la norma NMX-Z-055-IMNC-2009: Vigente (Vocabulario Internacional de Metrología - Conceptos fundamentales y generales, términos asociados (VIM), establecida en el punto 2.41 y denominada trazabilidad metroológica.
7. **Condiciones de medición:** El presente Certificado de Calibración, sólo aplica al instrumento y a los resultados en él descritos, con las condiciones y características presentadas en el momento que se realizó la calibración, las cuales se indican en este certificado y su uso es expresamente responsabilidad del propietario. Las características metroológicas indicadas en el instrumento corresponden a las informadas por el propietario, por los manuales de fabricación, hojas de especificaciones o al resultado de la inspección visual del instrumento medido.
8. **Vigencia de calibración:** Es responsabilidad del propietario, determinar la vigencia de calibración y/o medición, de acuerdo con su frecuencia de uso, mantenimiento y programación de calibración establecida. Puede consultar el documento internacional OIML-D10: Guía para la determinación de la vigencia; SNC-D1-1988: Directrices y criterios de periodos de calibración, uso y mantenimiento de instrumentos de medición y/o material relacionado.
9. **Las temperaturas especificadas han sido generadas de acuerdo a la Escala Internacional de Temperatura de 1990 (EIT-90).**
10. **Cuando un cliente solicite un acuerdo para que se informen los resultados de manera simplificada, el Laboratorio no aplica dicha solicitud, debido a que toda la información es necesaria para la interpretación de los resultados.**
11. **En caso de requerir modificar alguna condición especial del IBC, se indica en la página 3 del presente certificado.**
12. **Cuando exista una adición, desviación y/o exclusiones del método empleado por el Laboratorio o solicitado por el cliente, se indica en la página 3, en la sección correspondiente a Regla de Decisión o Condiciones Especiales del IBC, del presente certificado.**
13. **El Laboratorio no se hace responsable cuando la información sea proporcionada por el cliente y pueda afectar a la validez de los resultados.**
14. **En el caso de que el cliente solicite una evaluación de conformidad, las pautas en las que se base dicha evaluación, las dictaminará el mismo cliente; la evaluación incluirá información como: resultados a los que aplica la evaluación, especificaciones, normas y la regla de decisión aplicada por el cliente.**
15. **Consulta del Certificado de Calibración y/o informe de medición:** Para obtener sus resultados, favor de consultar nuestra página web: www.kapter.mx ([ingrese aquí](#)). Podrá realizar esta consulta mediante un usuario y contraseña. Sólo tendrá validez en su forma íntegra, con firma digital, código alfanumérico y sello de Kapter digital. Podrá ser reproducido en su totalidad cuando se cuente con los debidos accesos para ello y no debe ser reproducido parcialmente.

Antiguo Camino a Copalita No.2877.
Fracc. Villas del Valle. Zapopan, Jalisco.
Tel. 33-3834-4733 y 33-3165-8801
contacto@kapter.mx

Este documento es válido en original y/o formato digital con los correspondientes accesos y firmas.
Se recomienda evitar la reproducción parcial del mismo, para evitar errores en la interpretación de los resultados.
Para cualquier queja y/o sugerencia relacionada con este servicio, favor de acceder a nuestro sitio web: www.kapter.mx y/o escribirnos a: calidad@kapter.mx

BKP-CA (Confidencial) / F-LT-001-04, REV.08(2020-12-28)



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

Laboratorio de Metrología
Magnitud Temperatura
Servicio sólo con Trazabilidad

Certificado No. **LTR-000271**
Orden de servicio: **000487**
Fecha de recepción: **2021-02-20**
Fecha de calibración: **2021-02-27**
Fecha de emisión: **2021-03-08**
Página: **3 de 3**

RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN

Emisividad = 1.00

Puntos de calibración: -6 °C, 100 °C, 300 °C, 500 °C, 750 °C.
Distancia de calibración: 0.30 m

Termómetro Patrón (°C)	Termómetro IBC 24670058 (°C)	Error de Medida (°C)	Incertidumbre de Medida (°C)
-5.66	-3.38	2.28	+/- 2.2 °C
37.60	37.92	0.32	+/- 1.3 °C
299.62	298.87	-0.75	+/- 1.6 °C
497.79	493.88	-3.91	+/- 4.1 °C
741.93	746.78	4.85	+/- 11 °C



Observaciones Técnicas:

Modelo físico de un termómetro de radiación

El modelo físico empieza considerando un detector que al recibir la radiación electromagnética proveniente de una superficie, que tiene un valor de temperatura T_s , da una señal eléctrica S (corriente, diferencial de potencia, etc.) proporcional a la cantidad de radiación. Esta señal eléctrica tiene una parte lineal dentro de su curva y ésta sección es la que se utiliza para establecer la ecuación del termómetro de radiación como lineal:

$$S(T) = \frac{C}{\exp\left(\frac{C_1}{AT_{RAD} + B}\right) - 1} \quad \text{Despejando } T_{RAD} \text{ se obtiene:} \quad T_{RAD} = \frac{C_1}{A \ln\left(\frac{C}{S} + 1\right)} - \frac{B}{A}$$

Donde: T_{RAD} es la temperatura de radiancia de objeto que se mide; A, B, C son constantes que dependen de las características del termómetro de radiación y C_1 es la primera constante de radiación del espectro de Planck.

Considerando que el termómetro de radiación IBC no despliega valores de señal S , sino valores de temperatura T_{TR} , se utiliza la aproximación de Saunders-White para simular las señales y así obtener T_{RAD} :

$$S = \frac{1}{\exp\left(\frac{C_1}{A(T_{TR} + B)}\right) - 1} + \left(\frac{A+B}{2}\right) \left[1 - \left(\frac{A-B}{A+B}\right)^2\right] \quad B_{SR} = \frac{B}{2} \left(\frac{A-B}{A+B}\right)^2 \quad T_{RAD} = \frac{C_1}{A \ln\left[\frac{C}{A(T_{TR} + B)} + 1\right]} - \frac{B}{A}$$

Donde: T_{TR} es la temperatura proporcionada por el termómetro de radiación al medir el objeto o IBC.

Con estas aproximaciones se obtiene la siguiente ecuación de medición que relaciona la señal, la temperatura (T) y la emisividad espectral (ϵ) de una superficie y la temperatura de los objetos que proporcionan la radiación de fondo (T_{AMB}):

$$T = \frac{C_1}{A \ln\left[\frac{C}{A \left(\frac{1}{\exp\left(\frac{C_1}{A(T_{AMB} + B)}\right) - 1} + \left(\frac{A+B}{2}\right) \left[1 - \left(\frac{A-B}{A+B}\right)^2\right]\right)} + 1\right]} - \frac{B}{A}$$

Modelos válidos para los intervalos de temperatura y banda espectral solicitados en el presente servicio.

El Termómetro IBC se calibró utilizando un Termómetro de Contacto tipo termopar o RTD (según el caso) como patrón de referencia en la comparación y una Cavity de Cuerpo Gris con Gradiente Térmico como medio de reproducción de temperatura, en la banda espectral indicada en la Página 1. Ambos instrumentos se ajustaron a las siguientes características:

- Medio de Reproducción de Temperatura: Dauik 19®, Dauik 80®, Dauik 300®, Dauik 500® & Dauik 750®
- Alineación: A la zona de mayor temperatura del fondo de la cavidad del cuerpo gris.
- Tamaño del Spot: 0.019 m

Las lecturas reportadas representan el promedio de seis mediciones repetidas y representan la zona central del detector del IBC.

Debido a la desviación detectada del IBC, el laboratorio no se hace responsable por los afectos que pudieran alterar los resultados de la combinación.

Regla de decisión

Ninguna



Condiciones especiales

Humedad Relativa: 37.4% ± 1.9%

Antiguo Camino a Copalita No.2877.
Fracc. Villas del Valle. Zapopan, Jalisco.
Tel. 33-3834-4733 y 33-3165-8801
contacto@kapter.mx

Este documento es válido en original y/o formato digital con los correspondientes accesos y firmas. Se recomienda evitar la reproducción parcial del mismo, para evitar errores en la interpretación de los resultados. Para cualquier queja y/o sugerencia relacionada con este servicio, favor de acceder a nuestro sitio web: www.kapter.mx y/o escribimos a: calidad@kapter.mx

BKP-CA (Confidencial) / F-LT-001-04, REV.08(2020-12-28)