

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD EN
AISLANTES

DANIEL QUIROGA ARCILA
JIMENA VARGAS ENCINALES

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2018

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD EN
AISLANTES

DANIEL QUIROGA ARCILA
JIMENA VARGAS ENCINALES

Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO

Director
ALVARO BERMUDEZ CORONEL
Ingeniero químico

Director científico
SERGIO CARVAJAL PERDOMO
Ingeniero químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA, INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2018

Nota de aceptación.

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, D.C., Agosto de 2018

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectoría Académica y de Postgrados

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Decano Facultad de Ingeniería

Dr. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa Ingeniería Química

Ing. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

Este proyecto de grado lo dedico con todo mi amor y cariño a mis padres Nelson Quiroga Briceño y Mónica Arcila Gaviria, por su sacrificio y esfuerzo, por ser la guía para mi futuro, por creer en mí, por siempre estar presentes para brindarme su comprensión, cariño y amor pese a las dificultades.

A mis hermanos Nicolás Quiroga Arcila y Ana María Quiroga Arcila por ser ejemplo de dedicación e inspiración para sopesar cada día y así superarme.

A mi abuela Bertha Gaviria de Arcila por su basta sabiduría y por enseñarme que el amor es el regalo más grande que una generación le puede dejar a otra.

A mis amigos, compañeros, profesores y todas aquellas personas quienes han compartido su conocimiento para hacer de mí una mejor persona.

Gracias a todos.

Daniel Quiroga Arcila.

‘Una educación desde la cuna hasta la tumba, inconforme y reflexiva, que nos inspire un nuevo modo de pensar y nos incite a descubrir quiénes somos en una sociedad que se quiera más a sí misma...’

Gabriel García Márquez (1927-2014)

DEDICATORIA

Este proyecto que con tanta dedicación y amor lo hemos realizado, quiero dedicárselo a mi mamá Esperanza Encinales que siempre ha estado allí para darme fortaleza y ánimo, a mi papá Gabriel Vargas y a toda mi familia que ha sido un gran apoyo.

Así mismo, a mi estimada amiga Camila Moreno, pues sin su colaboración junto a la de su mamá Martha Malagón y la de Julio Cesar Fuentes, esto no podría haber sido posible.

También a mi hermana Natalia Vargas, a Nick Theelen, a mis compañeras de la casa, a todos mis amigos, amigas y a los Profesores que han estado a mi lado acompañándome a alcanzar este logro brindándome su conocimiento, apoyo y respaldo.

Infinitas gracias siempre hacia ustedes.

Jimena Vargas Encinales.

AGRADECIMIENTOS

- Agradecemos especialmente al Instituto Nacional de Metrología de Colombia (INM), a sus directivas y funcionarios que nos dieron la oportunidad de desarrollar este proyecto, nos brindaron el apoyo científico, técnico, logístico y económico.
- A nuestro director el Ingeniero Álvaro Bermúdez Coronel porque sin su decidido apoyo no hubiese sido posible concluir con éxito esta tesis.
- Al Ingeniero Sergio Carvajal Perdomo, director científico de esta tesis, quien no solo aportó sus conocimientos en la materia, sino quien dedicó su tiempo, brindándonos su consejo y amistad. Muchas Gracias.
- Al National Institute of Standards and Technology (NIST) de los EEUU, por su apoyo técnico desinteresado con el aporte de los materiales de referencia.
- A todo el cuerpo de Ingenieros, físicos, a los funcionarios de los laboratorios y talleres del INM, que de una u otra manera contribuyeron con su conocimiento y experiencia. Mil gracias.
- A todo el cuerpo de docentes de la Universidad de América que contribuyeron con nuestra formación y sentaron las bases para que este trabajo de grado sea una realidad.
- A la Ingeniera Elizabeth Torres Gámez orientadora de tesis, gracias por su ayuda.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	31
OBJETIVOS	33
1. MARCO TEORICO	34
1.1 IMPORTANCIA DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA	34
1.2 AISLANTES TÉRMICOS	39
1.3 DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA	42
1.3.1 Conductividad térmica en gases	43
1.3.2 Conductividad térmica en aislantes sólidos	44
1.3.3 Conductividad térmica como función de la temperatura	48
1.4 DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	49
1.4.1 Conservación energética global	51
1.5 TÉCNICAS Y MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	53
1.5.1 Métodos en estado estacionario	54
1.5.2 Métodos de estado transitorio	61
1.6 SELECCIÓN DEL MÉTODO	65
1.7 ASTM C 177-13 MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA EL ESTADO ESTACIONARIO, LAS MEDICIONES DE FLUJO DE CALOR Y PROPIEDADES DE TRANSMISIÓN TÉRMICA MEDIANTE EL GHPA	67
1.7.1 Significado y uso	68
1.7.2 Aparato GHPA	68
1.7.3 La muestra utilizada en el GHPA	69
1.7.4 Mediciones de temperatura	70
1.7.5 Procedimiento	70
1.7.6 Incertidumbre	71
1.8 “APARATO DE PLACA CALIENTE CON PROTECCIÓN DE FUENTE DE CALOR DE LÍNEA ”	71

2. DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL SISTEMA DE MEDICION GHPA	81
2.1 PLATOS	81
2.1.1 Plato caliente	81
2.1.2 Platos fríos	83
2.2 MATERIAL Y DIMENSIONES	84
2.3 CRITERIOS DE DISEÑO	86
2.4 ELEMENTOS CALEFACTORES	87
2.4.1 Área de medición	87
2.4.2 Guarda	87
2.5 SENSORES DE TEMPERATURA	87
2.5.1 Termómetros	87
2.5.2 Termopila	88
2.6 MEDICIÓN DE FLUJO DE CALOR	89
2.7 CONDICIONES AMBIENTALES	89
2.8 GHPA UTILIZADO EN EL PROYECTO	89
3. DESARROLLO DEL PROYECTO	92
3.1 PROCEDIMIENTO	92
3.2 DATOS OBTENIDOS	93
3.3 CÁLCULOS	98
3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	101
3.5 DETERMINACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DEL SISTEMA	106
3.6 ERROR DE MEDIDA	115
3.7 ERROR NORMALIZADO	116
4. ANÁLISIS FINANCIERO	119
5. CONCLUSIONES	123
6. RECOMENDACIONES	124
BIBLIOGRAFIA	125

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Distribución de consumo de energía final. Colombia – 2015	37
Gráfica 2. Participación de los energéticos en la industria	38
Gráfica 3. Conductividad térmica del Poliestireno Expandido de las Pruebas 1 y 1 repetición	96
Gráfica 5. Conductividad térmica del Poliestireno Expandido de las Pruebas 6 a la 10	97
Gráfica 6. Conductividad térmica de la Fibra de Vidrio.	97
Gráfica 7. Distribución f	106

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Aislantes para temperaturas entre 100 y 500°C	41
Tabla 3. Comparación entre los cinco métodos planteados	67
Tabla 4. Propiedades del aluminio 6061	84
Tabla 5. Dimensiones plato caliente	85
Tabla 6. Dimensiones platos fríos	85
Tabla 7. Especificación calibrador de procesos Fluke 744	88
Tabla 8. Especificaciones Keithley 181	88
Tabla 9. Especificaciones multímetro fluke 8846A	89
Tabla 10. Ejemplo de datos obtenidos durante la experimentación para la Fibra de Vidrio en la Prueba 14	95
Tabla 11. Ejemplo del cálculo de la conductividad térmica de la muestra de Fibra de Vidrio	99
Tabla 12. Conductividad térmica de las muestras de Poliestireno Expandido	100
Tabla 13. Conductividad térmica de la muestra Poliestiresno Expandido. Repetición de la prueba 1	100
Tabla 14. Conductividad térmica de las muestras de fibra de vidrio	101
Tabla 15. Datos de conductividad térmica obtenidos durante la experimentación de siete periodos treinta minutos	102
Tabla 16. Promedio de los tres últimos datos de conductividad térmica determinados por cada operario	102
Tabla 17. Sumatoria de los datos de la muestra por nivel, promedio por nivel y sumatoria total	103
Tabla 18. Suma de cuadrados	103
Tabla 19. Cuadrados medios	104
Tabla 20. Tabla anova	104
Tabla 21. Estimador del ANOVA	104

Tabla 22. Datos necesarios de la tabla F de Fisher	105
Tabla 23. Fracción de la tabla de distribución f de Fisher	105
Tabla 24. Datos iniciales de incertidumbre, donde A y B hacen referencia al tipo de incertidumbre y R y N son la distribución rectangular y normal respectivamente	110
Tabla 25. Datos de μ para cada magnitud	111
Tabla 26. Determinación del factor y $u_{típica}$ de todos los datos	112
Tabla 27. Contribución de cada parámetro a μ	113
Tabla 28. Valores de $\frac{u_{(i)}}{i}$	114
Tabla 29. Porcentaje de contribución	115
Tabla 30. Medición en SRM 1450d	117
Tabla 31. Clasificación de costos	120
Tabla 32. Costo del primer objetivo del proyecto	121
Tabla 33. Costo del segundo objetivo del proyecto	121
Tabla 34. Costo del tercer objetivo del proyecto	121
Tabla 35. Costo del cuarto objetivo del proyecto	122

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Clases de aparatos para métodos radiales	59

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Proceso – normal o proceso n para sólidos ideales	47
Figura 2. Proceso - umklapp o proceso u para sólidos aislantes	47
Figura 3. Conductividad térmica en función de la temperatura	49
Figura 4. Disposición general de los componentes mecánicos del aparato de placa caliente protegida	55
Figura 5. Flujo de calor en el aparato de placa caliente protegido	56
Figura 6. Componentes de hfma con dos transductores de flujo de calor	58
Figura 7. Configuración para medición de conductividad térmica usando la técnica de flujo radial	61
Figura 8. Esquema para técnica “maldonado”	63
Figura 9. Calentador y sensor de película delgada utilizados para método de fuente plana	64
Figura 10. Ghpa (guarded hot plate apparatus).	72
Figura 11. Aparato de placa caliente protegido (ghpa)	72
Figura 12. Plato caliente	82
Figura 13. Esquema de sistema de control.	82
Figura 14. Ubicación de la termopila	83
Figura 15. Plato frío	84
Figura 16. Ghpa construido	90
Figura 17. Plato frio superior.	90
Figura 18 plato frio inferior.	91
Figura 19 plato caliente con secciones.	91

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Ecuación de Conductividad Térmica Total	42
Ecuación 2. Ecuación de Conductividad Térmica Simple	43
Ecuación 3. Teoría cinética en gases	44
Ecuación 4. Ecuación general de conductividad térmica	44
Ecuación 5. Ecuación de Debye sobre la transferencia de calor en gases	45
Ecuación 6. Ley de Fourier	50
Ecuación 7. Conservación de energía	51
Ecuación 8. Consideración de la radiación en el balance de calor	52
Ecuación 9. Conservación de energía con contribución de la radiación	53
Ecuación 10. Rosseland cuantificación de la radiación	53
Ecuación 11. Conductividad térmica del (GHPA)	57
Ecuación 12. Conductividad térmica del (HFMA)	58
Ecuación 13. Conductividad térmica del método de flujo radial	60
Ecuación 14. Balance de calor del método Pulse Power	63
Ecuación 15. Balance de calor en el plato caliente	73
Ecuación 16. Calor q_1	73
Ecuación 17. Calor q_2	73
Ecuación 18. Calor q'	73
Ecuación 19 Balance de calor en términos de q_1 , q_2 y q'	74
Ecuación 20. Simplificación del balance de calor	74
Ecuación 21. Considerando $\Delta r \rightarrow 0$ en el balance de calor	74
Ecuación 22. Ecuación diferencial del balance de calor	75
Ecuación 23. Ecuación Diferencial del balance de calor w^2	75
Ecuación 24. Aproximacion matematica de la ecuacion diferencial del balance de calor	75

Ecuación 25 Aproximación matemática de la ecuación diferencial estándar.	76
Ecuación 26 Relación auxiliar.	76
Ecuación 27 Solución de la relación auxiliar.	76
Ecuación 28 Solución general de ecuación diferencial.	76
Ecuación 29 Determinante \bar{w}	77
Ecuación 30 Determinante \bar{w}_1	77
Ecuación 31 Determinante \bar{w}_2	77
Ecuación 32 Funciones μ_1, μ_2	77
Ecuación 33 Integración de determinantes.	78
Ecuación 34 Definición de la solución particular de la ecuación diferencial.	78
Ecuación 35 Solución de la integral por sustitución	78
Ecuación 36 Solución particular de la ecuación diferencial	78
Ecuación 37 Solución de la ecuación diferencial	79
Ecuación 38. Distribución de temperatura T_1	79
Ecuación 39. Distribución de temperatura T_2, T_3	80
Ecuación 40. Distribución de temperatura T_4	80
Ecuación 41. Cálculo del flujo de calor a partir de la corriente y la tensión.	98
Ecuación 42. Cálculo del diferencial de temperatura entre los platos que componen el sistema.	98
Ecuación 43. Cálculo del área de transferencia de calor.	99
Ecuación 44. Cálculo de la conductividad térmica de las muestras.	99
Ecuación 45. Incertidumbre típica tipo A	107
Ecuación 46 Incertidumbre típica tipo B	108
Ecuación 47. Incertidumbre combinada.	108
Ecuación 48. Determinación de u_c	114
Ecuación 49. Ecuación del error normalizado.	117
Ecuación 50. Ecuación de la dependencia de la temperatura en el valor de referencia de la conductividad aparente.	117

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Certificados de calibración de los instrumentos de medición utilizados en la experimentación	130
Anexo B. Datos obtenidos en la experimentación de tensión, corriente, temperaturas de los platos y temperatura ambiente para el poliestireno expandido	156
Anexo C. Datos obtenidos en la experimentación de tensión, corriente, temperaturas de los platos y temperatura ambiente para la fibra de vidrio	160
Anexo D. Planos de platos fríos y plato caliente	162
Anexo E. Certificado de material de referencia	164

ABREVIATURAS

Ω	Ohmios.
<i>SCT</i>	Suma de cuadrados totales.
<i>CMT</i>	Cuadrados medios totales.
<i>SCE_{TR}</i>	Suma de cuadrados entre tratamientos.
<i>CME_{TR}</i>	Cuadrados medios entre tratamientos.
<i>SCD_{ER}</i>	Suma de cuadrados del error residual.
<i>CMD_{ER}</i>	Cuadrados medios del error residual.
%.	Porcentaje.
%RDG.	Porcentaje de lectura.
°C	Celsius.
A	Amperios.
ASTM.	American Society of Testing Materials.
BECO.	Balance Energético Colombiano.
BHP.	Boiler Horsepower.
BHP.	Boiler horsepower. Caballo de fuerza de caldera.
BLOQ.	Bloque.
cm	Centímetros.
CMC.	Capacidades de Medición y Calibración.
COP.	Peso colombiano.
DC.	Corriente directa.
EEUU.	Estados Unidos.
ETC.	Etcétera.
g	Gramos.

GHP.	Guard Hot Plate.
GHPA.	Guarded Hot Plate Apparatus.
HFMA.	Heat Flux Meter Apparatus.
HR.	Humedad relativa.
INM.	Instituto Nacional de Metrología.
ISO.	International Organization for Standardization.
J	Joule.
K	Kelvin.
Kg	Kilogramos.
m	Metro.
mA	Mili-amperios.
mm	Mili-metro.
mV	Mili-voltios.
NIST.	National Institute of Standards and Technology.
PAG.	Página.
PBA.	Prueba.
PID.	Proporcional, Integral y Derivativa.
PROM.	Promedio.
SI.	Sistema Internacional de Unidades.
UPME.	Unidad de Planeación Minero Energética.
V	Voltios.
W	Watts.
WEO.	World Energy Outlook.

LISTA DE SIMBOLOS

s	Desviación estándar.
u	Desviación típica estimada.
ϕ	Función de disipación.
n	Observaciones.
r	Radio (m).
T_i	Temperatura inicial (K).
a	Ubicación del calentador en la sección de medición.
c	Ubicación del calentador en la sección de protección.
b	Ubicación del espaciamiento.
x	Valor medido.
q	Vector de flujo total de calor.
q_1	Calor de entrada.
q'	Calor de salida transversal a la muestra.
q_2	Calor de salida.
k_p	Conductividad del Plato Caliente.
k	Conductividad térmica (W/m·K).
k_s	Conductividad térmica de la muestra.
C_i	Contribución.
I	Corriente (A).
ρ	Densidad (kg/m ³).
Δr	Diferencia de radio (m).
g	Energía Interna (J/kg·K).
P	Entrada de energía térmica por unidad de tiempo.

E_n	Error normalizado.
j	Espaciamiento entre átomos.
m_u	Espesor de la muestra del GHPA (m).
m	Espesor (m).
S	Factor de calibración.
Q	Flujo de calor (W).
u_c	Incertidumbre combinada.
U	Incertidumbre expandida.
L	Longitud (m).
\bar{X}_i	Magnitud de entrada.
n_i	Niveles.
T_1	Perfil temperatura hasta calentador de sección de medición (K).
T_3	Perfil temperatura hasta el calentador de la sección de protección (K).
T_2	Perfil temperatura hasta el espaciamiento (K).
T_4	Perfil temperatura hasta la frontera del sistema GHPA (K).
p	Presión.
r_2	Radio exterior cilindro (m).
r_1	Radio interno cilindro (m).
R	Resistencia del calentador.
λ	Ruta libre media de fonones entre colisiones.
T_a	Temperatura ambiente (K).
T_0	Temperatura del baño (K).
\hat{T}	Temperatura del calentador (K).
T_f	Temperatura final (K).

T_m	Temperatura media (K).
T_h	Temperatura plato caliente (K).
\bar{T}	Temperatura superficial promedio de la sección de medición (K).
E	Tensión (mV).
d	Ubicación frontera del sistema.
X	Valor de referencia.
u^2	Varianza estimada.
v	Velocidad (m/s).
A	Área transversal al flujo de calor (m).
q_c	Calor de conducción.
Q^m	Calor generado dentro del medio.
q_R	Calor radiación.
c_c	Capacidad calorífica de cada partícula.
W	Diferencia de potencial del termopar.
α	Excitación.
T_h	Temperatura caliente (K).
T_c	Temperatura fría (K).
T	Temperatura (K).
\bar{Q}	Velocidad de flujo de calor (W).
C_v	Capacidad calorífica por unidad de volumen.
ΔT	Diferencial de temperatura.
T_{c_2}	Temperatura plato frío inferior (K).
T_{c_1}	Temperatura plato frío superior (K).
k_{app}	Conductividad Térmica Aparente.

∇T	Gradiente de temperatura (K).
$u(x_i)$	Incertidumbre estándar.
\bar{s}	Sustitución de parámetro
y_c	Solución combinada
C_1	Constante
C_2	Constante
\bar{w}	Determinante
μ	Función
y	Solución ecuación diferencial
y_1	Wronskiano
y_2	Wronskiano
y_p	Solución particular.

GLOSARIO¹

CALIBRACIÓN: es la operación que bajo condiciones previamente especificadas establece una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas que han sido obtenidas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, además utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación.

CORRECCIÓN: es la compensación de un efecto sistemático que se ha estimado. En este caso, la definición aplica para una magnitud escalar, sin embargo, un tensor o un vector donde sus componentes con magnitudes, también es considerado como una magnitud.

DERIVA: variación continua de una propiedad que puede ser medida respecto a un valor preestablecido.

ERROR ALEATORIO DE MEDIDA: componente del error de medida, que, a diferencia del error sistemático, éste en mediciones repetidas varía de forma impredecible.

ERROR DE MEDIDA: diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia.

ERROR MÁXIMO PERMITIDO: es el valor extremo del error de medida con respecto a un valor de referencia que se conoce. Éste se permite por reglamentaciones o especificaciones para un sistema de medida, una medición o un instrumento.

ERROR SISTEMÁTICO DE MEDIDA: es un componente del error de medida que al tener mediciones repetidas permanece constantes o cambia de forma predecible. Es igual a la diferencia entre el error de medida y el error aleatorio. Sus causas pueden ser conocidas o no.

EVALUACIÓN TIPO A DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA: es la evaluación de una componente de la incertidumbre de medida a través de un método de análisis estadístico de los valores que se miden con condiciones de medida definidas.

EVALUACIÓN TIPO B DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA: es la evaluación de la incertidumbre de medida de forma diferente a una evaluación de tipo A. Por ejemplo, una evaluación basada en informaciones, asociada a valores publicados y

¹ VOCABULARIO INTERNACIONAL DE METROLOGÍA. Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados. España. 2012, 3 ed. Disponible en: www.cem.es

reconocidos, al valor de un material de referencia, u obtenidas a partir de un certificado de calibración.

EXACTITUD DE MEDIDA: proximidad entre los valores medidos atribuidos al mensurando.

FONÓN: excitación colectiva de una asociación periódica de átomos o moléculas².

INCERTIDUMBRE: es un parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores que se atribuyen a un mensurando a partir de la información que se utiliza. Incluye componentes que vengan de efectos sistemáticos.

INSTRUMENTO DE MEDIDA: instrumento que produce una señal de salida con la información acerca del valor de la magnitud previamente medida. Esta señal puede proporcionarse de manera visual o acústica, además puede ser transmitida a uno o más dispositivos.

INTERVALO DE MEDIDA: es un conjunto de valores de magnitudes de una misma naturaleza que pueden ser medidos por un instrumento o sistema de medida dado con una incertidumbre instrumental especificada, en condiciones especificadas.

MAGNITUD: esta es la propiedad de un fenómeno, de un cuerpo o sustancia, que puede ser expresada cuantitativamente mediante un número y una referencia la cual puede ser una unidad de medida, un procedimiento de medida, un material de referencia o también puede ser una combinación de los anteriores.

MATERIAL DE REFERENCIA: material que sea estable y homogéneo con respecto a propiedades específicas, debe ser apto para su uso previo en una medición o en un examen de propiedades cualitativas.

MEDICIÓN: operaciones que tiene por objeto determinar el valor de una magnitud. Es el proceso mediante el cual se obtiene experimentalmente uno o varios valores que pueden ser atribuidos razonablemente a una magnitud.

MENSURANDO: es la magnitud que se quiere medir, por ejemplo, la longitud (m), masa (kg).

METROLOGÍA: es la ciencia de las mediciones y sus aplicaciones. Incluye todos los aspectos tanto teóricos como prácticos de las mediciones, sin importar su incertidumbre de medida y su campo de aplicación.

PATRÓN DE MEDIDA: materialización de la definición de una magnitud dada, con un valor determinado y una incertidumbre de medida asociada que se ha tomado

² GOBIERNO DE ESPAÑA. MINISTERIO DE EDUCACION, CULTURA Y DEPORTE. Real academia de ingeniería. España, 2012. Disponible en: <http://diccionario.raing.es/>

como referencia. Frecuentemente es utilizado como una referencia para la obtención de valores medidos e incertidumbres de medidas que se asocian para otras magnitudes que sean de la misma naturaleza y así estableciendo la trazabilidad metrológica mediante la calibración de otros patrones, sistemas de medida o instrumentos.

PATRÓN PRIMARIO DE MEDIDA: es el patrón que se establece mediante un procedimiento de medida primario o se crea como un objeto elegido por convenio.

PATRÓN SECUNDARIO DE MEDIDA: es el patrón que se ha establecido por medio de una calibración respecto a un patrón primario que sea de una magnitud de la misma naturaleza.

PRESICIÓN DE MEDIDA: es la proximidad que hay entre los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto o de objeto que sean similares, bajo a condiciones previamente especificadas.

REPETIBILIDAD DE MEDIDA: presión de medida bajo condiciones que incluyen el mismo procedimiento de medida, igual sistema de medida, los mismos operadores, el mismo lugar, las mismas condiciones de operación y mediciones sobre el mismo objeto o que sea similar en un corto periodo de tiempo.

REPRODUCIBILIDAD: es la capacidad de medida bajo condiciones como; diferentes lugares, distintos operadores, sistemas de medida que pueden utilizar diferentes procedimientos de medida y mediciones repetidas de los mismos objetos o similares.

RESULTADO DE MEDIDA: es un conjunto de valores de una magnitud que se atribuyen a un mesurando, van acompañados de cualquier otra información que se importante y esté disponible.

SENSIBILIDAD: es el cociente entre la variación de una indicación de un sistema de medida y la variación del valor de la magnitud que se ha medido.

SENSOR: este es un elemento que hace parte de un sistema de medida que se ve directamente afectado por la acción del fenómeno, cuerpo o por una sustancia portadora de la magnitud que se quiere medir.

SESGO DE MEDIDA: es el valor que se estima de un error sistemático.

SISTEMA DE UNIDADES: es el conjunto de unidades de base y derivadas, sus múltiplos y submúltiplos, que se define según reglas dadas para unos sistemas de magnitudes.

TRANSDUCTORES: son dispositivos que se encargan de convertir una tipo de energía a otro, ya sea eléctrica, mecánica, térmica, mecánica, magnética, ópticas y

variaciones químicas en voltajes y corrientes los cuales se pueden utilizar de forma indirecta o directa en otros sistemas de control.³

TRAZABILIDAD METROLÓGICA A UNA UNIDAD DE MEDIDA: trazabilidad metrológica en la que la referencia es la definición de una unidad de medida mediante su realización práctica.

TRAZABILIDAD: propiedad del resultado de una medición o de un patrón que pueda relacionarse con referencias, generalmente nacionales o internacionales por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones teniendo todas las incertidumbres determinadas.

VALIDACIÓN: es la verificación que se realiza para la determinar que los requisitos especificados son adecuados para un uso previsto.

³ HARPER, Gilberto. EL ABC DE LA INSTRUMENTACIÓN EN EL CONTROL DE PROCESOS INDUSTRIALES. Editorial Limusa, 2000. 48 p.

RESUMEN

Este proyecto de tesis realizado en conjunto con el Instituto Nacional de Metrología se centra en el desarrollo de un patrón nacional para la ejecución de un sistema de medición de conductividad térmica en aislantes.

Para establecer dicho patrón se seleccionó un método primario el cual se rige bajo la norma ASTM C177 con un aparato de placa caliente que determina la conductividad térmica midiendo el flujo de calor normal en placas isotérmicas.

En cuanto al método, se tuvieron en cuenta aspectos como los criterios de diseño del aparato, el material de las muestras, la distribución de la temperatura en el plato caliente y la guarda, y la transferencia de calor en espacio anular.

Seguidamente se construyó el prototipo necesario para la experimentación con los parámetros pertinentes de la norma escogida y se realizaron las pruebas para la medición de conductividad térmica. Después la recolección de datos, se estableció la reproducibilidad del sistema a través de un análisis estadístico ANOVA concluyendo que éste si es reproducible, seguidamente se halló la incertidumbre expandida con un material de referencia certificado SRM 1450d producido por el NIST, trazable al SI y se obtuvo un valor de 5.7% el cual fue aceptado por el INM, luego se determinó el error normalizado con un valor de 0.61 que implica que el desempeño del equipo diseñado fue satisfactorio para la incertidumbre estimada.

Finalmente, se estimó el costo en pesos colombianos del equipo utilizado en la experimentación y el costo de cada prueba.

PALABRAS CLAVES: Conductividad térmica, metrología, trazabilidad, incertidumbre, reproducibilidad.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se encuentra enmarcado en la conductividad y el aislamiento térmico, el primer término se puede definir como la transferencia de calor de las partículas que poseen más energía en una sustancia hacia las que poseen menos energía, generada por la interacción entre ellas. Un aislante es un material el cual posee una baja conductividad térmica, es decir una baja interacción entre las partículas que lo conforman ofreciendo una resistencia a la transferencia de calor a través del material, la relación existente entre la conductividad térmica y un material aislante se le conoce como aislamiento térmico.

Para analizar esta problemática es necesario mencionar sus causas. Una de ellas es el costo en energía desperdiciada. En Colombia para el año 2015 se estimaron valores alrededor de 4.700 millones de dólares anuales⁴. El rezago en la implementación de técnicas de eficiencia energética, el mal manejo de los recursos energéticos, el crecimiento económico y el aumento de la población son los principales factores por los que se presenta este fenómeno, una de las medidas para contrarrestar estas pérdidas energéticas es el aislamiento térmico.

La investigación de esta problemática se realizó con el interés de generar la trazabilidad y calibración de la conductividad térmica como una medida de eficiencia energética debido a que hasta el momento Colombia a través del Instituto Nacional de Metrología no cuenta con la capacidad de proporcionarlas.

Esto permitió evaluar un sistema de medición de conductividad en aislantes acorde a los requerimientos en términos metrológicos del INM y su objetivo como entidad.

La investigación se realizó partiendo de la importancia de la conductividad térmica, seguida de una descripción en términos microscópicos y macroscópicos. Se realizó una búsqueda bibliográfica de las técnicas y métodos más importantes para determinar la conductividad térmica. Se realizó la selección del método más apropiado, teniendo en cuenta factores como el tipo de patrón (metrológico), la variación de la prueba en el tiempo (estado estacionario, estado transitorio), el tiempo de realización de la prueba para determinar la conductividad y la incertidumbre del sistema.

Una vez evaluados estos factores se determinó como método para determinar la conductividad térmica el ASTM C 177, en el cual se utiliza el prototipo de Placa Caliente con Protección de fuente de calor de línea o GHPA por sus siglas en inglés.

⁴ MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍAS. y UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Plan de acción indicativo de eficiencia energética 2017 – 2022. [en línea]. 2016. 14 p. [citado 02 mar., 2018]. Disponible en: http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/PAI_PROURE_2017-2022.pdf

El diseño y construcción de este sistema de medición de conductividad térmica GHPA se realizó, teniendo en cuenta factores como los componentes del sistema, material, dimensiones, criterios de diseño, elementos calefactores, sensores de temperatura y condiciones ambientales óptimas para el correcto funcionamiento.

Tras la construcción del sistema se procede a realizar una evaluación del mismo en donde un análisis estadístico, la determinación de la incertidumbre del sistema, la reproducibilidad y el error normalizado son factores determinantes.

Finalmente se realiza un análisis financiero en el que se estiman los costos del proyecto, tanto variables como fijos, al igual que un estimado del valor de la prueba de conductividad.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema de medición de conductividad térmica acorde con las necesidades metrológicas de Instituto Nacional de Metrología.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar un método para la medición de conductividad térmica en aislantes.
- Evaluar un método para la medición de la conductividad en aislantes.
- Estimar la reproducibilidad y el error normalizado del sistema desarrollado.
- Estimar el costo de inversión del equipo y las pruebas.

1. MARCO TEORICO

Este proyecto se enfoca en darle solución a la imposibilidad de ofrecer la trazabilidad a las mediciones de conductividad térmica para el Instituto Nacional de Metrología. Son importantes porque impactan de manera significativa en el avance industrial, en términos de eficiencia energética y económico del país con el ahorro de costos en los procesos de producción al no aumentar el desperdicio de energía, además contribuyen a la reducción de emisiones de CO₂ y el disminuye el uso de combustibles fósiles.

1.1 IMPORTANCIA DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA

El acelerado desarrollo industrial de las últimas décadas ha conducido a un crecimiento en la demanda energética a nivel mundial. Este crecimiento supone, por un lado; una reducción en la disponibilidad de las fuentes energéticas y por otro un impacto en el medio ambiente. Durante la última década las emisiones de CO₂ han aumentado por encima del 20% y cada vez es más desbalanceada la relación de oferta y demanda de los combustibles fósiles. Si se continúa con esta tendencia, **World Energy Outlook 2005 (WEO 2005)** plantea que el crecimiento en emisiones y requerimiento energético seguirá aumentando en casi dos veces y media en 11 años, esto debido a las políticas existentes en temas energéticos, basadas principalmente en el consumo de carbón.⁵

El transporte, a nivel mundial, consume elevadas cantidades de combustible para su funcionamiento, y se irán incrementando, pues el carbón tendrá para el 2050 una demanda casi tres veces mayor que en el 2003. El requerimiento de gas crecerá en 138% y el del petróleo crudo en un 65% para producir combustibles líquidos utilizados para la movilidad.⁶

Para las centrales térmicas y todas aquellas industrias donde se requieren procesos de intercambio de calor, también aumentará el consumo energético, así como en el uso doméstico, por la acelerada producción de artículos para el hogar que no cuentan con garantía de ser inocuos al medio ambiente, como por ejemplo el uso del calefactor; importante en países donde las estaciones climáticas son marcadas. Sin embargo, los avances tecnológicos y el auge de términos como reciclaje, química verde, energías alternativas o eficiencia energética quieren darle un giro a la situación actual.

La tecnología en términos de energía sostenible ha ofrecido nuevas alternativas para contrarrestar el deterioro del planeta. Se ha establecido que las nuevas

⁵ International Energy Agency. Office of Energy Technology; R&D.; Group of Eight (Organization). Energy technology perspectives. Paris, 2006. 25 p.

⁶ Ibid. p. 39.

edificaciones sean un 70% más eficientes que las anteriores desde que esta industria ha invertido fundamentalmente en la mejora de los sistemas de aislamiento térmico. Los aires acondicionados actuales usan entre 30% y 40% menos energía que los modelos de hace 10 años y estos valores de ahorro pueden incrementarse si se tiene en cuenta el creciente desarrollo de tecnologías como las celdas fotovoltaicas, la micro generación combinada de calor y energía, las pilas de combustible, entre otros.⁷

En cuanto a la industria, también existe una gran oportunidad para el ahorro de energía y la disminución de las emisiones de CO₂. Basta con asegurar la mayor eficiencia posible en las bombas, motores, sistemas de calefacción, calderas y en general todas las máquinas térmicas que hacen parte de los procesos industriales para que estos valores crezcan. De igual forma, el reciclaje y la reutilización de algunos materiales o la implementación de nuevos métodos que tengan como objetivo principal la reducción del consumo de petróleo y gas natural, favorecerán las estrategias de sostenibilidad.

Con la creación de los vehículos híbridos, el avance en los motores, la inyección de combustibles y electrónica avanzada, se hace más factible la tarea de ser eficientes. Es posible conseguir un menor consumo de gasolina o diésel. El aporte de nuevos materiales, ha dado como resultado, medios de transporte más ligeros y por ende que cumplan su función con un mejor desempeño.

Solamente con estos factores se alcanzaría una disminución en el uso de energía entre un 17% a 33% para 2050 y esto se reflejaría en un 45% a 53% en las reducciones de CO₂ en el mismo año. Sin embargo, el aumento de la contaminación a nivel mundial es más significativo, se necesitan nuevas ideas, investigaciones y avances sobre eficiencia energética, puesto que esta última es una alternativa ecológica y económica que tendría el impacto que se busca a corto plazo.⁸

Como se señaló anteriormente, el uso de aislantes térmicos es un factor importante en la implementación de estrategias de eficiencia energética, especialmente en sectores donde las pérdidas de energía son altas, como en la industria y la construcción.

Si bien todos los materiales ofrecen una resistencia al flujo de calor, unos presentan mayor resistencia que otros. Generalmente los metales tienen un valor alto de conductividad térmica, mientras que los polímeros, las fibras minerales, el aire y el vacío no. Este último es uno de los mejores aislantes térmicos pues únicamente puede transmitir calor por radiación, aunque obtenerlo y mantener las condiciones adecuadas requiere de importantes cantidades de energía.

⁷ *Ibíd.* p. 27.

⁸ *Ibíd.* p. 28.

Sin embargo, se prefiere la utilización de materiales porosos o fibrosos que sean capaces de inmovilizar aire seco y encerrarlo en sus celdillas o donde el aislante tenga sus poros cerrados como una formación de burbujas que no se comunican entre sí, para que el gas que se utiliza como agente espumante quede atrapado allí.

Tener un buen aislamiento térmico es importante, tanto para el sector industrial, tecnológico, como para la cotidianidad doméstica. En los procesos donde se tiene un intercambio de calor, es fundamental la presencia del aislante porque permite aumentar la seguridad de los ambientes de trabajo evitando sobrecalentamiento en los equipos o taponamiento de las tuberías (tuberías de condensado, tuberías de retorno de agua fría, tuberías de refrigeración y agua helada entre otras) donde se puedan formar posibles explosiones.

Mejorar la eficiencia energética permite que los equipos tengan un mayor rendimiento con un menor requerimiento de energía al no permitir que ésta se disipe en el ambiente, produciendo un ahorro significativo en energía eléctrica, disminuyendo costos y contribuyendo a la reducción de emisiones de CO₂.

En las edificaciones, el aislamiento es un conjunto de materiales intercalados en un cerramiento que sirven para disminuir la transmisión de calor no deseada y obtener confort. Cuando existen pérdidas de calor, estas se producen a través de dichos cerramientos por la transmisión térmica, puede suceder cuando hay contacto con el exterior o con espacios que no están acondicionados como el suelo o las cubiertas.

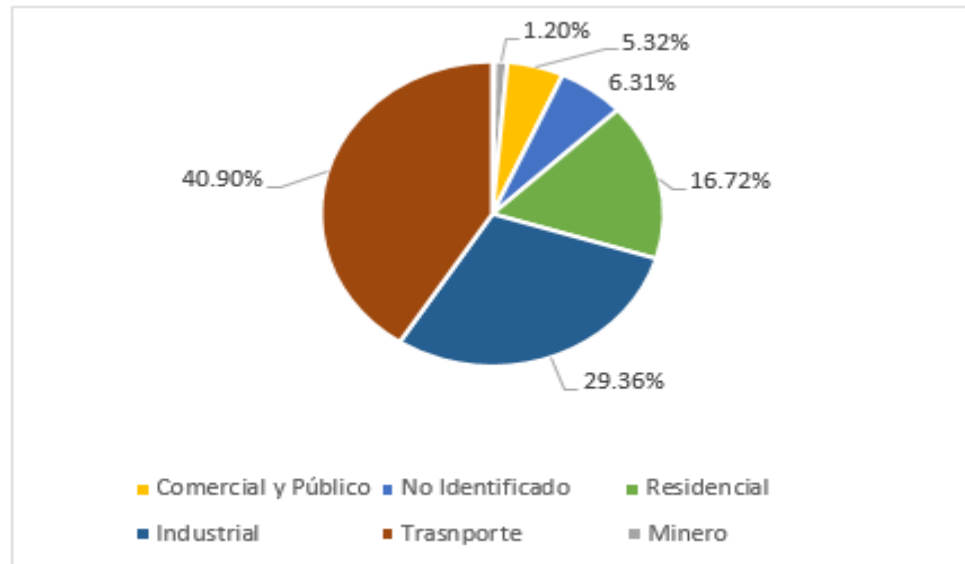
En Colombia las cifras no son alentadoras. Para el año 2015 se estimaron costos de energía desperdiciada de alrededor de 4.700 millones de dólares anuales⁹. El rezago en la implementación de técnicas de eficiencia energética, el mal manejo de los recursos energéticos, el crecimiento económico y el aumento de la población son los principales factores por los que se presenta este fenómeno. Se espera que para el periodo entre el 2016 y el 2030, la demanda de energía eléctrica crezca en un 52% y en cuanto al gas natural, un promedio de un 2,2% anual entre el 2015 y el 2035.

La Unidad de Planeación Minero Energética – UPME, publicó a finales de 2017 el Plan Indicativo de Eficiencia Energética 2017 – 2022 con el objetivo de *“Definir las acciones estratégicas y sectoriales que permitan alcanzar las metas en materia de eficiencia energética; de manera que se contribuya a la seguridad energética y al cumplimiento de compromisos internacionales en temas ambientales; generando impactos positivos en la competitividad del país y en el crecimiento de la calidad de vida de los colombianos”*.

⁹ MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍAS. y UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Plan de acción indicativo de eficiencia energética 2017 – 2022. [en línea]. 2016. 14 p. [citado 02 mar., 2018]. Disponible en: http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/PAI_PROURE_2017-2022.pdf

Debido a que la energía es un bien esencial para el desarrollo de las actividades industriales, comerciales y el bienestar de los hogares, el costo de los insumos energéticos puede tener un impacto significativo en la competitividad en todos los sectores que sean energo-intensivos. En este caso considerando la revisión del Balance Energético Colombiano (BECO), en el país se consumieron 1.219.827 TJ de energía final, y se distribuyó de la siguiente manera¹⁰;

Gráfica 1.Distribución de consumo de energía final. Colombia – 2015



Fuente. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIAS. y UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Plan de acción indicativo de eficiencia energética 2017 – 2022. [en línea]. 2016. 16 p. [citado 02 mar., 2018]. Disponible en: http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/PAI_PROURE_2017-2022.pdf

En la gráfica 1 resaltan los sectores donde se requiere una mayor cantidad de energía para su funcionamiento, como el sector de transporte con un 40,90% seguido por el industrial con un 29,36%. Es allí, principalmente donde se quiere ver un resultado significativo de las nuevas estrategias que adopte el país, aunque no se pretende dejar a un lado a las otras partes, pues incluso se impactarán para alcanzar mejores rendimientos.

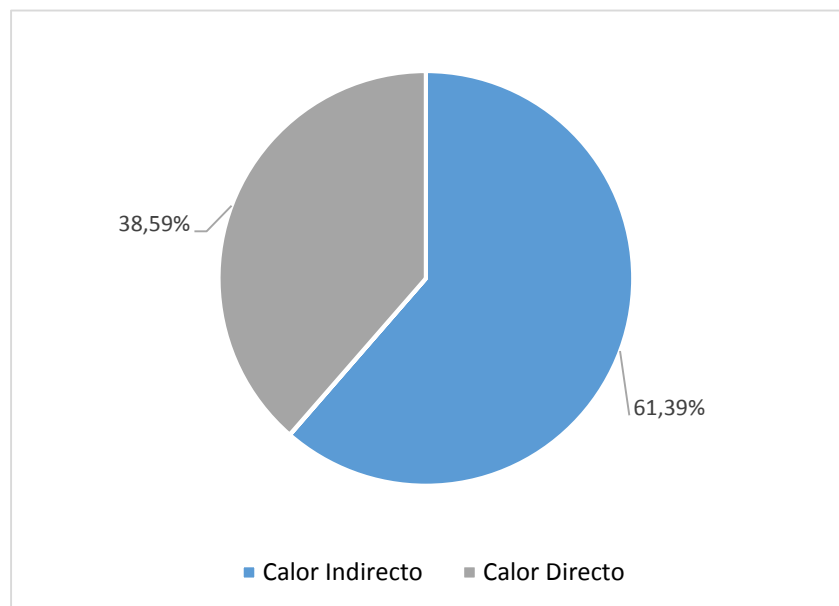
Una de las principales metas planteadas por la UPME es el ahorro energético. Con relación al sector industrial, entre las medidas consideradas se encuentra el aislamiento térmico, tanto en el calentamiento directo como indirecto, con

¹⁰ MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIAS. y UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Balance energético colombiano – BECO. [en línea]. [citado 02 marzo., 2018] Disponible en: <http://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/Paginas/BECOENERGTICO.aspx>

potenciales de aplicación entre el 40% y el 60% y una potencial eficiencia entre el 7% y el 18%.

El calor directo hace referencia a los sectores de metales básicos, plásticos, cementeros y químico, mientras que el indirecto a los sectores en donde el calor se produce con combustibles sólidos generalmente en calderas de gran tamaño que oscilan entre 2400 y 3000 BHP. Así mismo, también hay otros sectores energéticos térmicos que utilizan combustibles que han sido refinados de origen fósil. Sus utilidades se ven reflejadas en la industria de la siguiente manera.

Gráfica 2. Participación de los energéticos en la industria.



Fuente. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍAS. y UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Plan de acción indicativo de eficiencia energética 2017 – 2022. [en línea]. 2016. 14 p. [citado 02 mar., 2018]. Disponible en: http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/PAI_PROURE_2017-2022.pdf

Si se considerara solamente la reposición y mantenimiento de aislamiento térmico como medida de eficiencia energética teniendo en cuenta la energía eléctrica específicamente en; el calor directo, se tendría un impacto a favor del 0,05% de un 7,09% que conforman todas las soluciones planteadas para este tópico, de igual manera, en combustibles sólidos un 1,07% de un total de 5,30% y finalmente para el gas natural un 0,28% de 4,15%.

A nivel mundial el aislamiento térmico se ha consolidado como una de las principales técnicas en los sistemas de eficiencia energética en aplicaciones

cotidianas¹¹ debido a que frecuentemente las pérdidas de energía con el ambiente representan un alto porcentaje del consumo energético de procesos que involucran sistemas de intercambio de calor.

Norteamérica y Europa poseen una larga tradición en la medición de materiales con baja conductividad térmica¹²¹³. Producto de estas investigaciones surgieron métodos normalizados para la medición de propiedades térmicas en aislantes entre los que destaca el método primario conocido como GHP (Guard Hot Plate por las siglas en inglés)¹⁴.

Infortunadamente en Colombia no se han definido claramente las capacidades de medición y calibración (CMC) en propiedades térmicas como la conductividad térmica, que permitan ofrecer trazabilidad a las mediciones y garantizar la calidad de las mismas. Esta limitación ha dificultado la realización de investigaciones en el área de ahorro energético.

Desde el punto de vista técnico, la trazabilidad ofrece un elemento de soporte para la comparación de resultados analíticos, esto únicamente se logra a través del uso de bases comunes obtenidas mediante el uso de métodos estandarizados calibrados con materiales de referencia provenientes de un patrón nacional o internacional¹⁵.

1.2 AISLANTES TÉRMICOS

Los aislantes térmicos son materiales utilizados para evitar pérdidas de energía térmica al medio que los rodea reduciendo el flujo calor. Se caracterizan por tener una conductividad térmica baja y son ampliamente utilizados en los diferentes tipos de industria como la automotriz, química, petroquímica y en la construcción.

Para poder utilizar un aislante, es necesario saber cuál es el indicado según los requerimientos, y para esto es necesario tener en cuenta: la densidad del material, la conductividad térmica, los límites inferior y superior de temperatura, la rigidez

¹¹ PAPADOPOULOS, Agis. State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. En: ENERGY & BUILDINGS. vol. 37, no. 1, 77-86 p.

¹²SALMON, David. Thermal conductivity of insulations using guarded hot plates, including recent developments and sources of reference materials. En: MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY. Dec 1, vol. 12, p. R89

¹³ ZARR, Robert R, et al. Retrospective Analysis of NIST Standard Reference Material 1450, Fibrous Glass Board, for Thermal Insulation Measurements. En: Journal of Research of The National Institute of Standards And Technology. vol. 119, p. 296

¹⁴ AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS C177. Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus. 2013.

¹⁵ Ustaran, Juan. La problemática de la trazabilidad en las mediciones ambientales bajo la óptica de la NMX EC17025IMNC 2000. México, laboratorios ABC química investigación y análisis S.A. 2002. 1 p.

estructural, la estabilidad química, la degradación, la geometría, la resistencia al choque térmico, la fatiga, la abrasión, dilataciones y contracciones, la tracción y la compresión.

Para facilitar la selección de los aislantes, se tienen dos maneras de clasificarlos. Primero es dividirlos en tres grandes y generales grupos que se conforman de la siguiente manera.

Están los aislantes fibrosos que se constituyen de partículas de filamentos de baja densidad y pequeño diámetro, y presentan una alta porosidad (90%).¹⁶

También se encuentran los de tipo celular los cuales son materiales conformados por celdas que pueden ser abiertas o no. Tienen una baja densidad y capacidad térmica, y relativamente buena resistencia a la compresión. En este tipo de aislantes, a temperaturas criogénicas, los gases que pueden atraparse en las celdas se congelan creando un vacío parcial que mejora el desempeño del aislamiento.

Por otra parte, se tienen los de aislantes granulados que su presentación es de hojuelas o partículas pequeñas de materiales inorgánicos que se han aglomerado.¹⁷

Luego, es posible clasificarlos según la temperatura a la que serán sometidos.

- A temperaturas elevadas (Superiores a 500°C)
Para que este grupo pueda soportar altas temperaturas, deben ser de tipo cerámico y refractario. Generalmente son usados en equipos que puedan estar expuestos a contaminación o que sea necesario inspeccionarlos o requieran de limpieza especial.

Algunos ejemplos son; los ladrillos cerámicos que se obtienen a partir de la mezcla de materiales refractarios con productos combustibles que se eliminarán por el calentamiento, y también están los morteros y hormigones que se elaboran mezclando materiales como el cemento Portland con arenas, granos ordinarios y refractarios silicoaluminosos.

- A temperaturas intermedias (Entre 100°C y 500°C)
Debido al rango de temperaturas donde es posible usarlos, existe una gran cantidad de materiales que conforma este grupo y por supuesto diferentes maneras de aplicarlos, ya sea en la industria o en el uso cotidiano y doméstico.

¹⁶ KREITH, Frank, BOHN, Mark, MANGLIK, Raj M. Principios de transferencia de calor. 7 ed. México D.F. Cengage Learning Editores, SA. de C.V., 2012. 45 p. ISBN 978-607-481-615-0.

¹⁷ Ibid., p. 46.

Tabla 1. Aislantes para temperaturas entre 100 y 500°C

MATERIAL	TEMPERATURA DE OPERACIÓN (°C)
Amianto papel	150
	200
Amianto tela	300
Arcillas	200
	400
Arcilla caolín	400
Diatomeas, moldes	100
	250
	400
Diatomeas, polvo	100
	200
	400
Magnesia (85%) bloques y formas	100
	500
Roca, lana	100
	200
	400
Silicato cálcico hidratado, formas moldeadas	100
	250
Sílice fundida, fibras	100
	500
Vidrio, lana	100
	200
	400

Fuente: FERNÁNDEZ, Pedro. Ingeniería térmica y de fluidos. 1 ed. Santander (España). Servicio de Publicaciones de la Escuela T. Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación., 1992. ISBN. 84-600-8244.X.

- A temperaturas bajas.
Son comúnmente designados para uso doméstico o alimenticio, en procesos fisicoquímicos como separación y almacenamiento de gases y para acondicionamiento de aire. Los principales representantes de este grupo son el corcho, la madera, las fibras y las gomas o plásticos.

Para estos aislantes es importante recordar que al ser materiales higroscópicos, la humedad es un factor determinante. Si la presión de vapor de agua que se encuentra en el exterior del aislamiento está por encima a la del interior, se produce una difusión y el vapor pasa a la estructura del aislante, haciendo que no cumpla su función.

- A temperaturas criogénicas los tipos de aislamiento más comunes son los reflectores con vacío, tienen emisividades muy bajas del orden de 0.01, las capas múltiples que se alternan con láminas de aluminio proporcionan la resistencia térmica a la radiación con la fibra de vidrio para tener resistencia a la conducción.¹⁸

Después de estudiar el significado, uso y características de los aislantes, y de haber analizado por medio de estadísticas la importancia de la conductividad en la actualidad, es necesario desarrollar el concepto de conductividad térmica, el cual es la fundamentación teórica de este proyecto. En un inicio, se tratará de manera microscópica para comprender el comportamiento molecular del dicho fenómeno y luego de manera macroscópica para examinar la interacción con el exterior y los tipos de transferencia de calor.

1.3 DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

La energía térmica puede transmitirse a través de sólidos por portadores eléctricos (electrones o agujeros), ondas de celosía (fonones), ondas electromagnéticas, ondas de espín u otras excitaciones. En aislantes, las ondas de celosía transportan la mayor parte del calor.

Usualmente, la conductividad térmica (k) total se puede escribir como la suma de todos los componentes que representan las diferentes excitaciones:

Ecuación 1. Ecuación de Conductividad Térmica Total.

$$k = \sum_{\alpha} k_{\alpha}$$

Fuente: TRITT, Terry. Thermal conductivity: theory, properties, and applications. New York. Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2004. ISBN 0-306-48327-0.

Sabiendo que α indica una excitación, la conductividad térmica k es una propiedad específica para cada material que describe el transporte de energía en forma de calor presente a través de un cuerpo con masa, como consecuencia de un gradiente de temperatura. Está fuertemente influenciada tanto en magnitud, como en su dependencia con la temperatura según el material, lo cual ocurre por las diferencias en los cristales que lo componen, los tamaños de granos cuando son policristalinos,

¹⁸ FERNÁNDEZ, Pedro. Ingeniería térmica y de fluidos. 1 ed. Santander (España). Servicio de Publicaciones de la Escuela T. Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación., 1992. ISBN. 84-600-8244.X.

las imperfecciones, dislocaciones, las ondas de celosía, interacciones entre iones magnéticos, etc.¹⁹

Desde el punto de vista fenomenológico, la conductividad térmica puede expresarse como la relación entre el flujo de calor y el gradiente de temperatura a través de un medio, como se muestra en la siguiente ecuación:

Ecuación 2. Ecuación de Conductividad Térmica Simple

$$k = - \frac{\bar{Q}}{\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)}$$

Fuente. TRITT, Terry. Thermal conductivity: theory, properties, and applications. New York. Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2004. ISBN 0-306-48327-0.

Donde \bar{Q} es el vector de la velocidad de flujo de calor o flujo de calor y T el gradiente de temperatura expresado en términos de la segunda derivada.

La transferencia de calor en los sólidos no se genera en un extremo, ni va directamente en línea recta hasta atravesar el sólido, sino que tiende a difundirse a través de la muestra por diferentes formas de dispersión generadas al colisionar con los defectos del material o las fronteras de los granos que lo componen. Si dicha energía se propagara directamente sin ninguna restricción, la ECUACIÓN 2 no tendría ninguna dependencia del gradiente de temperatura que existe entre los extremos de la muestra, es el comportamiento aleatorio de la conductividad térmica lo que hace necesario agregar el termino en la ecuación ya mencionada, y un camino libre medio hace referencia a la distancia promedio que recorren los fonones sin haber sido dispersados o sin tener alguna interacción entre ellos²⁰.

1.3.1 Conductividad térmica en gases. Cuando se hace referencia a la conductividad térmica en gases, se analiza la teoría cinética, donde se establece la tasa de cambio de energía para un sistema debido a un gradiente de temperatura y puede ser expresada como:

¹⁹ TRITT, Terry. Thermal conductivity: theory, properties, and applications. New York. Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2004. ISBN 0-306-48327-0

²⁰ FERNANDEZ, Freddy, et al. Conductividad térmica en sólidos a altas temperaturas. En: Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela. 2006, vol. 21 no. 2.

Ecuación 3. Teoría cinética en gases.

$$\frac{\partial E}{\partial t} = c_c \bar{v} * \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

Fuente: TRITT, Terry. Thermal conductivity: theory, properties, and applications. New York. Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2004. ISBN 0-306-48327-0

Dónde:

- c_c = Capacidad calorífica de cada partícula.
- T = Gradiente de temperatura, y
- \bar{v} = Velocidad

Esta ecuación que describe el comportamiento de la conductividad en los gases también es posible aplicarla a sólidos sometidos a diferentes excitaciones de electrones, fonones, fotones entre otros, con el fin de obtener la ecuación 4.

Ecuación 4. Ecuación general de conductividad térmica

$$k = \frac{1}{3} \sum_{\alpha} C_{\alpha} v_{\alpha} l_{\alpha}$$

Fuente: TRITT, Terry. Thermal conductivity: theory, properties, and applications. New York. Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2004. ISBN 0-306-48327-0.

Donde α es la sumatoria de todas las excitaciones. La ecuación 4 es de gran utilidad para estimaciones de orden de magnitud, sin embargo, cabe resaltar que la conductividad térmica no tiene soluciones exactas, por lo tanto, los cálculos habitualmente se realizan con una combinación de la teoría de la perturbación y la ecuación de Boltzmann, importantes en el análisis de los procesos microscópicos.

1.3.2 Conductividad térmica en aislantes sólidos. Con el fin de poder comprender la conductividad térmica en sólidos, es necesario saber cuál es la rapidez con la que los fonones pueden transferir energía térmica dentro de un cristal, partiendo de que los fonones continuamente son dispersados y pueden tener interacciones entre ellos mismos, y determinar el comportamiento que tiene el camino libre medio del fonón, teniendo en cuenta los diferentes mecanismos de dispersión que se pueden presentar en los sólidos²¹.

²¹ FERNANDEZ, Op. cit, p. 2.

En cuanto a los aislantes, la conducción térmica del enrejado es su principal mecanismo. En los sólidos, los átomos vibran alrededor de sus posiciones de equilibrio o red cristalina. Estas vibraciones no son independientes entre sí pues se unen fuertemente a los átomos vecinos. La vibración del enrejado cristalino se puede caracterizar por los modos normales u ondas estacionarias. Los cuantos del campo vibratorio del cristal se conocen como "fonones". En presencia de un gradiente de temperatura, la energía térmica se considera que se propaga por medio de paquetes de ondas que consisten en varios modos normales, o fonones.²²

Normalmente las curvas de dispersión de fonones constan de ramas acústicas y ópticas. Las ramas acústicas de baja frecuencia corresponden a los átomos que se encuentran en una celda unitaria y se mueven en la misma fase, las ramas ópticas de alta frecuencia hacen alusión a átomos en una celda unitaria pero que se mueve en fases opuestas. Estos últimos no son eficaces en el transporte de energía térmica por su baja velocidad de grupo, sin embargo, pueden conducir calor al interactuar con los fonones acústicos, debido a que estos son los principales conductores de calor.

En materiales aislantes, es posible ignorar las contribuciones de los electrones móviles y enfocarse en la propagación de calor a través de fonones acústicos, empezando con el concepto de un sólido armónico perfecto, es decir, que tiene todas sus interacciones bien representadas por osciladores armónicos, apropiados para calentar, pues tiene una conductividad térmica infinita. Sin embargo, al no aplicar a un aislante real, se busca entender la conductividad térmica en términos de mecanismos de resistencia térmica.²³

Para tener una mejor comprensión sobre conductividad térmica de los sólidos dieléctricos simples y cristalinos, es necesario basarse en la ecuación de Debye sobre la transferencia de calor en gases y tratar las vibraciones de la red como un gas de fonones:

Ecuación 5. Ecuación de Debye sobre la transferencia de calor en gases

$$k = \frac{1}{3} C v \lambda$$

Fuente: TRITT, Terry. Thermal conductivity: theory, properties, and applications. New York. Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2004. ISBN 0-306-48327-0.

²² TRITT, Op. cit, p. 9.

²³ TRITT, Op. cit, p. 93.

Donde,

- C = Capacidad calorífica por unidad de volumen.
- v = Velocidad promedio del grupo de fonones.
- λ = Ruta libre media de fonones entre colisiones.

La interferencia al movimiento del fonón surge de la dispersión de éstos, cuando se tienen defectos en la estructura cristalina y por colisiones de fonones, lo que da como resultado una alteración de las frecuencias de fonones y de los momentos.

En el sólido armónico (ideal), tales interacciones fonón-fonón no son posibles debido a que no se acoplan, por lo que la conductividad térmica es infinita. No obstante, cuando se tienen sólidos reales con interacciones entre partículas inarmónicas, según su energía, hay dos tipos de interacción, las cuales sirven para la creación de fonones.

La primera que implica la eliminación de dos fonones para la creación de uno nuevo, y la segunda donde solo es destruido uno para finalizar con dos nuevos.

Dependiendo de la extensión de la participación del cristal en la dispersión, existen los denominados procesos normales (proceso N) y procesos Umklapp (proceso U).

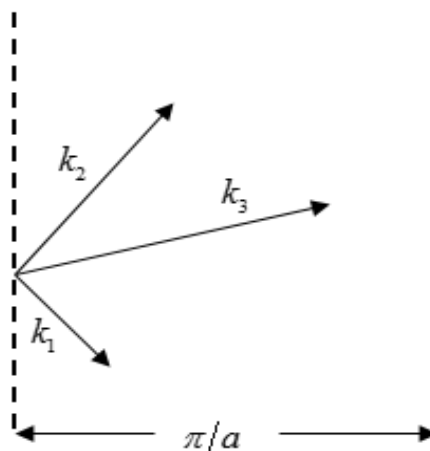
Los procesos N no interfieren con la corriente de fonones, que son cuantos del campo vibratorio del cristal, la suma de dos fonones es lo suficientemente grande para que de ella resulte uno nuevo con la misma energía total pero viajando en dirección opuesta, conservando el momento²⁴. Pese a esto influyen indirectamente en la transferencia de calor a través de un cambio en la distribución de frecuencias del fonón.

Los procesos U son eventos de dispersión de fonones donde se realiza una transformación en forma de reflejo la creación de un fonón como un vector de onda a otra zona Brillouin, efectivos a bajas frecuencias que proporcionan el mecanismo de resistencia térmica dominante en los sólidos aislantes reales, es decir, los que presentan impurezas. En este proceso, la suma de los vectores de onda de los fonones en colisión se encuentran fuera de la primera zona de Brillouin y por lo tanto, el vector de onda de fonón resultante se opone a la corriente de fonones, lo que da lugar a fenómenos de resistividad térmica donde no se conserva el momento.²⁵

²⁴ FERNANDEZ, Op. cit, p. 6.

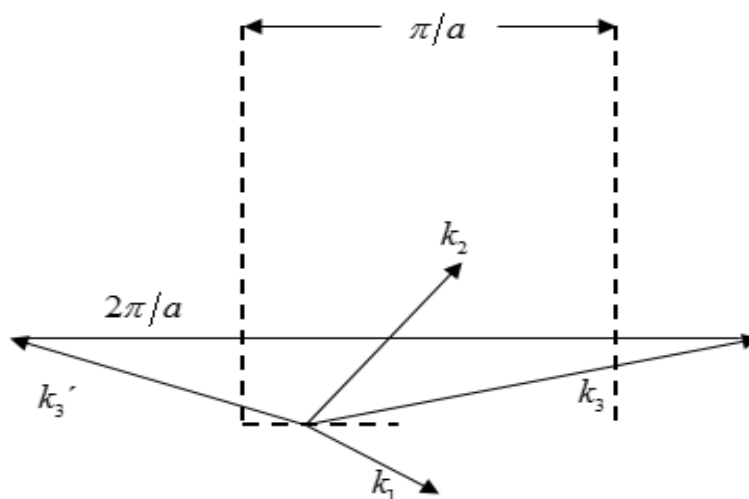
²⁵ TRITT, Op. cit, p. 95.

Figura 1. Proceso – normal o proceso N para sólidos ideales.



Fuente: FERNANDEZ, Freddy, et al. Conductividad térmica en sólidos a altas temperaturas. En: Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela. 2006, vol. 21 no. 2.

Figura 2. Proceso - Umklapp o Proceso U para sólidos aislantes.



Fuente: FERNANDEZ, Freddy, et al. Conductividad térmica en sólidos a altas temperaturas. En: Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela. 2006, vol. 21 no. 2.

En la figura 1 se puede apreciar lo descrito anteriormente sobre los dos fenómenos, donde los vectores de onda k_1 y k_2 se suman para dar como resultado al vector k_3 sin extenderse más allá de la primera zona de Brillouin que equivale a π/a , donde j es el espaciamiento entre átomos. Mientras que en la figura 2, el vector k_3 que

se tiene como resultado si se extiende hasta salir de la frontera, es físicamente equivalente al vector k_3' pero difiriendo de k_3 en $2\pi/j$ ²⁶.

A los cristales, que intencionalmente se les han agregado impurezas, es decir, que se encuentran dopados, se les atribuyen grandes contribuciones a los mecanismos de la resistividad de la dispersión de impurezas.

1.3.3 Conductividad térmica como función de la temperatura. La temperatura es un factor fundamental a la hora de hablar sobre la conductividad térmica, porque a temperaturas altas, la resistividad térmica está sujeta al proceso de Umklapp y eso hace que a medida que aumenta este tipo de dispersión, se reduzca la trayectoria media libre del fonón (λ). Por otra parte, se tienen en cuenta las impurezas del material, debido a que éstas reducen de manera significativa la trayectoria media libre del fonón tras agregar dispersión adicional que la desvía, aunque tienen poco efecto en la capacidad calorífica.

Mientras tanto, a medida que la temperatura disminuye, λ crece de tal forma que se acerca a su límite (dimensiones de la muestra²⁷), y es posible dispersar los fonones, más allá de las fronteras del espécimen con una temperatura lo suficientemente baja para que la conductividad térmica sea proporcional a temperatura al cubo (T^3) y al tamaño de los granos²⁸.

Para entender este tipo de dependencia es necesario dirigirse a la figura 3, ahí, se encuentran graficados datos experimentales de la conductividad térmica en función de la temperatura desde 0.1K hasta 1,000K, con el fin de demostrar dicho comportamiento.

Entonces se tiene que cuando la temperatura es menor a 20 K, la conductividad térmica se rige bajo las dimensiones físicas del material, es decir, el tamaño del grano, las fronteras y el espacio que exista entre las dislocaciones. Posteriormente, al aumentar la temperatura, se llega a un valor donde la conductividad térmica alcanzada es máxima y las contribuciones que generaban el tamaño de los granos, las dislocaciones y la falta de armonía en el sólido, disminuyen. Sin embargo, si se consiguen temperaturas superiores a las anteriores, la conductividad térmica disminuye inversamente proporcional a T , es decir, está en función de T^{-1} .

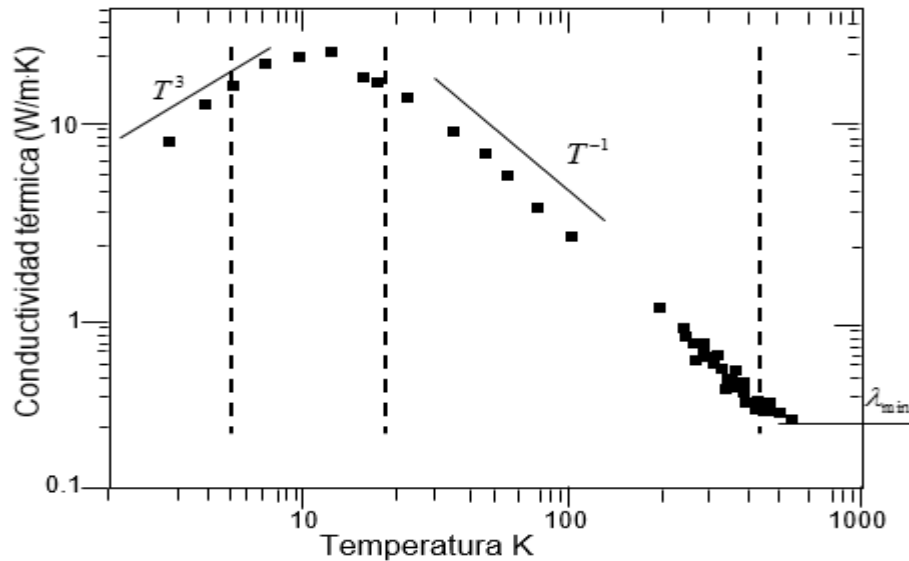
Finalmente, cuando el parámetro T sigue aumentando, la conductividad pasa a ser independiente de él y a mantenerse constante.

²⁶ FERNANDEZ, Op. cit, p. 5.

²⁷ TRITT, Op. cit, p. 96.

²⁸ FERNANDEZ, Op. cit, p. 6.

Figura 3. Conductividad térmica en función de la temperatura.



Fuente: FERNANDEZ, Freddy, et al. Conductividad térmica en sólidos a altas temperaturas. En: Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela. 2006, vol. 21 no. 2.

En la gráfica 3 se encuentra el procedimiento ya descrito, mostrándolo paso a paso a través del rango de temperatura, empezando con bajas (0.1 a 20 K), pasando por la segunda sección en donde la conductividad alcanza su valor máximo, luego empieza a disminuir hasta llegar al punto estable donde la temperatura sobrepasa los 500 K aproximadamente y ya ambos parámetros son independientes entre sí.

En otros casos, al tratarse de los vidrios, estos difieren de los sólidos cristalinos en que tienen conductividades más bajas y un dk/dT positivo, pese a esto, la descripción en algunos casos puede ocurrir en materiales cristalinos si tienen una dispersión óptica de resonancia acústica importante.

Muchos vidrios siguen una dependencia de temperatura casi universal, que incluye una región de muy baja temperatura ($T < 1K$) con una pendiente positiva pronunciada, seguido de un comportamiento constante entre aproximadamente 1K y 20 K, y luego una región de un dk/dT positivo por encima de aproximadamente 20 K²⁹.

1.4 DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

El calor es la forma de energía que se puede transmitir de un sistema a otro cuando existe un diferencial de temperatura. En términos termodinámicos existe el interés en determinar la cantidad de calor conforme un proceso pasa de un estado de equilibrio a otro, para lo cual existe la transferencia de calor.

²⁹ TRITT, Op. cit. 100.

Existen tres formas de transferir el calor, conducción, convección y radiación. Todos ellos requieren de un diferencial de temperatura para que se produzca la transferencia, y todos ellos ocurren del medio que posee la temperatura más elevada hacia uno de temperatura más baja.³⁰

La conducción entonces, es definida como la transferencia de calor de las partículas que poseen más energía en una sustancia hacia las que poseen menos energía, generada por la interacción entre ellas y la cual es expresada por la ley de Fourier de la siguiente manera.

Ecuación 6. Ley de Fourier

$$q_c = -kA \frac{dT}{dx}$$

Fuente. YUNUS, Cengel, y Ghajar, Afshin. Transferencia de calor y masa. 4 ed. México, D.F.: McGraw-Hill, 2011.

Dónde:

- k = Conductividad térmica del material.
- A = Área transversal al flujo de calor.
- $\frac{dT}{dx}$ = Gradiente de temperatura.

Esta ecuación se seleccionó debido a que las muestras que se utilizaron en el GHPA son discos de superficie plana con un espesor específico mencionado más adelante en los requerimientos de diseño. Además, se tuvo en cuenta que esta ecuación fuera pertinente para un flujo de calor unidimensional.

Para materiales sólidos, la mejor forma de determinar la conductividad térmica es de manera experimental, debido a las estructuras que los conforman y a las variables que se deben considerar para cada una de las estructuras existentes. De ésta forma, para materiales cristalinos, es determinante considerar la fase y el tamaño de los parámetros de red, mientras que para materiales amorfos la orientación molecular es de gran relevancia, solo por citar un ejemplo³¹.

Generalizando, los materiales cristalinos transfieren calor con mayor facilidad que los materiales amorfos y los metales son mejores conductores que los no metales.

³⁰ YUNUS, Cengel, y Ghajar, Afshin. Transferencia de calor y masa. 4 ed. México, D.F.: McGraw-Hill, 2011. 47 p.

³¹ BIRD, Byron, et al. Fenómenos de transporte: un estudio sistemático de los fundamentos del transporte de materia, energía y cantidad de movimiento. Barcelona.: Reverté, 1980. ISBN 9788429170504

Respecto al aislamiento térmico son los sólidos porosos secos excelentes debido a que son muy malos conductores de calor. La conductividad térmica para la mayoría de los metales puros es menor a medida que aumenta la temperatura, entretanto, la conductividad de los no metales aumenta y para las aleaciones la conductividad es intermedia³².

Para los sólidos que cuentan con dos fases (una fase sólida dispersa en una segunda fase sólida), o sólidos que contienen poros, como materiales granulares, metales sintetizados y espumas plásticas³³ para los cuales, sin lugar a dudas, realizar una descripción detallada respecto a la conductividad térmica resulta más complejo, se les pueden considerar homogéneos para condiciones de conducción en estado estacionario, con una conductividad térmica aparente (k_{app}).

Reinterpretando como cantidades análogas la temperatura y la densidad de flujo de calor, éstas promediadas sobre un volumen, que es grande, respecto a la escala de la heterogeneidad, pero diminuto respecto a las dimensiones generales del sistema de conducción de calor.

Una vez descrito el fenómeno de la conducción para algunos materiales es de gran importancia resaltar que los procesos reales no cuentan con un solo medio de transferencia de calor, si no que por el contrario se rigen por el principio de conservación de la energía descrito por la primera ley termodinámica en donde se expresa que, en el curso de un proceso, la energía no se puede crear ni destruir, solo se puede transformar. Por tanto, toda cantidad de energía debe ser tenida en cuenta en un proceso y a su vez respecto a la transferencia de calor involucrar tanto procesos de conducción como convección y radiación³⁴.

1.4.1 Conservación energética global. De manera general la ecuación de conservación de la energía es expresada de la siguiente manera³⁵.

Ecuación 7. Conservación de energía

$$\rho \frac{D_g}{D_t} = \rho \left(\frac{\partial g}{\partial t} + v \cdot \nabla g \right) = -\nabla \cdot q - p \nabla \cdot v + \mu \phi + Q^m,$$

Fuente. MODEST, Michael. (2013). Radiative heat transfer. 3 ed. Academic press. 2013. ISBN 9780123869449

³² Ibid. p. 327.

³³ Ibid. p. 328.

³⁴ YUNUS, Op. Cit., p.11.

³⁵MODEST, Michael. Radiative heat transfer. 3 ed. Academic Press. 2013, 297 p. ISBN 9780123869449

Donde,

- g = Energía interna
- ρ = Densidad
- p = Presión
- v = Vector velocidad
- q = Vector de flujo total de calor
- ϕ = Función de disipación
- Q''' = Calor generado dentro del medio (Como energía liberada causada por la reacción química).

La ecuación 7 es necesaria para determinar la contribución de calor por radiación en la conductividad aparente, la cual implica una relación entre las tres maneras de transferencia de calor: conducción, convección y radiación, en el sistema.

En materiales aislantes porosos, la transferencia de calor por radiación tiene generalmente una influencia importante que en condiciones normales tiene que competir con la transferencia de calor conductiva y convectiva, lo que implica que el campo de temperatura de transferencia este determinado por una ecuación global de conservación de energía donde se involucran los tres modos de transferencia de calor.

Al depender la intensidad de la radiación de las propiedades de emisión y de la temperatura, no es posible desacoplarla a la ecuación global de energía.

Existen efectos generados a la ecuación 7 de conservación de momento y energía cuando la radiación participa a través de la emisión, absorción y dispersión. El término de flujo de calor, que en la mayoría de aplicaciones se encuentra sin radiación debido solo la difusión molecular (conducción de calor) ahora tiene un segundo término, el flujo de calor por radiación generado por la energía de radiación que interactúa con el sistema, otros cambios son casi siempre insignificantes.

Al tener en cuenta la consideración de la contribución de un flujo de calor por radiación, la ecuación de conservación de energía puede ser expresada bajo los siguientes términos, si se supone que $d_g = c_v d_T$, y que la ley de Fourier se cumple:

Ecuación 8. Consideración de la radiación en el balance de calor.

$$q = q_c + q_r = -k\nabla T + q_r$$

Fuente: MODEST, Michael. (2013). Radiative heat transfer. 3 ed. Academic press. 2013. ISBN 9780123869449

De esta manera, la ecuación 8 de conservación de energía teniendo en cuenta la contribución de la radiación es la siguiente:

Ecuación 9. Conservación de energía con contribución de la radiación

$$\rho C_v \frac{D_T}{D_t} = \rho C_v \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) - p \nabla \cdot v + \mu \nabla^2 \theta + \dot{Q} - \nabla \cdot q_R$$

Fuente: MODEST, Michael. (2013). Radiative heat transfer. 3 ed. Academic press. 2013. ISBN 9780123869449

El flujo de calor por radiación dentro de la Ecuación 9 cuenta con un término que corresponde a la radiación, el cual puede ser cuantificado a través de la ecuación de Rosseland (si el medio puede ser considerado opaco, como en materiales porosos) y viene definida a través de siguiente ecuación:

Ecuación 10. Rosseland cuantificación de la radiación.

$$q_R(x) = - \frac{4\sigma}{3\beta(x)} \frac{d(T^4)}{dx} d\lambda = \frac{-16}{3\beta(x)} \sigma T^3 \frac{dT}{dx}$$

Fuente: MODEST, Michael. (2013). Radiative heat transfer. 3 ed. Academic press. 2013. ISBN 9780123869449

La cuantificación de la radiación de Rosseland es comúnmente utilizada en muestras de materiales porosos, sin embargo, al considerar el aporte de transferencia de energía de las tres formas (conducción, convección, radiación) en el prototipo es necesario tenerlo en cuenta entre los factores que permiten expresar el término de la conductividad térmica aparente debido a que este hace una relación entre las formas de transferir calor y la conductividad térmica

1.5 TÉCNICAS Y MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

En la actualidad existen varios métodos de medición de las propiedades térmicas, debido a que por lo general son parámetros críticos que deben ser establecidos con bastante precisión. Sin embargo, la obtención de datos por algunos de los métodos existentes resulta ser complicado debido a las consideraciones que tienen en cuenta como, por ejemplo, las pérdidas caloríficas que se transmiten a través de una muestra, las cuales no siempre son tan fáciles de determinar y cuantificar.

Los métodos de medición de conductividad térmica pueden ser divididos en dos amplias categorías, aquellas en las que se trabaja bajo condiciones de estado estacionario y las que trabajan en condiciones de estado transitorio³⁶.

A continuación, se realizará una revisión de las técnicas de medición de conductividad térmica más relevantes, exponiendo las características principales de cada uno de ellos y en algunos casos los posibles errores sistemáticos que se pudieran llegar a presentar³⁷.

1.5.1 Métodos en estado estacionario. La determinación de la conductividad térmica por el uso de los métodos de estado estacionario son los más utilizados, tienen como objetivo la evaluación de un sistema para el cual las variables que rigen su comportamiento permanecen constantes con el transcurso del tiempo sin generar perturbación alguna, sin embargo, este tipo de técnicas poseen el inconveniente de tomar varias horas para ser alcanzadas.

1.5.1.1 ASTM C177. En el ámbito internacional existen dos normas principales que rigen la medición de conductividad térmica unidimensional en estado estable, las cuales se encuentran reguladas, son la ASTM (norma C 177) y posteriormente por la ISO (norma 8302).

La norma ASTM C 177 establece un método de prueba estándar para mediciones de flujo de calor de estado estacionario y propiedades de transmisión térmica por medio del aparato de placa caliente protegida, en inglés GHPA (*guarded hot plate apparatus*).

El aparato de placa caliente protegida consiste en una superficie caliente dividida en dos secciones, la primera la sección de medición y la segunda es conocida como aislamiento térmico primario, también cuenta con dos superficies enfriadas, un aislamiento térmico secundario y una cámara climática³⁸.

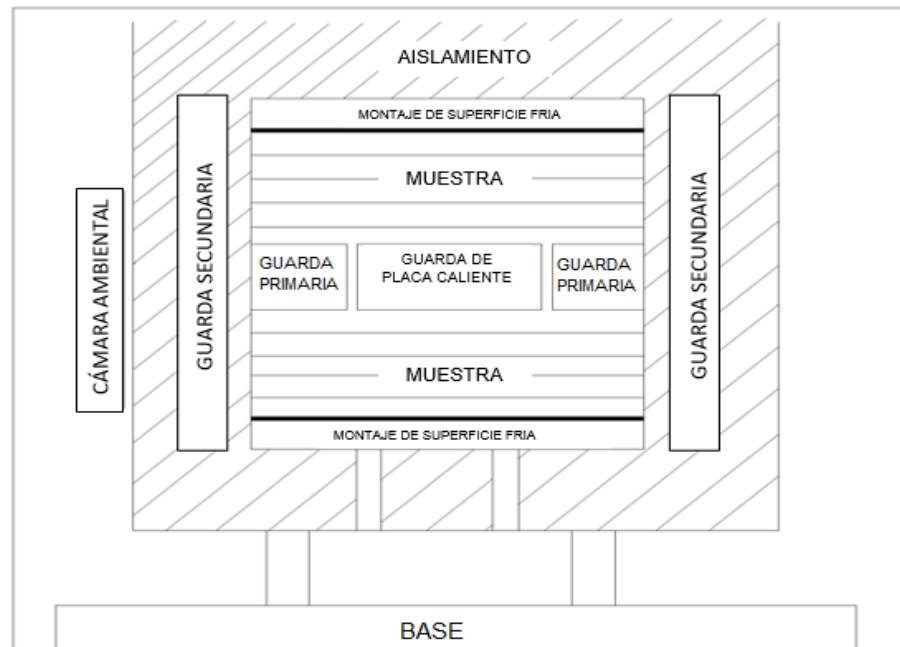
El objetivo principal del aparato es generar un flujo de calor en estado estacionario en la superficie caliente y en una dimensión a través de materiales con una baja conductividad térmica, comúnmente denominados aislantes térmicos, la Figura 4 ejemplifica el sistema.

³⁶ RODRÍGUEZ, María. Una revisión de las propiedades térmicas de los alimentos. México. Universidad de Sonora. División de Ingeniería. 1993. 29 p.

³⁷ TRITT, Op. Cit., p. 188.

³⁸ ASTM, Op. cit. p. 5.

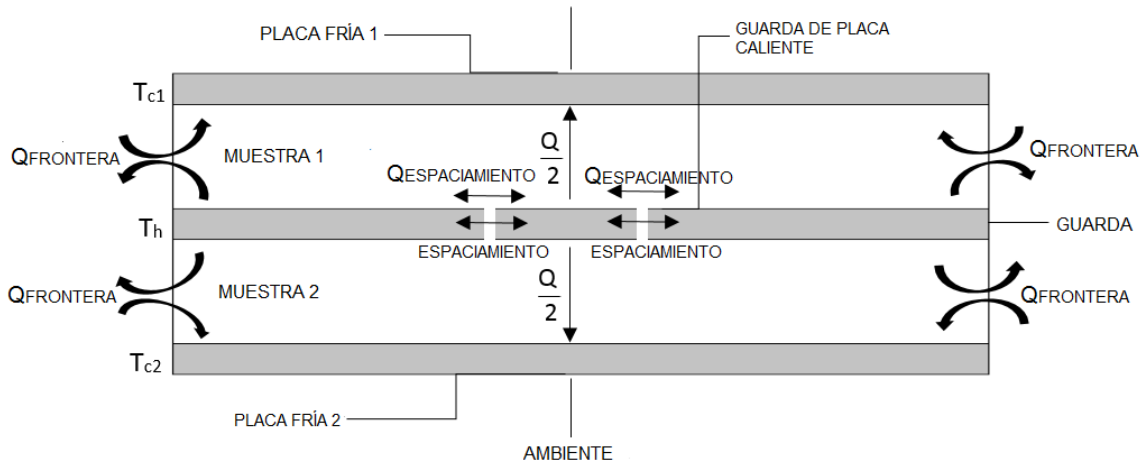
Figura 4. Disposición general de los componentes mecánicos del aparato de placa caliente protegida.



Fuente: AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS C177. Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus. 2013.

Los aislamientos primarios y secundarios son instalados para evitar flujo de calor lateral. Las superficies enfriadas son pozos de calor isotérmicos que retiran la energía generada por las unidades de calentamiento colocadas en la sección central, correspondiente a la placa caliente. La configuración se puede apreciar en la figura 5.

Figura 5. Flujo de calor en el aparato de placa caliente protegido.



Fuente: AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS C177. Standard test method for steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus. 2013.

Este método puede ser aplicado para distintos materiales de aislamiento lo que genera algunas variaciones de diseño en términos de construcción, sistemas de control y de medición, por este motivo es posible encontrar diferentes diseños de aparatos de placa caliente protegida normalmente utilizados a distintas variaciones de temperatura.

Otros factores deben ser considerados en la fase del diseño del sistema como el espesor de la muestra (aislante), rango de temperatura, condiciones ambientales.

Los procedimientos para medición del flujo de calor unidimensional son establecidos en la norma ASTM C1043³⁹ y complementan las condiciones óptimas para realizar la determinación de la conductividad térmica, proporcionando información de control de la pérdida o ganancia de calor, ubicación e instalación de los calentadores, diseño del espaciamiento entre la sección de medición y las placas de protección. Las incertidumbres del sistema se encuentran entre 1% y 3%.

El modelo matemático para la determinación de la conducción viene dado por la siguiente ecuación proveniente de una relación entre la ecuación de Fourier, las propiedades de la muestra aislante y el diferencial de temperaturas de la prueba, la cual permite expresar el término de conductividad aparente de la siguiente forma:

³⁹ AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS C1043. Standard Practice for guarded hot plate design using circular line heat sources. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

Ecuación 11. Conductividad térmica del (GHPA)

$$k_{app} = \frac{Q}{A\left(\left(\frac{\Delta T}{m}\right)_1 + \left(\frac{\Delta T}{m}\right)_2\right)}$$

Fuente: AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS C177. Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus. 2013.

Donde:

- k_{app} = Conductividad térmica aparente
- Q = Flujo de calor
- A = Área de medición del flujo de calor
- $\left(\frac{\Delta T}{m}\right)$ = Relación de la diferencia de temperatura ($T_h - T_c$) y el espesor (m) para el espécimen i .

1.5.1.2 ASTM C 518. Este método proporciona una manera rápida para determinar propiedades de transmisión en aislantes con un alto grado de precisión, siempre que se cuente con una apropiada calibración.

La ASTM C 518 establece un método de prueba estándar para propiedades de transmisión térmica de estado estable por medio del aparato *heat flux meter apparatus* (HFMA) de medición de flujo de calor.

El HFMA es un patrón secundario ampliamente usado en la industria para medición de conductividad térmica de aislantes. Al ser un patrón secundario necesita ser calibrado usando un material de referencia certificado. Este material es caracterizado usando un método primario de medición como el GHPA el cual garantiza el correcto funcionamiento al momento de realizar la medición de propiedades de transmisión térmica como la conductividad, debido a la estrecha similitud de materiales, espesores, temperaturas medias, y gradientes de temperatura esperados de las muestras de la prueba.

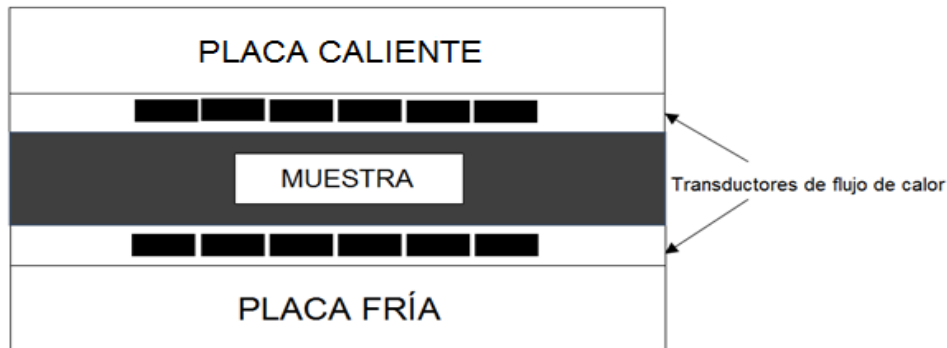
El aparato HFMA está conformado principalmente por dos placas isotérmicas y uno o más transductores de flujo de calor, los transductores de flujo de calor generan una fuerza electromotriz DC proporcional al flujo total de calor aplicado a la superficie del sensor por medio de una termopila diferencial⁴⁰.

⁴⁰ AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS C518-15. Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

Este equipo puede llegar a brindar resultados bastante acertados, sin embargo depende directamente de su correcta calibración y pese a esto se obtendrán valores inferiores a los obtenidos al GHPA.

Las incertidumbres asociadas para este método están entre 4% y 8%, la figura 6 permite ver la disposición de los componentes del aparato HFMA.

Figura 6. Componentes de HFMA con dos transductores de flujo de calor.



Fuente: AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS C518-15. Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

El modelo matemático para la determinación de la conducción viene determinado por la siguiente ecuación, donde se relaciona un factor de calibración, el diferencia de potencia de la termopila, las propiedades de la muestra, el diferencial de temperatura y el espesor:

Ecuación 12. Conductividad térmica del (HFMA).

$$k_{app} = \frac{S \cdot W}{\Delta T} m$$

Fuente. AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS C518-15. Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

Donde:

- k_{app} = Conductividad térmica aparente
- S =Factor de calibración
- W =Diferencia de potencia del termopar
- ΔT = Diferencial de temperatura
- m = Espesor

1.5.1.3 Método de flujo radial. Los métodos mencionados anteriormente utilizan disposiciones de muestras longitudinales para medir la conductividad termica, lo cual funciona a bajas temperaturas, sin embargo, al trabajar con altas temperaturas las pérdidas por radiación del calentador y de las superficies de la muestra no son insignificantes y pueden representar altas incertidumbres en el momento de cuantificar el calor a través de la muestra.

En este método el calor es aplicado internamente a la muestra, esto permite reducir las pérdidas de radiación desde la fuente de calor. Un diagrama de ilustración del método de flujo radial se muestra en la figura 7.

El método de flujo radial puede ser una gran alternativa a bajas temperaturas, sin embargo pueden generarse errores bastantes considerables a altas temperaturas debido a pérdidas radiativas que provienen directamente del calentador y de la superficie de la muestra.

El calentamiento interno se realiza en una variedad de geometrías de muestra. La simetría de la muestra debe guardar relación con la geometría del calentador. Existen cinco clases de aparatos para métodos radiales.

Cuadro 1. Clases de aparatos para métodos radiales.

Características	
CLASE 1.	La mas simple de emplear es una geometría cilíndrica con una fuente de calor central y longitud supuesta, por tanto sin protecciones finales.
CLASE 2.	Geometría cilíndrica que consiste en discos, una fuente de calor central, longitud nula, por lo tanto con protecciones finales.
CLASE 3.	Geometría esférica y elipsoidal, con fuente de calor completamente cerrada.
CLASE 4.	Geometría cilíndrica concéntrica que consiste en las conductividades conocidas y desconocidas, fuente de calor central y son analizados por métodos comparativos.
CLASE 5.	Muestras de autocalentamiento eléctrico, con geometría cilíndrica donde se analiza la distribución radial de la temperatura, con preparación de muestras.

Fuente. TRITT, Terry. Thermal conductivity: theory, properties, and applications. New York. Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2004. ISBN 0-306-48327-0.

Comunmente se emplea la geometría cilíndrica, en donde el calor se genera a lo largo del eje de un cilindro. En un flujo de calor entre un cilindro con radios r_1 y r_2 , con pérdidas insignificantes a través de la longitud. La conductividad k es definida por el siguiente modelo⁴¹:

⁴¹ TRITT, Op. Cit., p. 195.

Ecuación 13. Conductividad térmica del método de flujo radial

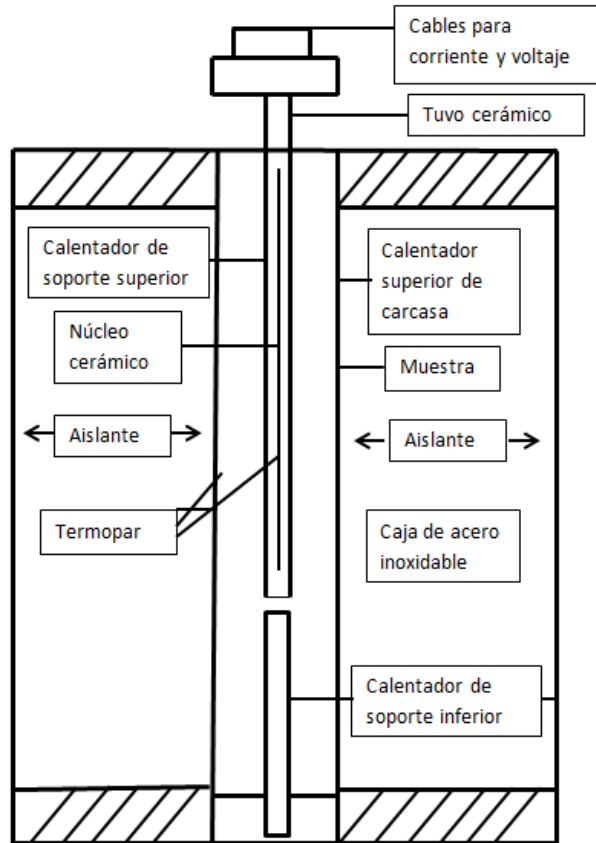
$$k = \frac{P \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L \Delta T}$$

Fuente. tritt, terry. thermal conductivity: theory, properties, and applications. new york. kluwe academic / plenum publishers, 2004. isbn 0.306-48327-0.

Donde:

- P = Entrada de energía térmica por unidad de tiempo
- L = Longitud de la muestra
- ΔT = La diferencia de temperatura entre los termopares
- $r_1 - r_2$ = Las posiciones radiales de los termopares internos y externos respectivamente.

Figura 7. Configuración para medición de conductividad térmica usando la técnica de flujo radial.



Fuente: FLYNN, Daniel. A radial flow apparatus for determining the thermal conductivity of loose fill insulations to high temperatures. En: Journal of research of the National Bureau of Standards-Co Engineering and Instrumentation. Abril- junio.1963. vol.67C, no, 2.

En esta técnica la muestra se encuentra encerrada entre el espacio anular y el núcleo cerámico, se genera el calor desde el interior del sistema calentando la muestra en el eje y fluyendo el calor de forma radial hacia afuera, por la presencia de un gradiente de temperatura. La detección de la temperatura se realiza por el uso de termopares.⁴²

1.5.2 Métodos de estado transitorio. Pese a que los métodos en estado estacionario son los más utilizados en la industria para determinar la conductividad térmica, las técnicas en estado transitorio se han vuelto muy populares como resultado del progreso realizado en la computación moderna y el análisis de datos.

⁴² ZHAO, Dongliang, et al. Measurement techniques for thermal conductivity and interfacial thermal conductance of bulk and thin film materials. En Journal of electronic packaging. Mayo, 2016, vol. 138, no. 4. p. 19.

Las técnicas en estado transitorio miden la respuesta cuando se envía una señal para crear calor en la muestra. En primera instancia la muestra se encuentra en un equilibrio térmico con el entorno, posteriormente es sometido a una señal de calentamiento y se registra el cambio de temperatura durante el tiempo para determinar la conductividad de la muestra.

Las ventajas de los métodos en estado transitorio son considerables, superan muchos de los problemas asociados con los métodos de estado estacionario como, por ejemplo, las pérdidas de calor, la resistencia de contacto y el tiempo de espera prolongado, sin embargo, estas técnicas poseen mayores incertidumbres de medición respecto a los métodos estacionarios⁴³.

1.5.2.1 Método Pulse Power (Técnica “Maldonado”). Los métodos tradicionales de medición de conductividad térmica de manera general requieren de un tiempo largo de espera entre mediciones para facilitar a la muestra alcanzar la consideración del estado estable.

Este método consiste en un baño que posee una temperatura la cual se desplaza lentamente mientras la corriente del calentador genera un gradiente térmico que es pulsado con una onda cuadrada. Como el equilibrio térmico nunca es establecido, el tiempo entre mediciones se reduce significativamente haciendo más probable la resolución de medición más alta.

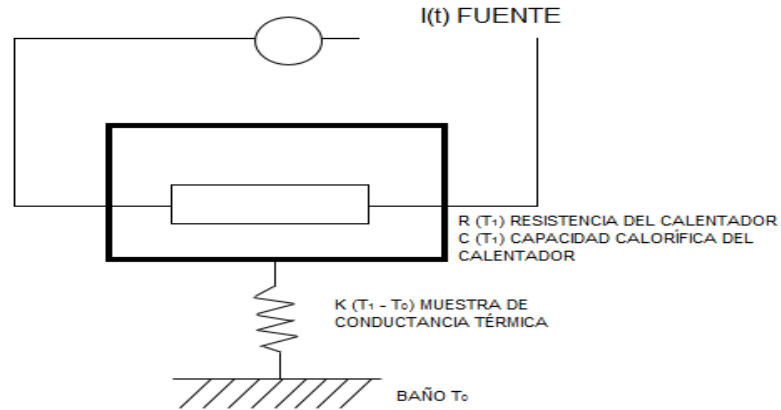
La configuración experimental de este método es básicamente el mismo que se ha trabajado con las mediciones en estado estacionario con la única excepción que la corriente de calentamiento se pulsa con una onda cuadrada de amplitud constante lo que posibilita crear pequeños gradientes térmicos, a diferencia del estado estable en el que no existe un gradiente térmico.

En 1992 Maldonado aplicó esta técnica para realizar la medición simultánea de la conductividad térmica y la potencia termoeléctrica. La siguiente figura es un ejemplo del método⁴⁴:

⁴³ ARAU, Carlos. Measurement of the In-Plane Thermal Conductivity by the Parallel Thermal Conductance Technique. University of Colorado at Boulder. Department of Mechanical Engineering. 2016. 5 p.

⁴⁴ TRITT, Op. Cit., p. 196.

Figura 8. Esquema para técnica “Maldonado”, donde T_0 es la temperatura del baño recirculado



Fuente: TRITT, Terry. Thermal conductivity: theory, properties, and applications. New York. Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2004. ISBN 0-306-48327-0.

En el balance de calor de la figura 8 es posible describirlo como la suma de las corrientes generadas en el calentador y el calor transmitido por la muestra el cual esta descrito por la siguiente ecuación:

Ecuación 14. Balance de calor del método Pulse Power

$$\frac{dQ}{dt} = C(T_1) \frac{d\hat{T}}{dt} = R(\hat{T}) I^2(t) - k(\hat{T} - T_0)$$

Fuente. TRITT, Terry. Thermal conductivity: theory, properties, and applications. New York. Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2004. ISBN 0-306-48327-0.

Donde

- $\frac{dQ}{dt}$ = Tasa de cambio de calor en el calentador.
- \hat{T} = Temperatura del calentador.
- R = Resistencia del calentador.
- k = Conductividad térmica.
- T_0 = Temperatura del baño.

En este método por lo general se utilizan muestras de geometría cilíndrica o rectangular que se sostiene entre un calentador y un dissipador de calor. La corriente

de calentamiento es una onda cuadrada de corriente con amplitud constante y el diferencial de temperatura se puede medir con un termopar.⁴⁵

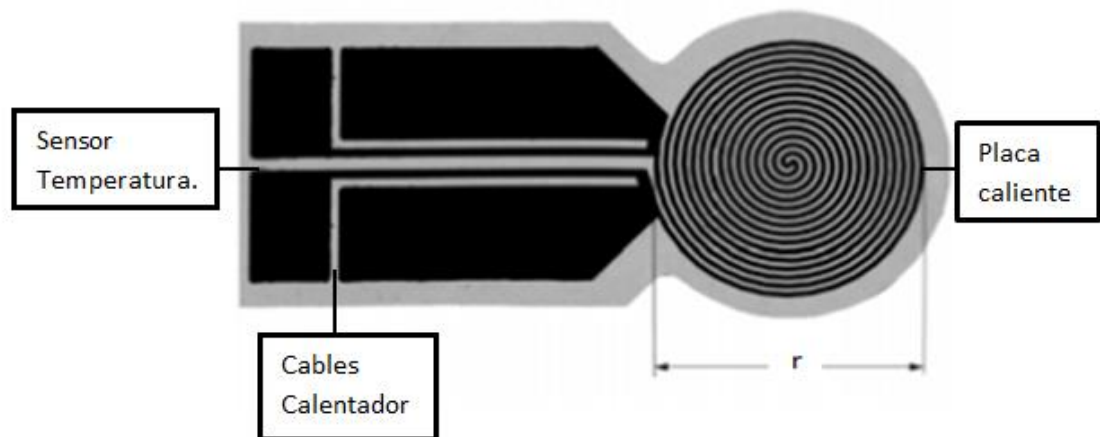
Una ventaja de esta técnica es que la temperatura de la muestra se reduce en proporciones pequeñas mientras la medición se realiza, lo que permite ahorrar tiempo en la secuencia de mediciones donde alcanzar un estado estacionario no es necesario.

1.5.2.2. Método del disco caliente. Este método transitorio utiliza un elemento resistivo delgado, plano y aislado eléctricamente, como se muestra en la Figura 9, como un sensor de temperatura y una fuente de calefacción. Se realiza colocando el calentador entre dos muestras de prueba del mismo material. Es de gran importancia que la superficie de esas muestras sean lo más planas y lisas posibles debido a que minimiza la resistencia de contacto con el calefactor.

La conductividad térmica de la muestra se puede determinar a partir de una única medición transitoria, controlando el aumento de la resistencia en el elemento de calentamiento.

Una de las ventajas del método transitorio de disco caliente es que funciona tanto para fluidos como para sólidos con conductividades térmicas que varían de 0,01 a 500 W/(m·K) y un rango de temperatura desde temperaturas criogénicas hasta 500K⁴⁶.

Figura 9. Calentador y sensor de película delgada utilizados para método de fuente plana



Fuente: MALINARIC Krupa, P. International Journal of Mathematics, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering

⁴⁵ ZHAO, Op. Cit., p. 14.

⁴⁶ RODRIGUEZ, Op. Cit., p. 43.

1.6 SELECCIÓN DEL MÉTODO

Con el fin de seleccionar el método pertinente para el Instituto Nacional de Metrología, se establecerán cinco criterios determinantes para justificar el porqué del más adecuado. Luego, según el método y el criterio que se esté evaluando, se calificarán teniendo en cuenta el nivel de importancia, que en este caso se refleja en la determinación del valor de incertidumbre más bajo y por requerimientos del país en términos de conductividad térmica que se irán explicando a continuación. La escala que se aplicará será de la siguiente manera, teniendo a 3 como alto; 2 para una puntuación de medio; 1 bajo y 0 nulo, es decir que no tiene ninguna incidencia el método que se utilice en los resultados y la incertidumbre.

Después de calificar cada factor, se realiza una sumatoria de puntos acumulados. Se establece el método más apropiado atendiendo a la puntuación obtenida por cada criterio.

Se seleccionará la norma o método con la mayor cantidad de puntos acumulados.

CRITERIOS.

1. Tipo de patrón: Este criterio es fundamental puesto que es la realización o materialización de la definición de una magnitud. Se divide en patrón primario y patrón secundario. El primario es el que se establece mediante un proceso de medición primario o que se ha creado como un objeto, que se elige por convenio, mientras que el secundario está establecido a través de la calibración con respecto a un patrón primario que debe ser de una magnitud de igual naturaleza.

Un ejemplo de patrón primario es el prototipo internacional del kilogramo, que se tiene como objeto elegido por convenio⁴⁷.

Debido a que el patrón secundario depende del primario, pues es establecido a partir de su calibración, es pertinente sobreponer al primario frente al secundario, y en este caso asignar un valor de 3 y 2 respectivamente.

2. Variación en el tiempo: Este criterio habla sobre el estado en que trabaja el equipo, es decir, si este es transitorio o es estable. Cuando se alcanza el estado estable, las variables que rigen el comportamiento del sistema tienden a permanecer constantes a lo largo del tiempo sin generar perturbación alguna. Por otra parte, en el estado transitorio las variables si cambian a través este y se presentan las perturbaciones, lo cual no asegura la correcta medición y recopilación de datos, obteniéndose una incertidumbre mayor por la proporción de los errores atribuidos.

⁴⁷ VOCABULARIO INTERNACIONAL DE METROLOGÍA. Op. cit., p. 54

Por los resultados en la incertidumbre, se estable tomar un valor de 3 y el transitorio de 2.

3. Tiempo de realización de la prueba: Se refiere al tiempo necesario por el sistema para alcanzar alguno de los dos estados. Como se ha mencionado anteriormente, el estado transitorio no necesita fijar sus variables a lo largo del tiempo y eso hace que su duración es más corta con respecto al estado estable que si lo necesita. Este es un factor primordial a la hora de desarrollar un proyecto, sin embargo, al ahorrar tiempo se pueden estar sacrificando factores como el porcentaje de incertidumbre de los datos o la calidad de los mismos.

Según el tiempo que se requiere para el desarrollo de este proyecto, se asigna un valor de 3 los métodos que requieran un menor tiempo y un valor del 2 al resto.

4. Incertidumbre: Este es el parámetro que caracteriza la dispersión que tienen los valores que han sido atribuidos a un mensurando. Este proyecto busca ofrecer datos de conductividad térmica confiable y trazable al SI, por lo tanto busca valores de incertidumbre bajos.⁴⁸

El método que proporciones menores valores de incertidumbre tendrán un valor de 3 y los otros un valor de 1.

5. Pérdidas de energía en forma de calor: Este es un factor que aumenta el valor de la incertidumbre de los datos que se obtenga. Se busca utilizar la mayor cantidad posible de energía en el sistema, no que esta se disperse en el ambiente y no tenga utilidad alguna.

Y finalmente se tiene que los requerimientos en términos de conductividad térmica del país como se encuentra en el DECRETO 4175 de 2011, capítulo II, artículo 6, donde se dice que el INM cumplirá las siguientes funciones:

“Establecer, custodiar y conservar los patrones nacionales de medida correspondientes a cada magnitud, salvo que su conservación o custodia sea más conveniente en otra institución, caso en el cual el Instituto Nacional de Metrología, INM, establecerá los requisitos aplicables y, con base en ellos, designará a la entidad competente.”, y “Establecer y operar los laboratorios de referencia de metrología científica e industrial que requiera el país, de acuerdo con las políticas del Estado y designar los laboratorios primarios de metrología que requiera.”

Teniendo claros los criterios que se evaluarán, se muestra en la tabla 2 la calificación asignada a cada método y la sumatoria final.

⁴⁸ Ibid., p. 35

Tabla 2. Comparación entre los cinco métodos planteados.

Método	Criterio 1. Tipo de patrón	Criterio 2. Variación en el tiempo	Criterio 3. Tiempo de realización de la prueba	Criterio 4. Incertidumbre	Criterio 5. Pérdidas de energía en forma de calor	Total
ASTM C 177	3	3	2	3	2	13
ASTM C 518 DISCO CALIENTE	2	3	2	3	2	12
FLUJO RADIAL	2	3	2	3	2	12
PULSE POWER	2	2	3	1	3	11
	2	2	3	1	3	11

Fuente: elaboración propia

Después de haber comparado los resultados de las sumatorias y establecido la importancia de cada criterio, es posible seleccionar el método. La norma ASTM C177, por ser un patrón primario que proporciona valores bajos de incertidumbre, asegura confiabilidad, reproducibilidad en los resultados y se ajusta a los requerimientos de conductividad térmica del país, es en este caso particular es la más apropiada.

Partiendo de esta selección del método, se continua con la profundización del mismo para esclarecer su funcionamiento, diseño, requerimientos y construcción.

1.7 ASTM C 177-13 MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA EL ESTADO ESTACIONARIO, LAS MEDICIONES DE FLUJO DE CALOR Y PROPIEDADES DE TRANSMISIÓN TÉRMICA MEDIANTE EL GHPA

Después de haber determinado el método pertinente que cumple con las expectativas y prioridades del Instituto Nacional de Metrología, el cual tiene en cuenta las necesidades metrológicas del país, es importante realizar una profundización sobre los requerimientos que implica la norma con la cual se desarrollará la experimentación del mismo.

Esta norma, fundamentalmente, busca establecer los criterios que se deben tener en cuenta en el momento de realizar las mediciones pertinentes en estado estable para el aparato de placa caliente.

Aquí, se encuentra desde la terminología utilizada en el método, el diseño, las condiciones necesarias según los parámetros escogidos, los requisitos de los materiales que se necesitan tanto para las muestras como para la construcción en sí del sistema de medición, hasta la estimación de la incertidumbre y todos los factores que pueden afectar la trazabilidad de las mediciones. Aunque no busca

considerar todos los problemas de seguridad, puesto que dichas prácticas son responsabilidad del usuario⁴⁹.

1.7.1 Significado y uso. Este método es utilizado con el fin de realizar la medición del flujo de calor entre los platos que lo componen y el valor de la conductividad térmica de la muestra (aislantes térmicos) que se ubica entre ellas, siempre y cuando se tenga un estado estacionario. Esta experimentación es fácilmente aplicable a una alta gama de materiales y muestras.

Sin embargo, para obtener resultados precisos y confiables es necesario considerar ciertos parámetros, por ejemplo, si se van a utilizar las dos caras del plato caliente, las dos muestras que las cubrirán deben tener una densidad, un espesor y un área lo más idéntica posible, puesto que es fundamental que el flujo de calor entre los platos sea unidireccional, esto porque los resultados se pueden ver afectados por la composición del material, la humedad, el espesor de las muestras, la temperatura ambiente, etc.

Se debe tener presente que la transmisión de calor se puede producir por cualquiera de los tres métodos por separado de transferencia de calor, ya sea por radiación, conducción y convección, debido a que también es posible generar inconformidades por pérdidas de energía⁵⁰.

1.7.2 Aparato GHPA. Es un conjunto de superficies que consta de un plato caliente el cual se compone de una sección de medición, una guarda primaria, anillo de medición, y de dos placas frías. En algunos casos, donde es difícil el control de las condiciones ambientales, este equipo también contiene una cámara para establecerlas.⁵¹

En cuanto al plato caliente, se busca que tenga un flujo de calor unidireccional y que permanezca en estado estable, también que su guarda primaria tenga calentadores para mantener la temperatura, mientras que, para los platos fríos, es indispensable un baño recirculado que no permita el aumento de la temperatura.

Acercas de los materiales de los platos, para temperaturas moderadas, es común emplear el cobre y el aluminio. Con temperaturas altas, las aleaciones de níquel son las indicadas. En el caso particular de esta experimentación, se trabajarán temperaturas moderadas, descartando así el uso de las aleaciones de níquel y sugiriendo al cobre o al aluminio como material indicado. Sin embargo, es necesario considerar otros factores como que el material sea dimensional y químicamente estables, fuerte para resistir deformaciones y distorsiones, y con una emisividad mayor que 0.8 y que se mantenga uniforme, la cual se logra con un tratamiento en

⁴⁹ ASTM C177-13. Op. Cit., p. 1

⁵⁰ *Ibíd.*, p. 1.

⁵¹ *Ibíd.*, p. 4.

la superficie que puede ser proporcionado con pinturas de alta emisividad, aunque en el caso del aluminio, este puede ser anodizado y evitar la necesidad de un revestimiento adicional. Además, es fundamental que el material seleccionado tenga una conductividad térmica alta.

Debido a que cumple los anteriores requerimientos mencionados de manera satisfactoria, proporciona el anodizado que evita la necesidad de recubrimiento y tiene un fácil alcance en el mercado, el aluminio es el material seleccionado para la experimentación. En la tabla 4 se encuentran sus propiedades.

Para este material, es apropiado un tamaño de medida suficiente para cubrir el espacio existente entre el plato caliente y la guarda primaria, el cual no debe ser mayor al 5% del área de la sección media, así mismo que muestre un contacto significativo con la muestra. Con relación a sus espesores, los platos gruesos ayudan a reducir las distribuciones laterales de temperatura, aunque reducen la capacidad de respuesta del aparato. Es recomendable establecer un equilibrio entre estos dos factores⁵².

1.7.3 La muestra utilizada en el GHPA. Las muestras deben ser ubicadas a cada lado de la placa caliente y tener un diámetro que cubra la mayor parte de los platos para conseguir el suficiente contacto entre ellas y asegurar una mejor transferencia de calor.

Los aislantes deben ser similares en características como la densidad, el espesor, la conductividad térmica y las dimensiones, pues en este caso, la geometría juega un papel importante en términos de transferencia. Para el espesor hay factores relevantes que se estudian para la toma de la mejor alternativa, como lo son: el tamaño del aparato y la resistencia térmica de la muestra, puesto que de ello dependerá la precisión deseada de los datos. Las otras características como la dimensión y la densidad también se establecen a partir del tamaño del equipo, que se puede definir considerando la capacidad del laboratorio o la finalidad del mismo.

Al mismo tiempo, se necesita un material que sea una mezcla homogénea para que la distribución de la temperatura sea uniforme. Cabe resaltar que al tener inhomogeneidad, se incrementa el valor de incertidumbre de los resultados y se generan pérdidas de calor por los bordes, que para mantenerlas con un valor por debajo de un 0.5%, el espesor máximo recomendado debe ser un tercio de la dimensión lineal máxima de la sección de medida.

La superficie necesita estar adecuada de tal forma que sea posible garantizar que se encuentran en paralelo con los platos y así asegurar el óptimo contacto ya mencionado.

⁵² *Ibíd.*, p. 6.

Luego, en el caso de que el material que se está utilizando como muestra no indique alguna especificación acerca de la temperatura ambiente y humedad relativa, se debe mantener a $22 \pm 5^{\circ}\text{C}$ y $50 \pm 10\%$ por un lapso de tiempo hasta que menos del 1% de masa haya cambiado en 24 horas. El contenido de humedad que haya dentro de la muestra puede causar un comportamiento transitorio, entonces es recomendado un constante monitoreo.⁵³

1.7.4 Mediciones de temperatura. Con el objetivo de tener un valor de gradiente de temperatura de la muestra acertada o vigilar y controlar el desequilibrio de la temperatura, es pertinente la implementación de un sistema de sensores espaciados por igual alrededor del espaciamento si se trata superficies redondas. Para esta función los más indicados son los termopares por su amplia gama de aplicación y su precisión, siendo este último un factor importante para el cumplimiento del objetivo. Aunque existen otros métodos con los cuales también es posible alcanzarlo como los termistores, diodos y termómetros de resistencia.

Las uniones entre los cables y las superficies de metales diferentes, deben hacerse en las regiones donde no se tenga un gradiente de temperatura apreciable. Y estos, preferiblemente debe tener un diámetro inferior a 0.6 mm y estar certificados por el proveedor para garantizar un error menor al 1%.

Por otra parte, no solo se tendrá la medición de la temperatura, también se registrarán datos de corriente y tensión, que serán utilizados para el cálculo del flujo de calor y las características térmicas necesarias⁵⁴.

1.7.5 Procedimiento. Inicialmente se seleccionan las muestras de ensayo, se mide y registra la masa y sus dimensiones, se instalan en el aparato, seguido por ubicar los sensores de monitoreo.

Se ajustan los sistemas para la calefacción o refrigeración de los platos. Se establecen y registran las condiciones ambientales donde se va a llevar a cabo la experimentación.

Tan pronto se encuentran listos los pasos anteriores, se registra la fecha, la hora y los datos que se vayan obteniendo. Es importantes tener en cuenta que con los primeros datos podemos identificar el momento en el que el aparato alcanza el estado estable mas no usarlos para el cálculo del flujo de calor.

Las condiciones que se han descrito anteriormente se deben registrar durante intervalos de 30 minutos.

⁵³ *Ibíd.*, p. 10.

⁵⁴ *Ibíd.*, p. 8.

Justo antes de finalizar la prueba, es necesario también considerar los datos ambientales de donde se desarrolló la experimentación y volver determinar la masa y dimensiones de las muestras⁵⁵.

1.7.6 Incertidumbre. Después de recolectar los datos y desarrollar los cálculos requeridos, es momento de analizar la incertidumbre de los resultados.

Primero hay que tener en cuenta el término exactitud, el cual se refiere a la proximidad de concordancia entre el valor observado y un valor de referencia aceptado⁵⁶.

Luego, los factores que posiblemente afectaron la experimentación, verificar si alguno de ellos es viable reducir para una próxima vez o si es necesario tener en cuenta otros elementos a la hora de realizar la práctica.

Dichos errores pueden encontrarse en el tamaño equívoco del aparato, el tipo de protección primaria, las dimensiones y el material de la muestra, e incluso las condiciones ambientales. Generalmente, esto se clasifica en incertidumbre de errores aleatorios o sistemática, la cual es una suma total de todos los pequeños errores independientes que se no se pueden controlar y en la incertidumbre estadística los cuales se podrían prevenir.

1.8 “APARATO DE PLACA CALIENTE CON PROTECCIÓN DE FUENTE DE CALOR DE LÍNEA ”

El aparato de placa caliente protegido fue descrito en 1974 y concebido por H. E. Robinson, considerando un plato circular altamente conductivo, dividido en una sección de medición y otra sección de la guarda, en la que se encuentra un espaciador. La sección de medición se calienta constantemente por la acción de un calentador, de igual forma ocurre con la guarda, el plato caliente se encuentra entre dos muestras planas con las mismas conductividades y espesores, estas a su vez están en contacto con los platos fríos por las caras externas.⁵⁷

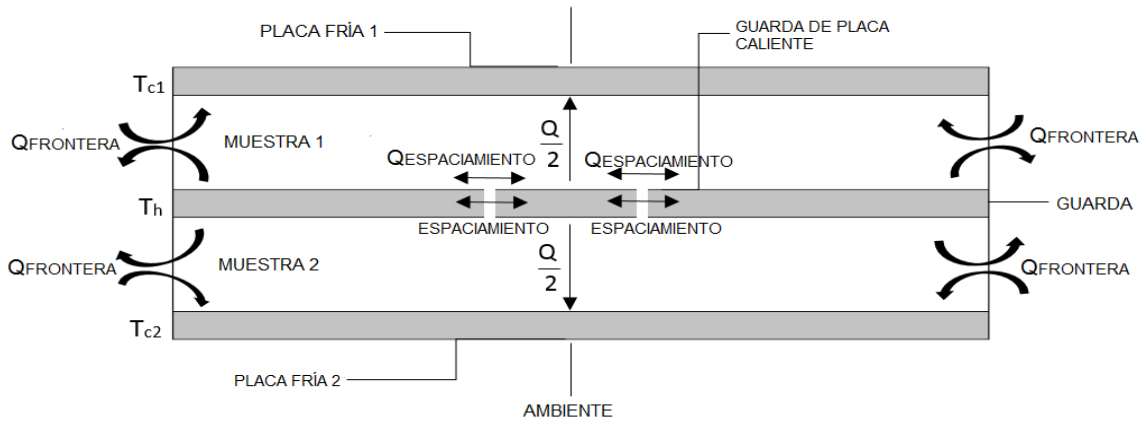
El equipo de manera general puede ser descrito como un sandwich al encontrarse las muestras entre tres platos (dos fríos y el central caliente). Los flujos de calor se representan en la siguiente figura,

⁵⁵ *Ibíd.*, p. 11.

⁵⁶ *Ibíd.*, p. 13.

⁵⁷ HAHN, M. H., ROBINSON, H. E., y FLYNN, D. R. Robinson line-heat-source guarded hot plate apparatus. In Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations. ASTM International. 1974.

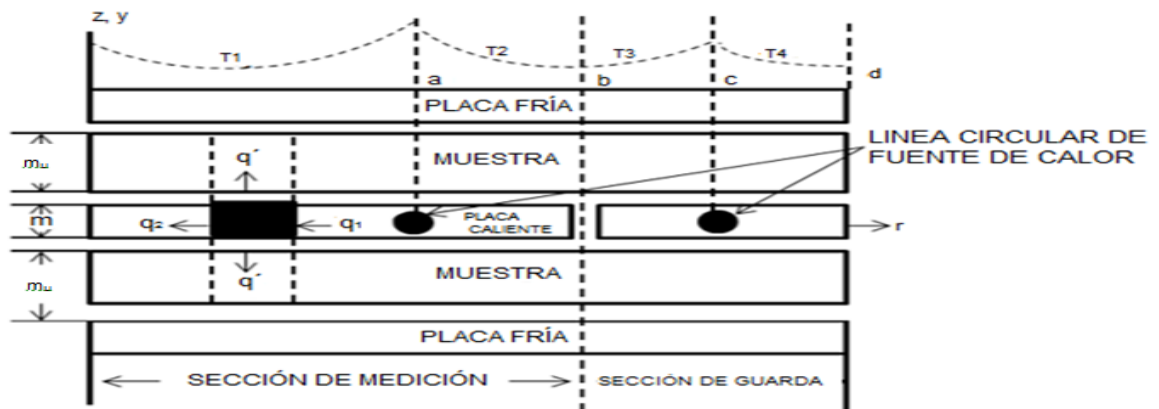
Figura 10. GHPA (guarded hot plate apparatus).



Fuente. AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS C177. Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus. 2013.

Si se supone que los flujos de calor en el espaciamiento y en la frontera son despreciables en comparación con el flujo de calor a través de la muestra, el sistema puede representar como aparece en la figura 11, donde se ven los puntos indicados para la instalación de los sensores de temperatura (a y c) y los puntos b y d los cuales representa el espaciamiento y la frontera del aparato respectivamente, las direcciones de los flujos de calor, los perfiles de temperatura (T_1 , T_2 , T_3 y T_4), la sección de medición, la sección de la guarda y la ubicación pertinente de las muestras en el aparato

Figura 11. Aparato de placa caliente protegido (GHPA)



Fuente. HAHN, M. H., ROBINSON, H. E. y FLYNN, D. R. Robinson line-heat-source guarded hot plate apparatus. In Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations. ASTM International. 1974.

La sección transversal (plato caliente) con radio r mostrada en la figura 11 se le realiza un balance de calor en la ecuación 15, a condiciones de estado estacionario y con muestras idénticas.

Ecuación 15. Balance de calor en el plato caliente

$$q_1 = q_2 + 2q'$$

Fuente. HAHN, M. H., ROBINSON, H. E., y FLYNN, D. R. Robinson line-heat-source guarded hot plate apparatus. In Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations. ASTM International. 1974.

Donde se define q_1 , q_2 y q' en las ecuaciones (ecuación 16, ecuacion 17 y ecuación 18) una ilustracion del balance se encuentra en la figura 11.

Ecuación 16. Calor q_1

$$q_1 = k_p (2\pi r m) \frac{dT}{dr} \Big|_{r+\Delta r}$$

Fuente. HAHN, M. H., ROBINSON, H. E., y FLYNN, D. R. Robinson line-heat-source guarded hot plate apparatus. In Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations. ASTM International. 1974.

Ecuación 17. Calor q_2

$$q_2 = k_p (2\pi r m) \frac{dT}{dr} \Big|_r$$

Fuente. HAHN, M. H., ROBINSON, H. E., y FLYNN, D. R. Robinson line-heat-source guarded hot plate apparatus. In Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations. ASTM International. 1974.

Ecuación 18. Calor q'

$$q' = k_{app} \frac{(2\pi r m)}{m_u} (T_i - T_f)$$

Fuente. HAHN, M. H., ROBINSON, H. E., y FLYNN, D. R. Robinson line-heat-source guarded hot plate apparatus. In Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations. ASTM International. 1974.

Una vez definido el calor respecto a cada uno de sus componentes, se reemplazan ecuación 16, ecuación 17 y ecuación 18 en el balance general mostrado en la ecuación 15. La siguiente ecuacion corresponde al resultado.

Ecuación 19. Balance de calor en términos de q_1 , q_2 y q'

$$k_p(2\pi rm) \frac{dT}{dr} \Big|_{r+\Delta r} - k_p(2\pi rm) \frac{dT}{dr} \Big|_r - 2k_{app} \frac{(2\pi r dr)}{m_u} (T_i - T_f) = 0$$

Fuente. HAHN, M. H., ROBINSON, H. E., y FLYNN, D. R. Robinson line-heat-source guarded hot plate apparatus. In Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations. ASTM International. 1974.

La ecuación 20 y la ecuación 21 muestran la simplificación del balance y aplicando el límite cuando $\Delta r \rightarrow 0$ respectivamente.

Ecuación 20. Simplificación del balance de calor

$$k_p(2\pi m) \left[\frac{r \frac{dT}{dr} \Big|_{r+\Delta r} - r \frac{dT}{dr} \Big|_r}{dr} \right] - 2k_{app} \frac{(2\pi)}{m_u} r (T_i - T_f) = 0 \quad , \Delta r \rightarrow 0$$

Fuente. HAHN, M. H., ROBINSON, H. E., y FLYNN, D. R. Robinson line-heat-source guarded hot plate apparatus. In Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations. ASTM International. 1974.

Ecuación 21. Considerando $\Delta r \rightarrow 0$ en el balance de calor.

$$k_p m \frac{d(r \frac{dT}{dr})}{dr} - \frac{2k_{app} r}{m_u} (T_i - T_f) = 0$$

$$k_p m \left[\frac{dT}{dr} + r \frac{d^2 T}{dr^2} \right] - \frac{2k_{app} r}{m_u} (T_i - T_f) = 0$$

Fuente. HAHN, M. H., ROBINSON, H. E., y FLYNN, D. R. Robinson line-heat-source guarded hot plate apparatus. In Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations. ASTM International. 1974.

Realizada esta simplificación este balance corresponde a una ecuación diferencial mostrada en la ecuación 22.

Ecuación 22. Ecuación diferencial del balance de calor

$$\frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{d^2T}{dr^2} - \frac{2k_{app}}{m_u k_p m} (T - T_f) = 0$$

Fuente. HAHN, M. H., ROBINSON, H. E., y FLYNN, D. R. Robinson line-heat-source guarded hot plate apparatus. In Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations. ASTM International. 1974.

Ecuación 23. Ecuación Diferencial del balance de calor w^2

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1dT}{rdr} - w^2 \Delta T = 0$$

Fuente. HAHN, M. H., ROBINSON, H. E., y FLYNN, D. R. Robinson line-heat-source guarded hot plate apparatus. In Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations. ASTM International. 1974.

La ecuación 23 relaciona la temperatura y el radio del plato caliente con una constante $w^2 = \frac{2k_s}{mk_p m_u}$ donde k_p es la conductividad térmica del material, k_s es la conductividad térmica de las muestras, m es el espesor de la placa y m_u es el espesor de la muestra.

Esta constante permite relacionar la conductividad del material y la conductividad de las muestras, al ser alta la conductividad del material respecto a la conductividad de las muestras, w^2 tiende a ser pequeño. Para simplificar el análisis puede suponerse en la ecuación 22, que $T_f = 0$ y que la temperatura puede expresarse como una temperatura promedio (teniendo en cuenta que las variaciones de temperatura, en un material de conductividad alta, son pequeñas en comparación con su magnitud) el término $w\Delta T$ puede expresarse en términos de una constante

$$E = \frac{k_s \bar{T}}{2mk_p m_u}.$$

Ecuación 24. Aproximación matemática de la ecuación diferencial del balance de calor

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} - 4E = 0$$

Fuente. HAHN, M. H., ROBINSON, H. E., y FLYNN, D. R. Robinson line-heat-source guarded hot plate apparatus. In Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations. ASTM International. 1974.

Una vez definida la ecuación 24 se procede a su solución la cual permite relacionar las distribuciones de temperatura a lo largo del Sistema GHPA.

Ecuación 25. Aproximación matemática de la ecuación diferencial estándar

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = 4E$$

Se expresa como una ecuación lineal homogénea y se procede a su solución, partiendo de la ecuación 26 como se muestra a continuación.

Ecuación 26. Relación auxiliar

$$\begin{aligned} \bar{s}^2 + \frac{1}{r} \bar{s} &= 0 \\ \bar{s} \left(\bar{s} + \frac{1}{r} \right) &= 0 \end{aligned}$$

Donde, \bar{s} representa una sustitución de parámetros y se soluciona como se muestra en la.

Ecuación 27. Solución de la relación auxiliar

$$\begin{aligned} \bar{s}_1 &= 0 \\ \bar{s}_2 &= -\frac{1}{r} \end{aligned}$$

Una vez se tienen las soluciones de la relación auxiliar se determina la solución combinada de la ecuación diferencial.

Ecuación 28. Solución general de ecuación diferencial

$$y_c = C_1 + C_2 e^{-\frac{1}{r}t}$$

Donde y_c representa la solución combinada de la ecuación diferencial y C_1, C_2 representan constantes, de igual manera se calculan los wronskianos por medio de los determinantes.

Ecuación 29. Determinante \bar{w}

$$\bar{w} = \begin{bmatrix} 1 & e^{-\frac{1}{r}} \\ 0 & -\frac{1}{r}e^{-\frac{1}{r}} \end{bmatrix} = -\frac{1}{r}e^{-\frac{1}{r}}$$

Ecuación 30. Determinante \bar{w}_1

$$\bar{w}_1 = \begin{bmatrix} 0 & e^{-\frac{1}{r}} \\ 4E & -\frac{1}{r}e^{-\frac{1}{r}} \end{bmatrix} = -4Ee^{-\frac{1}{r}}$$

Ecuación 31. Determinante \bar{w}_2

$$\bar{w}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 4E \end{bmatrix} = 4E$$

Donde $\bar{w}, \bar{w}_1, \bar{w}_2$ son los determinantes. Se realiza una sustitución de parámetros para y encontrar la solución particular de la ecuación diferencial después de realizar una integración.

Ecuación 32. Funciones μ_1, μ_2

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 4Er \ln r \\ \mu_2 &= 4Er \end{aligned}$$

Donde μ_1, μ_2 son funciones que se obtienen a partir de la integración de los determinantes.

Ecuación 33. Integración de determinantes.

$$\mu_1 = \int \frac{\bar{w}_1}{\bar{w}}$$

$$\mu_2 = \int \frac{\bar{w}_2}{\bar{w}}$$

Se establece la ecuación particular en términos de las funciones μ_1, μ_2 y los wronskianos y_1, y_2

Ecuación 34. Definición de la solución particular de la ecuación diferencial

$$y_p = \mu_1 y_1 + \mu_2 y_2$$

Se plantea la integral, por el método de sustitución como se muestra en la Ecuación 35.

Ecuación 35. Solución de la integral por sustitución.

$$\mu_1(r) = \int \mu_1(r) \partial r \rightarrow \mu_1(r) = -4E \int r \ln r \partial r$$

$$\theta = \ln r$$

$$\partial \theta = \frac{\partial r}{r}$$

$$\partial r = e^\theta \partial \theta$$

$$\int r \ln r \partial r = \int e^\theta \theta e^\theta \partial \theta = \int \theta e^{2\theta} \partial \theta$$

$$\int \theta e^{2\theta} \partial \theta = \frac{e^{2\theta}}{2} \left(\frac{\theta}{2^0} - \frac{1}{2^1} \right) + C$$

$$\int \theta e^{2\theta} \partial \theta = \frac{e^{2\theta}}{2} \left(\theta - \frac{1}{2} \right) + C \rightarrow \frac{r^2}{2} \left(\ln r - \frac{1}{2} \right)$$

Luego de dar solución a la integral se encuentra la solución particular.

Ecuación 36. Solución particular de la ecuación diferencial

$$y_p = \frac{r^2}{2} \left(\ln r - \frac{1}{2} \right) + 2Er^2 \ln r$$

Finalmente la solución de la ecuación diferencial se muestra en la Ecuación 37 a continuación.

Ecuación 37. Solución de la ecuación diferencial

$$y = y_c + y_p$$

$$y = C_1 + C_2 \ln r + \frac{r^2}{2} \left(\ln r - \frac{1}{2} \right) + 2Er^2 \ln r$$

La Ecuación 37 permite hacer una relación de la distribución de temperaturas del sistema con las ubicaciones de los calentadores, el espaciamento entre la sección de medición y la sección de protección, y la frontera del sistema. Se tuvieron en cuenta las siguientes suposiciones:

El perfil de temperatura resultante del sistema se aprecia en la parte superior de la figura 10 y puede ser expresado como $T_g = T_2 = T_3$ y el espaciamento como $T_e = T_4$ en el borde exterior de la guarda.

Una vez definidos T_g , T_e y las siguientes consideraciones:

- Una continuidad de la temperatura en toda la placa.
- El espaciamento es de grosor insignificante.
- El gradiente de temperatura radial en el espaciamento desaparece, lo que corresponde a un flujo de calor radial igual a cero.

Es posible sustituir estas condiciones en la ECUACIÓN 37. El resultado se presenta en la ecuación 25, ecuación 26 y ecuación 27. Estas expresiones matemáticas permiten describir la temperatura en cualquier radio como una relación de temperatura en el espaciamento, esto se debe a la facilidad al medir la temperatura sobre la sección de la guarda y permite relacionar otras temperaturas de interés, en especial la temperatura superficial de la sección de medición⁵⁸.

Ecuación 38. Distribución de temperatura T_1

$$\frac{T_1}{T_g} = 1 - \frac{Eb^2}{T_g} \left(1 - \frac{r^2}{b^2} + 2 \ln \frac{a}{b} \right) \quad 0 \leq r \leq a$$

Fuente. HAHN, M. H., ROBINSON, H. E., y FLYNN, D. R. Robinson line-heat-source guarded hot plate apparatus. In Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations. ASTM International. 1974.

⁵⁸ Ibid. p. 171.

Ecuación 39. Distribución de temperatura T_2, T_3

$$\frac{T_2}{T_g} = \frac{T_3}{T_g} = 1 - \frac{Eb^2}{T_g} \left(1 - \frac{r^2}{b^2} + 2 \ln \frac{r}{b}\right) \quad a \leq r \leq c$$

Fuente. HAHN, M. H., ROBINSON, H. E., y FLYNN, D. R. Robinson line-heat-source guarded hot plate apparatus. In Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations. ASTM International. 1974.

Ecuación 40. Distribución de temperatura T_4

$$\frac{T_4}{T_g} = 1 + \frac{Te - T_g}{T_g} - \frac{Ed^2}{T_g} \left(1 - \frac{r^2}{d^2}\right) - \left(\frac{Te - T_g}{T_g} - \frac{Ed^2}{T_g} \left(1 - \frac{b^2}{d^2}\right) - \frac{2Eb^2}{T_g} \ln \frac{b}{c}\right) \frac{\ln \frac{r}{d}}{\ln \frac{c}{d}} \quad c \leq r \leq d$$

Fuente. HAHN, M. H., ROBINSON, H. E., y FLYNN, D. R. Robinson line-heat-source guarded hot plate apparatus. In Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations. ASTM International. 1974.

Donde se realizan las siguientes consideraciones

- \bar{T} = Temperatura superficial promedio de la sección de medición.
- $E \equiv \frac{k_s \bar{T}}{2mk_p L}$
- T = Distribución de temperatura.

Como fue demostrado por Hahn⁵⁹ si se toma $\frac{b}{a} = \sqrt{2}$, la temperatura promedio de la sección de medición es igual a la temperatura en el espaciamiento, lo que evita utilizar sensores de temperatura en el interior de la sección de medición resultando conveniente en términos experimentales.

⁵⁹ Ibid. p.173.

2. DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL SISTEMA DE MEDICION GHPA

(Guarded hot plate apparatus).

De acuerdo con el análisis realizado anteriormente mediante el cual se seleccionó la ASTM C 177 como el método para la determinación de la conductividad térmica, se debe tener en cuenta los requerimientos técnicos del sistema de medición GHPA, estos parámetros rigen el diseño y la construcción del sistema de medición.

El GHPA es un sistema de medición primario de conductividad térmica que consta de tres platos, que deben ser construidos en un material altamente conductivo, con dimensiones específicas tanto para el plato caliente, los platos fríos como para las muestras de aislante que van a ser analizadas.

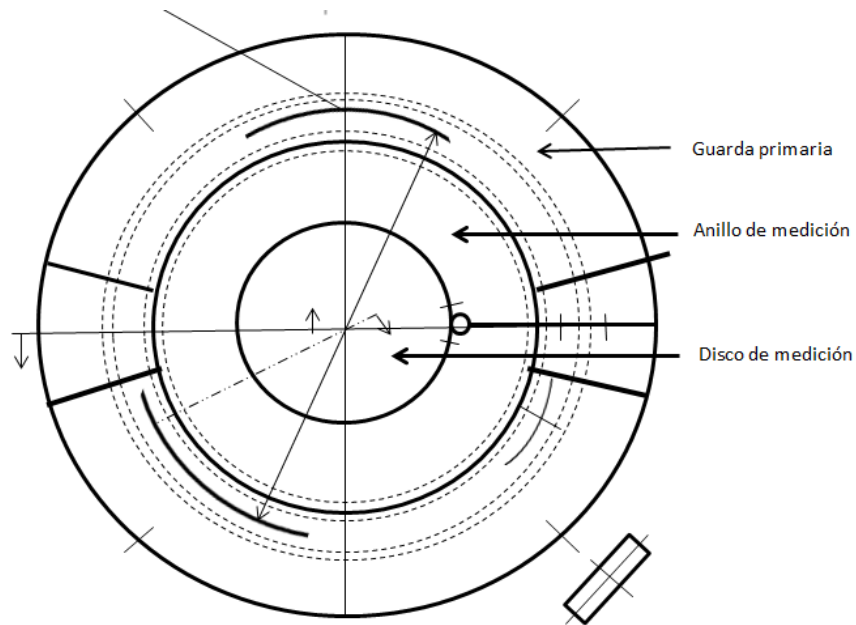
Es de gran importancia tener en cuenta que este sistema lo constituyen elementos calefactores los cuales permiten generar el flujo de calor requerido en el plato caliente, al igual que sensores que faciliten el control de la temperatura en los tres platos.

2.1 PLATOS

2.1.1 Plato caliente. El plato caliente se compone de dos secciones; el área de medición y la guarda primaria (plato central en la figura 11). La distancia entre la guarda primaria y el área de medición se denomina espaciamiento. El área de medición está compuesta de un anillo de medición y el disco de medición.

El plato es calentado a través de resistencias eléctricas en las cuales el flujo de calor se transmite radialmente en el plato y se transfiere axialmente a través de las muestras de medición. El calefactor es ubicado de tal forma que la temperatura promedio en el área de medición sea igual a la temperatura del espaciamiento. La potencia suministrada al sistema es medida a través de la corriente que pasa por la resistencia calefactora y la tensión a través del circuito. La ilustración del plato se encuentra en la figura 12.

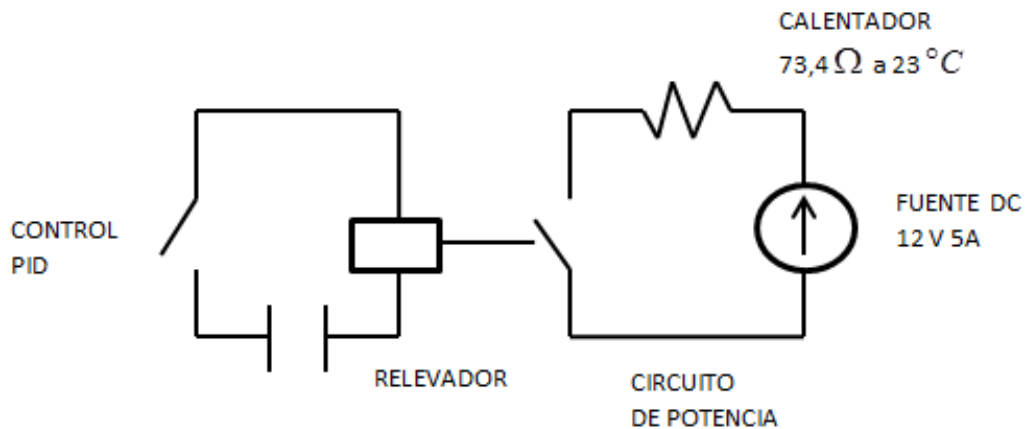
Figura 12. Plato caliente



Fuente. HAHN, M. H., ROBINSON, H. E., y FLYNN, D. R. Robinson line-heat-source guarded hot plate apparatus. In Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations. ASTM International. 1974.

El calefactor es alimentado con una fuente de corriente directa que opera a 5 A y 12 V. La cantidad de energía que entra al sistema es controlada a través de un controlador de temperatura PID conectado en serie con un relevador electromecánico de 12 V como se muestra en la figura 13.

Figura 13. Esquema de sistema de control



Fuente. Elaboración propia.

El controlador de la temperatura del plato caliente es marca Watlow tipo SD basado en microprocesador. La precisión para la temperatura es de 0.1 %. Los parámetros del controlador fueron configurados a través de la función auto-ajuste.

Para asegurar que el flujo de calor se da solamente en la dirección axial, la diferencia de temperatura radial entre el área de medición y la guarda primaria es monitoreada a través de una termopila cuyas juntas están instaladas en el espaciamento sucesivamente entre el anillo de medición y la guarda primaria como se ve en la figura 14, la ubicación específica de las juntas de la termopila se encuentra detalladas en el plano del disco caliente en el anexo D.

Figura 14. Ubicación de la termopila



Fuente. Elaboración propia

El sistema de control para la diferencia de temperatura en la guarda, conocida como desbalanceo, es similar al presentado en la figura 13. En este caso la tensión de salida de la termopila, cuando el sistema está en condiciones isotérmicas, es ajustada como valor objetivo, de tal forma que el controlador envía la señal para calentamiento cuando el controlador está por debajo del valor objetivo. Se usó una fuente de corriente directa igual a la del sistema de control de la temperatura del plato caliente, un controlador genérico de referencia REX-C100 con exactitud de 0.5% y un relevador de estado sólido de 3 V a 24 V.

2.1.2 Platos fríos. Los platos fríos fueron contruidos con el mismo material que los platos calientes. El diseño interior se realizó con forma de espiral para favorecer la transferencia de calor entre el fluido y las placas como se observa en la figura 15. La temperatura de los platos fríos es controlada con un baño Tampson modelo TK20 recirculando agua a $8\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$. En el anexo F se presenta el plano detallado de los platos.

Figura 15. Plato frío



Fuente. Elaboración propia

2.2 MATERIAL Y DIMENSIONES

Teniendo en cuenta la facilidad para la fabricación, la estabilidad térmica, una alta conductividad que facilite la uniformidad térmica de la superficie de los platos y una capacidad calorífica baja que permita una respuesta rápida del equipo se seleccionó aluminio 6061 para la construcción de los platos (platos fríos y plato caliente). En la tabla 4 se presentan algunas propiedades físicas del aluminio 6061.

Tabla 3. Propiedades del aluminio 6061.

Densidad, g/cm ³	2.70
Temperatura de fusión, °C	582
Coefficiente de expansión térmica lineal, K ⁻¹	2.36x10 ⁻⁶
Calor específico J/(kg ·K) (0-100°C)	896
Conductividad térmica a 25 °C, W/(m·K)	180

Fuente: AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. International, "Properties of wrought aluminum and aluminum alloys"

De acuerdo al análisis de la sección 1.7 y las recomendaciones ASTM⁶⁰, fue determinada la geometría y las dimensiones de los plato caliente y de los platos fríos⁶¹. En la tabla 5 y en el anexo D se presentan las dimensiones del plato caliente teniendo en cuenta que este cuenta con dos secciones que lo conforman. En la tabla 6 y en el anexo F se presentan las dimensiones de los platos fríos.

Tabla 4. Dimensiones plato caliente.

Diámetro del plato caliente,	304.80
Mm	
Diámetro del plato de medición,	151.58
Mm	
Diámetro Interno guarda	176.21
primaria, mm	
Diámetro disco de medición,	57.21
Mm	

Fuente. Elaboración propia

Tabla 5. Dimensiones platos fríos

Diámetro de la plato frío, mm	304.80
Espesor del plato frío,	25.40
Mm	

Fuente. Elaboración propia

Las dimensiones de los platos fríos guardan relación con las dimensiones del plato caliente y del material bajo prueba (muestra) debido a la configuración geométrica del sistema de medición.

Respecto al espaciamiento se escogió una geometría en forma de diamante para minimizar el flujo de calor lateral⁶². Para sostener la guarda primaria y el plato de medición se usaron 3 pasadores ajustables de 1.59 mm de diámetro distribuidos equidistantemente, que permiten centrar el plato de medición con respecto a la guarda primaria. En el anexo D se presentan los detalles de los pasadores y el espaciamiento.

⁶⁰ ZARR, Op. Cit., p. 43.

⁶¹ AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS C1043-16, Standard Practice for Guarded-Hot-Plate. Design Using Circular Line Heat Sources. West Conshohocken, PA, 2016.

⁶²HAHN, M, Op. Cit, p. 5.

2.3 CRITERIOS DE DISEÑO

El diámetro de los materiales bajo prueba (muestra) fue seleccionado de 304.8 mm \pm 5 mm de acuerdo a las especificaciones presentadas en "Line-Heat- Source Guarded-Hot- Plate Apparatus"⁶³.

El espesor máximo del material bajo prueba (muestra) depende de las condiciones de frontera en los bordes del material y la temperatura ambiental. Esta influencia puede estimarse analíticamente y en general se recomienda que el espesor máximo sea la tercera parte de la máxima dimensión lineal del área de medición, de tal forma que las pérdidas de calor en los bordes sean aceptables (<0.5 %)⁶⁴.

Para el caso particular del área de medición con un diámetro de 153.2 mm el máximo espesor para el material bajo prueba (muestra) será de 51 mm. El espesor mínimo está determinado por la capacidad que se tenga para medir la planitud del material bajo prueba. Si los materiales tienen superficies no uniformes se producirán resistencias térmicas por la presencia de aire entre los platos de medición y el material. Se recomienda que el espesor sea al menos diez veces el espesor del espaciamiento entre el anillo de medición y el plato de aislamiento⁶⁵. Para el sistema construido el mínimo espesor es de 10 mm.

El sistema de medición fue construido con fuentes que generan máximo 75 W por lo que la máxima conductividad que puede medirse es de aproximadamente 2 W/(m·K).

Debido a que no se tiene control sobre la fuerza aplicada para unir los platos de medición y el material bajo prueba (muestra) el sistema solo debe ser usado para muestras rígidas.

Los sensores de temperatura fueron calibrados entre 10 °C y 40 °C para cubrir temperaturas medias que estén cercanas a las condiciones ambientales. Por lo anterior el sistema inicialmente está limitado para temperaturas del plato frío entre 10 °C y 15 °C y temperaturas en el plato caliente entre 25 °C y 45 °C.

La incertidumbre objetivo del sistema de medición es de 5.7%.

⁶³ ZARR, Op. Cit., p. 6.

⁶⁴ BANKVALL, Lars. Mechanisms of Heat Transfer in Permeable Insulation and their Investigation in a Special Guarded-Hot-Plate. Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations, ASTM International, 1974.

⁶⁵ ASTM C177. Op. cit., p. 9

2.4 ELEMENTOS CALEFACTORES

Los elementos calefactores son los encargados de generar la energía para mantener el plato caliente en un valor determinado de temperatura.

2.4.1 Área de medición. El elemento calefactor seleccionado fue de tipo cartucho con forma cilíndrica de 28,56 mm de largo por 6.35 mm de ancho y fue construido con alambre de ferroníquel con espesor de 0.278 mm y recubierto con cerámica de alúmina de alta pureza. La resistencia eléctrica del calentador a 20 °C es de 73.4 Ω . Los cables de conexión de para el calentador fueron AWG 14 de tal forma que tenga una resistividad menor que el elemento calefactor.

El calefactor fue ubicado en el borde del disco de medición de acuerdo al análisis de la sección 1.7.

2.4.2. Guarda. El elemento calefactor de la guarda primaria es de similares características al del área de medición. Sus dimensiones son de 50.80 mm de largo por 6.35 mm de ancho y tiene una resistencia eléctrica a 20 °C de 65.6 Ω .

Fue localizado en el mismo ángulo del elemento calefactor del área de medición a una profundidad de 63.5 mm desde el borde de la guarda.

2.5 SENSORES DE TEMPERATURA

2.5.1 Termómetros. Actualmente los termómetros de resistencia y los termopares son los sensores más usados, debido a los niveles de incertidumbres que pueden ofrecer y su facilidad en el acoplamiento con otros sistemas de medición. En general para temperaturas moderadas los termómetros de resistencia ofrecen mejor desempeño que los termopares, sin embargo, los termopares son más versátiles debido a su facilidad de ensamble y operación.

Teniendo en cuenta el espesor de los platos, el diámetro del elemento sensor y el intervalo de operación se seleccionaron termopares tipo K para los tres platos, los cuales permiten establecer los valores de temperatura. Estos termopares fueron calibrados en el laboratorio de temperatura y humedad del INM y son trazables al SI. En el anexo A se presentan los certificados de calibración.

El termopar para el plato caliente se ubicó en el borde del plato de medición, mientras que los termopares de los platos fríos se ubicaron en el centro de los platos. Para el plato frío superior se usó como indicador de temperatura el calibrador de procesos marca Fluke modelo 744 y para el plato frío inferior se usó el nano voltímetro marca Keithley modelo 181. A continuación, se presentan las especificaciones para cada uno.

Tabla 6. Especificación calibrador de procesos Fluke 744.

Termopares	
Precisión de la medida:	E:0,3 °C
	N:0,5 °C
	J:0,3 °C
	L:0,3 °C
	K:0,3 °C
	T:0,3 °C
	U:0,3 °C
	B:0,9 °C
	R:1,0 °C
	S:0,9 °C
C:0,6 °C	

Fuente: Fluke corporation. Especificación calibrador de procesos fluke 744. 2018. Disponible en: <http://www.fluke.com/fluke/mxes/calibradores-de-procesos/calibradores-multifuncion/fluke-744-hart.htm?Pid=56124>

Tabla 7. Especificaciones Keithley 181.

DC volts			
Rango	Resolución $5\frac{1}{2}$ Digital	Exactitud \pm (%rdg + counts)	
		24 Hr, 22°C-24°C	1 Year, 18°C- 28°C
2 mV	10 mV	$6.00 \times 10^{-3} + 5^*$	$1.50 \times 10^{-2} + 5^*$
20 mV	100 mV	$6.00 \times 10^{-3} + 2^*$	$1.50 \times 10^{-2} + 2^*$
200 mV	1 μ V	$6.00 \times 10^{-3} + 2$	$1.50 \times 10^{-2} + 2$
2 V	10 μ V	$4.00 \times 10^{-3} + 1.5$	$7.00 \times 10^{-3} + 2$
20 V	100 μ V	$4.00 \times 10^{-3} + 1.5$	$1.00 \times 10^{-2} + 2$
200 V	1 mV	$4.00 \times 10^{-3} + 1.5$	$1.00 \times 10^{-2} + 2$
1000 V	10 mV	$5.00 \times 10^{-3} + 1.5$	$1.00 \times 10^{-2} + 2$

Fuente: Tektronix, Inc. Especificaciones keithley 181. 2018. Disponible en: <https://www.tek.com/manual/keithley-model-181-digital-nanovoltmeter-service-manual-30816b>

2.5.2. Termopila. La termopila encargada de convertir la energía térmica en energía eléctrica se fabricó con termoelementos de termopar tipo K formando 6 juntas espaciadas equidistantemente en ángulos de 60 °C. Para un termopar tipo K a 20 °C el coeficiente de Seebeck es del orden de 40 (μ V/°C)⁶⁶, lo que para 6 juntas representa 240 (μ V/°C). Teniendo en cuenta que la lectura de la tensión de

⁶⁶ BURNS, George. et al. "Temperature-electromotive force reference functions and tables for the letter-designated thermocouple types based on the ITS-90," NIST Spec. Publ. Monogr. 175, 1993, vol. 93, p. 630.

la termopila fue alimentada directamente al controlador REX C-100 la resolución de la diferencia de temperatura es del orden de 0.2 °C.

2.6 MEDICIÓN DE FLUJO DE CALOR

El flujo de calor es estimado a través de la medición de corriente a través del elemento calefactor y la tensión del circuito de la figura 13. La corriente y la tensión fueron medidas con dos multímetros de 6.5 dígitos marca Fluke Modelo 8846 A en el anexo A se presentan los certificados de calibración. Las mediciones son trazables al SI a través del Laboratorio de Corriente Continua y Alterna del INM. Para la medición de corriente se usó el multímetro con serie 9568003 y para tensión el multímetro con serie 2497009. Las especificaciones se presentan en la tabla 9.

Tabla 8.Especificaciones multímetro fluke 8846A.

Resolución	6.5 Digitas	
V DC	Rango	100 mV to 1000 V
	Max.	100 mv
	Resolución	
	Precisión	8846A: $2.40 \times 10^{-3} + 5.00 \times 10^{-4}$ (% medición + % of rango)
A DC	Rango	100 μ A to 10 A
	Max.	100 ma
	Resolución	
	Precisión	$5.00 \times 10^{-2} + 5.00 \times 10^{-3}$ (% medición + % of rango)

Fuente: Fluke corporation. Especificaciones multímetro Fluke 8846⁹. 2018. Disponible en: <http://en-us.fluke.com/products/bench-instruments/8845a-8846a-6-5-digit-precision-multimeters.html#techspecs>

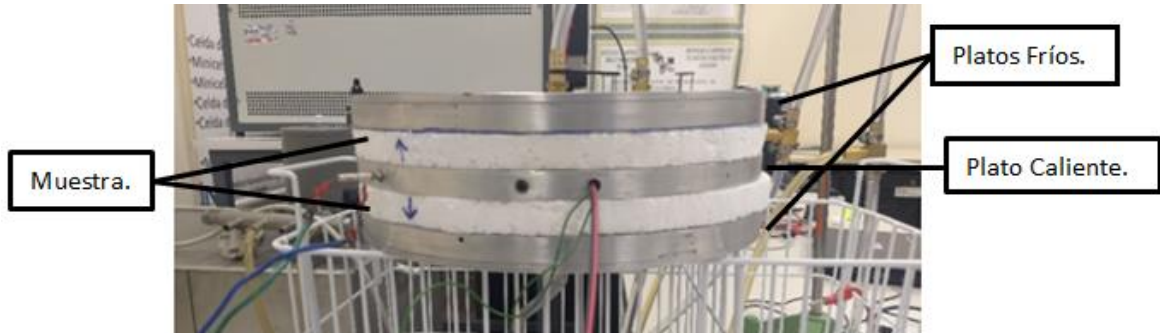
2.7 CONDICIONES AMBIENTALES

Las pruebas fueron realizadas en el laboratorio de temperatura y humedad del INM. Las condiciones ambientales durante la ejecución de los ensayos se mantuvieron entre 22 °C \pm 3 °C y 50 %HR \pm 15 %HR.

2.8 GHPA UTILIZADO EN EL PROYECTO

Como resultado del diseño, se construyó el sistema que a continuación se expone, el cual ejemplifica el equipo de medición con materiales bajo prueba (muestra).

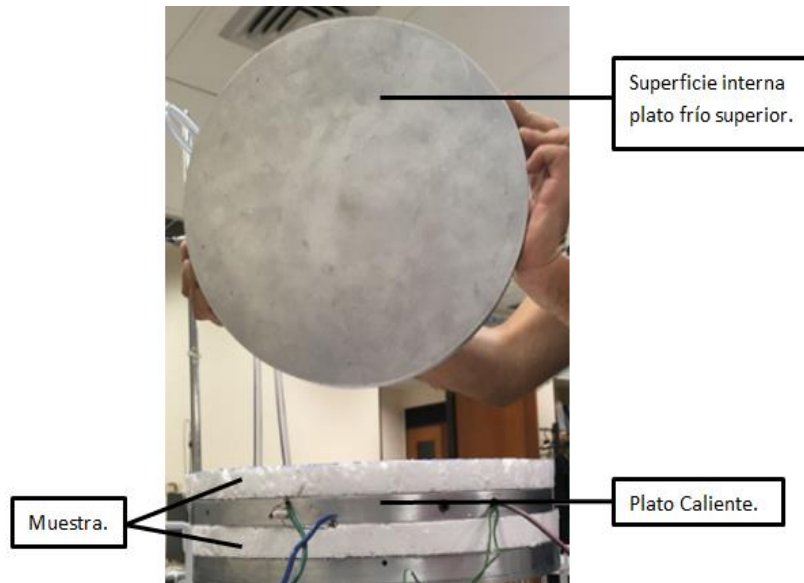
Figura 16. GHPA construido



Fuente. Elaboración propia

La figura 16 muestra de forma general el equipo utilizado durante la experimentación de este proyecto, como se ha mencionado anteriormente se encuentra compuesto por dos platos fríos los cuales encierran las dos muestras del mismo material y entre las muestras se encuentra el plato caliente.

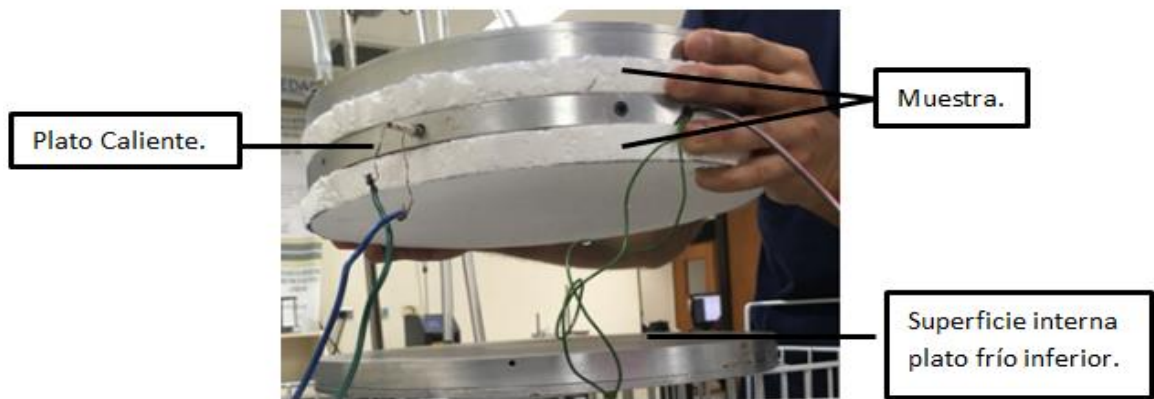
Figura 17. Plato frio superior.



Fuente. Elaboración propia

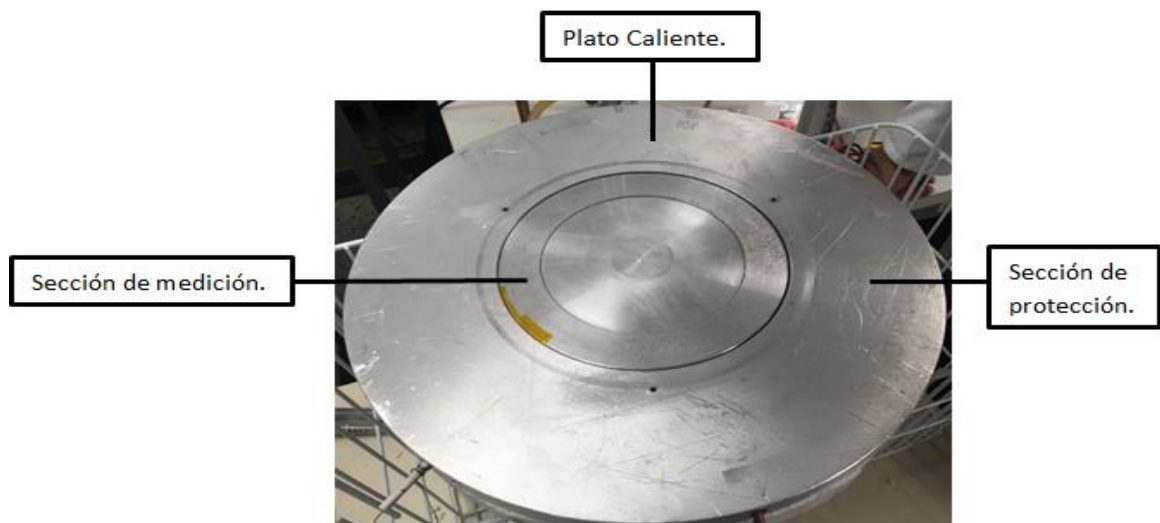
La figura 17 y figura 18 muestran la superficie en contacto del plato frío superior con la primera muestra y la superficie en contacto del plato frio inferior en contacto con la segunda muestra respectivamente. Cabe resaltar que en el interior de los platos fríos circula agua, la cual los mantiene refrigerados.

Figura 18 Plato frío inferior.



Fuente. Elaboración propia

Figura 19. Plato caliente con secciones.



Fuente. Elaboración propia

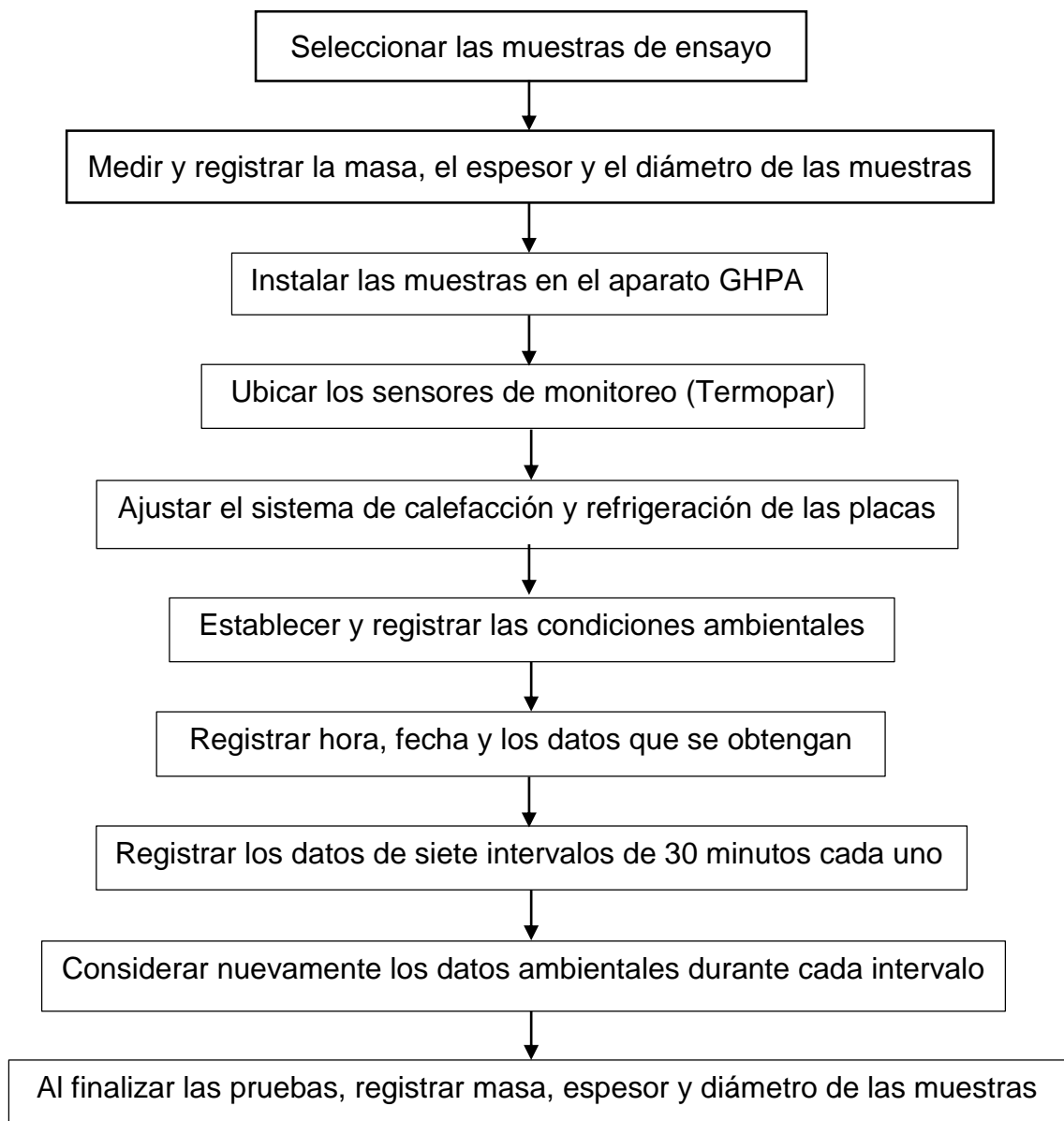
La figura 19 muestra el plato caliente dividido en secciones, sección de medición y sección de protección, internamente en este plato se ubican los elementos calefactores al igual que el termopar permitiendo mantener caliente el plato y su respectivo control.

3. DESARROLLO DEL PROYECTO

Debido a que el problema a solucionar de este proyecto es la falta de trazabilidad en las mediciones de la conductividad térmica, en el siguiente capítulo se tratará la experimentación y recolección de datos para cumplir dicho objetivo, de igual forma será explicada realizando un paso a paso de la metodología utilizada, con los cálculos pertinentes y el análisis de resultados correspondiente.

3.1 PROCEDIMIENTO

Las pruebas a nivel laboratorio se llevaron a cabo de manera rigurosa siguiendo el procedimiento presentado a continuación:



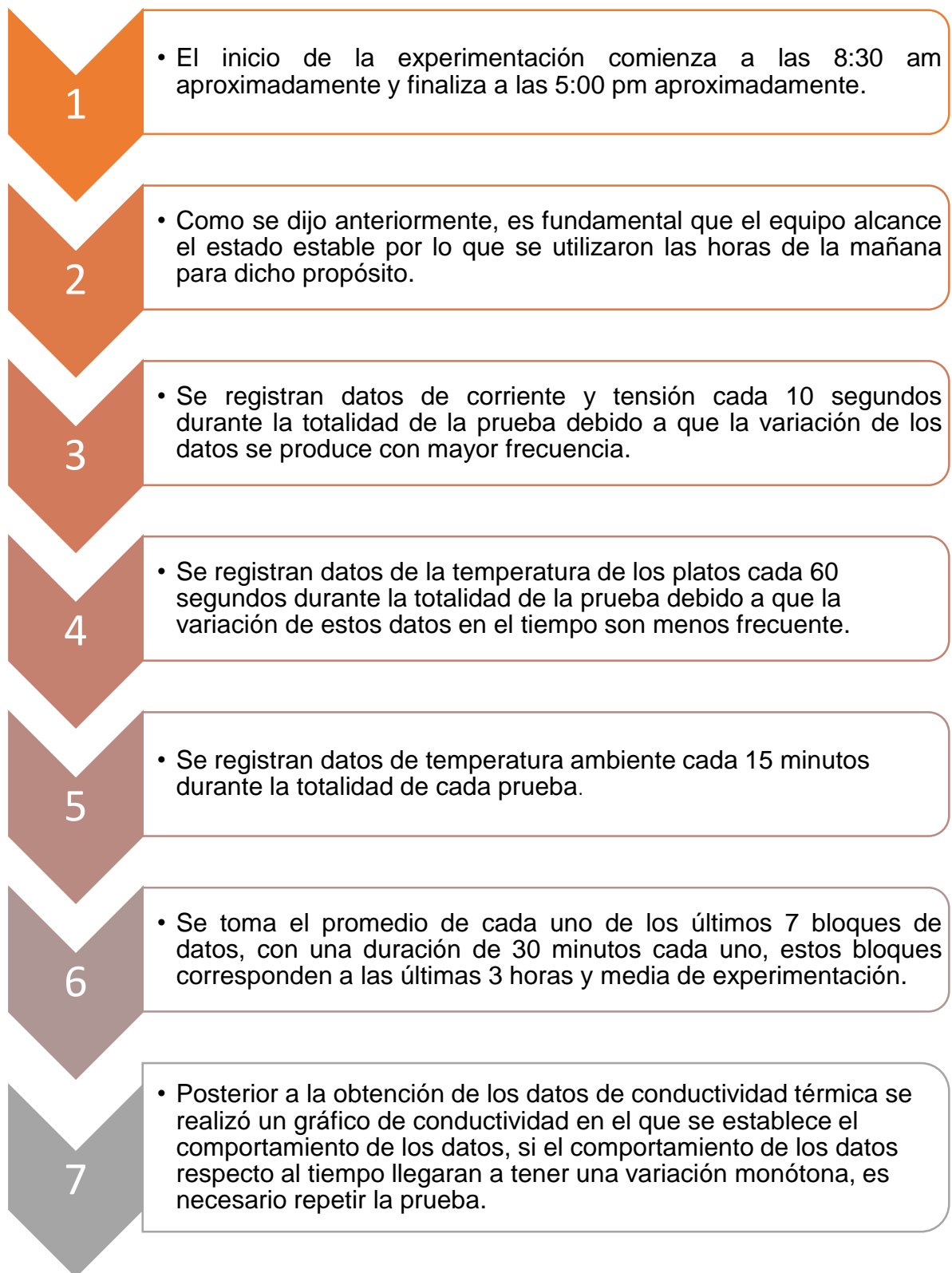
3.2 DATOS OBTENIDOS

La experimentación está compuesta por 15 pruebas. Estas se componen de 11 para verificar la reproducibilidad del método, las cuales se realizaron con poliestireno expandido, y 4 más para calcular la incertidumbre expandida y el error normalizado con el material de referencia que en el caso particular es fibra de vidrio. Las primeras 11 pruebas se conforman de 10 iniciales que se establecieron con un análisis estadístico usando como factor al operario y evaluando dos niveles, las cuales fueron suficientes para hacer una estimación de la desviación estándar, y una extra para corregir la primera experimentación que debido a la conexión incorrecta de los sensores de temperatura tuvo que ser corregida. Cada prueba con un tiempo estimado de realización de un día, con el propósito de garantizar que el sistema de medición alcanzaba el estado estable.

Durante todas las partes experimentales se obtuvieron mega datos, distribuidos entre las variables consideradas, entre las que se encuentran: la temperatura del plato frío superior, la temperatura del plato caliente, la temperatura del plato frío inferior, la temperatura ambiente del laboratorio, la tensión y la corriente del equipo.

Los datos totales obtenidos para cada una de las 15 pruebas se encuentran consignados en el anexo en medio magnético.

Respecto a los datos utilizados para determinar la conductividad térmica fueron adquiridos y seleccionados bajo los siguientes parámetros:



En el anexo B se muestran los datos obtenidos de tensión, corriente, temperaturas de los platos y temperatura ambiente para el poliestireno expandido y en el anexo C para la fibra de vidrio, durante la totalidad de la experimentación. Sin embargo, en la siguiente tabla se muestra un ejemplo para el primer material (Poliestireno Expandido). Las condiciones de operación en el laboratorio del INM fueron de 50% HR \pm 15% HR \pm y 22° C \pm 3°C y el equipo utilizado es el visto en las figuras 16.

Tabla 9. Ejemplo de datos obtenidos durante la experimentación para la Fibra de Vidrio en la Prueba 14.

Bloq	Fecha	Hora Inicio	Hora Final	I , A	E , mV	T_{c_1} , °C	T_{c_2} , °C	T_h , °C	T_a , °C
1	26/04/18	13:30:31	14:00:22	0.11	11.48	11.60	11.50	30.00	23.40
2	26/04/18	14:00:32	14:30:24	0.10	11.47	11.60	11.50	29.90	23.40
3	26/04/18	14:30:34	15:00:26	0.10	11.48	11.60	11.60	29.90	23.50
4	26/04/18	15:00:36	15:30:27	0.09	11.47	11.60	11.50	29.90	23.70
5	26/04/18	15:30:37	16:00:29	0.05	11.48	11.60	11.60	30.00	23.70
6	26/04/18	16:00:39	16:30:31	0.09	11.48	11.60	11.60	29.90	23.60
7	26/04/18	16:30:41	17:00:32	0.09	11.48	11.60	11.60	29.90	23.60

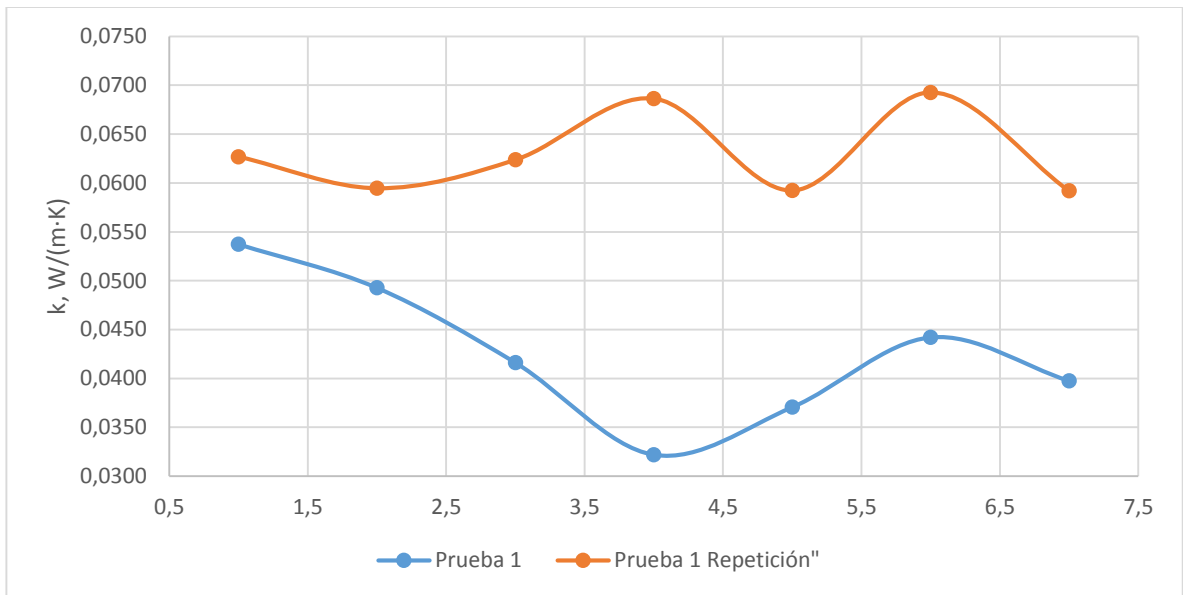
*La escala temporal de los datos obtenidos es cada 30 minutos.

Fuente. Elaboración propia

En la tabla anterior, T_h hace referencia a la temperatura registrada para el plato caliente, mientras que T_{c_1} e T_{c_2} indican la temperatura del plato frío superior y el plato frío inferior respectivamente según la figura 16. Además, aquí se registra el tiempo de duración de las pruebas y la hora de cada una, los datos de intensidad, corriente y la temperatura ambiente del laboratorio.

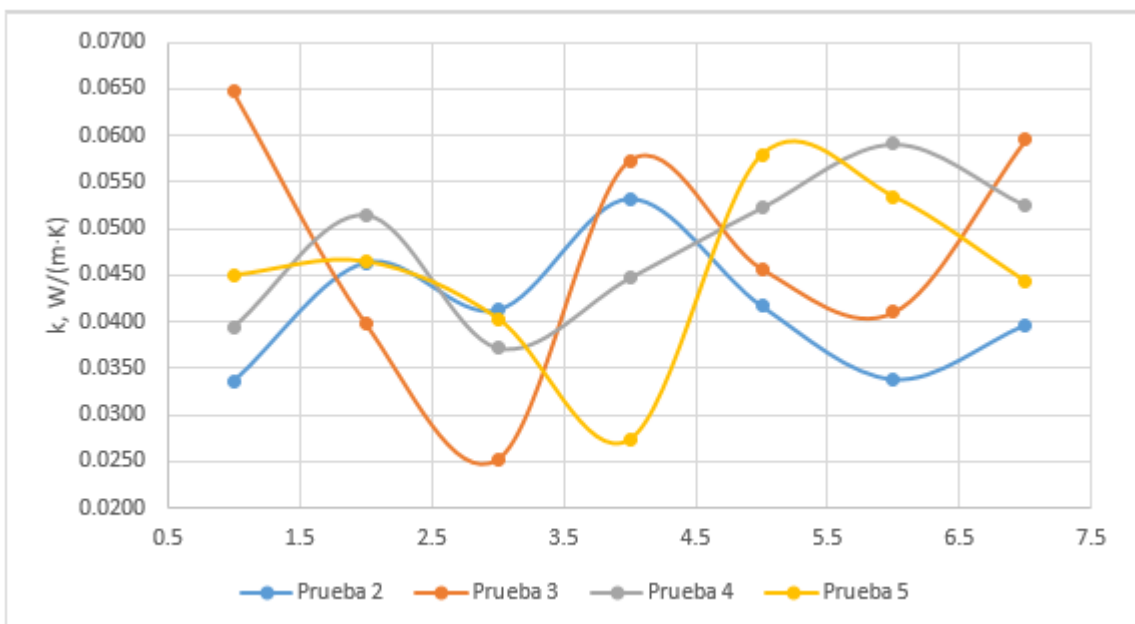
En las gráficas 3, gráfica 4, gráfica 5 y gráfica 6 se pueden ver los resultados de la conductividad térmica en cada prueba de los diferentes materiales utilizados.

Gráfica 3. Conductividad térmica del Poliestireno Expandido de las Pruebas 1 y 1 repetición.



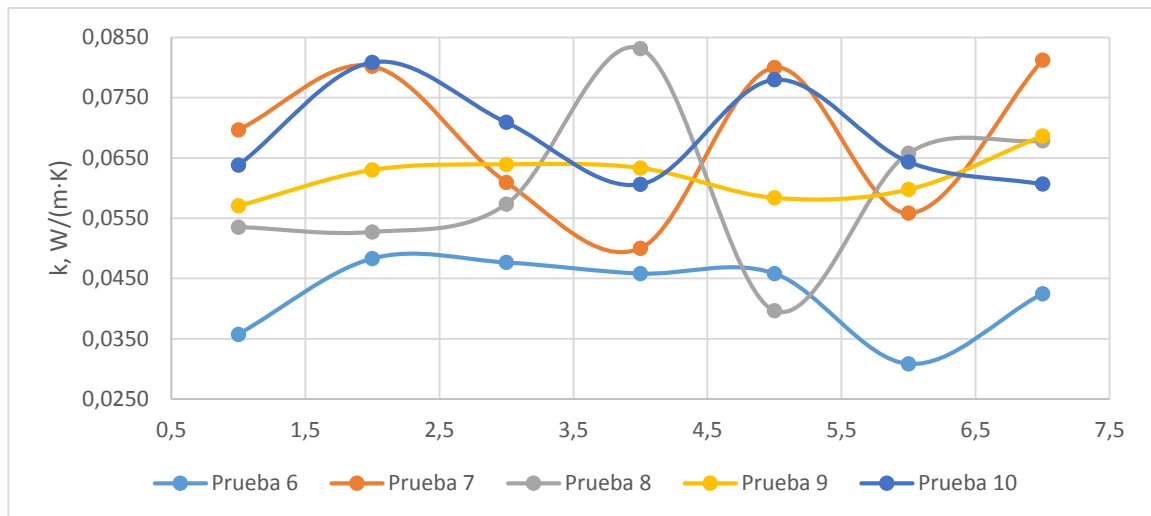
Fuente. Elaboración propia

Gráfica 4. Conductividad térmica del Poliestireno Expandido de las Pruebas 2 a la 5.



Fuente. Elaboración propia

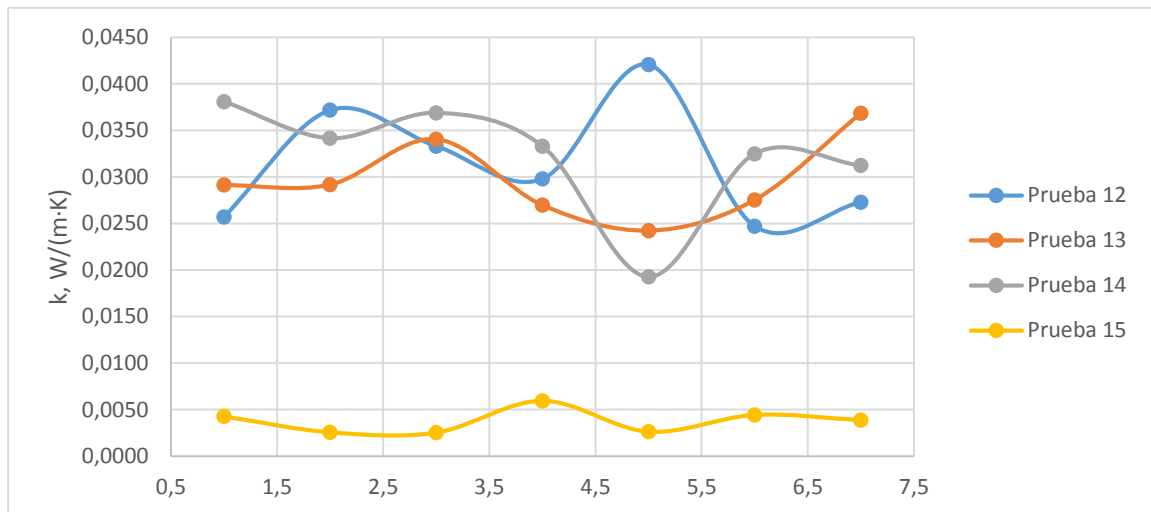
Gráfica 5. Conductividad térmica del Poliestireno Expandido de las Pruebas 6 a la 10.



Fuente. Elaboración propia

Se dividieron las pruebas en tres gráficas diferentes con el fin de poder observar con más detalle el comportamiento de la conductividad térmica en cada prueba.

Gráfica 6. Conductividad térmica de la Fibra de Vidrio.



Fuente. Elaboración propia

Las anteriores gráficas demuestran que los datos de conductividad térmica de cada prueba no han tenido una tendencia monótona, a excepción de la prueba 1, sin embargo, esta fue realizada nuevamente y se ve reflejada en la prueba 11 (Prueba 1 repetición).

Durante la experimentación de la prueba número 15, los valores medidos de conductividad térmica tuvieron una incertidumbre expandida menor, es decir, 1%

frente a 5.7%, lo cual indicaría que dichos datos de medida se encontraron muy cercanos al valor certificado del material. Según lo que se notó durante el proceso práctico, esto puede ser posible a que la temperatura ambiente del laboratorio fue de 23.5°C, superior lo acostumbrado.

3.3 CÁLCULOS

Para el cálculo de la conductividad térmica de las muestras que se analizaron, se desarrolló el siguiente procedimiento con los datos obtenidos y seleccionados anteriormente.

Siempre es importante verificar que todos los datos se encuentran bajo el mismo sistema de unidades y sean coherentes con el propósito del proyecto. En este caso, se utiliza en Sistema Internacional para magnitudes y unidades fundamentales (SI) entre las que se encuentra por ejemplo el metro (m) para la longitud, kilogramo (kg) al referirnos a la masa, el segundo (s) para el tiempo, entre otros.

Después de realizar la anterior aclaración, se procede a realizar el cálculo del flujo del flujo de calor de la siguiente manera:

Ecuación 41. Cálculo del flujo de calor a partir de la corriente y la tensión

$$Q = I \cdot E$$

Ejemplo, en tabla 10 se tiene que la intensidad es de 0.11 A y la tensión de 11.48 mV. Al multiplicar estos dos datos se tiene que el flujo de calor es de 1.28 W.

$$Q = 0.11 \cdot 11.48 = 1.25 \text{ W}$$

Posteriormente, es necesaria la determinación del diferencial de temperatura entre los platos fríos y el caliente.

Ecuación 42. Cálculo del diferencial de temperatura entre los platos que componen el sistema

$$\Delta T = \frac{T_h - (T_{c_2} + T_{c_1})}{2}$$

$$\Delta T = \frac{30.00 - (11.50 + 11.60)}{2} = 18.40 \text{ K}$$

El área de intercambio de calor es un factor fundamental en este experimento y se determina de la siguiente forma,

Ecuación 43. Cálculo del área de transferencia de calor

$$A = \frac{\pi}{2} \cdot (r_0^2 + r_1^2) \cdot (1 + \alpha \cdot (Th - Ta))^2$$

Finalmente, la conductividad térmica de las muestras se determina así:

Ecuación 44. Cálculo de la conductividad térmica de las muestras

$$k = \frac{Q \cdot L}{2 \cdot A \cdot \Delta T}$$
$$k = \frac{1.25 \cdot 2.05 \times 10^{-2}}{2 \cdot 1.82 \times 10^{-2} \cdot 18.40} = 3.81 \times 10^{-2} \frac{W}{m \cdot K}$$

Para el material de referencia proporcionado por el NIST, la fibra de vidrio tiene un valor de conductividad térmica de $0.033 \pm 1.0\%$ como se muestra a continuación:

$$k = (1.10489 \times 10^{-4}) \cdot T \pm 1.0\%$$
$$k = (1.10489 \times 10^{-4}) \cdot 295.15 \pm 1.0\% = 0.033 \pm 1.0\% W / (m \cdot K)$$

Según este resultado es posible afirmar que el valor calculado durante la experimentación en el INM es satisfactorio comparado con el valor suministrado por el NIST en el certificado del material de referencia SRM 1450d.

Tabla 10. Ejemplo del cálculo de la conductividad térmica de la muestra de Fibra de Vidrio

Bloque	I , A	E , mV	ΔT , K	Q , W	A , m ²	k , W/(m·K)
1	0.11	11.48	18.40	1.27	1.82×10^{-2}	3.81×10^{-2}

Fuente. Elaboración propia

Tabla 11. Conductividad térmica de las muestras de Poliestireno Expandido.

Pba.

Bloq.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	5.4X10 ⁻² 2	3.4X10 ⁻² 2	6.5X10 ⁻² 2	3.9X10 ⁻² 2	4.5X10 ⁻² 2	3.6X10 ⁻² 2	7.0X10 ⁻² 2	5.3X10 ⁻² 2	5.7X10 ⁻² 2	6.4X10 ⁻² 2
2	4.9X10 ⁻² 2	4.6X10 ⁻² 2	4.0X10 ⁻² 2	5.1X10 ⁻² 2	4.6X10 ⁻² 2	4.8X10 ⁻² 2	8.0X10 ⁻² 2	5.3X10 ⁻² 2	6.3X10 ⁻² 2	8.1X10 ⁻² 2
3	4.2X10 ⁻² 2	4.1X10 ⁻² 2	2.5X10 ⁻² 2	3.7X10 ⁻² 2	4.0X10 ⁻² 2	4.8X10 ⁻² 2	6.1X10 ⁻² 2	5.7X10 ⁻² 2	6.4X10 ⁻² 2	7.1X10 ⁻² 2
4	3.2X10 ⁻² 2	5.3X10 ⁻² 2	5.7X10 ⁻² 2	4.5X10 ⁻² 2	2.7X10 ⁻² 2	4.6X10 ⁻² 2	5.0X10 ⁻² 2	8.3X10 ⁻² 2	6.3X10 ⁻² 2	6.1X10 ⁻² 2
5	3.7X10 ⁻² 2	4.2X10 ⁻² 2	4.6X10 ⁻² 2	5.2X10 ⁻² 2	5.8X10 ⁻² 2	4.6X10 ⁻² 2	8.0X10 ⁻² 2	4.0X10 ⁻² 2	5.8X10 ⁻² 2	7.8X10 ⁻² 2
6	4.4X10 ⁻² 2	3.4X10 ⁻² 2	4.1X10 ⁻² 2	5.9X10 ⁻² 2	5.3X10 ⁻² 2	3.1X10 ⁻² 2	5.6X10 ⁻² 2	6.6X10 ⁻² 2	6.0X10 ⁻² 2	6.4X10 ⁻² 2
7	4.0X10 ⁻² 2	4.0X10 ⁻² 2	5.9X10 ⁻² 2	5.9X10 ⁻² 2	4.4X10 ⁻² 2	4.2X10 ⁻² 2	8.1X10 ⁻² 2	6.8X10 ⁻² 2	6.9X10 ⁻² 2	6.1X10 ⁻² 2
Prom.	4.3X10 ⁻² 2	4.1X10 ⁻² 2	4.8X10 ⁻² 2	4.8X10 ⁻² 2	4.5X10 ⁻² 2	4.2X10 ⁻² 2	6.8X10 ⁻² 2	6.0X10 ⁻² 2	6.2X10 ⁻² 2	6.9X10 ⁻² 2

Fuente. Elaboración propia

Tabla 12. Conductividad térmica de la muestra Poliestiresno Expandido.
Repetición de la prueba 1

Bloque	Prueba 11
1	6.30X10 ⁻²
2	5.90X10 ⁻²
3	6.20X10 ⁻²
4	6.90X10 ⁻²
5	5.90X10 ⁻²
6	6.90X10 ⁻²
7	5.90X10 ⁻²
Promedio	6.30X10 ⁻²

Fuente. Elaboración propia

Tabla13. Conductividad térmica de las muestras de fibra de vidrio.

Bloque	Prueba 12	Prueba 13	Prueba 14	Prueba 15
1	2.60X10 ⁻²	2.90X10 ⁻²	3.80X10 ⁻²	4.00X10 ⁻³
2	3.70X10 ⁻²	2.90X10 ⁻²	3.40X10 ⁻²	3.00X10 ⁻³
3	3.30X10 ⁻²	3.40X10 ⁻²	3.70X10 ⁻²	2.00X10 ⁻³
4	3.00X10 ⁻²	2.70X10 ⁻²	3.30X10 ⁻²	6.00X10 ⁻³
5	4.20X10 ⁻²	2.40X10 ⁻²	1.90X10 ⁻²	3.00X10 ⁻³
6	2.50X10 ⁻²	2.70X10 ⁻²	3.20X10 ⁻²	4.00X10 ⁻³
7	2.70X10 ⁻²	3.70X10 ⁻²	3.10X10 ⁻²	4.00X10 ⁻³
Promedio	3.10X10 ⁻²	3.00X10 ⁻²	3.20X10 ⁻²	4.00X10 ⁻³

Fuente. Elaboración propia

3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Con el fin de estimar la reproducibilidad del sistema de medición, se formuló un diseño experimental usando como factor al operario y evaluando dos niveles. Los operarios realizaron las pruebas aleatoriamente. Los resultados fueron analizados usando un análisis de varianza (ANOVA) considerando el siguiente modelo:

- Objetivo: Verificar si el cambio de operario afecta la medición de la conductividad térmica en el equipo construido.
- $H_0: \mu_1 = \mu_2$ No hay dependencia significativa al cambiar de operario en la medición de la conductividad térmica en el equipo construido.
- $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ Hay diferencia significativa al cambiar el operario en la medición de la conductividad térmica en el equipo construido.
- Variable respuesta: Conductividad térmica
- Solución propuesta: El cambio aleatorio de operario en la realización de las pruebas no influye en la medición de la conductividad térmica en el equipo construido.

Tabla 14. Datos de conductividad térmica obtenidos durante la experimentación de siete periodos treinta minutos.

Operario 1				Operario 2	
$k, W/(m \cdot K)$				$k, W/(m \cdot K)$	
3.36X10 ⁻²	6.47X10 ⁻²	4.49X10 ⁻²	3.57X10 ⁻²	6.27X10 ⁻²	3.95X10 ⁻²
4.63X10 ⁻²	3,98X10 ⁻²	4.64X10 ⁻²	4.83X10 ⁻²	5.95X10 ⁻²	5.15X10 ⁻²
4.12X10 ⁻²	2.52X10 ⁻²	4.03X10 ⁻²	4.77X10 ⁻²	6.24X10 ⁻²	3.72X10 ⁻²
5.31X10 ⁻²	5.73X10 ⁻²	2.73X10 ⁻²	4.58X10 ⁻²	6.86X10 ⁻²	4.47X10 ⁻²
4.17X10 ⁻²	4.57X10 ⁻²	5.79X10 ⁻²	4.58X10 ⁻²	5.92X10 ⁻²	5.23X10 ⁻²
3.38X10 ⁻²	4.10X10 ⁻²	5.34X10 ⁻²	3.08X10 ⁻²	6.93X10 ⁻²	5.91X10 ⁻²
3.97X10 ⁻²	5.95X10 ⁻²	4.42X10 ⁻²	4.25X10 ⁻²	5.92X10 ⁻²	5.25X10 ⁻²
PROMEDIO			PROMEDIO		
3.84X10 ⁻²	4.87X10 ⁻²	5.18X10 ⁻²	3.97X10 ⁻²	6.26X10 ⁻²	5.46X10 ⁻²

Fuente. Elaboración propia

Tabla 15. Promedio de los tres últimos datos de conductividad térmica determinados por cada operario.

Operario	
$k, W/(m \cdot K)$	
1	2
3.84X10 ⁻²	5.46X10 ⁻²
4.87X10 ⁻²	3.97X10 ⁻²
5.18X10 ⁻²	6.26X10 ⁻²

Fuente. Elaboración propia

Al tener organizada y definida la muestra de datos que se recolectaron en la prueba y que se analizaran en el ANOVA, se realiza la suma de todos los valores.

Tabla 16. Sumatoria de los datos de la muestra por nivel, promedio por nivel y sumatoria total

	Operario	
	$k, W/(m \cdot K)$	
	1	2
$Y_{i.}$	0.14	0.16
$\bar{Y}_{i.}$	4.63×10^{-2}	5.23×10^{-2}
$Y_{..}$	0.29	

Fuente. Elaboración propia

En este diseño, se tuvieron dos niveles ($k=2$), seis datos en total ($N=6$) y tres datos por nivel ($n_i=3$), y se obtuvieron los siguientes resultados en la determinación de la suma de cuadrados.

Tabla 17. Suma de cuadrados

Fórmula	Suma de cuadrados	Resultado
$SCT = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij}^2 - \frac{Y_{..}^2}{N}$	SCT	4.22×10^{-4}
$SCE_{TR} = \frac{\sum Y_{i.}^2}{n_i}$	SCE_{TR}	5.36×10^{-5}
$SCD_{ER} = SCT - SCE_{TR}$	SCD_{ER}	3.68×10^{-4}

Fuente. Elaboración propia.

- La suma de cuadrados (SCT) totales sirve calcular el efecto de la variación de todos los datos.
- La suma de cuadrados entre tratamientos (SCE_{TR}) calcula el efecto del cambio de nivel del factor.
- La suma de cuadrados del error residual (SCD_{ER}) calcula el efecto de la realización de réplicas.

Tras de terminar la suma de cuadrados, se continuó con hallar los cuadrados medios del diseño.

Tabla 18. Cuadrados medios

Fórmula	Cuadrados medios	Resultado
$CMT = \frac{SCT}{N-1}$	CMT	8.44×10^{-5}
$CMD_{ER} = \frac{SCD_{ER}}{N-k}$	CMD_{ER}	9.21×10^{-5}
$CME_{TR} = \frac{SCE_{TR}}{k-1}$	CME_{TR}	5.36×10^{-5}

Fuente. Elaboración propia

Los cuadrados medios se calcularon con el fin de encontrar el estimador del ANOVA F, el cual se utilizó para comprar con respecto al F de la tabla F de Fisher.

Tabla 19. Tabla ANOVA

Suma de cuadrados		Cuadrados medios	
SCE_{TR}	5.4×10^{-5}	CME_{TR}	5.36×10^{-5}
SCD_{ER}	3.7×10^{-4}	CMD_{ER}	9.21×10^{-5}
SCT	4.2×10^{-4}	CMT	8.44×10^{-5}

Fuente. Elaboración propia

El paso siguiente para la realización del ANOVA fue la determinación del estimador que se estableció de la siguiente manera,

Tabla 20. Estimador del ANOVA

Estimador del ANOVA		
Fórmula	Estimador F	Resultado
$F = \frac{CME_{TR}}{CMD_{ER}}$	F	0.58

Fuente. Elaboración propia

Por último, es necesario comparar el estimador del ANOVA determinado con el estimado de la tabla, que en este caso ha sido la tabla F de Fisher.

Tabla 21. Datos necesarios de la tabla F de Fisher

Datos necesarios de la tabla F de Fisher		
ν_1	$k-1$	1
ν_2	$N-k$	4
α	5.00×10^{-2}	
F.tablas	7.71	

Fuente. Elaboración propia

Al analizar la tabla de distribución F de Fisher se determinó que el estimador tiene un valor de 7.71, el cual es mayor que el determinado en el anterior procedimiento, 0.582, concluyendo que la hipótesis planteada inicialmente ha sido aceptada. No hay dependencia significativa al cambiar de operario en la medición de la conductividad térmica en el equipo construido.

Tabla 22. Fracción de la tabla de distribución f de Fisher

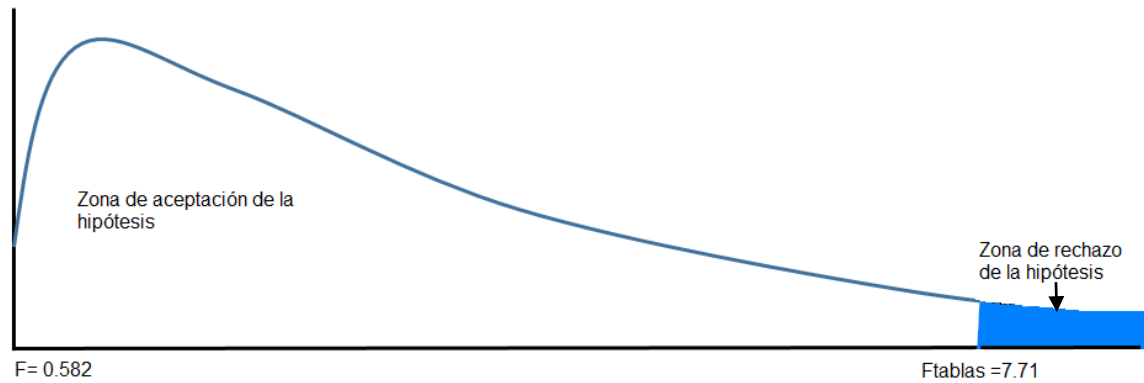
ν_2	ν_1	1	2	3	4
	α				
1	0.1	39.86	49.5	53.59	55.83
	0.05	161.45	199.5	215.71	224.16
	0.025	647.79	799.5	864.16	899.58
	0.01	4052.2	4999.5	5403.4	5624.6
2	0.1	8.53	9.00	9.16	9.24
	0.05	18.51	19.00	19.16	19.25
	0.025	38.51	39.00	39.17	39.25
	0.01	98.5	99.00	99.17	99.25
3	0.1	5.54	5.46	5.39	5.34
	0.05	10.13	9.55	9.28	9.12
	0.025	17.44	16.04	15.44	15.1
	0.01	34.12	30.82	29.46	28.71
4	0.1	4.54	4.32	4.19	4.11
	0.05	7.71	6.94	6.59	6.39
	0.025	12.22	10.65	9.98	9.6
	0.01	21.2	18.00	16.69	15.98

Fuente. Elaboración propia

Donde el cuadro azul indica $\nu_2 = N - k$, siendo N el número total de datos y k los niveles utilizados en el diseño. Mientras que el cuadro rojo hace referencia a valor

de $\nu_1 = k - 1$. Estos son parámetros necesarios para la búsqueda del estimador en la tabla f de Fisher.

Gráfica 7. Distribución f



Fuente. Elaboración propia

La gráfica de la Distribución f en este caso sirve para comprobar que el valor encontrado en tablas y el calculado no se encuentran en la misma zona, sino que, el valor determinado coincide en la zona de aceptación de la hipótesis planteada, demostrando la reproducibilidad de los datos de conductividad térmica en este proyecto.

3.5 DETERMINACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DEL SISTEMA

Con el fin de comparar los resultados obtenidos con el sistema construido, se calcula y analiza la incertidumbre en este numeral. Primero se da una breve introducción sobre el significado e importancia de esta aproximación y luego se procede a hallarla.

Se entiende por incertidumbre de una medición, generalmente, a la duda sobre la validez que tenga un resultado y al dato que caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser atribuidos al mensurando, es decir, es la imposibilidad de saber cuál es el valor exacto del mensurando⁶⁷.

Al no conocer el valor exacto del mensurando; el resultado se convierte en una aproximación que solo estaría completa si se acompaña de la incertidumbre de dicha estimación⁶⁸.

⁶⁷ CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA. Evaluación de datos de medición. Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida. [en línea]. 2008. 132 p. [citado 29 may., 2018]. Disponible en: <http://www.cem.es/sites/default/files/gum20digital1202010.pdf>

⁶⁸ Ibid. p. 6.

Esto significa que en el momento de realizar una medición lo que realmente se obtiene es un promedio de la magnitud que es está midiendo. Por ejemplo, si se midiera un objeto plano con una regla para determinar su longitud, en realidad se hace una aproximación al valor verdadero de la longitud del objeto debido a que no es posible determinar el valor real de su longitud.

Esto permite asociar a la medida un valor promedio y adicionar el valor de la incertidumbre de la medición, donde el valor promedio es el que se observa en la regla mientras que la incertidumbre depende del tipo de instrumento, el tipo de medición, entre otros factores y define un rango de valores entre los que podría estar el valor real de la medición.

Por otra parte, la incertidumbre comprende varios componentes, permitiéndole ser evaluada a partir de la distribución estadística de los resultados de series de mediciones y estar caracterizada por sus desviaciones típicas experimentales, o ser evaluada asumiendo las distribuciones de probabilidad que se basen principalmente en la experiencia adquirida o en otra información⁶⁹.

Teniendo presente estos factores la incertidumbre se ha clasificado en varios tipos: Tipo A, Tipo B y Combinada:

Por un lado, se tiene la incertidumbre Tipo A, utilizada cuando se realizan observaciones independientes de una de las variables a las mismas condiciones de medida, es decir pueden estimarse por el uso de cálculos estadísticos obtenidos de un proceso experimental. Los valores de las observaciones varían debido a efectos aleatorios o de las magnitudes que intervengan. En esta incertidumbre se evalúa u^2 , calculado por una serie de observaciones repetidas independientes, conocida comúnmente como varianza estimada estadísticamente s^2 . La raíz positiva de este término u , resulta $u = s$ por conveniencia y también es denominado como incertidumbre típica Tipo A es calculada, para los propósitos de este trabajo, por la ECUACIÓN 45.

Ecuación 45. Incertidumbre típica tipo A

$$u(x_i) = s(\bar{X}_i) = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Fuente. CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA. Evaluación de datos de medición. Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida. [En línea]. 2008. [citado 29 may., 2018]. Disponible en: <http://www.cem.es/sites/default/files/gum20digital1202010.pdf>.

⁶⁹ Ibid. p. 4.

Donde,

- $u(x_i)$ = Incertidumbre estándar.
- \bar{X}_i = Magnitud de entrada.
- s = Desviación estándar.
- n = Observaciones.

Al referirse a la incertidumbre obtenida a partir de una evaluación Tipo B se hace referencia a los valores de una magnitud que no han sido obtenidos por medio de observaciones repetidas, por este motivo la incertidumbre típica es obtenida por la información científica disponible o basada en otras experiencias.

La varianza estimada u^2 es evaluada partiendo de la información obtenida y la desviación típica estimada u a veces es llamada incertidumbre típica Tipo B⁷⁰ es definida por la Ecuación 36.

Ecuación 46. Incertidumbre típica tipo B

$$u(p) = \frac{U(p)}{k}$$

Fuente. CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA. Evaluación de datos de medición. Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida. [En línea]. 2008. [citado 29 may., 2018]. Disponible en: <http://www.cem.es/sites/default/files/gum20digital1202010.pdf>.

Donde $u(p)$ es la incertidumbre típica y se obtiene dividiendo la incertidumbre expandida $U(p)$ sobre k un factor de cobertura.

La incertidumbre combinada se encuentra definida normalmente con el nombre de ley de propagación de incertidumbre y consiste en una incertidumbre donde se relaciona una contribución a la incertidumbre tipo A y una contribución tipo B expresada de la siguiente forma.

Ecuación 47. Incertidumbre combinada.

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

Fuente. CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA. Evaluación de datos de medición. Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida. [En línea]. 2008. [citado 29 may., 2018]. Disponible en: <http://www.cem.es/sites/default/files/gum20digital1202010.pdf>.

⁷⁰ Ibid., p. 8.

Donde u_c es la incertidumbre combinada u_A^2 y u_B^2 son las contribuciones a la incertidumbre combinada de Tipo A y Tipo B respectivamente.

Los casos más comunes donde se debe tener presente la incertidumbre son:

- Si se tiene una definición incompleta del mensurando.
- Al realizar de forma imperfecta la definición del mensurando.
- Cuando se tiene una muestra no representativa del mensurando, por lo tanto, la muestra analizada puede no representar al mensurando definido.
- Si se tiene conocimiento incompleto de los efectos de las condiciones ambientales sobre la medición, o medición imperfecta de dichas condiciones ambientales.
- Lectura sesgada de instrumentos analógicos, por parte del técnico.
- Tener valores inexactos de los patrones de medida o de los materiales de referencia.
- Contar con valores inexactos de constantes y otros parámetros tomados de fuentes externas.
- Implementar aproximaciones e hipótesis establecidas en el método y en el procedimiento de medida.
- Las variaciones en las observaciones repetidas del mensurando, incluso en condiciones aparentemente idénticas, entre otras⁷¹.

Después de haber analizado el significado, la importancia y los factores que influyen en la incertidumbre, se determinaron las contribuciones para las mediciones de conductividad térmica.

El cálculo de la conductividad se hizo a través del área, el diferencial de temperatura, el flujo de calor y el espesor de las muestras. Los datos obtenidos experimentalmente se presentan a continuación:

⁷¹ Ibid., p. 7.

Tabla 23. Datos iniciales de incertidumbre, donde A y B hacen referencia al tipo de incertidumbre y R y N son la distribución rectangular y normal respectivamente

Fuente de incertidumbre		Valor estimado		Tipo	Distribución
A	r_0	7.57×10^{-2}	M	B	R
	r_1	7.66×10^{-2}	M	B	R
	α	2.36×10^{-5}	M	B	R
	ΔT_{mp}	9.09	K	B	R
L	Repetibilidad	2.54×10^{-2}	M	A	N
	Calibración medidor de alturas	0	M	B	N
ΔT	Repetibilidad	18.35	K	B	N
	Calibración	0	K	B	N
Q	Repetibilidad E	11.47	V	A	N
	Calibración en E	0	V	B	N
	Repetibilidad I	8.88×10^{-2}	A	B	N
	Calibración en I	0	A	B	N

Fuente. Elaboración propia

La tabla 24 muestra las magnitudes consideradas. El valor estimado de las magnitudes como por ejemplo el diferencial de temperatura es el promedio de los datos obtenidos durante la experimentación, de igual manera ocurre con la corriente y la tensión del sistema. También se encuentra el tipo de incertidumbre y la distribución. Donde distribución N (Normal) hace referencia a los resultados experimentales obtenidos de observaciones repetidas y distribución R (Rectangular) hace referencia a un valor que tiene la misma probabilidad dentro de una muestra determinada.

Luego, se establece el valor de la u para cada magnitud.

Tabla 24. Datos de u para cada magnitud

Fuente de incertidumbre		u	
A	r_0	2.00×10^{-5}	m
	r_1	2.00×10^{-5}	m
	α	2.40×10^{-6}	m
	ΔT_{mp}	0.20	K
L	Repetibilidad	1.56×10^{-4}	m
	Calibración medidor de alturas	1.00×10^{-6}	m
ΔT	Repetibilidad	0.14	K
	Calibración	0.80	K
Q	Repetibilidad E	2.50×10^{-6}	V
	Calibración en E	1.00×10^{-6}	V
	Repetibilidad I	1.85×10^{-3}	A
	Calibración en I	1.00×10^{-5}	A

Fuente. Elaboración propia

Los valores de la tabla 25 se establecieron de la siguiente manera. Para el área de transferencia los valores de u fueron tomados del anexo F, el valor para los parámetros ΔT_{mp} , ΔT , L , E e I que corresponde a la incertidumbre de calibración fue tomado del anexo A. Las incertidumbres por repetibilidad se estimaron usando la ecuación 32.

Para determinar la u_c incertidumbre combinada de cada magnitud se determina debe determinar además de la incertidumbre de la tabla 24, el factor según el tipo de distribución. Para distribuciones normales se usa la raíz del número de mediciones mientras que para distribuciones rectangulares se usa $\sqrt{3}$.

Tabla 25. Determinación del factor y $u_{típica}$ de todos los datos

Fuente de incertidumbre		Factor	$u_{típica}$	
<i>A</i>	r_0	1.732	1.15×10^{-5}	m
	r_1	1.732	1.15×10^{-5}	m
	α	1.732	1.36×10^{-6}	K ⁻¹
	ΔT_{mp}	1.732	0.120	K
<i>L</i>	Repetibilidad	1.732	9.01×10^{-5}	m
	Calibración medidor de alturas	1.732	5.70×10^{-7}	m
ΔT	Repetibilidad	1.732	8.08×10^{-2}	K
	Calibración	1.732	0.46	K
<i>Q</i>	Repetibilidad <i>E</i>	1.732	1.46×10^{-6}	V
	Calibración en <i>E</i>	1.732	5.70×10^{-7}	V
	Repetibilidad <i>I</i>	1.732	1.07×10^{-2}	A
	Calibración en <i>I</i>	1.73	5.77×10^{-6}	A

Fuente. Elaboración propia

Posteriormente se determinó la contribución que tiene cada magnitud de entrada como el producto $C_i u_i$.

Tabla 26. Contribución de cada parámetro a u

	Fuente de incertidumbre	Grados de libertad	C_i		Contribución a u	
A	r_0	10X10 ⁶	0.24	M	2.75X10 ⁻⁶	m ²
	r_1	10X10 ⁶	0.24	M	2.78X10 ⁻⁶	m ²
	α	10X10 ⁶	0.33	m ²	4.52X10 ⁻⁷	m ²
	ΔT_{mp}	10X10 ⁶	8.60X10 ⁻⁷	K	9.90X10 ⁻⁸	m ²
L	Repetibilidad	2	1	M	9.00X10 ⁻⁵	m
	Calibración medidor de alturas	2	1	M	5.80X10 ⁻⁷	m
ΔT	Repetibilidad	2	1	K	8.08X10 ⁻²	K
	Calibración	2	1	K	0.46	K
Q	Repetibilidad E	2	1	V	1.46X10 ⁻⁶	V
	Calibración en E	2	1	V	5.80X10 ⁻⁷	V
	Repetibilidad I	2	1	A	1.07X10 ⁻³	A
	Calibración en I	2	1	A	5.80X10 ⁻⁷	A

Fuente. Elaboración propia

Los valores de C_i en la tabla 27 fueron determinados derivando parcialmente la ecuación 11 con respecto a cada magnitud de entrada de acuerdo a, NIST Technical Note 1606, Assessment of Uncertainties for the NIST 1016 mm Guarded-Hot-Plate Apparatus: Extended Analysis for Low-Density Fibrous-Glass Thermal Insulation por Robert R. Zarr.

Posteriormente se determina la incertidumbre combinada como la suma cuadrática de las incertidumbres típicas de las magnitudes de entrada.

Por ejemplo, para el caso de área se tiene,

$$u_{(A)} = \sqrt{(2.75 \times 10^{-6})^2 + (2.78 \times 10^{-6})^2 + (4.50 \times 10^{-7})^2 + (9.90 \times 10^{-8})^2} = 3.94 \times 10^{-6}$$

Una vez obtenidas las incertidumbres combinadas para cada magnitud de entrada se evalúa la incertidumbre combinada relativa para la conductividad térmica de acuerdo a la ecuación 48.

Ecuación 48. Determinación de u_c

$$\frac{u_c}{k} = \sqrt{\left(\frac{u_{(A)}}{A}\right)^2 + \left(\frac{u_{(L)}}{L}\right)^2 + \left(\frac{u_{(\Delta T)}}{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{u_{(E)}}{E}\right)^2 + \left(\frac{u_{(I)}}{I}\right)^2}$$

Fuente. CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA. Evaluación de datos de medición. Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida. [En línea]. 2008. [citado 29 may., 2018]. Disponible en: <http://www.cem.es/sites/default/files/gum20digital1202010.pdf>.

Tabla 27. Valores de $\frac{u_{(i)}}{i}$

Fuente de incertidumbre	$\frac{u_{(i)}}{i}$	
<i>A</i>	2.20X10 ⁻⁴	m ²
<i>L</i>	3.54X10 ⁻³	m
ΔT	2.55X10 ⁻²	K
<i>E</i>	1.40X10 ⁻⁷	V
<i>I</i>	1.20X10 ⁻²	A

Fuente. Elaboración propia

Teniendo los valores de $\frac{u_{(i)}}{i}$, se resuelve la

Ecuación 48, para determinar $\frac{u_c}{k}$ de la siguiente manera,

$$\frac{u_c}{k} = \sqrt{\left(\frac{4.00 \times 10^{-6}}{1.82 \times 10^{-2}}\right)^2 + \left(\frac{9.00 \times 10^{-5}}{2.54 \times 10^{-2}}\right)^2 + \left(\frac{0.47}{18.35}\right)^2 + \left(\frac{1.57 \times 10^{-6}}{11.47}\right)^2 + \left(\frac{1.07 \times 10^{-3}}{8.88 \times 10^{-2}}\right)^2}$$

$$\frac{u_c}{k} = 2.85 \times 10^{-2}$$

Al ser u_c una incertidumbre relativa, es necesario multiplicarla por 100,

$$u_c = 2.85 \times 10^{-2} \cdot 100 = 2.85$$

Después de calcular u_c , se determina la U expandida, multiplicando el resultado de u_c por un factor con el cual se logra una probabilidad de cobertura del 95% aproximadamente para un distribución t-student. Para este caso particular el factor es 2.

$$U = u_c \cdot 2$$

$$U = 2.85 \cdot 2 = 5.7\%$$

Los porcentajes de contribución para cada magnitud de entrada se presentan en la siguiente tabla,

Tabla 28. Porcentaje de contribución

Fuente	$\%C_i$
<i>A</i>	0.0%
<i>L</i>	1.5%
ΔT	80.8%
<i>E</i>	0.0%
<i>I</i>	17.7%
Total	100.0%

Fuente. Elaboración propia

3.6 ERROR DE MEDIDA

Los errores de medida son la diferencia que existe entre un valor que se ha medido a una magnitud y un valor de referencia. Estos afectan la interpretación de los resultados, y se componen de dos grupos: los errores sistemáticos de medida y los errores aleatorios de medida.

Los primeros son el error de medida que, cuando se tienen repetidas mediciones permanece constante, o en el caso de que haya una variación es posible predecirla. La causa de ellos puede ser conocida o no, pero pueden ser controlables y explicados a partir de una fuente de variación sistemática, además de ser compensados aplicando una corrección.

El valor que se utiliza como referencia en los errores sistemáticos es un valor medido de un patrón que tiene una incertidumbre de medida despreciable.

Por otra parte, se tienen el segundo grupo, es decir los errores aleatorios de medida los cuales al tener repetidas mediciones, se presentan variaciones de manera impredecible.⁷² Se deben al azar y no pueden ser controlados.⁷³

⁷² VOCABULARIO INTERNACIONAL DE METROLOGÍA. Op. Cit., p. 32.

⁷³ ARGIBAY, Juan Carlos. Técnicas psicométricas. Cuestiones de validez y confiabilidad. En: Subjetividad y Procesos Cognitivos. 2006. p. 15-33.

Las causas más comunes por las cuales se presenta los errores de medición son las siguientes:

- Errores debidos al instrumento: estas pueden presentarse ya sea por limitaciones del instrumento, errores que se determinan al momento de la calibración que pueden ser de diseño estructural, a las propiedades del material con que está construido y envejecimiento. Estas pueden reducirse introduciendo las correcciones reportadas en los certificados de calibración.
- Errores debidos al método: estos ocurren por la realización de aproximaciones al aplicar el principio de medición o por hacer extrapolaciones de una parte del objeto al objeto completo.
- Errores debidos a agentes externos: estos se dividen en: factores ambientales donde la magnitud y el instrumento puede afectarse en mayor o menor grado a las condiciones del ambiente como la temperatura, la humedad, el nivel de luminosidad, la presión y el nivel de polvo y contaminación. Y en presencia de elementos parásitos, los cuales inciden en el equilibrio del sistema de medición y provocan disminución de la exactitud, por ejemplo, las corrientes de aire o las vibraciones mecánicas.
- Errores debidos al observador: son errores que se cometen al leer la escala del instrumento, al tener un manejo inadecuado de este y al no cumplir con el procedimiento previo al uso, es decir, no hacer el ajuste de cero o no esperar el tiempo de precalentamiento.
- Errores matemáticos: este tipo de errores se generan al emplear fórmulas inadecuadas y al realizar redondeos en las cantidades.⁷⁴

3.7 ERROR NORMALIZADO

Para la evaluación de los resultados y siguiendo los parámetros internacionales se utiliza el error normalizado para comparar la diferencia en los valores obtenidos experimentalmente en el laboratorio y los valores de referencia.

El error normalizado es un método estadístico usado para evaluar la calidad de una medición con respecto a un valor de referencia. Un valor $|E_n| > 1$ indica que los resultados son insatisfactorios, lo que requeriría una determinación de las causas que generan la desviación de los datos y las acciones correctivas. Un resultado

⁷⁴ SÁEZ, Sifredo, FONT, Luis. Incertidumbre de la Medición. Teoría y Práctica. 1 ed. Maracay – Estado Aragua. L&S CONSULTORES C.A. Febrero 2001. p. 6.

satisfactorio se produce cuando $|E_n|$ es menor o igual a la unidad y se encuentra definido por:

Ecuación 49. Ecuación del error normalizado

$$E_n = \frac{|X - x|}{\sqrt{U_x^2 + U_x^2}}$$

Donde X representa el valor de referencia y x el valor medido por el laboratorio. El material usado como referencia fue el SRM 1450d producido por el NIST. En el Anexo G se presenta el certificado de calibración. Este material tiene valores certificados para conductividad térmica y resistencia térmica determinados a partir del método primario ASTM C177. El material es clasificado como lamina de fibra de vidrio moldeado semirrígido de alta densidad de acuerdo a la clasificación ASTM C1558⁷⁵.

El valor de referencia depende de la temperatura media según la siguiente expresión⁷⁶:

Ecuación 50. Ecuación de la dependencia de la temperatura en el valor de referencia de la conductividad aparente.

$$k_{app} = (1.10 \times 10^{-4}) \times T_m$$

Donde T_m representa la temperatura media en kelvin. La incertidumbre expandida para el material es de 1%.

Las mediciones realizadas sobre el material de referencia en el laboratorio se presentan en la tabla 29.

Tabla 29. Medición en SRM 1450d

L, m	I, A	E, V	T_{c1} , °C	T_{c2} , °C	T_h , °C	T_a , °C	Q, W	ΔT , °C	A, m2	k, W/(m·K)
2.05×10^{-2}	8.94×10^{-2}	11.47	11.60	11.60	30.00	21.90	1.02	18.40	1.82×10^{-2}	3.13×10^{-2}

Fuente. Elaboración propia

⁷⁵ AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS C1558-16, Standard Guide for Development of Standard Data Records for Computerization of Thermal Transmission Test Data for Thermal Insulation, ASTM Int. West Conshohocken, PA, 2016.

⁷⁶ZARR, Robert. et al. Estándar Reference Materials: SRM 1450d, Fibrous-Glass Board, NIST Spec. Publ., vol 260, 17 p.

Reemplazando en las Ecuación 36 y Ecuación 37 la incertidumbre determinada en el numeral 3.5 se obtiene,

$$E_n = | 3.25 \times 10^{-2} - 3.14 \times 10^{-2} | / \sqrt{((3.20 \times 10^{-4})^2 + (1.79 \times 10^{-3})^2)} = 0.61$$

El error normalizado es menor que 1 por lo que puede concluirse que el desempeño del equipo diseñado fue satisfactorio para la incertidumbre estimada.

4. ANÁLISIS FINANCIERO

En el presente capítulo se exponen los costos generados a partir del proyecto EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD EN AISLANTES. Se presentará de la siguiente forma: iniciando con el valor total requerido, luego, este dato dividido según el desarrollo de cada objetivo, para después enfocarse en el costo de la construcción del aparato y finalmente se realizará la estimación del costo de cada prueba. Sin embargo, es importante resaltar que dado a que éste tiene un objetivo social, el beneficio que resulta de la puesta en marcha del mismo va a ser para el crecimiento económico y educativo del país a través del Instituto Nacional de Metrología, el cual, tiene como visión ser en el 2020 el centro de investigación, desarrollo e innovación, líder en materia Metrológica en Colombia, con proyección internacional y capacidades de medición reconocidas, actuando con responsabilidad social⁷⁷.

Este tipo de proyectos se caracterizan por generar un efecto en el bienestar de una sociedad, durante un tiempo determinado según las necesidades o poder seguir trascendiendo. Sirven para dar solución a una problemática existente y alcanzar un cambio esperado⁷⁸. Por lo tanto, en este caso, se ha realizado con el fin de brindarle, principalmente a la industria, el servicio de datos de conductividad térmica en aislantes para que sean aprovechados en pro a la eficiencia energética de los procesos que se traduce en ahorro económico, innovación y crecimiento. De igual forma impactará positivamente la sostenibilidad ambiental, a través de la disminución del consumo de combustibles fósiles (principalmente gas, petróleo y carbón) o el máximo aprovechamiento de estos, que genera la reducción del porcentaje de emisiones de CO₂ a la atmosfera contrarrestando la vulnerabilidad al cambio climático.

La unidad monetaria utilizada para unificar y abordar este capítulo es el peso colombiano (COP) y los costos incurridos serán clasificados como fijos y variables. Siendo los primeros; servicios de electricidad, internet, agua, alquiler de equipos complementarios y nómina, se nombran de esta forma porque independientemente de la realización o no del proyecto, el instituto requiere de ellos. Mientras que, los otros costos se representaran bajo el título de variables, el cual se compone de la compra de partes para la construcción del aparato (GHPA).

⁷⁷ INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGÍA DE COLOMBIA. Instituto Nacional de Metrología de Colombia –Misión y Visión. [Consultado el 6 May 2018]. Disponible en: <http://www.inm.gov.co/index.php/el-inm/mision>

⁷⁸ANDIA VALENCIA, Walter. Proyectos de inversión: Un enfoque diferente de análisis Industrial Data. *En: Producción y Gestión*. Enero-julio. 2010, vol. 13 no. 1. 28-31 p. [citado 6 May., 2018] Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/816/81619989004.pdf>

Tabla 30. Clasificación de costos

		Costos (COP)	
		Variables	Fijos
			Servicio de electricidad, agua, internet, transporte
			168,800
			Nómina
			2,010,000
			Alquiler de equipos complementarios
			2,050,000
			Gastos de oficina
			673,000
			Compra de partes para la construcción del aparato
		673,000	

Fuente. Elaboración propia

Tras haber recopilado y sumado los costos generados, se determinó un valor final del proyecto de COP 5, 491,300 (cinco millones cuatrocientos noventa y un mil trescientos pesos colombianos). Este valor es la sumatoria final del costo de cada objetivo específico que se estimó de la siguiente manera.

En el primer objetivo específico que trata sobre la selección de un método para la medición de conductividad térmica en aislantes se concluyó un valor de COP 794,000 (setecientos noventa y cuatro mil pesos colombianos) que se describen en la tabla 32 mencionando el título del objetivo, las actividades que se realizaron para alcanzarlo, la descripción de los costos, la unidad de medida; es decir, por hora o global, la cantidad requerida, el valor por unidad en COP, el total de los recursos basándose en los dos grupos anteriores y valor total final, también en pesos colombianos.

Tabla 31. Costo del primer objetivo del proyecto

OBJETIVO	ACTIVIDADES	DESCRIPCIÓN	UNIDAD DE MEDIDA	CANTIDAD	VALOR UNITARIO COP	TOTAL RECURSO COP	TOTAL POR OBJETIVO COP
Seleccionar un método para la conductividad térmica en aislantes	1.1.1 Hacer un análisis comparativo propiedades de los métodos	Estudiante	HORA	18	15,000	270,000	794,000
		Estudiante	HORA	18	15,000	270,000	
	1.1.2 Establecer las condiciones en donde se llevará a cabo la experimentación	Equipos de computo	HORA	26	1,000	26,000	
		Internet	HORA	20	1,000	20,000	
	Información	GLOBAL	1	100,000	100,000		
	Materiales (Impresión, papelería)	GLOBAL	18	5,000	90,000		
	Servicios públicos (Agua, luz, teléfono)	HORA	18	1,000	18,000		

Fuente. Elaboración propia

Para el segundo objetivo donde se evaluó el método seleccionado, se obtuvo un valor de COP 3, 528,800 (tres millones quinientos veintiocho mil ochocientos pesos colombianos).

Tabla 32. Costo del segundo objetivo del proyecto

OBJETIVO	ACTIVIDADES	DESCRIPCIÓN	UNIDAD DE MEDIDA	CANTIDAD	VALOR UNITARIO COP	TOTAL RECURSO COP	TOTAL OBJETIVO COP
Evaluar un método para la medición de la conductividad térmica en aislantes	1.2.1 Construir del aparato de medición a partir de la norma C1043	Alquiler 4 Termómetros de resistencia de platino clase AA	GLOBAL	4	250,000	1,000,000	3,528,800
		Alquiler 1 Indicador de temperaturas (± 5 M μ)	GLOBAL	1	25,000	25,000	
		Alquiler un resistor estandar de 100 Ω (10ppm)	GLOBAL	1	60,000	60,000	
		Alquiler 1 Control de temperatura PID (0.1°C)	GLOBAL	1	15,000	15,000	
		Alquiler 1 Baño recirculador	GLOBAL	1	500,000	500,000	
		Alquiler 1 Multímetro digital de 6 1/2 dígitos	GLOBAL	1	200,000	200,000	
		Alquiler 1 Fuente de poder 50V	GLOBAL	1	50,000	50,000	
		Alquiler 1 Medidor de alturas 0.01 mm	GLOBAL	1	200,000	200,000	
		Lamina de aluminio 6061-T6 de 4m x 4m	GLOBAL	1	250,000	250,000	
		Alambre de ferroniquel	GLOBAL	10	2,000	20,000	
	1.2.2 Establecer la metodología 1.2.3 Realizar las pruebas	Fuente conmutada 12 V 5A	GLOBAL	2	40,500	81,000	
		Termopares tipo K	GLOBAL	3	13,000	39,000	
		Controlador modelo REX C-100	GLOBAL	1	100,000	100,000	
		Cinta térmica Kapton 20mm	GLOBAL	1	27,000	27,000	
		Poliestireno expandido	GLOBAL	1	6,000	6,000	
		Fibra de vidrio	GLOBAL	1	150,000	150,000	
		Estudiante	HORA	25	15,000	375,000	
		Estudiante	HORA	25	15,000	375,000	
		Transporte	GLOBAL	14	2,200	30,800	
		Servicios (Agua, luz, teléfono)	HORA	25	1,000	25,000	

Fuente. Elaboración propia

El tercero, donde se estimó la reproducibilidad y error normalizado del sistema desarrollado, fue de COP 494,500 (cuatrocientos noventa y cuatro mil quinientos pesos colombianos).

Tabla 33. Costo del tercer objetivo del proyecto

OBJETIVO	ACTIVIDADES	DESCRIPCIÓN	UNIDAD DE MEDIDA	CANTIDAD	VALOR UNITARIO COP	TOTAL RECURSO COP	TOTAL OBJETIVO COP
Estimar la reproducibilidad y error normalizado del sistema desarrollado	1.3.1 Analizar los valores obtenidos	Estudiante	HORA	10	15,000	150,000	494,500
		Estudiante	HORA	10	15,000	150,000	
	1.3.2 Hallar la incertidumbre, error normalizado y reproducibilidad del sistema	Equipos de computo	HORA	20	1,000	20,000	
		Internet	HORA	17	1,000	17,000	
	Información	GLOBAL	1	70,000	70,000		
	Materiales (Impresión, papelería)	GLOBAL	15	4,500	67,500		
	Servicios públicos (Agua, luz, teléfono)	HORA	20	1,000	20,000		

Fuente. Elaboración propia

Finalmente, el último objetivo que hizo referencia a la estimación del costo de inversión del equipo y las pruebas, tuvo un costo de COP 674,00 (seiscientos setenta y cuatro mil pesos colombianos).

Tabla 34. Costo del cuarto objetivo del proyecto

OBJETIVO	ACTIVIDADES	DESCRIPCIÓN	UNIDAD DE MEDIDA	CANTIDAD	VALOR UNITARIO COP	TOTAL RECURSO COP	TOTAL POR OBJETIVO COP
Estimar el costo de inversión del equipo y de las pruebas	1.4.1 Determinar el costo de los materiales	Estudiante	HORA	14	15,000	210,000	674,000
		Estudiante	HORA	14	15,000	210,000	
		Equipos de computo	HORA	26	1,000	26,000	
	1.4.2 Establecer el costo del equipo	Internet	HORA	20	1,000	20,000	
		Información	GLOBAL	1	100,000	100,000	
	1.4.3 Estimar el costo de las pruebas	Materiales (Impresión, papelería)	GLOBAL	18	5,000	90,000	
		Servicios públicos (Agua, luz, teléfono)	HORA	18	1,000	18,000	

Fuente. Elaboración propia

Al tener el costo final del proyecto es posible estimar solo el costo de la fabricación que se ve en el segundo objetivo específico, generando un valor de COP 3, 528,800 (tres millones quinientos veintiocho mil ochocientos pesos colombianos). Ahí se incluyen los costos de mano de obra y materiales.

En la estimación del costo de la prueba individual se tuvieron en cuenta los precios que tienen los diferentes laboratorios que prestan el servicio en el país, como los son el laboratorio de la Universidad de Antioquia y el laboratorio de la Universidad de los Andes, determinando un valor de COP 134,000 (ciento cuarenta y tres mil pesos colombianos) para el Instituto Nacional de Metrología por prueba.

5. CONCLUSIONES

- Se determinó que el método adecuado para la medición de la conductividad térmica en aislantes según las necesidades metrológicas del país es el método que se rige bajo la norma ASTM C177.
- Se construyó un sistema de medición primario para la determinación de conductividad térmica en aislantes. El sistema implementado tiene una incertidumbre expandida de 5.7 % para muestras semirrígidas con conductividades menores a 2 W/ (m·K), temperaturas medias entre 18 °C y 22 °C, diferencias de temperatura entre 17 °C y 19 °C y espesores de muestra entre 10 mm y 50 mm.
- Se encontró que el sistema diseñado es reproducible y ofrece mediciones comparables con respecto al material de referencia certificado SRM 1450d producido por el NIST y trazable al SI. Se obtuvo un error normalizado menor que 1 por lo que puede concluirse que el desempeño del equipo diseñado fue satisfactorio para la incertidumbre estimada.
- Finalmente se concluyó que fabricación del aparato tiene un valor de COP. 3, 528,800 y se obtuvo un valor final del proyecto con un costo de COP. 5, 491,300 La realización de cada prueba tiene un valor de COP. 143,000 según el análisis realizado a partir de los datos de precios obtenidos de los laboratorios que cuentan con dicho servicio en el país.

6. RECOMENDACIONES

- La principal contribución a la incertidumbre fue debida a la calibración de los termómetros utilizados, por lo que se recomienda usar termómetros de mayor jerarquía como termómetros de resistencia de platino. Otra componente significativa en la incertidumbre estuvo relacionada con la repetibilidad en la medición de corriente.
- Esta variación se debió a que el sistema de control implementado funcionaba en modo On-Off. Se recomienda implementar estrategias de control que permitan obtener variaciones menores en la salida de corriente y se usen calentadores de tipo cinta para asegurar la uniformidad en el calentamiento del área de medición.
- Igualmente se recomienda realizar un estudio de repetibilidad a largo plazo con el fin de garantizar la confiabilidad del sistema en un futuro.
- Es recomendable elaborar un estudio detallado de la instrumentación utilizada.
- A partir del prototipo elaborado se recomienda la realización de un manual de operación y mantenimiento para la continuación del proyecto.

BIBLIOGRAFIA

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS C1558-16, Standard Guide for Development of Standard Data Records for Computerization of Thermal Transmission Test Data for Thermal Insulation, ASTM Int. West Conshohocken, PA, 2016.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS C177. Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus. 2013. 23 p.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS C518-15. Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

ANDIA VALENCIA, Walter. Proyectos de inversión: Un enfoque diferente de análisis Industrial Data. En: Producción y Gestión. Enero-julio. 2010, vol. 13 no. 1. 28-31 p. [citado 6 May., 2018] Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/816/81619989004.pdf>

ARAU, Carlos. Measurement of the In-Plane Thermal Conductivity by the Parallel Thermal Conductance Technique. University of Colorado at Boulder. Department of Mechanical Engineering. 2016. 5 p.

ARGIBAY, Juan Carlos. Técnicas psicométricas. Cuestiones de validez y confiabilidad. En: Subjetividad y Procesos Cognitivos. 2006. P. 15-33.

BANKVALL, Lars. Mechanisms of Heat Transfer in Permeable Insulation and their Investigation in a Special Guarded-Hot-Plate. Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations, ASTM International, 1974.

BIRD, Byron, et al. Fenómenos de transporte: un estudio sistemático de los fundamentos del transporte de materia, energía y cantidad de movimiento. Barcelona: Reverté, 1980. ISBN 9788429170504

BURNS George. et al. "Temperature-electromotive force reference functions and tables for the letter-designated thermocouple types based on the ITS-90," NIST Spec. Publ. Monogr. 175, 1993, vol. 93.

CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA. Evaluación de datos de medición. Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida. [En línea]. 2008. 132 p. [citado 29 may., 2018]. Disponible en: <http://www.cem.es/sites/default/files/gum20digital1202010.pdf>.

FERNANDEZ, Freddy, et al. Conductividad térmica en sólidos a altas temperaturas. En: Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela. 2006, vol. 21 no. 2.

FLYNN, Daniel. A radial flow apparatus for determining the thermal conductivity of loose fill insulations to high temperatures. En: Journal of research of the National Bureau of Standards-Co Engineering and Instrumentation. 1963. vol.67C, no, 2.

GOBIERNO DE ESPAÑA. MINISTERIO DE EDUCACION, CULTURA Y DEPORTE. Real academia de ingeniería. [En línea]. España. 2012. [citado 29 may., 2018]. Disponible en: <http://diccionario.raing.es/>

HAHN, M. H., ROBINSON, H. E., y FLYNN, D. R. Robinson line-heat-source guarded hot plate apparatus. In Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations. ASTM International. 1974, 26 p.

HARPER, Gilberto. EL ABC DE LA INSTRUMENTACIÓN EN EL CONTROL DE PROCESOS INDUSTRIALES. Editorial Limusa, 2000. 292 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización, 1 ed. Bogotá: ICONTEC, 2008. 33 p.

_____. Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC 5613. 1 ed. Bogotá: El instituto, 2008. 38 p.

_____. Referencias documentales para fuentes de información electrónicas. NTC 4490. 1 ed. Bogotá: El instituto, 1998. 23 p.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGÍA DE COLOMBIA. Instituto Nacional de Metrología de Colombia –Misión y Visión. [Consultado el 6 May 2018]. Disponible en: <http://www.inm.gov.co/index.php/el-inm/mision>

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Office of Energy Technology; R&D.; Group of Eight (Organization). Energy technology perspectives. Paris, 2006. 484 p.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍAS. y UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Balance energético colombiano – BECO. [en línea]. [citado 02 marzo., 2018] Disponible en: <http://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/Paginas/BECOENERGTICO.aspx>

_____. Plan de acción indicativo de eficiencia energética 2017 – 2022. [en línea]. 2016. 157 p. [citado 02 mar., 2018]. Disponible en: http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/PAI_PROURE_2017-2022.pdf

MODEST, Michael. Radiative heat transfer. 3 ed. Academic Press. 2013, 904 p. ISBN 9780123869449

PAPADOPOULOS, Agis. State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. En: ENERGY & BUILDINGS. vol. 37, no. 1, 77-86 p.

RODRÍGUEZ, María. Una revisión de las propiedades térmicas de los alimentos. México. Universidad de Sonora. División de Ingeniería. 1993. 96 p.

SÁEZ, Sifredo, FONT, Luis. Incertidumbre de la Medición. Teoría y Práctica. 1 ed. Maracay – Estado Aragua. L&S CONSULTORES C.A. Febrero 2001. p. 108.

SALMON, David. Thermal conductivity of insulations using guarded hot plates, including recent developments and sources of reference materials. En: MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY. Dec 1, vol. 12.

TRITT, Terry. Thermal conductivity: theory, properties, and applications. New York. Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2004, 290 p. ISBN 0-306-48327-0

VOCABULARIO INTERNACIONAL DE METROLOGÍA. Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados. España. 2012, 3 ed. Disponible en: www.cem.es

YUNUS, Cengel, y Ghajar, Afshin. Transferencia de calor y masa. 4 ed. México, D.F.: McGraw-Hill, 2011. 904 p.

ZARR, Robert R, et al. Retrospective Analysis of NIST Standard Reference Material 1450, Fibrous Glass Board, for Thermal Insulation Measurements. En: Journal of Research of The National Institute of Standards And Technology. vol. 119, p. 370.

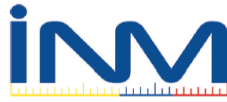
ZARR, Robert.,et al. Standard Reference Materials: SRM 1450d, Fibrous-Glass Board, NIST Spec. Publ., vol 260,115p.

ZHAO, Dongliang, et al. Measurement techniques for thermal conductivity and interfacial thermal conductance of bulk and thin film materials. En Journal of electronic packaging. Mayo, 2016, vol. 138, no. 4. p. 19.

ANEXOS

ANEXO A.

CERTIFICADOS DE CALIBRACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN UTILIZADOS EN LA EXPERIMENTACIÓN



Instituto Nacional de Metrología
de Colombia

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN / CALIBRATION CERTIFICATE

LABORATORIO DE CORRIENTE CONTINUA Y ALTERNA AC AND DC CURRENT LABORATORY

Número de certificado / Certificate number: 2991

Objeto / Object:	MULTIMETRO DIGITAL	Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).
Tipo / Type:	8846A	
Fabricante Manufacturer	FLUKE	El usuario está obligado a calibrar el instrumento a intervalos apropiados.
Número de Serie Serial Number:	9568003	
Solicitante Customer:	INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA - COLOMBIA AV, CRA. 50 NO.26-55 INT.2	<i>This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).</i>
Ciudad / City:	BOGOTA D.C. COLOMBIA	
Fecha de calibración / Calibration date:	2017-10-20	<i>The user is obliged to have the object calibrated at appropriate intervals.</i>
Número de cotización / Orden number:	17 000595	

Este certificado de calibración no puede ser reproducido parcialmente, excepto con autorización del laboratorio que lo emite. Los suplementos de certificados de calibración sin firma no son válidos. / *This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of the issuing laboratory. Calibration certificates without signature are not valid.*

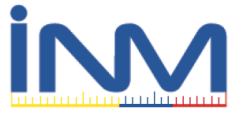
Los resultados de este certificado solo están relacionados con los objetos calibrados. / *The results of this certificate just are related with the calibrated objects.*

Fecha de Expedición Issued date	Calibrado por Calibrated by	Autorizado por Authorized by
	Firmado digitalmente COD0001233105	Firmado digitalmente COD0012378482
2017-10-20	Ingeniero Diana Marcela Forero Guerrero Profesional Universitario	Ingeniero Mauricio Sachica Avellaneda Profesional Especializado

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA - INM
SUBDIRECCION METROLOGIA FISICA, Laboratorio de Corriente Continua y Alterna
Avenida Carrera 50 No. 26-55, Interior 2 CAN, Bogotá D.C. - Colombia
Conmutador: (57)(1) 2542222, Fax: (57)(1) 2542238
E-mail: contacto@inm.gov.co, WEB: www.inm.gov.co



M1-01-F-04 -V3 (2017-04-06)



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN / CALIBRATION CERTIFICATE

LABORATORIO DE CORRIENTE CONTINUA Y ALTERNA
AC and DC CURRENT LABORATORY

Número de certificado / Certificate number: 2991

1. CONSECUTIVO INTERNO: 17/L03-070
Internal number

2. DESCRIPCIÓN DEL INSTRUMENTO
Description of the instrument

Multímetro digital Marca: Fluke, Modelo: 8846A, Número de Serie: 9568003.

3. MÉTODO DE CALIBRACIÓN
Calibration method

La calibración se realizó de acuerdo al procedimiento interno M1-01/L03/P-07. Las mediciones se realizaron por el método directo.

El equipo fue sometido a calentamiento previo por más de cuatro horas. Se realizó ajuste de cero con la función CALC:FUNC NULL para las funciones de tensión continua, corriente continua y resistencia.

4. CONDICIONES AMBIENTALES
Environmental conditions

Las mediciones se realizaron bajo condiciones ambientales estables a temperatura de $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, humedad relativa de $45\% \pm 10\%$ y presión atmosférica de $752\text{ hPa} \pm 5\text{ hPa}$.

5. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN
Results of calibration

Tabla 1. Medición de tensión eléctrica continua 6 1/2 dígitos. Front Input. NPLC=100.

Intervalo de medida	Valor medido	Valor aplicado patrón	Error	Factor de cobertura	Incertidumbre expandida U
mV	mV	mV	mV	k para 95.45%	mV
-100 a 100	-19.9998	-19.9998	0.0000	2.0	0.0006
-100 a 100	-9.9997	-10.0000	0.0003	2.0	0.0010
-100 a 100	10.0004	10.0000	0.0004	2.0	0.0010
-100 a 100	20.0005	20.0000	0.0005	2.0	0.0006

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN / CALIBRATION CERTIFICATE

LABORATORIO DE CORRIENTE CONTINUA Y ALTERNA
AC and DC CURRENT LABORATORY

Número de certificado / Certificate number: 2991

Tabla 2. Medición de corriente eléctrica continua. Configuración 6 1/2 dígitos. Front Input. NPLC=100.

Intervalo de medida	Valor medido	Valor aplicado patrón	Error	Factor de cobertura	Incertidumbre expandida U
μA	μA	μA	μA	k para 95.45%	μA
-100 a 100	-99.008	-99.000	-0.008	2.0	0.010
-100 a 100	-50.0037	-49.9999	-0.0038	2.0	0.0081
-100 a 100	-10.0007	-9.9999	-0.0008	2.0	0.0065
-100 a 100	10.0007	10.0001	0.0006	2.0	0.0065
-100 a 100	49.9993	50.0000	-0.0007	2.0	0.0081
-100 a 100	98.995	99.000	-0.005	2.0	0.010
mA	mA	mA	mA	k para 95.45%	mA
-1 a 1	-0.990050	-0.989997	-0.000053	2.0	0.000043
-1 a 1	-0.500023	-0.500000	-0.000023	2.0	0.000025
-1 a 1	-0.100007	-0.100000	-0.000007	2.0	0.000011
-1 a 1	0.100003	0.100000	0.000003	2.0	0.000011
-1 a 1	0.500025	0.500004	0.000021	2.0	0.000025
-1 a 1	0.990046	0.990001	0.000045	2.0	0.000043
mA	mA	mA	mA	k para 95.45%	mA
-10 a 10	-9.90042	-9.90002	-0.00040	2.0	0.00040
-10 a 10	-5.00023	-5.00004	-0.00019	2.0	0.00023
-10 a 10	-1.00003	-1.00000	-0.00003	2.2	0.00011
-10 a 10	1.00000	1.00000	0.00000	2.1	0.00008
-10 a 10	4.99996	5.00002	-0.00006	2.0	0.00023
-10 a 10	9.89953	9.90000	-0.00047	2.0	0.00040
mA	mA	mA	mA	k para 95.45%	mA
-100 a 100	-99.0016	-99.0012	-0.0004	2.0	0.0053
-100 a 100	-50.0009	-50.0007	-0.0002	2.0	0.0030
-100 a 100	-10.0001	-10.0000	-0.0001	2.0	0.0005
-100 a 100	10.0001	10.0000	0.0001	2.0	0.0004
-100 a 100	50.0009	50.0003	0.0006	2.0	0.0030
-100 a 100	99.0012	99.0007	0.0005	2.0	0.0053
mA	mA	mA	mA	k para 95.45%	mA
-400 a 400	-396.005	-396.012	0.007	2.0	0.045
-400 a 400	-200.005	-200.002	-0.003	2.0	0.010
-400 a 400	-40.002	-40.001	-0.001	2.0	0.003
-400 a 400	40.001	40.000	0.001	2.0	0.003
-400 a 400	200.007	200.002	0.005	2.0	0.010
-400 a 400	396.003	396.010	-0.007	2.0	0.045

Tabla 3. Medición de resistencia a cuatro hilos. Configuración 6 1/2 dígitos. Front Input.

Intervalo de medida	Valor medido	Valor aplicado patrón	Error	Factor de cobertura	Incertidumbre expandida U
Ω	Ω	Ω	Ω	<i>k para 95.45%</i>	Ω
0 a 100	9.9991	9.9997	-0.0006	2.0	0.0003
0 a 100	99.9950	100.0004	-0.0054	2.0	0.0011
$k\Omega$	$k\Omega$	$k\Omega$	$k\Omega$	<i>k para 95.45%</i>	$k\Omega$
0 a 1	0.099996	0.100000	-0.000004	2.0	0.000002
0 a 1	0.999989	1.000030	-0.000041	2.0	0.000008

Tabla 4. Medición de resistencia a dos hilos. Configuración 6 1/2 dígitos. Front Input.

Intervalo de medida	Valor medido	Valor aplicado patrón	Error	Factor de cobertura	Incertidumbre expandida U
$M\Omega$	$M\Omega$	$M\Omega$	$M\Omega$	<i>k para 95.45%</i>	$M\Omega$
0 a 10	0.99998	0.99997	0.00001	2.0	0.00002
0 a 10	9.99812	9.99842	-0.00030	2.0	0.00043
$M\Omega$	$M\Omega$	$M\Omega$	$M\Omega$	<i>k para 95.45%</i>	$M\Omega$
0 a 100	9.9976	9.9984	-0.0008	2.0	0.0005
0 a 100	99.925	99.992	-0.067	2.0	0.011
$G\Omega$	$G\Omega$	$G\Omega$	$G\Omega$	<i>k para 95.45%</i>	$G\Omega$
0 a 1	0.099854	0.099992	-0.000138	2.0	0.000011
0 a 1	0.99484	1.00010	-0.00526	2.1	0.00012

6. INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN

Measurement uncertainty

La incertidumbre reportada (ver columna de incertidumbre expandida en las tablas de resultados) se ha determinado multiplicando la incertidumbre estándar combinada por el factor de cubrimiento *k* (ver columna de factor de cobertura en las tablas) con el cual se logra una probabilidad de cobertura del 95.45% para una distribución t de Student.

La incertidumbre de medida fue estimada de acuerdo a "JCGM 100:2008 GUM 1995 with minor corrections".

La incertidumbre expresada en este certificado no incluye los cambios posibles causados por la deriva en los valores del instrumento. La incertidumbre por deriva debe ser estimada por el usuario.

7. TRAZABILIDAD DE LA MEDICIÓN

Traceability

Este certificado documenta la trazabilidad de acuerdo al Sistema Internacional de Unidades a través de los Patrones Nacionales del Instituto Nacional de Metrología que reproducen las unidades de las magnitudes eléctricas.

Los patrones utilizados fueron:

Instrumento	Marca / Modelo / No. Serie	Calibración: Fecha/ No.
Calibrador Multifunción	Fluke / 5730A / 3092501	2016-08-24 / CNM-CC-410-230/2016 Tensión continua; 2016-09-05 / CNM-CC-410-227/2016 Corriente continua; 2016-08-18 / CNM-CC-410-228/2016 Resistencia
Resistencia patrón 1 GΩ	Fluke / 8508A-7000k / 55173	CNM-CC-410-239/2016 2016-07-29

8. OBSERVACIONES

Additional information

Los puntos en tensión eléctrica continua inferiores a 100 mV se realizaron por petición del cliente, sin embargo, el alcance de acuerdo al sistema de gestión de calidad del laboratorio empieza en 100 mV.

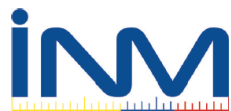
Los resultados de calibración expresados en este certificado son válidos bajo las condiciones ambientales y en los modos de operación indicados. El usuario es responsable de realizar las correcciones necesarias si el instrumento es utilizado bajo condiciones distintas a las señaladas.

La trazabilidad de los valores de las mediciones que se realicen con este instrumento, se conservará solo si el usuario realiza el tratamiento adecuado de los errores correspondientes que se reportan en este certificado.

Es responsabilidad del usuario calibrar el instrumento en intervalos de tiempo apropiados. El instrumento lleva una estampilla con el número de este certificado.

De acuerdo con la 10ª Resolución de la 22ª CGPM de 2003, en este documento se usa el punto en línea como separador decimal.

Fin del Certificado de Calibración
End of Calibration Certificate



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN / CALIBRATION CERTIFICATE

**LABORATORIO DE CORRIENTE CONTINUA Y ALTERNA
AC AND DC CURRENT LABORATORY**

Número de certificado / Certificate number: 3272

Objeto / Object:	MULTIMETRO DIGITAL	Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).
Tipo / Type:	8846A	
Fabricante Manufacturer	FLUKE	El usuario está obligado a calibrar el instrumento a intervalos apropiados.
Número de Serie Serial Number:	2497009	
Solicitante Customer:	INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA - COLOMBIA Avenida Carrera 50 No. 26 - 55 Interior 2	<i>This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).</i>
Ciudad / City:	BOGOTA D.C. COLOMBIA	
Fecha de calibración / Calibration date:	2018-03-28	<i>The user is obliged to have the object calibrated at appropriate intervals.</i>

Número de radicación / Radication number: 18 000659

Este certificado de calibración no puede ser reproducido parcialmente, excepto con autorización del laboratorio que lo emite. Los suplementos de certificados de calibración sin firma no son válidos. *This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of the issuing laboratory. The supplements of the calibration certificates without signature are not valid.*

Los resultados de este certificado solo están relacionados con los objetos calibrados. *The results of this certificate just are related with the calibrated objects.*

Fecha de Expedición Issued date	Calibrado por Calibrated by	Autorizado por Authorized by
	Firmado digitalmente COD0001233105	Firmado digitalmente COD0012395370
2018-03-28	Ingeniero Nelson Duvan Vargas Saenz Profesional Universitario	Ingeniero Mauricio Sachica Avellaneda Profesional Especializado

1. CONSECUTIVO INTERNO: 18/L03-014
Internal number

2. DESCRIPCIÓN DEL INSTRUMENTO
Description of the instrument

Multímetro digital Marca: Fluke, Modelo: 8846A, Número de Serie: 2497009.

3. MÉTODO DE CALIBRACIÓN
Calibration method

La calibración se realizó de acuerdo al procedimiento interno M1-01/L03/P-07. Las mediciones se realizaron por el método directo.

Las mediciones en la función de temperatura (RTD) se realizaron midiendo valores patrón de resistencia y utilizando la tabla ITS-90 en sus correspondencia entre ohm y grados Celsius para Pt 100 $\alpha = 0.003851$.

El equipo fue sometido a calentamiento previo por más de cuatro horas. Se realizó ajuste de cero con la función CALC:FUNC NULL para las funciones de tensión continua, corriente continua y resistencia.

4. CONDICIONES AMBIENTALES
Environmental conditions

Las mediciones se realizaron bajo condiciones ambientales estables a temperatura de $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, humedad relativa de $45\% \pm 15\%$ y presión atmosférica de $752\text{ hPa} \pm 5\text{ hPa}$.

5. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN
Results of calibration

Tabla 1. Medición de tensión eléctrica continua 6 1/2 dígitos. Front Input. NPLC=100.

Intervalo de medida	Valor medido	Valor aplicado patrón	Error	Factor de cobertura	Incertidumbre expandida U
mV	mV	mV	mV	k para 95.45%	mV
-100 a 100	-99.0011	-99.0001	-0.0010	2.0	0.0012
-100 a 100	-50.0010	-50.0001	-0.0009	2.0	0.0009
-100 a 100	-10.0010	-10.0001	-0.0009	2.0	0.0006
-100 a 100	9.9990	9.9999	-0.0009	2.0	0.0006
-100 a 100	49.9986	49.9999	-0.0013	2.0	0.0009
-100 a 100	98.9977	98.9999	-0.0022	2.0	0.0013

Tabla 2. Medición de tensión eléctrica continua 6 1/2 dígitos. Front Input. NPLC=100 (continuación).

Intervalo de medida	Valor medido	Valor aplicado patrón	Error	Factor de cobertura	Incertidumbre expandida U
V	V	V	V	k para 95.45%	V
-1 a 1	-0.990003	-0.989999	-0.000004	2.0	0.000006
-1 a 1	-0.500000	-0.499999	-0.000001	2.0	0.000004
-1 a 1	-0.099999	-0.100000	0.000001	2.0	0.000002
-1 a 1	0.100001	0.100000	0.000001	2.0	0.000002
-1 a 1	0.500003	0.500000	0.000003	2.0	0.000004
-1 a 1	0.990006	0.990000	0.000006	2.0	0.000006
V	V	V	V	k para 95.45%	V
-10 a 10	-9.90004	-9.90000	-0.00004	2.0	0.00004
-10 a 10	-5.00002	-5.00000	-0.00002	2.0	0.00003
-10 a 10	-1.00000	-1.00000	0.00000	2.0	0.00001
-10 a 10	1.00000	1.00000	0.00000	2.0	0.00001
-10 a 10	2.00001	2.00000	0.00001	2.0	0.00002
-10 a 10	3.00001	3.00000	0.00001	2.0	0.00002
-10 a 10	4.00002	4.00000	0.00002	2.0	0.00002
-10 a 10	5.00003	5.00000	0.00003	2.0	0.00003
-10 a 10	6.00004	6.00000	0.00004	2.0	0.00003
-10 a 10	7.00004	7.00000	0.00004	2.0	0.00003
-10 a 10	8.00005	8.00000	0.00005	2.0	0.00004
-10 a 10	9.00005	9.00000	0.00005	2.0	0.00004
-10 a 10	9.90006	9.90000	0.00006	2.0	0.00004
V	V	V	V	k para 95.45%	V
-100 a 100	-99.0002	-99.0000	-0.0002	2.0	0.0006
-100 a 100	-50.0001	-50.0000	-0.0001	2.0	0.0004
-100 a 100	-10.0001	-10.0000	-0.0001	2.0	0.0001
-100 a 100	9.9998	10.0000	-0.0002	2.0	0.0001
-100 a 100	49.9998	50.0000	-0.0002	2.0	0.0004
-100 a 100	98.9998	98.9999	-0.0001	2.0	0.0007
V	V	V	V	k para 95.45%	V
-1000 a 1000	-990.002	-990.000	-0.002	2.0	0.008
-1000 a 1000	-500.000	-500.000	0.000	2.0	0.004
-1000 a 1000	-100.000	-100.000	0.000	2.0	0.001
-1000 a 1000	100.000	100.000	0.000	2.0	0.001
-1000 a 1000	500.000	500.000	0.000	2.0	0.004
-1000 a 1000	990.003	990.000	0.003	2.0	0.008

Tabla 3. Medición de tensión eléctrica alterna 6 1/2 dígitos. Front Input. RMS filter setting 3 Hz.

Intervalo de medida	Valor medido	Valor aplicado patrón	Error	Factor de cobertura	Incertidumbre expandida U
mV a 55 Hz	mV	mV	mV	k para 95.45%	mV
0 a 100	9.9941	10.0000	-0.0059	2.0	0.0086
0 a 100	49.990	50.000	-0.010	2.0	0.031
0 a 100	98.983	99.000	-0.017	2.0	0.033
mV a 1 kHz	mV	mV	mV	k para 95.45%	mV
0 a 100	9.9942	10.0000	-0.0058	2.0	0.0086
0 a 100	49.992	50.000	-0.008	2.0	0.031
0 a 100	98.988	99.000	-0.012	2.0	0.033
mV a 20 kHz	mV	mV	mV	k para 95.45%	mV
0 a 100	9.9896	10.0000	-0.0104	2.0	0.0094
0 a 100	49.981	50.000	-0.019	2.0	0.034
0 a 100	98.971	99.000	-0.029	2.0	0.040
mV a 50 kHz	mV	mV	mV	k para 95.45%	mV
0 a 100	9.985	10.000	-0.015	2.0	0.018
0 a 100	49.977	50.000	-0.023	2.0	0.093
0 a 100	98.97	99.00	-0.03	2.0	0.11
mV a 100 kHz	mV	mV	mV	k para 95.45%	mV
0 a 100	9.990	10.000	-0.010	2.0	0.042
0 a 100	50.03	50.00	0.03	2.0	0.14
0 a 100	99.07	99.00	0.07	2.0	0.17
mV a 300 kHz	mV	mV	mV	k para 95.45%	mV
0 a 100	9.979	10.000	-0.021	2.0	0.050
0 a 100	50.23	50.00	0.23	2.0	0.16
0 a 100	99.43	99.00	0.43	2.0	0.21
V a 55 Hz	V	V	V	k para 95.45%	V
0 a 1	0.099939	0.100000	-0.000061	2.0	0.000033
0 a 1	0.49988	0.49999	-0.00011	2.0	0.00049
0 a 1	0.98979	0.99001	-0.00022	2.0	0.00025
V a 1 kHz	V	V	V	k para 95.45%	V
0 a 1	0.099941	0.100000	-0.000059	2.0	0.000033
0 a 1	0.49990	0.49999	-0.00009	2.0	0.00048
0 a 1	0.989850	0.990004	-0.000154	2.0	0.000068
V a 20 kHz	V	V	V	k para 95.45%	V
0 a 1	0.099905	0.100000	-0.000095	2.0	0.000040
0 a 1	0.49984	0.50000	-0.00016	2.0	0.00049
0 a 1	0.98976	0.99001	-0.00025	2.0	0.00011

Tabla 4. Medición de tensión eléctrica alterna 6 1/2 dígitos. Front Input. RMS filter setting 3 Hz (continuación).

Intervalo de medida	Valor medido	Valor aplicado patrón	Error	Factor de cobertura	Incertidumbre expandida U
V a 50 kHz	V	V	V	k para 95.45%	V
0 a 1	0.099833	0.100000	-0.000167	2.0	0.000079
0 a 1	0.49984	0.49996	-0.00012	2.0	0.00045
0 a 1	0.98983	0.99000	-0.00017	2.0	0.00017
V a 100 kHz	V	V	V	k para 95.45%	V
0 a 1	0.09977	0.10000	-0.00023	2.0	0.00017
0 a 1	0.50043	0.49990	0.00053	2.0	0.00047
0 a 1	0.99109	0.99000	0.00109	2.0	0.00053
V a 300 kHz	V	V	V	k para 95.45%	V
0 a 1	0.09913	0.10000	-0.00087	2.0	0.00021
0 a 1	0.50283	0.49996	0.00287	2.0	0.00076
0 a 1	0.9967	0.9900	0.0067	2.0	0.0013
V a 55 Hz	V	V	V	k para 95.45%	V
0 a 10	0.99907	1.00001	-0.00094	2.0	0.00024
0 a 10	4.9970	5.0000	-0.0030	2.0	0.0039
0 a 10	9.8942	9.9000	-0.0058	2.0	0.0039
V a 1 kHz	V	V	V	k para 95.45%	V
0 a 10	0.99909	1.00000	-0.00091	2.0	0.00007
0 a 10	4.9972	5.0000	-0.0028	2.0	0.0039
0 a 10	9.8948	9.9000	-0.0052	2.0	0.0039
V a 20 kHz	V	V	V	k para 95.45%	V
0 a 10	0.99880	1.00001	-0.00121	2.0	0.00011
0 a 10	4.9967	5.0000	-0.0033	2.0	0.0039
0 a 10	9.8941	9.9000	-0.0059	2.0	0.0040
V a 50 kHz	V	V	V	k para 95.45%	V
0 a 10	0.99763	1.00000	-0.00237	2.0	0.00046
0 a 10	4.9944	5.0000	-0.0056	2.0	0.0026
0 a 10	9.8904	9.9000	-0.0096	2.0	0.0028
V a 100 kHz	V	V	V	k para 95.45%	V
0 a 10	0.99456	1.00000	-0.00544	2.0	0.00053
0 a 10	4.988	5.000	-0.012	2.0	0.013
0 a 10	9.879	9.900	-0.021	2.0	0.013

Tabla 5. Medición de tensión eléctrica alterna 6 1/2 dígitos. Front Input. RMS filter setting 3 Hz (continuación).

Intervalo de medida	Valor medido	Valor aplicado patrón	Error	Factor de cobertura	Incertidumbre expandida U
V a 300 kHz	V	V	V	k para 95.45%	V
0 a 10	0.9781	1.0000	-0.0219	2.0	0.0013
0 a 10	4.956	5.000	-0.044	2.0	0.014
0 a 10	9.823	9.900	-0.077	2.0	0.017
V a 55 Hz	V	V	V	k para 95.45%	V
0 a 100	9.99011	10.00000	-0.00989	2.0	0.0039
0 a 100	49.967	50.000	-0.033	2.0	0.034
0 a 100	98.938	99.000	-0.062	2.0	0.034
V a 1 kHz	V	V	V	k para 95.45%	V
0 a 100	9.9905	10.0000	-0.0095	2.0	0.0039
0 a 100	49.969	50.000	-0.031	2.0	0.034
0 a 100	98.944	99.000	-0.056	2.0	0.034
V a 20 kHz	V	V	V	k para 95.45%	V
0 a 100	9.9877	10.0000	-0.0123	2.0	0.0040
0 a 100	49.965	50.000	-0.035	2.0	0.034
0 a 100	98.937	99.000	-0.063	2.0	0.035
V a 50 kHz	V	V	V	k para 95.45%	V
0 a 100	9.9747	10.0000	-0.0253	2.0	0.0013
0 a 100	49.936	50.000	-0.064	2.0	0.091
0 a 100	98.887	99.000	-0.113	2.0	0.093
V a 100 kHz	V	V	V	k para 95.45%	V
0 a 100	9.9400	10.0000	-0.0600	2.0	0.0035
0 a 100	49.85	50.00	-0.15	2.0	0.11
0 a 100	98.73	99.00	-0.27	2.0	0.14
V a 55 Hz	V	V	V	k para 95.45%	V
0 a 1000	99.903	100.000	-0.097	2.0	0.034
0 a 1000	499.694	500.003	-0.309	2.0	0.044
0 a 1000	989.436	990.012	-0.576	2.0	0.085
V a 1 kHz	V	V	V	k para 95.45%	V
0 a 1000	99.906	100.000	-0.094	2.0	0.034
0 a 1000	499.723	500.008	-0.285	2.0	0.044
0 a 1000	989.524	990.012	-0.488	2.0	0.081

Número de certificado / Certificate number: 3272

Tabla 6. Medición de resistencia a cuatro hilos. Configuración 6 1/2 dígitos. Front Input. NPLC=100.

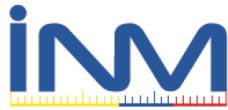
Intervalo de medida	Valor medido	Valor aplicado patrón	Error	Factor de cobertura	Incertidumbre expandida U
Ω	Ω	Ω	Ω	k para 95.45%	Ω
0 a 10	0.99952	0.99967	-0.00015	2.0	0.00011
0 a 10	9.99930	10.00000	-0.00070	2.0	0.00025
Ω	Ω	Ω	Ω	k para 95.45%	Ω
0 a 100	9.9994	10.0000	-0.0006	2.0	0.0003
0 a 100	99.9972	100.0008	-0.0036	2.0	0.0011
k Ω	k Ω	k Ω	k Ω	k para 95.45%	k Ω
0 a 1	0.099999	0.100001	-0.000002	2.0	0.000002
0 a 1	1.000001	1.000016	-0.000015	2.0	0.000009
k Ω	k Ω	k Ω	k Ω	k para 95.45%	k Ω
0 a 10	0.99999	1.00002	-0.00003	2.0	0.00002
0 a 10	9.99998	10.00017	-0.00019	2.0	0.00009
k Ω	k Ω	k Ω	k Ω	k para 95.45%	k Ω
0 a 100	10.0001	10.0002	-0.0001	2.0	0.0002
0 a 100	99.9999	100.0013	-0.0014	2.0	0.0012

Tabla 7. Medición de resistencia a dos hilos. Configuración 6 1/2 dígitos. Front Input. NPLC=100.

Intervalo de medida	Valor medido	Valor aplicado patrón	Error	Factor de cobertura	Incertidumbre expandida U
M Ω	M Ω	M Ω	M Ω	k para 95.45%	M Ω
0 a 1	0.100001	0.100001	0.000000	2.0	0.000002
0 a 1	0.999981	0.999992	-0.000011	2.0	0.000021
M Ω	M Ω	M Ω	M Ω	k para 95.45%	M Ω
0 a 10	1.00000	0.99999	0.00001	2.0	0.00003
0 a 10	9.99862	9.99909	-0.00047	2.0	0.00043
M Ω	M Ω	M Ω	M Ω	k para 95.45%	M Ω
0 a 100	9.9988	9.9991	-0.0003	2.0	0.0005
0 a 100	99.930	100.004	-0.074	2.0	0.011
G Ω	G Ω	G Ω	G Ω	k para 95.45%	G Ω
0 a 1	0.100177	0.100004	0.000173	2.0	0.000012
0 a 1	0.995693	1.000100	-0.004407	2.0	0.000089

Tabla 8. Medición de corriente eléctrica continua. Configuración 6 1/2 dígitos. Front Input. NPLC=100.

Intervalo de medida	Valor medido	Valor aplicado patrón	Error	Factor de cobertura	Incertidumbre expandida U
uA	uA	uA	uA	k para 95.45%	uA
-100 a 100	-100.004	-99.999	-0.005	2.0	0.011
-100 a 100	-49.9981	-49.9998	0.0017	2.0	0.0084
-100 a 100	-9.9938	-10.0003	0.0065	2.0	0.0069
-100 a 100	10.0072	9.9995	0.0077	2.0	0.0070
-100 a 100	50.0065	49.9991	0.0074	2.0	0.0086
-100 a 100	100.002	99.999	0.003	2.0	0.011
mA	mA	mA	mA	k para 95.45%	mA
-1 a 1	-1.000058	-0.999998	-0.000060	2.0	0.000044
-1 a 1	-0.500028	-0.499999	-0.000029	2.0	0.000026
-1 a 1	-0.100005	-0.099999	-0.000006	2.0	0.000011
-1 a 1	0.100004	0.099999	0.000005	2.0	0.000011
-1 a 1	0.500025	0.499997	0.000028	2.0	0.000026
-1 a 1	1.000047	0.999994	0.000053	2.0	0.000044
mA	mA	mA	mA	k para 95.45%	mA
-10 a 10	-9.99883	-9.99999	0.00116	2.0	0.00041
-10 a 10	-4.99939	-4.99999	0.00060	2.0	0.00023
-10 a 10	-0.99990	-1.00000	0.00010	2.1	0.00009
-10 a 10	0.99966	0.99999	-0.00033	2.2	0.00013
-10 a 10	4.99846	5.00000	-0.00154	2.0	0.00025
-10 a 10	9.99649	9.99999	-0.00350	2.0	0.00042
mA	mA	mA	mA	k para 95.45%	mA
-100 a 100	-99.9820	-100.0009	0.0189	2.0	0.0054
-100 a 100	-49.9911	-50.0004	0.0093	2.0	0.0031
-100 a 100	-9.9982	-10.0000	0.0018	2.0	0.0005
-100 a 100	9.9979	10.0000	-0.0021	2.0	0.0005
-100 a 100	49.9900	50.0002	-0.0102	2.0	0.0031
-100 a 100	99.9789	100.0004	-0.0215	2.0	0.0054
mA	mA	mA	mA	k para 95.45%	mA
-400 a 400	-399.90	-400.02	0.12	2.0	0.18
-400 a 400	-199.957	-200.002	0.045	2.0	0.012
-400 a 400	-39.993	-40.000	0.007	2.0	0.003
-400 a 400	39.992	40.000	-0.008	2.0	0.003
-400 a 400	199.956	200.001	-0.045	2.0	0.012
-400 a 400	399.90	400.02	-0.12	2.0	0.19



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN / CALIBRATION CERTIFICATE

LABORATORIO DE CORRIENTE CONTINUA Y ALTERNA
AC and DC CURRENT LABORATORY

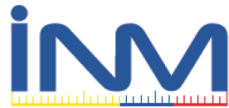
Número de certificado / Certificate number: 3272

Tabla 9. Medición de corriente eléctrica continua. Configuración 6 1/2 dígitos. Front Input. NPLC=100 (continuación).

Intervalo de medida	Valor medido	Valor aplicado patrón	Error	Factor de cobertura	Incertidumbre expandida U
A	A	A	A	k para 95.45%	A
-1 a 1	-1.00012	-1.00004	-0.00008	2.0	0.00019
-1 a 1	-0.50005	-0.50002	-0.00003	2.0	0.00018
-1 a 1	-0.100008	-0.100001	-0.000007	2.1	0.000008
-1 a 1	0.100006	0.100000	0.000006	2.1	0.000010
-1 a 1	0.50003	0.50002	0.00001	2.0	0.00020
-1 a 1	1.00001	1.00004	-0.00003	2.0	0.00022
A	A	A	A	k para 95.45%	A
-3 a 3	-2.9990	-3.0016	0.0026	2.0	0.0048
-3 a 3	-1.50009	-1.50007	-0.00002	2.0	0.00023
-3 a 3	-0.30002	-0.30001	-0.00001	2.0	0.00018
-3 a 3	0.30002	0.30001	0.00001	2.0	0.00019
-3 a 3	1.50009	1.50006	0.00003	2.0	0.00026
-3 a 3	3.0000	2.9971	0.0029	2.0	0.0048
A	A	A	A	k para 95.45%	A
-10 a 10	-9.9985	-10.0018	0.0033	2.0	0.0061
-10 a 10	-4.9988	-5.0020	0.0032	2.0	0.0052
-10 a 10	-1.00007	-1.00004	-0.00003	2.0	0.00019
-10 a 10	1.00006	1.00004	0.00002	2.0	0.00022
-10 a 10	5.0000	4.9972	0.0028	2.0	0.0052
-10 a 10	9.9996	9.9973	0.0023	2.0	0.0061

Tabla 10. Medición de corriente eléctrica alterna 6 1/2 dígitos. Front Input. RMS filter setting 3 Hz.

Intervalo de medida	Valor medido	Valor aplicado patrón	Error	Factor de cobertura	Incertidumbre expandida U
mA a 55 Hz	mA	mA	mA	k para 95.45%	mA
0 a 1	0.99987	1.00000	-0.00013	2.0	0.00065
mA a 1 kHz	mA	mA	mA	k para 95.45%	mA
0 a 1	0.99991	1.00000	-0.00009	2.0	0.00070
mA a 55 Hz	mA	mA	mA	k para 95.45%	mA
0 a 10	0.99944	1.00000	-0.00056	2.0	0.00065
0 a 10	4.9981	5.0000	-0.0019	2.0	0.0024
0 a 10	9.9966	10.0000	-0.0034	2.0	0.0027



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN / CALIBRATION CERTIFICATE

LABORATORIO DE CORRIENTE CONTINUA Y ALTERNA
AC and DC CURRENT LABORATORY

Número de certificado / Certificate number: 3272

Tabla 11. Medición de corriente eléctrica alterna 6 1/2 dígitos. Front Input. RMS filter setting 3 Hz (continuación).

Intervalo de medida	Valor medido	Valor aplicado patrón	Error	Factor de cobertura	Incertidumbre expandida U
mA a 1 kHz	mA	mA	mA	k para 95.45%	mA
0 a 10	0.99941	1.00000	-0.00059	2.0	0.00071
0 a 10	4.9982	5.0000	-0.0018	2.0	0.0027
0 a 10	9.9968	10.0000	-0.0032	2.0	0.0034
mA a 55 Hz	mA	mA	mA	k para 95.45%	mA
0 a 100	9.9927	10.0000	-0.0073	2.0	0.0027
0 a 100	49.980	50.000	-0.020	2.0	0.016
0 a 100	99.964	100.000	-0.036	2.0	0.020
mA a 1 kHz	mA	mA	mA	k para 95.45%	mA
0 a 100	9.9925	10.0000	-0.0075	2.0	0.0034
0 a 100	49.981	50.000	-0.019	2.0	0.020
0 a 100	99.967	100.000	-0.033	2.0	0.028
mA a 55 Hz	mA	mA	mA	k para 95.45%	mA
0 a 400	39.937	40.000	-0.063	2.0	0.016
0 a 400	199.808	200.002	-0.194	2.0	0.027
0 a 400	399.59	400.00	-0.41	2.0	0.14
mA a 1 kHz	mA	mA	mA	k para 95.45%	mA
0 a 400	39.934	40.000	-0.066	2.0	0.018
0 a 400	199.807	199.998	-0.191	2.0	0.044
0 a 400	399.64	400.00	-0.36	2.0	0.27
A a 55 Hz	A	A	A	k para 95.45%	A
0 a 1	0.100	0.100	0.000	2.0	0.014
0 a 1	0.5000	0.5000	0.0000	2.0	0.0023
0 a 1	0.9999	1.0000	-0.0001	2.0	0.0023
A a 1 kHz	A	A	A	k para 95.45%	A
0 a 1	0.100	0.100	0.000	2.0	0.014
0 a 1	0.5000	0.5000	0.0000	2.0	0.0023
0 a 1	1.0000	1.0000	0.0000	2.0	0.0023

Tabla 12. Medición frecuencia. Configuración 6 1/2 dígitos. Front Input.

Intervalo de medida	Valor medido	Valor aplicado patrón	Error	Factor de cobertura	Incertidumbre expandida U
MHz	MHz	MHz	MHz	k para 95.45%	MHz
0.3 a 1	1.000017	1.000000	0.000017	2.0	0.000001

Tabla 13. Medición de Temperatura (RTD). Pt 100 Alpha 0.00385. 4 Hilos. Front Input, NPLC=100.

Valor indicado instrumento bajo prueba	Valor medido convertido	Valor aplicado patrón	Error	Factor de cobertura	Incertidumbre expandida U
°C	Ω	Ω	Ω	k para 95.45%	Ω
-198.875	19.0036	18.9991	0.0045	2.0	0.0059
0.017	100.0065	100.0008	0.0057	2.0	0.0060
238.721	190.0094	190.0037	0.0057	2.0	0.0062

6. INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN

Measurement uncertainty

La incertidumbre reportada (ver columnas de incertidumbre expandida en las tablas de resultados) se ha determinado multiplicando la incertidumbre estándar combinada por el factor de cobertura k (ver columnas de factor de cobertura en las tablas) con el cual se logra una probabilidad de cobertura del 95.45% para una distribución t de Student.

La incertidumbre de medida fue estimada de acuerdo a "JCGM 100:2008 GUM 1995 with minor corrections".

La incertidumbre expresada en este certificado no incluye los cambios posibles causados por la deriva en los valores del instrumento. La incertidumbre por deriva debe ser estimada por el usuario.

7. TRAZABILIDAD DE LA MEDICIÓN

Traceability

Este certificado documenta la trazabilidad de acuerdo al Sistema Internacional de Unidades a través de los Patrones Nacionales del Instituto Nacional de Metrología que reproducen las unidades de las magnitudes eléctricas.

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN / CALIBRATION CERTIFICATE

LABORATORIO DE CORRIENTE CONTINUA Y ALTERNA
AC and DC CURRENT LABORATORY

Número de certificado / Certificate number: 3272

Los patrones utilizados fueron:

Instrumento	Marca / Modelo / No. Serie	Calibración: Fecha/ No.
Calibrador Multifunción	Fluke / 5720A / 6665204	Fluke 263138/2016-07-29
Resistencia patrón 1 GΩ	Fluke / 8508A-7000k / 55173	CNM-CC-410-239/2016-07-29
Amplificador de Transconductancia	Clarke-Hess / 8100 / 414	INM 2683/2017-06-01
Oscilador Atómico de Cesio – Patrón Nacional de tiempo y frecuencia.	Symmetricom / 5071A / US49353327	SIMTN (SIM Time Network) Common-View Measurement System

8. OBSERVACIONES

Additional information

Los resultados de calibración expresados en este certificado son válidos bajo las condiciones ambientales y en los modos de operación indicados. El usuario es responsable de realizar las correcciones necesarias si el instrumento es utilizado bajo condiciones distintas a las señaladas.

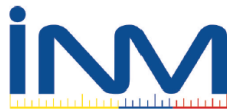
La trazabilidad de los valores de las mediciones que se realicen con este instrumento, se conservará solo si el usuario realiza el tratamiento adecuado de los errores correspondientes que se reportan en este certificado. Es responsabilidad del usuario calibrar el instrumento en intervalos de tiempo apropiados. El instrumento lleva una estampilla con el número de este certificado.

Este certificado emplea punto (.) en línea como separador decimal, de acuerdo con la 10ª Resolución de la 22ª CGPM de 2003 y la Resolución DG-210-2015 del 12 de Agosto de 2015 del INM.

Los indicadores (F) e (I) encontrados en la última columna de cada punto denotan:

- (F) Punto fuera de especificación del fabricante
- (I) No se puede determinar si el punto se encuentra dentro o fuera de especificación del fabricante.

Fin del Certificado de Calibración
End of Calibration Certificate



Instituto Nacional de Metrología
de Colombia

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN / CALIBRATION CERTIFICATE

LABORATORIO DE TEMPERATURA Y HUMEDAD
TEMPERATURE AND HUMIDITY LABORATORY



Número de certificado / Certificate number: 3341

Objeto / Object: TERMOMETRO DIGITAL CON TERMOPAR TIPO K

Tipo / Type: 181

Fabricante: KEITHLEY
Manufacturer:

Número de Serie: 467220 / 003
Serial number:

Solicitante: INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA - COLOMBIA
Customer:
Avenida Carrera 50 No. 26 - 55 Interior 2

Ciudad / City: BOGOTA D.C.
COLOMBIA

Fecha de calibración / Calibration date: 2018-05-11

Número de radicación / Radication number: 18 003090

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).
/ This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

El usuario está obligado a calibrar el instrumento a intervalos apropiados.
/ The user is obliged to have the object calibrated at appropriate intervals.

Este certificado de calibración no deberá ser usado para reclamar certificación de producto, aprobación o respaldo de NVLAP, NIST, o cualquier agencia del Gobierno de los Estados Unidos de América.
/ This calibration certificate shall not be used to claim product certification, approval, or endorsement by NVLAP, NIST, or any agency of the U.S. Government.

Este certificado de calibración no puede ser reproducido parcialmente, excepto con autorización del laboratorio que lo emite. Los suplementos de certificados de calibración sin firma no son válidos. / This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of the issuing laboratory. The supplements of the Calibration certificates without signature are not valid.

Los resultados de este certificado solo están relacionados con los objetos calibrados. / The results of this certificate just are related with the calibrated objects.



Este certificado es consistente con las capacidades de calibración y medición (CMC) que están incluidas en el Apéndice C del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo (CIPM MRA), elaborado por el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM). Bajo el CIPM MRA, todos los institutos participantes reconocen la validez de los certificados de calibración y medición de cada uno de los otros participantes para las magnitudes, los intervalos y las incertidumbres de medición especificadas en el Apéndice C (para más detalle ver <http://www.bipm.org>). / This certificate is consistent with the calibration and measurement capabilities (CMCs) that are included in Appendix C of the Mutual Recognition Arrangement (CIPM MRA) drawn up by the International Committee for Weights and Measures (CIPM). Under the CIPM MRA, all participating institutes recognize the validity of each other's calibration and measurement certificates for the quantities, ranges and measurement uncertainties specified in Appendix C (for details see <http://www.bipm.org>).

Fecha de Expedición: Calibrado por:
Issued date: Calibrated by:

Firmado digitalmente
COD0000000317

Autorizado por:
Authorized by:

Firmado digitalmente
COD0012399882

2018-05-16 Ingeniero Sergio Andrés Carvajal Perdomo
Profesional Universitario

Fisico Ciro Alberto Sanchez Morales
Profesional Especializado

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA - INM
SUBDIRECCION METROLOGIA FISICA, Laboratorio de Temperatura y Humedad
Avenida Carrera 50 No. 26-55, Interior 2 CAN. Bogotá D.C. - Colombia
Commutador: (57)(1) 2542222
E-mail: contacto@inm.gov.co, WEB: www.inm.gov.co



M1-01-F-18 - V4 (2018-03-09)

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN / CALIBRATION CERTIFICATE

LABORATORIO DE TEMPERATURA Y HUMEDAD
TEMPERATURE AND HUMIDITY LABORATORY



Número de certificado / Certificate number: 3341

1. CONSECUTIVO INTERNO: 18-L02-053
Internal number

2. DESCRIPCIÓN DEL INSTRUMENTO
Description of the instrument

Termómetro digital con termopar tipo K. Sensor: 003. Resolución: 0.1 °C. Inmersión: 200 mm.

3. MÉTODO DE CALIBRACIÓN
Calibration method

Comparación en baño líquido.

4. CONDICIONES AMBIENTALES
Environmental conditions

Las mediciones se realizaron bajo condiciones ambientales de:
Temperatura: 22.0 °C ± 3.0 °C
Humedad Relativa: 50.0 %HR ± 15.0 %HR

5. RESULTADOS DE CALIBRACIÓN
Results of calibration

Tabla 1. Resultados

Temperatura, °C	Corrección, °C	Factor de cobertura <i>k</i>	Incertidumbre de medición, °C
9.6	0.4	2.0	±0.8
19.6	0.4	2.0	±0.8
29.5	0.5	2.0	±0.8
39.5	0.5	2.0	±0.8

6. INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN
Measurement Uncertainty

La incertidumbre de medición reportada se ha determinado multiplicando la incertidumbre estándar combinada por el factor de cobertura *k*, con el cual se logra una probabilidad de cobertura del 95% aproximadamente para una distribución t-student.

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN / CALIBRATION CERTIFICATE

LABORATORIO DE TEMPERATURA Y HUMEDAD
TEMPERATURE AND HUMIDITY LABORATORY



Número de certificado / Certificate number: 3341

La incertidumbre de medición fue estimada de acuerdo con el documento: **JCGM 100:2008**, GUM 1995 with minor corrections. **Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement**. JCGM member organizations (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML). First edition. September 2008.

7. TRAZABILIDAD DE LA MEDICION

Traceability

Se usaron los siguientes instrumentos de medida:

Tabla 2. Trazabilidad

Instrumento	NIM	Trazabilidad
SPRT Pt25	020207	PTB
Indicador	020302	INM

El Instituto Nacional de Metrología - INM asegura el mantenimiento de la trazabilidad de estos patrones de medida con los Patrones Nacionales de Medida de Temperatura. Estos patrones son trazables a la Escala Internacional de Temperatura de 1990, **ITS-90**.

8. OBSERVACIONES

Additional information

Este certificado emplea punto (.) en línea como separador decimal, de acuerdo con la 10ª Resolución de la 22ª CGPM de 2003 y la Resolución DG-210-2015 del 12 de Agosto de 2015 del INM.

Fin del Certificado de Calibración
End of Calibration Certificate

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN / CALIBRATION CERTIFICATE

LABORATORIO DE TEMPERATURA Y HUMEDAD
TEMPERATURE AND HUMIDITY LABORATORY



Número de certificado / Certificate number: 3340

Objeto / Object: TERMOMETRO DIGITAL CON TERMOPAR TIPO K

Tipo / Type: 744

Fabricante: FLUKE
Manufacturer:

Número de Serie: 9752016 / 002
Serial number:

Solicitante: INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA - COLOMBIA
Customer:
Avenida Carrera 50 No. 26 - 55 Interior 2

Ciudad / City: BOGOTA D.C.
COLOMBIA

Fecha de calibración / Calibration date: 2018-05-11

Número de radicación / Radication number: 18 003090

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).
/ This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

El usuario está obligado a calibrar el instrumento a intervalos apropiados.
/ The user is obliged to have the object calibrated at appropriate intervals.

Este certificado de calibración no deberá ser usado para reclamar certificación de producto, aprobación o respaldo de NVLAP, NIST, o cualquier agencia del Gobierno de los Estados Unidos de América.
/ This calibration certificate shall not be used to claim product certification, approval, or endorsement by NVLAP, NIST, or any agency of the U.S. Government.

Este certificado de calibración no puede ser reproducido parcialmente, excepto con autorización del laboratorio que lo emite. Los suplementos de certificados de calibración sin firma no son válidos. / This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of the issuing laboratory. The supplements of the Calibration certificates without signature are not valid.

Los resultados de este certificado solo están relacionados con los objetos calibrados. / The results of this certificate just are related with the calibrated objects.



Este certificado es consistente con las capacidades de calibración y medición (CMC) que están incluidas en el Apéndice C del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo (CIPM MRA), elaborado por el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM). Bajo el CIPM MRA, todos los institutos participantes reconocen la validez de los certificados de calibración y medición de cada uno de los otros participantes para las magnitudes, los intervalos y las incertidumbres de medición especificadas en el Apéndice C (para más detalle ver <http://www.bipm.org>). / This certificate is consistent with the calibration and measurement capabilities (CMCs) that are included in Appendix C of the Mutual Recognition Arrangement (CIPM MRA) drawn up by the International Committee for Weights and Measures (CIPM). Under the CIPM MRA, all participating institutes recognize the validity of each other's calibration and measurement certificates for the quantities, ranges and measurement uncertainties specified in Appendix C (for details see <http://www.bipm.org>).

Fecha de Expedición: Calibrado por:
Issued date: Calibrated by:

Firmado digitalmente
COD0000000317

Autorizado por:
Authorized by:

Firmado digitalmente
COD0012399882

2018-05-16 Ingeniero Sergio Andrés Carvajal Perdomo
Profesional Universitario

Físico Ciro Alberto Sanchez Morales
Profesional Especializado

Página 1 de 3

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN / CALIBRATION CERTIFICATE

LABORATORIO DE TEMPERATURA Y HUMEDAD
TEMPERATURE AND HUMIDITY LABORATORY



Número de certificado / Certificate number: 3340

1. CONSECUTIVO INTERNO: 18-L02-052
Internal number

2. DESCRIPCIÓN DEL INSTRUMENTO
Description of the instrument

Termómetro digital con termopar tipo K. Sensor: 002. Resolución: 0.1 °C. Inmersión: 200 mm.

3. MÉTODO DE CALIBRACIÓN
Calibration method

Comparación en baño líquido.

4. CONDICIONES AMBIENTALES
Environmental conditions

Las mediciones se realizaron bajo condiciones ambientales de:

Temperatura: 22.0 °C ± 3.0 °C

Humedad Relativa: 50.0 %HR ± 15.0 %HR

5. RESULTADOS DE CALIBRACIÓN
Results of calibration

Tabla 1. Resultados

Temperatura, °C	Corrección, °C	Factor de cobertura <i>k</i>	Incertidumbre de medición, °C
10.6	-0.6	2.0	±0.8
20.4	-0.4	2.0	±0.8
30.3	-0.3	2.0	±0.8
40.2	-0.2	2.0	±0.8

6. INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN
Measurement Uncertainty

La incertidumbre de medición reportada se ha determinado multiplicando la incertidumbre estándar combinada por el factor de cobertura *k*, con el cual se logra una probabilidad de cobertura del 95% aproximadamente para una distribución t-student.

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN / CALIBRATION CERTIFICATE

LABORATORIO DE TEMPERATURA Y HUMEDAD
TEMPERATURE AND HUMIDITY LABORATORY



Número de certificado / Certificate number: 3340

La incertidumbre de medición fue estimada de acuerdo con el documento: **JCGM 100:2008**. GUM 1995 with minor corrections. **Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement**. JCGM member organizations (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML). First edition. September 2008.

7. TRAZABILIDAD DE LA MEDICION

Traceability

Se usaron los siguientes instrumentos de medida:

Tabla 2. Trazabilidad

Instrumento	NIM	Trazabilidad
SPRT Pt25	020207	PTB
Indicador	020302	INM

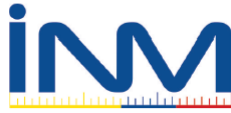
El Instituto Nacional de Metrología - INM asegura el mantenimiento de la trazabilidad de estos patrones de medida con los Patrones Nacionales de Medida de Temperatura. Estos patrones son trazables a la Escala Internacional de Temperatura de 1990, **ITS-90**.

8. OBSERVACIONES

Additional information

Este certificado emplea punto (.) en línea como separador decimal, de acuerdo con la 10ª Resolución de la 22ª CGPM de 2003 y la Resolución DG-210-2015 del 12 de Agosto de 2015 del INM.

Fin del Certificado de Calibración
End of Calibration Certificate



Instituto Nacional de Metrología
de Colombia

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN / CALIBRATION CERTIFICATE

LABORATORIO DE TEMPERATURA Y HUMEDAD
TEMPERATURE AND HUMIDITY LABORATORY



Número de certificado / Certificate number: 3339

Objeto / Object: TERMOMETRO DIGITAL CON TERMOPAR TIPO K

Tipo / Type: SD6C-HCJA-AARG

Fabricante: WATLOW
Manufacturer:

Número de Serie: 136989 / 001
Serial number:

Solicitante: INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA - COLOMBIA
Customer:
Avenida Carrera 50 No. 26 - 55 Interior 2

Ciudad / City: BOGOTA D.C.
COLOMBIA

Fecha de calibración / Calibration date: 2018-05-11

Número de radicación / Radication number: 18 003090

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).
/ This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

El usuario está obligado a calibrar el instrumento a intervalos apropiados.
/ The user is obliged to have the object calibrated at appropriate intervals.

Este certificado de calibración no deberá ser usado para reclamar certificación de producto, aprobación o respaldo de NVLAP, NIST, o cualquier agencia del Gobierno de los Estados Unidos de América.
/ This calibration certificate shall not be used to claim product certification, approval, or endorsement by NVLAP, NIST, or any agency of the U.S. Government.

Este certificado de calibración no puede ser reproducido parcialmente, excepto con autorización del laboratorio que lo emite. Los suplementos de certificados de calibración sin firma no son válidos. / This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of the issuing laboratory. The supplements of the Calibration certificates without signature are not valid.

Los resultados de este certificado solo están relacionados con los objetos calibrados. / The results of this certificate just are related with the calibrated objects.



Este certificado es consistente con las capacidades de calibración y medición (CMC) que están incluidas en el Apéndice C del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo (CIPM MRA), elaborado por el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM). Bajo el CIPM MRA, todos los institutos participantes reconocen la validez de los certificados de calibración y medición de cada uno de los otros participantes para las magnitudes, los intervalos y las incertidumbres de medición especificadas en el Apéndice C (para más detalle ver <http://www.bipm.org>). / This certificate is consistent with the calibration and measurement capabilities (CMCs) that are included in Appendix C of the Mutual Recognition Arrangement (CIPM MRA) drawn up by the International Committee for Weights and Measures (CIPM). Under the CIPM MRA, all participating institutes recognize the validity of each other's calibration and measurement certificates for the quantities, ranges and measurement uncertainties specified in Appendix C (for details see <http://www.bipm.org>).

Fecha de Expedición: Calibrado por:
Issued date: Calibrated by:

Firmado digitalmente
COD0000000317

Autorizado por:
Authorized by:

Firmado digitalmente
COD0012399882

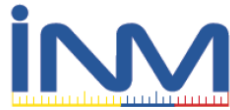
2018-05-16 Ingeniero Sergio Andrés Carvajal Perdomo
Profesional Universitario

Físico Ciro Alberto Sanchez Morales
Profesional Especializado Página 1 de 3

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA - INM
SUBDIRECCION METROLOGIA FISICA, Laboratorio de Temperatura y Humedad
Avenida Carrera 50 No. 26-55, Interior 2 CAN, Bogotá D.C. - Colombia
Conmutador: (57)(1) 2542222
E-mail: contacto@inm.gov.co, WEB: www.inm.gov.co



M1-01-F-18 - V4 (2018-03-09)



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN / CALIBRATION CERTIFICATE

LABORATORIO DE TEMPERATURA Y HUMEDAD
TEMPERATURE AND HUMIDITY LABORATORY



Número de certificado / Certificate number: 3339

1. CONSECUTIVO INTERNO: 18-L02-051
Internal number

2. DESCRIPCIÓN DEL INSTRUMENTO
Description of the instrument

Termómetro digital con termopar tipo K. Sensor: 001. Resolución: 0.1 °C. Inmersión: 200 mm.

3. MÉTODO DE CALIBRACIÓN
Calibration method

Comparación en baño líquido.

4. CONDICIONES AMBIENTALES
Environmental conditions

Las mediciones se realizaron bajo condiciones ambientales de:
Temperatura: 22.0 °C ± 3.0 °C
Humedad Relativa: 50.0 %HR ± 15.0 %HR

5. RESULTADOS DE CALIBRACIÓN
Results of calibration

Tabla 1. Resultados

Temperatura, °C	Corrección, °C	Factor de cobertura <i>k</i>	Incertidumbre de medición, °C
10.5	-0.5	2.0	±0.8
20.2	-0.2	2.0	±0.8
30.1	-0.1	2.0	±0.8
40.1	-0.1	2.0	±0.8

6. INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN
Measurement Uncertainty

La incertidumbre de medición reportada se ha determinado multiplicando la incertidumbre estándar combinada por el factor de cobertura *k*, con el cual se logra una probabilidad de cobertura del 95% aproximadamente para una distribución t-student.

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN / CALIBRATION CERTIFICATE

LABORATORIO DE TEMPERATURA Y HUMEDAD
TEMPERATURE AND HUMIDITY LABORATORY



Número de certificado / Certificate number: 3339

La incertidumbre de medición fue estimada de acuerdo con el documento: **JCGM 100:2008**. GUM 1995 with minor corrections. **Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement**. JCGM member organizations (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML). First edition. September 2008.

7. TRAZABILIDAD DE LA MEDICION

Traceability

Se usaron los siguientes instrumentos de medida:

Tabla 2. Trazabilidad

Instrumento	NIM	Trazabilidad
SPRT Pt25	020207	PTB
Indicador	020302	INM

El Instituto Nacional de Metrología - INM asegura el mantenimiento de la trazabilidad de estos patrones de medida con los Patrones Nacionales de Medida de Temperatura. Estos patrones son trazables a la Escala Internacional de Temperatura de 1990, **ITS-90**.

8. OBSERVACIONES

Additional information

Este certificado emplea punto (.) en línea como separador decimal, de acuerdo con la 10ª Resolución de la 22ª CGPM de 2003 y la Resolución DG-210-2015 del 12 de Agosto de 2015 del INM.

Fin del Certificado de Calibración
End of Calibration Certificate

ANEXO B.

DATOS OBTENIDOS EN LA EXPERIMENTACIÓN DE TENSIÓN, CORRIENTE, TEMPERATURAS DE LOS PLATOS Y TEMPERATURA AMBIENTE PARA EL POLIESTIRENO EXPANDIDO.

Prueba 1.

Bloque	Fecha	Hora Inicio	Hora Final	I , A	E , mV	T_{c_1} , °C	T_{c_2} , °C	T_h , °C	T_a , °C
1	09/04/18	12:31:08	13:00:59	0.16	11.46	11.70	11.60	30.50	21.50
2	09/04/18	13:52:52	14:22:43	0.14	11.45	11.70	11.60	30.60	21.60
3	09/04/18	14:22:53	14:52:45	0.12	11.46	11.70	11.60	30.70	21.60
4	09/04/18	14:52:46	15:22:46	0.09	11.46	11.70	11.70	30.60	21.60
5	09/04/18	15:22:56	15:52:48	0.11	11.46	11.70	11.60	30.50	21.60
6	09/04/18	15:52:58	16:22:49	0.13	11.46	11.70	11.70	30.60	21.60
7	09/04/18	16:22:59	16:52:51	0.12	11.46	11.70	11.60	30.50	21.70

Fuente. Elaboración propia

Prueba 2.

Bloque	Fecha	Hora Inicio	Hora Final	I , A	E , mV	T_{c_1} , °C	T_{c_2} , °C	T_h , °C	T_a , °C
1	10/04/18	13:15:49	13:45:41	0.10	11.46	11.70	11.70	30.60	21.60
2	10/04/18	13:45:51	14:15:42	0.14	11.46	11.70	11.70	30.60	21.60
3	10/04/18	14:15:52	14:45:44	0.12	11.46	11.70	11.60	30.60	21.60
4	10/04/18	14:45:54	15:15:45	0.16	11.47	11.70	11.60	30.50	21.60
5	10/04/18	15:15:55	15:45:47	0.12	11.46	11.70	11.60	30.20	21.60
6	10/04/18	15:45:57	16:15:49	0.10	11.46	11.70	11.60	30.60	21.70
7	10/04/18	16:15:59	16:45:59	0.12	11.47	11.70	11.60	30.50	21.70

Fuente. Elaboración propia

Prueba 3

Bloque	Fecha	Hora Inicio	Hora Final	I , A	E , mV	T_{c_1} , °C	T_{c_2} , °C	Th , °C	Ta , °C
1	11/04/18	13:21:19	13:51:11	0.19	11.46	11.60	11.60	30.60	21.50
2	11/04/18	13:51:21	14:21:13	0.12	11.46	11.60	11.60	30.70	21.60
3	11/04/18	14:21:23	14:51:14	0.07	11.47	11.60	11.60	30.60	21.60
4	11/04/18	14:51:24	15:21:16	0.17	11.46	11.60	11.60	30.60	21.60
5	11/04/18	15:21:26	15:51:18	0.13	11.47	11.60	11.60	30.60	21.60
6	11/04/18	15:51:28	16:21:19	0.12	11.46	11.60	11.60	30.40	21.60
7	11/04/18	16:21:29	16:51:21	0.17	11.47	11.60	11.60	30.30	21.60

Fuente. Elaboración propia

Prueba 4

Bloque	Fecha	Hora Inicio	Hora Final	I , A	E , mV	T_{c_1} , °C	T_{c_2} , °C	Th , °C	Ta , °C
1	12/04/18	13:13:42	13:43:34	0.11	11.47	11.60	11.60	30.50	21.70
2	12/04/18	13:43:44	14:13:36	0.15	11.47	11.60	11.60	30.50	21.70
3	12/04/18	14:13:46	14:43:37	0.11	11.47	11.60	11.60	30.40	21.70
4	12/04/18	14:43:47	15:13:39	0.13	11.46	11.60	11.60	30.30	21.70
5	12/04/18	15:13:49	15:43:41	0.15	11.47	11.60	11.60	30.20	21.80
6	12/04/18	15:43:51	16:13:42	0.17	11.47	11.60	11.60	30.40	21.80
7	12/04/18	16:13:52	16:43:44	0.15	11.47	11.60	11.60	30.30	21.80

Fuente. Elaboración propia

Prueba 5

Bloque	Fecha	Hora Inicio	Hora Final	I , A	E , mV	T_{c_1} , °C	T_{c_2} , °C	Th , °C	Ta , °C
1	13/04/18	13:16:14	13:46:05	0.13	11.47	11.50	11.60	30.60	20.00
2	13/04/18	13:46:15	14:16:07	0.14	11.47	11.50	11.60	30.70	19.90
3	13/04/18	14:16:17	14:46:09	0.12	11.47	11.50	11.60	30.00	19.80
4	13/04/18	14:46:19	15:16:10	0.08	11.47	11.50	11.60	30.40	19.90
5	13/04/18	15:16:20	15:46:12	0.16	11.48	11.50	11.60	29.20	20.00
6	13/04/18	15:46:22	16:16:14	0.15	11.47	11.50	11.60	29.90	19.80
7	13/04/18	16:16:24	16:46:15	0.13	11.47	11.50	11.60	30.40	19.70

Fuente. Elaboración propia

Prueba 6

Bloque	Fecha	Hora Inicio	Hora Final	I , A	E , mV	T_{c_1} , °C	T_{c_2} , °C	T_h , °C	T_a , °C
1	16/04/18	13:00:31	13:30:11	0.10	11.46	11.50	11.50	30.30	20.50
2	16/04/18	13:30:01	14:00:13	0.14	11.46	11.50	11.60	30.10	20.30
3	16/04/18	14:00:33	14:30:14	0.14	11.46	11.50	12.00	30.40	19.80
4	16/04/18	14:30:34	15:00:16	0.14	11.46	11.50	11.60	30.70	20.40
5	16/04/18	15:00:34	15:30:18	0.14	11.46	11.50	11.60	30.70	20.60
6	16/04/18	15:30:35	16:00:19	0.09	11.46	11.50	11.60	30.30	20.10
7	16/04/18	16:00:36	16:30:21	0.12	11.46	11.50	11.60	30.30	20.20

Fuente. Elaboración propia

Prueba 7

Bloque	Fecha	Hora Inicio	Hora Final	I , A	E , mV	T_{c_1} , °C	T_{c_2} , °C	T_h , °C	T_a , °C
1	17/04/18	13:16:11	13:46:03	0.20	11.46	11.60	11.60	30.20	21.40
2	17/04/18	13:46:13	14:16:06	0.23	11.47	11.60	11.60	29.90	21.50
3	17/04/18	14:16:16	14:46:08	0.17	11.47	11.60	11.60	29.70	21.50
4	17/04/18	14:46:19	15:16:11	0.14	11.47	11.60	11.60	30.10	21.50
5	17/04/18	15:16:21	15:46:14	0.23	11.46	11.60	11.60	30.10	21.50
6	17/04/18	15:46:24	16:16:16	0.16	11.47	11.60	11.60	30.20	21.60
7	17/04/18	16:16:26	16:46:19	0.23	11.47	11.60	11.60	29.80	21.60

Fuente. Elaboración propia

Prueba 8

Bloque	Fecha	Hora Inicio	Hora Final	I , A	E , mV	T_{c_1} , °C	T_{c_2} , °C	T_h , °C	T_a , °C
1	18/04/18	13:28:03	13:57:55	0.15	11.47	11.60	11.60	29.90	21.60
2	18/04/18	13:58:05	14:27:56	0.15	11.47	11.60	11.60	30.00	21.60
3	18/04/18	14:28:06	14:57:57	0.17	11.47	11.60	11.60	30.60	21.60
4	18/04/18	14:58:07	15:27:59	0.24	11.47	11.60	11.60	29.90	21.60
5	18/04/18	15:28:09	15:58:00	0.11	11.47	11.60	11.60	30.00	21.70
6	18/04/18	15:58:10	16:28:01	0.19	11.47	11.60	11.60	30.00	21.70
7	18/04/18	16:28:11	16:58:03	0.19	11.47	11.60	11.60	30.20	21.80

Fuente. Elaboración propia

Prueba 9

Bloque	Fecha	Hora Inicio	Hora Final	I , A	E , mV	T_{c_1} , °C	T_{c_2} , °C	T_h , °C	T_a , °C
1	19/04/18	13:16:36	13:45:36	0.17	11.47	11.60	11.60	30.40	20.80
2	19/04/18	13:46:36	14:15:36	0.18	11.47	11.50	11.60	30.00	20.60
3	19/04/18	14:16:36	14:45:36	0.18	11.46	11.60	11.60	29.70	20.40
4	19/04/18	14:46:36	15:15:36	0.18	11.47	11.50	11.60	29.70	20.30
5	19/04/18	15:16:36	15:45:36	0.17	11.47	11.50	11.60	30.00	20.40
6	19/04/18	15:46:36	16:15:36	0.17	11.47	11.60	11.60	30.20	20.80
7	19/04/18	16:16:36	16:45:36	0.20	11.47	11.60	11.60	30.30	21.20

Fuente. Elaboración propia

Prueba 10

Bloque	Fecha	Hora Inicio	Hora Final	I , A	E , mV	T_{c_1} , °C	T_{c_2} , °C	T_h , °C	T_a , °C
1	20/04/18	13:24:53	13:54:44	0.18	11.47	11.60	11.60	30.00	21.80
2	20/04/18	13:54:54	14:24:46	0.23	11.47	11.60	11.60	30.00	21.90
3	20/04/18	14:24:56	14:54:47	0.20	11.47	11.60	11.60	29.90	21.90
4	20/04/18	14:54:57	15:24:48	0.16	11.47	11.60	11.60	29.10	21.70
5	20/04/18	15:24:58	15:54:50	0.22	11.47	11.60	11.60	29.90	21.80
6	20/04/18	15:55:00	16:24:52	0.18	11.47	11.60	11.60	29.90	21.90
7	20/04/18	16:25:02	16:54:56	0.17	11.47	11.60	11.60	30.20	22.00

Fuente. Elaboración propia

Prueba 11. Corrección de la prueba 1.

Bloque	Fecha	Hora Inicio	Hora Final	I , A	E , mV	T_{c_1} , °C	T_{c_2} , °C	T_h , °C	T_a , °C
1	23/04/18	13:26:54	13:56:46	0.18	11.47	11.60	11.60	30.10	21.60
2	23/04/18	13:56:56	14:26:48	0.17	11.47	11.60	11.60	30.10	21.60
3	23/04/18	14:26:58	14:56:49	0.18	11.47	11.60	11.60	30.10	21.70
4	23/04/18	14:56:59	15:26:51	0.20	11.47	11.60	11.60	30.10	21.70
5	23/04/18	15:27:01	15:56:52	0.17	11.47	11.60	11.60	30.10	21.80
6	23/04/18	15:57:02	16:26:54	0.20	11.47	11.60	11.60	30.00	21.90
7	23/04/18	16:27:04	16:56:56	0.17	11.47	11.60	11.60	30.20	21.80

Fuente. Elaboración propia

ANEXO C.

DATOS OBTENIDOS EN LA EXPERIMENTACIÓN DE TENSIÓN, CORRIENTE, TEMPERATURAS DE LOS PLATOS Y TEMPERATURA AMBIENTE PARA LA FIBRA DE VIDRIO.

Prueba 12.

Bloque	Fecha	Hora Inicio	Hora Final	I , A	E , mV	T_{c_1} , °C	T_{c_2} , °C	T_h , °C	T_a , °C
1	24/04/18	13:25:38	13:55:30	0.07	11.47	11.60	11.50	29.40	21.80
2	24/04/18	13:55:40	14:25:31	0.11	11.47	11.60	11.50	29.90	21.80
3	24/04/18	14:25:41	14:55:33	0.09	11.47	11.60	11.60	29.40	21.90
4	24/04/18	14:55:43	15:25:34	0.08	11.47	11.60	11.60	29.90	21.80
5	24/04/18	15:25:44	15:55:36	0.12	11.47	11.60	11.60	30.00	21.80
6	24/04/18	15:55:46	16:25:38	0.07	11.47	11.60	11.60	30.00	21.90
7	24/04/18	16:25:48	16:55:39	0.08	11.47	11.60	11.60	30.00	21.90

Fuente. Elaboración propia

Prueba 13.

Bloque	Fecha	Hora Inicio	Hora Final	I , A	E , mV	T_{c_1} , °C	T_{c_2} , °C	T_h , °C	T_a , °C
1	25/04/18	13:29:22	13:59:13	0.08	11.48	11.50	11.60	30.00	21.80
2	25/04/18	13:59:23	14:29:15	0.08	11.48	11.50	11.60	29.90	21.80
3	25/04/18	14:29:25	14:59:16	0.10	11.47	11.60	11.60	29.40	21.90
4	25/04/18	14:59:26	15:29:18	0.08	11.48	11.60	11.60	30.00	22.00
5	25/04/18	15:29:28	15:59:19	0.07	11.48	11.60	11.60	30.00	22.00
6	25/04/18	15:59:29	16:29:21	0.08	11.47	11.60	11.60	29.90	22.00
7	25/04/18	16:29:31	16:59:23	0.10	11.47	11.60	11.60	29.90	22.10

Fuente. Elaboración propia

Prueba 14.

Bloque	Fecha	Hora Inicio	Hora Final	I , A	E , mV	T_{c_1} , °C	T_{c_2} , °C	T_h , °C	T_a , °C
1	26/04/18	13:30:31	14:00:22	0.11	11.48	11.60	11.50	30.00	23.40
2	26/04/18	14:00:32	14:30:24	0.10	11.47	11.60	11.50	29.90	23.40
3	26/04/18	14:30:34	15:00:26	0.10	11.48	11.60	11.60	29.90	23.50
4	26/04/18	15:00:36	15:30:27	0.09	11.47	11.60	11.50	29.90	23.70
5	26/04/18	15:30:37	16:00:29	0.05	11.48	11.60	11.60	30.00	23.70
6	26/04/18	16:00:39	16:30:31	0.09	11.48	11.60	11.60	29.90	23.60
7	26/04/18	16:30:41	17:00:32	0.09	11.48	11.60	11.60	29.90	23.60

Fuente. Elaboración propia

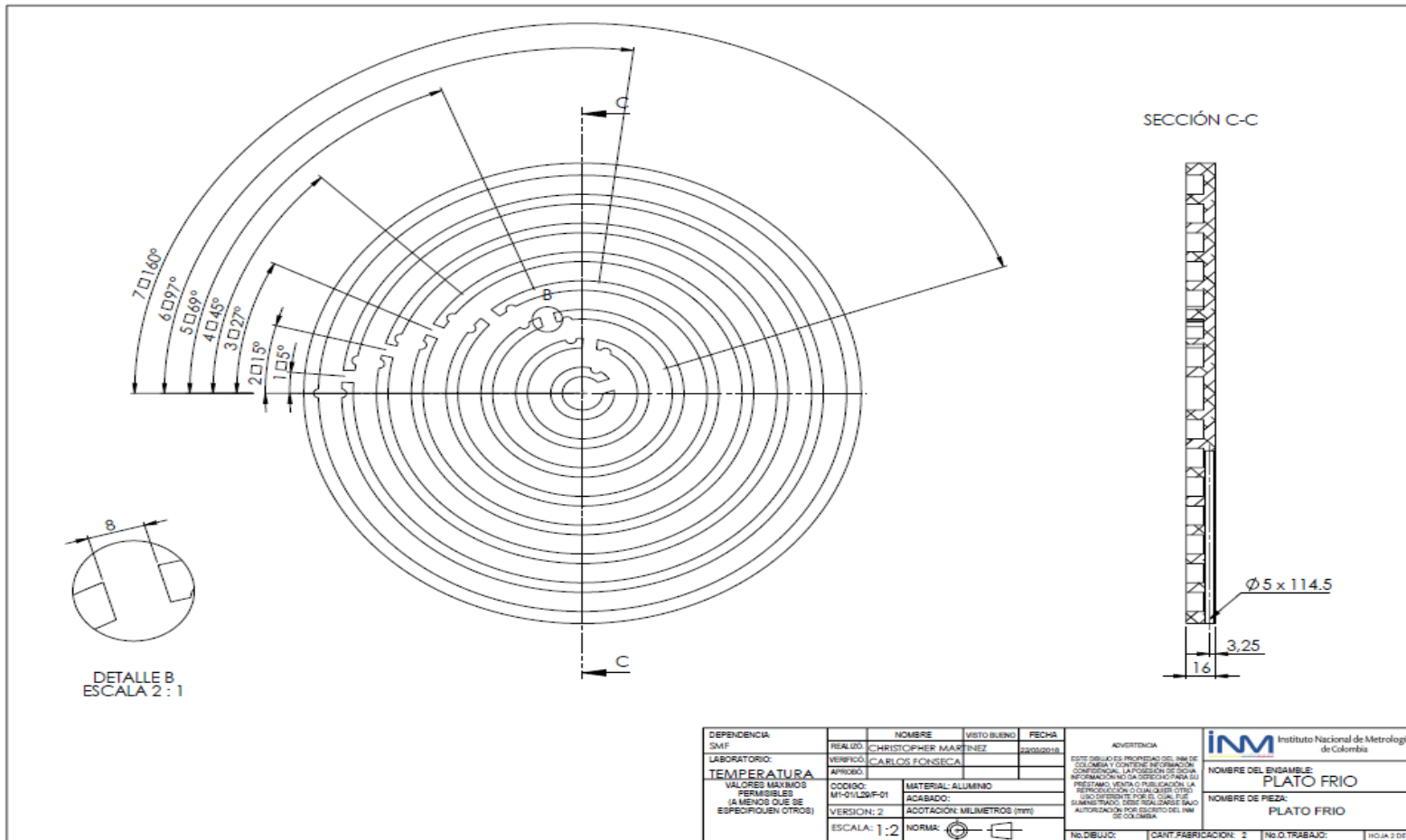
Prueba 15.

Bloque	Fecha	Hora Inicio	Hora Final	I , A	E , mV	T_{c_1} , °C	T_{c_2} , °C	T_h , °C	T_a , °C
1	27/04/18	13:08:18	13:38:09	0.01	11.47	11.50	11.60	29.90	23.40
2	27/04/18	14:38:19	14:08:11	0.01	11.48	11.50	11.60	30.00	23.40
3	26/04/18	14:08:21	14:38:13	0.01	11.47	11.50	11.60	30.00	23.50
4	26/04/18	15:38:23	15:08:14	0.02	11.47	11.50	11.60	29.90	23.70
5	26/04/18	15:08:24	15:38:16	0.01	11.54	11.50	11.60	29.90	23.70
6	26/04/18	16:38:26	16:08:17	0.01	11.48	11.50	11.60	30.00	23.60
7	26/04/18	16:08:27	16:38:19	0.01	11.48	11.50	11.60	29.90	23.60

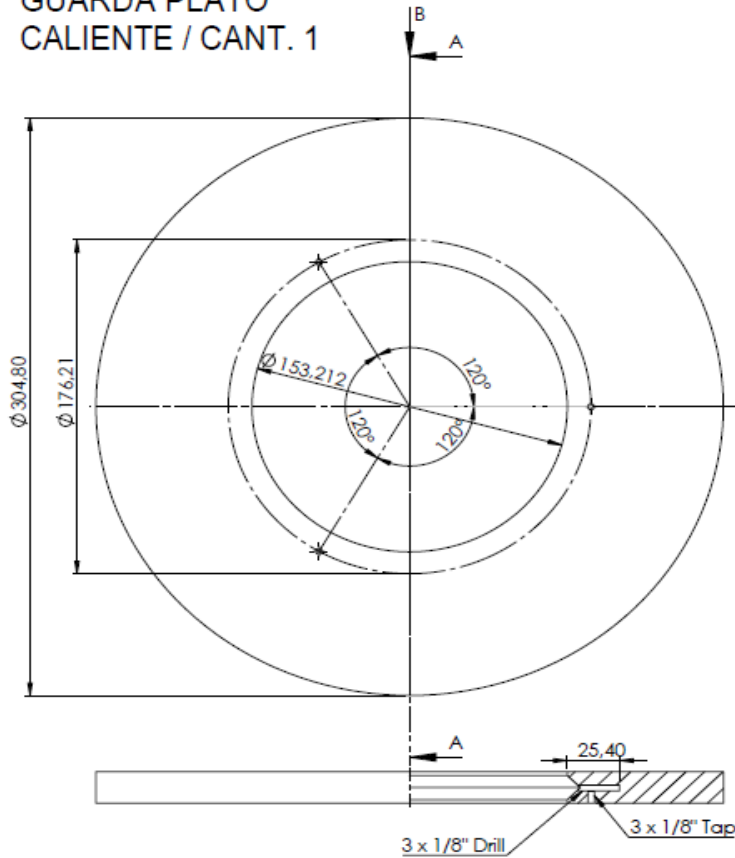
Fuente. Elaboración propia

ANEXO D.

PLANOS DE PLATOS FRÍOS Y PLATO CALIENTE

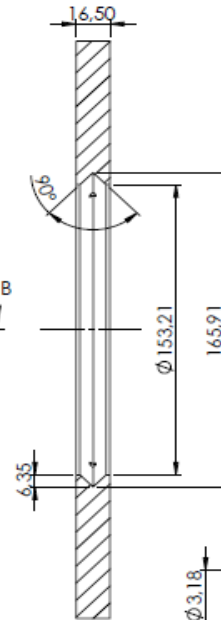


**GUARDA PLATO
CALIENTE / CANT. 1**



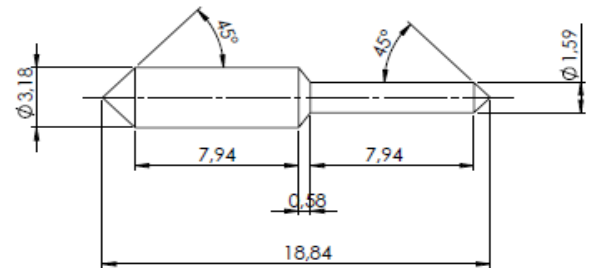
**SECCIÓN B-B
ESCALA 1 : 2**


**SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 2**



NOTA: TODAS LAS DIMENSIONES SE TRABAJARAN CON UNA TOLERANCIA DE 0.02mm

**PASADOR CENTRAL
CANT. 3**



DEPENDENCIA SMF	REALIZO CHRISTOPHER MARTINEZ	VISTO BUENO	FECHA 26/02/2018	ADVERTENCIA	 Instituto Nacional de Metrología de Colombia NOMBRE DEL ENSAMBLE: CONDUCTIVIDAD TERMICA - PLATO CALIENTE NOMBRE DE PIEZA: GUARDA Y PASADOR CENTRAL
LABORATORIO: TEMPERATURA Y HUMEDAD	VERIFICO SERGIO CAVALJAL			ESTE DIBUJO ES PROPIEDAD DEL INM DE COLOMBIA Y CONTIENE INFORMACION CONFIDENCIAL. LA POSESION DE ESTA INFORMACION NO DA DERECHO PARA SU REPRODUCCION O CUALQUIER OTRO USO DIFERENTE POR EL CUAL FUE ENTREGADO. ESTE DIBUJO SE HA AUTORIZADO POR ESCRITO DEL INM DE COLOMBIA	
VALORES MAXIMOS PERMISIBLES (A MENOS QUE SE ESPECIFIQUEN OTROS)	APROBO SERGIO CAVALJAL				
	CODIGO: M1-01/L24/F-01			MATERIAL: ALUMINIO - SAE 304 ACABADO: ACOTACION: MILIMETROS (mm)	
	VERSION: 2			NORMA:	
	ESCALA: 1:5			No. DIBUJO:	CANT. FABRICACION:
				No. O. TRABAJO:	HOJA 1 DE 2

ANEXO E.

CERTIFICADO DE MATERIAL DE REFERENCIA



National Institute of Standards & Technology Certificate

Standard Reference Material® 1450d

Thermal Conductivity - Fibrous Glass Board

Serial Number: 093

This Standard Reference Material (SRM) is intended primarily for use in the measurement of the thermal conductivity or thermal resistance of insulation materials. SRM 1450d is a high-density fibrous glass board certified for bulk density (ρ) and thermal conductivity (λ). The SRM can be used in conjunction with ASTM C177 [1] or ASTM C518 [2]. A unit of SRM 1450d consists of a square panel of fibrous glass and phenolic binder molded into a semi-rigid board. The nominal dimensions of a unit are 611 mm \times 611 mm \times 26 mm, and the bulk density of the material lot ranges from 114 kg \cdot m⁻³ to 124 kg \cdot m⁻³.

Certified Values and Uncertainties: The certified values of ρ (kg \cdot m⁻³) and λ (W \cdot m⁻¹ \cdot K⁻¹), and their associated relative expanded uncertainties ($k = 2$) for this unit are

$$\rho = 124 \pm 1.2 \% (k = 2)$$

$$\lambda = (1.10489 \times 10^{-4}) \times T \pm 1.0 \% (k = 2)$$

where T is the mean specimen temperature (K) valid from 280 K to 340 K.

Expiration of Certification: The certification of SRM 1450d is valid indefinitely, within the uncertainty specified, provided the SRM is handled and stored in accordance with instructions given in this certificate (see "Instructions for Handling, Storage, and Use"). Accordingly, periodic recalibration or recertification of this SRM is not required. The certification is nullified if the SRM is damaged, contaminated, or otherwise modified.

Maintenance of SRM Certification: NIST will monitor this SRM over the period of its certification. If substantive technical changes occur that affect the certification, NIST will notify the purchaser. Registration (see attached sheet) will facilitate notification.

The overall direction and coordination of the technical measurements leading to the certification of this SRM were performed by R.R. Zarr, A.C. Harris, and J.F. Roller of the NIST Energy and Environment Division.

Statistical analysis was provided by S.D. Leigh of the NIST Statistical Engineering Division.

Support aspects involved in the issuance of this SRM were coordinated through the NIST Measurement Services Division.

A. Hunter Fanney, Chief
Energy and Environment Division

Robert L. Watters, Jr., Chief
Measurement Services Division

Gaithersburg, MD 20899
Certificate Issue Date: 20 January 2012
Certificate Revision History on Last Page

INSTRUCTIONS FOR HANDLING, STORAGE, AND USE

Stacking: Certified values of thermal conductivity are valid for a single unit, and are invalid for stacked units.

Slicing: Certified values of thermal conductivity are invalid for a unit where the thickness of the material has been modified by slicing.

Cutting: It is possible to cut the SRM unit into smaller pieces. It is imperative to verify that bulk density of each piece is within the certified range of bulk density ($114 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ to $124 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

Upper Temperature Limit: The decomposition point of the binder is approximately 473 K (200 °C). As a precaution, this SRM should not be heated above 380 K (107 °C). It should be noted that oven drying, as opposed to desiccant drying, can remove other volatiles and potentially affect chemical or physical properties of the material.

Lower Temperature Limit: A lower temperature limit for SRM 1450d has not been established.

Use: The SRM unit should not be compressed more than 10 % of original thickness. The unit should be stored in the original packaging for identification purposes in a clean dry environment at temperatures between 15 °C and 30 °C. Prior to the thermal conductivity measurement, the SRM should be maintained in laboratory conditions of 20 °C to 25 °C and from 40 % relative humidity (RH) to 65 % RH until the mass of the unit is stable (i.e., two successive measurements within 24 h differ by less than 1 %). Thermal conductivity measurements should be conducted in accordance with the appropriate ASTM Test Method C177 [1], C518 [2], or other similar international standard.

SOURCE, PREPARATION, AND ANALYSIS ⁽¹⁾

Source: SRM 1450d is a commercial insulation product supplied by Quiet Core, Incorporated.

Sample Selection: Test specimens for characterizing the steady-state thermal transmission properties of SRM 1450d were selected based on a randomized full factorial experimental design that required 30 test specimens (15 pairs) covering three nominal levels of density. The breakdown consisted of five pairs having a relatively low bulk density, five pairs near the mean bulk density, and five pairs having a relatively high bulk density.

Measurement Technique: Thermal conductivity measurements were made on the NIST 1016 mm line-heat-source guarded-hot-plate apparatus [3] in accordance with ASTM Test Method C177 [1]. Following a randomized full factorial design, the thermal conductivity ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) was determined for three levels of bulk density ranging from $114 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ to $124 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ and five levels of mean temperature (280 K, 295 K, 310 K, 325 K, and 340 K). A temperature difference of 25 K was maintained across the thickness of the test specimens. A model, linear in mean temperature (in kelvin), was fit from the experimental data by least squares regression.

$$\lambda = (1.10489 \cdot 10^4) T$$

The last digit of the coefficient is provided to reduce rounding errors. The residual standard deviation of the fit was $0.00012 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Measurement Uncertainty: Measurement uncertainties for SRM 1450d are discussed in reference 3. The uncertainties in the certified values of thermal conductivity were calculated according to the ISO Guide [4]. These uncertainties apply only to this lot of fibrous glass board and can be expressed as an expanded uncertainty $U = ku_c$ with U determined from a combined standard uncertainty u_c and a coverage factor of $k = 2$. The determination of u_c and the interpretation of the expanded uncertainties are discussed in reference 4. The expanded uncertainties of the certified thermal conductivity values are not expected to exceed 1 %. This estimate is based on the budget for the measurement uncertainties.

Supplemental Information: For unit conversions to non-SI units, the user should consult NIST Special Publication 811 [5].

⁽¹⁾ Certain commercial equipment, instruments or materials are identified in this certificate to adequately specify the experimental procedure. Such identification does not imply recommendation or endorsement by the National Institute of Standards and Technology, nor does it imply that the materials or equipment identified are necessarily the best available for the purpose.
SRM 1450d Page 2 of 3

REFERENCES

- [1] ASTM C177-10, *Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus*; Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.06, West Conshohocken, PA (2010).
- [2] ASTM C518-10, *Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus*; Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.06, West Conshohocken, PA (2010).
- [3] Zarr, R.R.; Harris, A.C.; Roller, J.F.; Leigh, S.D.; *SRM 1450d, Fibrous-Glass Board, for Thermal Conductivity from 280 K to 340 K*; NIST Special Publication 260-173; U.S. Government Printing Office: Washington, DC; available at <http://www.nist.gov/srm/publications.cfm> (accessed Jan 2012).
- [4] JCGM 100:2008; *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*; (ISO GUM 1995 with Minor Corrections), Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM) (2008); available at http://www.bipm.org/utls/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf (accessed Jan 2012); see also Taylor, B.N.; Kuyatt, C.E.; *Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results*; NIST Technical Note 1297; U.S. Government Printing Office: Washington, DC (1994); available at <http://www.nist.gov/pml/pubs/index.cfm> (accessed Jan 2012).
- [5] Thompson, A.; Taylor, B.N.; *Guide for the Use of the International System of Units (SI)*; NIST Special Publication 811; U.S. Government Printing Office: Washington, DC (2008); available at <http://www.nist.gov/pml/pubs/index.cfm> (accessed Jan 2012).

Certificate Revision History: 20 January 2012 (Bulk density expanded uncertainty corrected; Editorial changes); 11 July 2011 (Original certificate date).

Users of this SRM should ensure that the Certificate in their possession is current. This can be accomplished by contacting the SRM Program: telephone (301) 975-2200; fax (301) 926-4751; e-mail srminfo@nist.gov; or via the Internet at <http://www.nist.gov/srm>.