



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO



DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

**DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UN DISPOSITIVO  
PARA DETERMINAR LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE  
MATERIALES HOMOGÉNEOS DE CONSTRUCCIÓN**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA**

PRESENTA:  
CÉSAR AUGUSTO DE DIOS DE LA CRUZ

BAJO LA DIRECCIÓN DE:  
DR. EDGAR VICENTE MACÍAS MELO

EN CODIRECCIÓN:  
DR. LUIS MANUEL LÓPEZ MANRIQUE

CUNDUACÁN, TABASCO A SEPTIEMBRE DE 2024

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

## Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Cunduacán, el día 6 del mes septiembre del año 2024, el que suscribe el Ing. César Augusto de dios de la Cruz alumno del Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería con número de matrícula 212d19004, adscrito a la División Académica de Ingeniería y Arquitectura, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor de la Tesis presentada para la obtención del Grado de Maestro titulada Desarrollo y caracterización de un dispositivo para determinar la conductividad térmica de materiales homogéneos de construcción dirigida por el Dr. Edgar Vicente Macias Melo.

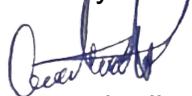
### DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Cunduacán, Tabasco a 6 de septiembre de 2024.

Nombre y Firma



Ing. César Augusto de dios de la Cruz.



**UJAT**

UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División  
Académica  
de Ingeniería  
y Arquitectura



2024  
Felipe Carrillo  
PUERTO  
PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA  
MEXICO

**DIRECCIÓN**

**OFICIO:** DAIA/DIR 2015 /2024

**FECHA:** 11 de septiembre de 2024

**ASUNTO:** Autorización de  
impresión definitiva

**ING. CÉSAR AUGUSTO DE DIOS DE LA CRUZ**  
PASANTE DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA  
**P R E S E N T E**

En virtud de haber elaborado su trabajo de Tesis denominado:

**"Desarrollo y caracterización de un dispositivo para determinar la conductividad térmica de materiales homogéneos de construcción"**

Para obtener el grado de **Maestro en Ciencias en Ingeniería** y en el cual ha tenido como Director de Tesis a el Dr. Edgar Vicente Macías Melo y Codirector al Dr. Luis Manuel López Manrique.

Tengo a bien autorizarle la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los trámites correspondientes para su examen de obtención de grado.

Agradeciendo de antemano sus atenciones, le envío un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

**DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ**  
**DIRECTORA**

c.c.p. Archivo  
DRA'DMFM / LB'ECR



**DIRECCIÓN**

Carretera Cunduacán –Jalpa de Méndez, km 1, Col. La Esmeralda,  
C.P.86690 Cunduacán, Tabasco  
Tel. (993) 358.15.00 Ext. 6752  
e-Mail: [direccion.daia@ujat.mx](mailto:direccion.daia@ujat.mx)

[www.ujat.mx](http://www.ujat.mx)



# UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”



División  
Académica  
de Ingeniería  
y Arquitectura



2024  
Felipe Carrillo  
PUERTO  
GOBIERNO FEDERAL  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN  
PÚBLICA  
MEXICO

## JEFATURA DE POSGRADO

Cunduacán, Tabasco a 30 de agosto de 2024.

**MEM / AP-DAIA / 175 / 2024**

PARA **DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ**  
DIRECTORA DE LA DAIA  
DE: COMISIÓN SINODAL  
ASUNTO: APROBACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS DE MAESTRÍA

Una vez hecha la revisión detallada del Trabajo de Tesis denominado:

**“Desarrollo y caracterización de un dispositivo para determinar la conductividad térmica de materiales homogéneos de construcción”**

Desarrollado por el Ing. César Augusto de Dios de la Cruz de la Maestría en Ciencias en Ingeniería, le comunicamos que aceptamos la impresión del trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.

### COMITÉ SINODAL

  
DRA. KARLA MARÍA AGUILAR CASTRO  
PRESIDENTE

  
DRA. MIGUEL ÁNGEL HERNÁNDEZ RIVERA  
SECRETARIO

  
DR. EDGAR VICENTE MACÍAS MELO  
VOCAL 1

  
DRA. EBELIA DEL ÁNGEL MERAZ  
VOCAL 2

  
DR. IVAN ALEJANDRO HERNÁNDEZ PÉREZ  
VOCAL 3

# Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 6 de septiembre de 2024.

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como autor en la producción, creación y/o realización de la obra denominada Desarrollo y caracterización de un dispositivo para determinar la conductividad térmica de materiales homogéneos de construcción.

Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

## COLABORADORES



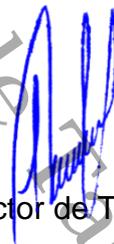
Alumno

Ing. César de Dios de la Cruz.



Director de Tesis

Dr. Edgar Vicente Macías Melo.



Co-director de Tesis

DR. Luis Manuel López Manrique.

## **Dedicatorias**

*A mis padres: María de los Santos y Miguel de Dios, por estar conmigo de manera incondicional.*

*A mi prometida Karla Crisóstomo: Por su amor incondicional y sempiterno.*

*A mis abuelos que ya no están conmigo: Francisco de Dios, María López, Jose Cruz y Librada Montero.*

*A mis Asesores por compartir amablemente sus conocimientos y ser dedicados con sus estudiantes.*

*A mis hermanos: Auribel, Shandira y Emmanuel por el cariño que siempre me han dado.*

*A mis amigos: Carlos Rodas, Luis Cupil, Javier Chan, Jhonatan Palacios, Román Méndez, Eduardo Ramos, Javier Concha por su aprecio y amistad a lo largo de los años.*

*"Si quieres tener buenas ideas, tienes que tener muchas ideas. La mayoría de ellas serán erróneas, y solo tienes que aprender cuáles desechar".*

*Linus Pauling.*

## **Agradecimientos**

*Quiero agradecer:*

*A Dios por ayudarme a alcanzar otra meta más en mi vida.*

*De manera muy especial a mis asesores:*

*Al Dr. Edgar Vicente Macías Melo y la Dra. Karla María Aguilar Castro por valiosa ayuda e incondicional apoyo en este trabajo de investigación, por sus consejos de vida (y recuerdos), los momentos divertidos y de aprendizaje que pasamos juntos.*

*A mis Padres: María de los Santos y Miguel de Dios, por seguir alentándome en mi preparación.*

*A mi prometida Karla Crisóstomo y su familia, por su gran ayuda aún en los momentos más difíciles.*

*Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo financiero recibido para seguir preparando material humano en pro del avance del país.*

## Resumen

En este trabajo, se presenta el desarrollo y caracterización de un dispositivo experimental para determinar la Conductividad Térmica de Materiales Homogéneos de Construcción (CTMHC) considerando modelación en CFD y requerimientos normativos. Para determinar la conductividad térmica se diseñó, construyó e instrumentó un aparato de Placa Caliente con Guarda (APCG). El método de placa caliente con guarda es un método primario en estado estacionario. El APCG consta de una unidad de calentamiento, dos especímenes de muestra y dos unidades de enfriamiento. Las muestras utilizadas en el estudio fueron poliestireno extruido (Foamular), lana mineral y poliestireno expandido (Unicel). El comportamiento de las temperaturas en los materiales de muestras entre la placa fría ( $T_{PF}$ ) y la placa caliente ( $T_{PC}$ ) se midieron con la finalidad de determinar la conductividad térmica en tres valores de temperatura media de operación de las muestras (pruebas a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). El diseño de las placas del APCG se realizó mediante un código computacional desarrollado en MATLAB, de carácter CFD, para establecer la geometría y la distancia de la distribución de la resistencia eléctrica en la placa caliente. Como resultado del diseño se obtuvieron temperaturas homogéneas con una distancia entre resistencias de  $6\text{ mm}$ , espesor de la placa caliente de  $10\text{ mm}$ , y radios de las placas de  $200\text{ mm}$ . Se realizaron nueve pruebas de conductividad térmica con valores en el intervalo de  $0,0253$  a  $0,0455\text{ W/m }^{\circ}\text{C}$ . Simultáneamente, se realizó un análisis de incertidumbre para determinar la variable que afecta más en la medición, dando como resultado una incertidumbre de  $\pm 2,19\%$  respecto al material termo aislante Foamular® como material de referencia. Por otro lado, se realizó un análisis de sensibilidad y se encontró que la variable de mayor afectación en las mediciones es el voltaje que es suministrado a la placa caliente. Como pudo observarse, la variación de temperatura de prueba tuvo un efecto sobre la conductividad térmica obtenida, así como, en los valores de la incertidumbre. Respecto a la variación de la temperatura de prueba, la conductividad térmica en general varío de  $24,71 - 30,55\%$ , siendo el poliestireno expandido (Unicel) el que presentó el menor porcentaje de variación.

**Palabras Clave:** Conductividad Térmica, APCG, Foamular, Incertidumbre, Modelación CFD.

# Abstract

This work presents the development and characterization of an experimental device to determine the thermal conductivity of homogeneous construction materials (CTMHC) while considering CFD modeling and regulatory requirements. A hot plate with a guard (APCG) apparatus was designed, constructed, and instrumented to determine the thermal conductivity. The guarded hot plate method is a steady-state primary method. The APCG consists of a heating unit, two sample specimens, and two cooling units. The samples used in the study were extruded polystyrene (Foamular), mineral wool, and expanded polystyrene (Unicel). The temperature behavior of the sample materials between the cold plate ( $T_{PF}$ ) and the hot plate ( $T_{PC}$ ) was determined by considering three operating temperature values for each material sample (tests at  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $45^{\circ}\text{C}$  y  $65^{\circ}\text{C}$ ). The design of the APCG plates was performed using a computational code developed in MATLAB, of a CFD nature, to establish the geometry and distance of the electrical resistance distribution on the hot plate. As a result of the design, homogeneous temperatures were obtained with a distance between resistors of  $6\text{ mm}$ , hot plate thickness of  $10\text{ mm}$ , and plate radii of  $200\text{ mm}$ . Nine thermal conductivity tests were carried out, and values in the range of  $0,0253$  a  $0,0455\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$  were found. Simultaneously, a sensitivity analysis was performed to determine the variable that most affects the measurement, resulting in an uncertainty of  $\pm 2,19\%$  concerning the Foamular® thermal insulating material as reference material and finding that the variable with the most significant effect on the measurements is the voltage supplied to the hot plate. As could be observed, the test temperature variation had an impact on the thermal conductivity obtained, as well as on the uncertainty values. Regarding the variation of the test temperature, the overall thermal conductivity varied from  $24,71 - 30,55\%$ , with the expanded polystyrene (Unicel) being the one that presented the lowest percentage of variation.

**Keywords:** Thermal conductivity, APCG, Foamular, uncertainty, CFD Modeling.

# Nomenclatura

Símbolo	Definición	Unidad
$\lambda$ ó $k$	Conductividad Térmica	$W/mk$
$L_x$	Espesor del espécimen de muestra	$m$
$A_m$	Área de la muestra	$m^2$
$A_{zm}$	Área de la zona de medición en la placa caliente	$m^2$
$A_{zg}$	Área de la zona de guarda en la placa caliente	$m^2$
$A_{zb}$	Área de la zona de efecto de borde en la placa caliente	$m^2$
$T$	Temperatura	$^{\circ}C$
$T_G$	Temperatura en un punto de la zona de guarda	$^{\circ}C$
$T_B$	Temperatura en un punto de la zona de efecto de borde	$^{\circ}C$
$T_m$	Temperatura promedio	$^{\circ}C$
$T_{Pc}$	Temperatura de la placa caliente	$^{\circ}C$
$T_{Pf}$	Temperatura de la placa fría	$^{\circ}C$
$T_{f-I}$	Temperatura de la placa fría inferior	$^{\circ}C$
$T_{f-S}$	Temperatura de la placa fría superior	$^{\circ}C$
$T_{ZG}$	Temperatura de la zona de guarda	$^{\circ}C$
$T_{ZB}$	Temperatura de la zona de efecto de borde	$^{\circ}C$
$T_{Zms}$	Temperatura en la zona de medición superior	$^{\circ}C$
$T_{Zmi}$	Temperatura en la zona de medición inferior	$^{\circ}C$
$T_{mat} - P_c$	Temperatura de superficie entre la placa caliente y el material bajo prueba	$^{\circ}C$
$T_{mat} - P_f$	Temperatura de superficie entre la placa fría y el material bajo prueba	$^{\circ}C$
$\Delta T$	Diferencia de temperatura en el mensurado	$^{\circ}C$
$q$	Flujo de calor	$W$
$q''$	Flux de calor	$W/m^2$
$h$	Coeficiente de transferencia de calor por convección	$W/(m^2K)$
$\rho$	Densidad del material	$kg/m^3$

<b>Símbolo</b>	<b>Definición</b>	<b>Unidad</b>
$\alpha$	Difusividad térmica del material	$m^2/s$
$P_e$	Potencia eléctrica suministrada por la fuente	$W$
$f(FEM)$	Función dependiente de la Fuerza electromotriz	$V$
$V$	Voltaje	$V$
$V_{zm}$	Voltaje en la zona de medición	$V$
$\Delta TMG$	Diferencia de temperatura de zona de medición vs zona de guarda	$^{\circ}C$
$\Delta TGEB$	Diferencia de temperatura de zona de guarda vs zona de efecto de borde	$^{\circ}C$
$TM1$	Temperatura de la muestra inferior	$^{\circ}C$
$TM2$	Temperatura de la muestra superior	$^{\circ}C$
$T_c$	Temperatura del centro de la placa caliente	$^{\circ}C$
$A$	Corriente eléctrica	$A (C/s)$
$R$	Resistencia eléctrica	$\Omega$
$SEE$	Error estándar de estimación	$^{\circ}C$
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzman	$5,67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$

# Índice de Contenido

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Generalidades	1
1.2. Antecedentes	4
1.3. Objetivos	8
1.3.1. Objetivo General	8
1.3.2. Objetivos Específicos	8
1.4. Hipótesis	8
1.5. Metas Alcanzables	9
1.6. Estructura de la Tesis	10
<b>2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	<b>13</b>
2.1. Transferencia de Calor	13
2.1.1. Conducción	14
2.1.1.1. Ley de Fourier	16
2.1.2. Convección	16
2.1.2.1. Convección Forzada	17
2.1.2.2. Convección Natural	18
2.1.3. Radiación	19
2.2. Ecuación general de conducción de calor en coordenadas cilíndricas	20
2.3. Dinámica de fluidos computacionales (CFD)	21
2.3.1. Método de volumen Finito	21
2.4. Condiciones de Frontera	23
2.4.1. Condición de frontera de primera clase (Dirichlet)	24
2.4.2. Condición de frontera de segunda clase (Neumann)	24
2.4.3. Condición de frontera de tercera clase (Robin)	24
2.5. Dispositivos para determinar la conductividad térmica en materiales	25
2.5.1. Flash Laser FLA	25

2.5.2.	Medidores de flujo de calor . . . . .	26
2.5.3.	Principio de medición de la conductividad térmica con un APCG . . . . .	26
2.5.3.1.	Ecuación de trabajo del APCG . . . . .	29
2.5.3.2.	Efecto Joule . . . . .	29
2.6.	Aparatos de placa caliente con guarda en México . . . . .	30
2.7.	Determinación de incertidumbre por propagación de error . . . . .	31
2.7.1.	Errores durante el proceso de medición . . . . .	31
2.7.2.	Tipos de Incertidumbres . . . . .	31
2.7.2.1.	Incertidumbre combinada . . . . .	32
2.7.3.	Modelo estadístico para la determinación de la incertidumbre de la conductividad térmica . . . . .	33
2.7.3.1.	Incertidumbre de la Potencia Eléctrica . . . . .	33
2.7.3.2.	Incertidumbre del área de medición . . . . .	34
2.7.4.	Propagación de error de la conductividad térmica en un APCG . . . . .	34
2.8.	Conductividades térmicas de materiales aislantes . . . . .	35
<b>3.</b>	<b>Diseño del APCG</b> . . . . .	<b>38</b>
3.1.	Simulación del APCG . . . . .	38
3.1.1.	Modelo Físico del APCG . . . . .	39
3.1.2.	Metodología de Simulación y obtención de resultados . . . . .	40
3.1.3.	Análisis de Diseño Geométrico . . . . .	41
3.1.3.1.	Análisis de Temperatura de contacto (segunda corrida de simulación) . . . . .	43
3.1.3.2.	Selección del arreglo del APCG para la conductividad térmica de $0,02 W/mK$ . . . . .	46
3.1.3.3.	Selección del arreglo del APCG para la conductividad térmica de $0,5 W/mK$ . . . . .	47
3.1.3.4.	Selección del arreglo del APCG para la conductividad térmica de $1,4 W/mK$ . . . . .	48
3.1.3.5.	Selección del arreglo del APCG para la conductividad térmica de $2 W/mK$ . . . . .	51
3.1.3.6.	Análisis de temperatura en el interior del material . . . . .	53
3.1.4.	Análisis de incertidumbre . . . . .	55
3.1.4.1.	Incertidumbres en las fuentes de suministro de energía . . . . .	56
3.1.4.2.	Incertidumbre en la conductividad térmica de materiales homogéneos de construcción . . . . .	57

3.1.4.3. Variables que afectan la incertidumbre en la medición de la conductividad térmica . . . . .	59
3.1.5. Discusión de resultados del análisis geométrico del APCG . . . . .	60
3.2. Manufactura CAD/CAM del APCG . . . . .	61
3.2.1. Diseño de la placa fría . . . . .	61
3.2.1.1. Simulación CFD de la placa fría . . . . .	62
3.2.2. Diseño de la placa caliente . . . . .	63
3.2.3. Diseño de la distribución de resistencia . . . . .	64
3.2.4. Diseño completo del APCG . . . . .	68
<b>4. Construcción del APCG . . . . .</b>	<b>71</b>
4.1. Manufactura del APCG . . . . .	71
4.1.1. Construcción de la placa fría . . . . .	72
4.1.1.1. Boquilla de la placa fría . . . . .	74
4.1.2. Corte de la placa caliente . . . . .	74
4.2. Distribución de resistencias en la placa caliente . . . . .	75
4.3. Instrumentación del APCG . . . . .	77
4.3.1. Diseño de termopilas de la placa caliente . . . . .	77
4.3.2. Diseño de termopila para los mensurados . . . . .	80
4.4. Sistema de adquisición de datos . . . . .	81
4.4.1. Procesamiento de datos . . . . .	82
4.5. Ensamble del APCG . . . . .	84
4.5.1. Funcionamiento del APCG . . . . .	85
<b>5. Metodología . . . . .</b>	<b>87</b>
5.1. Muestras bajo prueba . . . . .	87
5.2. Procedimiento experimental . . . . .	89
5.2.1. Preparación de las muestras . . . . .	89
5.2.2. Pruebas y condiciones . . . . .	89
5.3. Pasos del procedimiento experimental . . . . .	90
5.3.1. Diagrama de procedimiento experimental. . . . .	91
5.4. Reporte de medición de la conductividad térmica en materiales homogéneos de construcción . . . . .	92
5.5. Establecimiento del estado permanente térmico . . . . .	93
<b>6. Resultados y discusión . . . . .</b>	<b>95</b>
6.1. Comportamiento del APCG de la prueba PF25 . . . . .	96
6.1.1. Reporte de conductividad térmica PF25 . . . . .	99

6.2. Resultados de la conductividad térmica en los materiales homogéneos de construcción .....	100
<b>Conclusiones</b>	<b>105</b>
<b>Recomendaciones</b>	<b>108</b>
<b>Productos Extracurriculares</b>	<b>109</b>
<b>A. Discretización de la ecuación gobernante</b>	<b>124</b>
<b>B. Tabla de conductividades térmicas</b>	<b>127</b>
<b>C. Primera corrida de simulación</b>	<b>130</b>
C.1. Perfiles de temperaturas no homogéneos .....	131
<b>D. Planos del APCG</b>	<b>132</b>
D.1. Plano de placa Fría .....	132
D.2. Plano de la base cuadra del APCG .....	134
D.3. Plano de distribución de resistencias .....	135
D.4. Plano de boquilla de la placa fría .....	138
<b>E. Instrumentación del APCG</b>	<b>139</b>
<b>F. Reportes de Conductividad Térmica</b>	<b>140</b>
F.1. Reporte de conductividad térmica Prueba PL25 .....	141
F.2. Reporte de conductividad térmica Prueba PL45 .....	142
F.3. Reporte de conductividad térmica Prueba PL65 .....	143
F.4. Reporte de conductividad térmica Prueba PF45 .....	144
F.5. Reporte de conductividad térmica Prueba PF65 .....	145
F.6. Reporte de conductividad térmica Prueba PU25 .....	146
F.7. Reporte de conductividad térmica Prueba PU45 .....	147
F.8. Reporte de conductividad térmica Prueba PU65 .....	148

# Índice de Tablas

2.1. Grupos adimensionales empleados en el fenómeno de convección . . . . .	19
2.2. Tabla de las componentes y variables involucradas en la medición de la conductividad térmica. . . . .	28
2.3. Valores de conductividades térmicas ( $\lambda$ ) de materiales aislantes . . . . .	30
3.1. Variables para utilizar en las simulaciones y valores numéricos . . . . .	41
3.2. Variables y valores numéricos empleados ( <i>Segunda corrida de simulación</i> )	43
3.3. Desviación estándar en las temperaturas $T_{mat} - P_c$ y $T_{mat} - P_f$ para conductividades de 0,02 y 0,5 W/mK . . . . .	45
3.4. Desviación estándar en las temperaturas $T_{mat} - P_c$ y $T_{mat} - P_f$ para conductividades de 1,4 y 2 W/mK . . . . .	45
3.5. Arreglo de las simulaciones 33 y 93 para la $\lambda$ de 0,02 W/mK. . . . .	47
3.6. Arreglo de las simulaciones 46 y 94 para la $\lambda$ de 0,5 W/mK. . . . .	48
3.7. Arreglo de las simulaciones 43 y 67 para la $\lambda$ de 1,4 W/mK. . . . .	51
3.8. Arreglo de la simulación 40 y 88 para la $\lambda$ de 1,4 W/mK. . . . .	53
3.9. Fuentes de suministro de energía . . . . .	56
3.10. Valores de Simulación para el cálculo de incertidumbre . . . . .	57
3.11. Resultado de Incertidumbres del APCG . . . . .	58
3.12. Distribución de resistencia en la placa caliente . . . . .	67
5.1. Tabla de pruebas y condiciones para determinar la conductividad térmica .	89
6.1. Tabla de resultados de medición de la conductividad térmica . . . . .	100
6.2. Tabla de temperaturas de las mediciones de los materiales de prueba . . . . .	102
6.3. Tabla de desviación estándar, suministro de energía y voltaje de las mediciones de los materiales de prueba . . . . .	103

# Índice de Figuras

2.1. Simulación transferencia de calor por conducción. . . . .	15
2.2. Placa de aluminio dentro de un espacio físico. . . . .	17
2.3. Placa de aluminio con una temperatura impuesta. . . . .	17
2.4. Efecto convectivo sobre la placa de aluminio. Fuente Propia . . . . .	18
2.5. Sistema coordinado cilíndrico. . . . .	20
2.6. Representación de VC finito en dos dimensiones en coordenadas cilíndricas. . . . .	22
2.7. Dispositivo Flash Láser (FLA) para determinar conductividades térmicas. Tomado de Instruments,2021. . . . .	25
2.8. Dispositivo Medidor de flujo de calor (HFM) para determinar conductividades térmicas. Tomado de Instruments (2021). . . . .	26
2.9. Esquema de las componentes del equipo y variables involucradas en la medición y que pueden afectará al sistema de medición. . . . .	27
2.10. Placa de Foamular como envolvente térmico. . . . .	35
2.11. Lana mineral como envolvente térmico. . . . .	35
3.1. Esquema físico del APCG con condiciones de frontera. . . . .	39
3.2. Metodología para la selección de la geometría de APCG. . . . .	41
3.3. Temperatura de superficie de las simulaciones 13, 14, 37 y 38 empleando los dos radios ( $r$ ) de las placas. . . . .	42
3.4. Perfil de temperatura no homogéneo de la simulación 47. . . . .	44
3.5. Perfil de temperatura de la simulación 33. . . . .	46
3.6. Perfil de temperatura de la simulación 93. . . . .	46
3.7. Perfil de temperatura de la simulación 46. . . . .	47
3.8. Perfil de temperatura de la simulación 94. . . . .	47
3.9. Temperatura de superficie $T_{mat} - P_f$ con $\lambda$ de $1,4 W/mK$ empleando el radio ( $Er_1$ ) en las placas. . . . .	49
3.10. Temperatura de superficie $T_{ma} - P_c$ con $\lambda$ de $1,4 W/mK$ empleando el radio ( $Er_1$ ) en las placas. . . . .	49

3.11. Temperatura de superficie $T_{mat} - Pf$ con $\lambda$ de $1,4 W/mK$ empleando el radio ( $Er_2$ ) en las placas. . . . .	50
3.12. Perfil de temperatura de la simulación 43. . . . .	51
3.13. Perfil de temperatura de la simulación 67. . . . .	51
3.14. Temperatura de superficie $Pc - mat$ con $\lambda$ de $2 W/mK$ empleando el radio ( $Er_1$ ) en las placas. . . . .	52
3.15. Temperatura de superficie $Pf - mat$ con $\lambda$ de $2 W/mK$ empleando el radio ( $ER_1$ ) en las placas. . . . .	52
3.16. Perfil de temperatura de la simulación 40. . . . .	53
3.17. Perfil de temperatura de la simulación 88. . . . .	53
3.18. Radios de las placas de 200 mm con $\lambda$ de $0,02 W/mK$ . . . . .	54
3.19. Radios de las placas de 250 mm con $\lambda$ de $0,02 W/mK$ . . . . .	54
3.20. Radios de las placas de 200 mm con $\lambda$ de $1,4 W/mK$ . . . . .	55
3.21. Radios de las placas de 250 mm con $\lambda$ de $1,4 W/mK$ . . . . .	55
3.22. BK Precision® modelo 1761. . . . .	56
3.23. BK Precision® modelo 1673. . . . .	56
3.24. Incertidumbre de la fuente BK 1761. . . . .	57
3.25. Incertidumbre de la fuente BK 1673. . . . .	57
3.26. Incertidumbre de la fuente BK modelo 1761 a corriente máxima con conductividad de $0,02 W/mK$ . . . . .	59
3.27. Incertidumbre de la fuente BK modelo 1761 a voltaje máximo con conductividad de $0,02 W/mK$ . . . . .	59
3.28. Incertidumbre de la fuente BK modelo 1761 a corriente máxima con conductividad de $0.5 W/mK$ . . . . .	60
3.29. Incertidumbre de la fuente BK modelo 1761 a voltaje máximo con conductividad de $0.5 W/mK$ . . . . .	60
3.30. Diseño de la placa fría. . . . .	61
3.31. Placa fría con el mensurado. . . . .	61
3.32. Simulación de la dinámica de fluido en el interior de la placa fría. . . . .	62
3.33. Simulación de la placa fría con el mensurado y la placa caliente. . . . .	63
3.34. Plano de placa caliente del APCG. . . . .	64
3.35. Radios de zona de medición, guarda y anillo de efecto de borde. . . . .	66
3.36. Distribución de resistencia en la zona de medición. . . . .	67
3.37. Aparato de placa caliente con guarda. . . . .	68
3.38. Aparato de placa caliente con guarda vista explosionada. . . . .	69
4.1. Placa de aluminio de $3/8''$ de espesor. . . . .	73

4.2. Placa de aluminio de 4 mm de espesor. . . . .	73
4.3. Proceso de soldadura en la placa fría, equipo de soldadura Miller 252 MIG Welder. . . . .	73
4.4. Esquema del proceso de soldadura de la geometría para el fluido de trabajo (llamado refrigerante). . . . .	73
4.5. Boquilla de la placa fría. . . . .	74
4.6. Inversor de corte por plasma, CUT-100. . . . .	75
4.7. Inversor de corte por plasma, CUT-100. . . . .	75
4.8. Discos de la placa caliente cortada. . . . .	75
4.9. Disco de placa caliente en torno. . . . .	75
4.10. Zonas de distribución de resistencia en la placa caliente. . . . .	76
4.11. Resistencia adherida al disco de aluminio de la placa caliente. . . . .	76
4.12. Acoplamiento de la resistencia eléctrica con recubrimiento de aluminio. . . . .	77
4.13. Resistencia eléctrica acoplada con silicón como elemento de unión y fijación. . . . .	77
4.14. Plano de distribución geométrica de la termopila en la placa caliente. . . . .	78
4.15. Conexión de la distribución de termopilas. . . . .	79
4.16. Placa caliente con termopares y termopilas adheridas. . . . .	80
4.17. Termopila del mensurado. . . . .	80
4.18. Termopila adherida la parte superior del mensurado. . . . .	81
4.19. Termopila adherida en la parte inferior del mensurado. . . . .	81
4.20. Tarjeta multiplexora Keysight 34901A. . . . .	81
4.21. Sistema de adquisición de datos Keysight 34972A. . . . .	82
4.22. Programa principal para determinar la Conductividad Térmica. . . . .	83
4.23. Esquema general de la instrumentación del sistema de medición de conductividad térmica. . . . .	84
4.24. Dispositivo APCG en funcionamiento. . . . .	85
4.25. Temperatura de la placa caliente a una temperatura promedio de 25 °C del uniceL. . . . .	85
5.1. Muestra de referencia Foamular ®. . . . .	88
5.2. Comaudi Industrial, Panel de lana mineral, 5 de abril del 2024. . . . .	88
5.3. Materiales y peso, Poliestireno expandido, 5 de abril del 2024. . . . .	88
5.4. Muestras de poliestireno expandido sobre la placa fría y placa caliente . . . . .	90
5.5. Muestras de poliestireno expandido con el dispositivo APCG completo. . . . .	90
5.6. Diagrama de flujo del procedimiento experimental. . . . .	91
5.7. Reporte de conductividad Térmica de los materiales homogéneos de construcción. . . . .	92

6.1. Temperatura del APCI prueba PF25. . . . .	96
6.2. Temperaturas en la placa caliente PF25. . . . .	97
6.3. Temperaturas de superficies de las placas frías PF25. . . . .	98
6.4. Conductividad térmica (Foamular®) prueba PF25. . . . .	98
6.5. Reporte de conductividad Térmica Poliestireno Extruido. . . . .	99

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

En este capítulo introductorio, se presentan las generalidades respecto al tema de investigación del Aparato de Placa Caliente con Guarda (**APCG**), así como también la revisión bibliográfica realizada para sustentar esta tesis, del mismo se plantea los objetivos generales y particulares, los alcances del proyecto y la estructura general del trabajo de tesis.

### 1.1. Generalidades

Las condiciones climáticas a nivel mundial han cambiado con el tiempo como consecuencia del crecimiento de su población y las dimensiones de su distribución territorial. De acuerdo con la ONU, en 2011 la población mundial llegó a los 7.000 millones de personas y, actualmente, se estima que el planeta se dirige a los 8.000 millones de personas, teniendo en cuenta el impacto de la pandemia de COVID-19 desde noviembre de 2019, como se menciona en [Iberdrola \(2021\)](#).

El desarrollo urbano de las ciudades a escala mundial se ha incrementado de manera proporcional a la población y provoca más islas térmicas urbanas. Las islas de calor o islas térmicas urbanas se define como la diferencia de temperatura que se observa entre sitios urbanos densamente poblados, edificaciones sobre el perímetro rural o peri-urbana. Usualmente, el comportamiento espacial clásico de una isla térmica urbana es de forma círculo concéntrico o en forma de domo. Esta diferencia térmica se relaciona gradualmente a una pérdida del ambiente natural, intra y peri-urbano, reemplazando por superficies compuestas como; asfalto, concreto, ladrillo y otros materiales de construcción que provocan un desbalance hídrico y radiativo superficial. Por lo que, [Sáez \(2010\)](#) menciona que, como consecuencia, se obtiene un aumento de la temperatura en las áreas

urbanas. Por consiguiente, conduce a un aumento en el gasto energético, aumento en las emanaciones contaminantes y gases de efecto invernadero, aumento acelerado de la degradación ambiental y desgaste de la calidad de vida en las ciudades. Por consiguiente, compromete la salud humana y el confort térmico aumentando la temperatura de los recintos habitacionales.

Por otra parte, a nivel global, las edificaciones representan alrededor del 40 % del per cápita total y contribuyen a más del 30 % de las emisiones de  $CO_2$ . Esta preocupación ha dado lugar a una serie de estudios realizados en todo el mundo para mejorar el desempeño energético de los edificios sobre los diseños y la construcción de las envolventes de los edificios, por ejemplo: aislamiento térmico y revestimientos reflectivo; sensibilidad y optimización; análisis del ciclo de vida; análisis técnico y económico de medidas energéticamente eficientes para la renovación de edificios existentes (la automatización de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) y los sistemas de iluminación). Una proporción significativa del aumento del uso de la energía se debió a la extensión de los sistemas HVAC como efecto al aumento de la demanda de un mejor confort térmico dentro del entorno construido, acorde a lo explicado por [Yang et al. \(2014\)](#).

[Bautista \(2021\)](#) explica que, el aumento del gasto de energía en el sector habitacional se compone por actividades de uso final del consumo de energéticos en viviendas particulares: calentamiento de agua, calefacción y enfriamiento de espacios, cocción de alimentos, iluminación, además del uso de equipos electrodomésticos.

Los sistemas controlados que más aportan al consumo de energía son los sistemas de confort térmico e iluminación. Un sistema de confort térmico (coloquialmente llamado calefacción y aire acondicionado) comúnmente se emplea para suministrar o retirar calor del interior de un recinto o espacio determinado. Por lo que, [Bautista \(2021\)](#) indica que, el consumo proporcional de un equipo de calefacción en el interior de una edificación puede ser hasta del 44 %, aun cuando, el de un sistema de aire acondicionado llega hasta un 45 % con base al Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía, en España (IDAE) y la Encuesta Nacional de Consumos de Energéticos en Vivienda (ENCEVI). En México, en promedio, los sistemas de aire acondicionado y calefacción operan normalmente entre nueve y cinco horas en promedio.

Las viviendas actuales no están diseñadas adecuadamente para el ambiente ni su entorno, a pesar de que existen sugerencias específicas que hace la CONAFOVI (2006), por lo que, hay varios aspectos que no son tomados en consideración, como el tipo de clima, y la orientación y topología de la vivienda. Por lo cual, la sensación térmica que el ser humano percibe en la vivienda o en algún lugar determinado es complejo. La razón es que, toman parte parámetros y factores diversos al mismo tiempo, por ejemplo: el tipo de actividades que se realizan, los diversos equipos electrónicos y de iluminación que se utilizan, la cantidad de ocupantes, el volumen de la edificación, así como, los materiales

de construcción con los cuales se implementaron dichos espacios.

Por lo anterior, uno de los factores que puede contribuir al logro del confort térmico dentro de una edificación son los materiales de construcción. Por lo que, es importante escoger materiales de construcción con propiedades termofísicas como la conductividad térmica y el coeficiente de ganancia de calor adecuados, para las zonas topológicas y climas específicos. Considerar en la selección de materiales de construcción, la ubicación y cargas térmicas de una edificación, hogar o establecimiento puede ayudar a mejorar el desempeño energético hasta un 20 % y disminuir el precio de operación hasta un 40 %. Esto es, considerar envolventes adecuados en edificaciones permite reducir los tiempos de operación de los sistemas de acondicionamiento de aire y como consecuencia reducir los consumos de energía eléctrica.

Los desafíos actuales en cuanto al consumo energético de activos fijos, públicos y privados demandan que haya materiales de construcción que tengan como objetivo, disminuir en consumo energético, que cumplan con las necesidades de confort térmico para las personas y que sean en menor costo de producción. Todas esas necesidades pueden ser cubiertas haciendo usos de recursos que ya han sido estudiados, por ejemplo, la implementación de materiales de aerogel y poliestireno expandido, espuma aislante, lana mineral como materiales aislantes térmicos. El hormigón y sus combinaciones, ladrillos, etc., como materiales de construcción de edificaciones en edificios y hogares en zonas rurales y urbanas.

Para precisar la conductividad térmica de materiales, se puede determinar a través de cálculos teóricos o utilizando dispositivos experimentales. Las principales técnicas para establecer la conductividad térmica de forma experimental son: Flash Laser (FLA), aparato de placa caliente con guarda (APCG) y Medidores de flujo de calor (HFM).

Sin embargo, al momento de realizar los cálculos de consumos energéticos hay discrepancias por los tipos de modelos utilizados, lo cual da como resultado valores imprecisos debido a las conductividades térmicas de materiales de construcción y materiales aislantes térmicos. Por lo tanto, de acuerdo con [Wang et al. \(2018\)](#), una estimación precisa de la conductividad térmica de los materiales de construcción es crucial para la modelización de los procesos de transferencia de calor y el cálculo del consumo de energía de los edificios. La conductividad térmica de los materiales de construcción es uno de los parámetros más relevantes para el análisis del rendimiento térmico de dichas muestras y su impacto en el comportamiento térmico de una edificación. Por lo cual, es importante determinar el valor de la conductividad térmica de los materiales que se usan en la construcción de edificaciones, considerando las condiciones de operación donde se implementaran. Para esto, se requiere el desarrollo de dispositivos de medición térmica, que permitan determinar la conductividad térmica instrumentado con sistemas de controles digitales para disminuir la incertidumbre de las mediciones en los materiales de construcción. Lo anterior,

se espera que contribuya con la generación de conocimiento para obtener mediciones más precisas de materiales de construcciones homogéneos para calcular el ahorro de energía de cada material al momento de realizar los cálculos de consumos térmicos en casas habitacionales, edificios, hogares en zonas urbanas y rurales, entre otros.

### 1.2. Antecedentes

En México, por la ubicación geográfica de su región prevalece el clima cálido. De acuerdo con, la Asociación de Empresas para el Ahorro de Energía en la Edificación (AEAE) en 2006 realizó un análisis en el cual se estimaron los Grados Día (una referencia del peso que posee la temperatura en el exterior sobre las necesidades de confort de un espacio interior en una localidad dada), lo cual demostró la elevada necesidad de confort térmico en edificaciones en una parte importante del territorio mexicano con clima cálido.

En promedio, un usuario en una zona de clima cálido gasta el doble de electricidad que uno en un ambiente templado y puede llegar a ser cinco veces más que para usuarios en tarifa 1-F. Así mismo, el Gobierno Federal consigna más de 40 mil millones de pesos anuales para costear la deuda no cubierta por los derechohabientes domésticos del servicio eléctrico para mejorar el confort térmico en zonas de clima cálido. De igual forma, algunos estudios estiman que, el uso de electricidad para el confort térmico seguirá creciendo, debido a que es una necesidad no cubierta que aumenta a medida de qué regiones de clima cálido se urbanizan (de Buen, 2009). De acuerdo con la [CONUUE \(2018\)](#), en los últimos cuatro años el requerimiento eléctrico por confort térmico ha crecido más de 50 % en regiones de clima cálido bajo tarifas 1B y 1C.

Por otra parte, en la literatura se expone que, el ser humano ha buscado solucionar el problema de lograr mejorar el estado de confort dentro de las edificaciones con el fin de mantener sensaciones corporales agradables de temperatura. Para este fin, se han desarrollado e implementando diferentes tipos de materiales que con el tiempo y el desarrollo tecnológico han venido evolucionando. Esa evolución de los materiales de construcción y materiales aislantes térmicos ha impactado fuertemente en sectores como el de la construcción, y gracias a eso hoy se cuenta con una amplia variedad de productos que cumplen satisfactoriamente su función, como minimizar el flujo de calor entre el exterior y el interior de una vivienda, contribuyendo así al logro de las condiciones de confort térmico.

El impacto de mantener el confort térmico se refleja en las curvas de requerimiento del sector eléctrico nacional que, con base al Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional en 2017, se estableció por la necesidad y uso constante de los sistemas de

aire acondicionado (**SENER, 2017**). Este procedimiento ha llevado a que en México y desde hace ya diez años, aumente el gasto energético en las edificaciones de uso residencial y comercial, lo cual resulta ser mayor que el de instalaciones industriales. De igual forma **López et al. (2020)**, explica que, para mantener el confort térmico en un espacio habitacional, se genera un alto consumo que representa la edificación a nivel mundial.

De acuerdo con la **CONUUE (2018)** (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía), los sistemas de aire acondicionado consumen cerca del 40 % de dicha energía. Con base en, los estudios realizados por el Centro Mario Molina, en México, el consumo energético que representan las edificaciones está entre un 18 % y un 20 % de la energía que se genera en nuestro país. Si se considera el sector de los edificios en nuestro país, tomando en cuenta la amplia variedad de condiciones bioclimáticas, se estima que, el promedio de gasto energético es del 40 al 60 % y son provenientes de los sistemas de aire acondicionado, calefacción y ventilación. Por otra parte, de acuerdo con lo reportado por **López et al. (2020)** en México todavía hay muchas edificaciones que han sido diseñadas utilizando las llamadas “reglas de dedo”, que tiene como criterio el volumen de los sistemas en metros cuadrados por tonelada de refrigeración ( $m^2/TR$ ). Lo anterior, sin importar el tipo de sistema o considerar hacer un balance térmico, que toma en cuenta en primer lugar la envolvente de la edificación, la ocupación, la ventilación y todas las cargas derivadas de iluminación y equipamientos dentro del edificio. Por lo que, hacen hincapié en la importancia de lograr que las edificaciones reduzcan sus consumos energéticos para garantizar los objetivos que se tienen en los diversos foros internacionales.

Por otro lado, de acuerdo con la CONUEE, la NOM-020-ENER es una norma que establece como debe ser la envolvente en las edificaciones, la cual incluye, de manera integral, techo, muros, ventanas y puertas, y que entró en vigor en 2011.

**López et al. (2020)** señala que, en México se consume aproximadamente en forma de calor el 30 % del consumo total de energía, la energía eléctrica tiene una participación del 18 % y el resto se utiliza para transporte y otras actividades. Por esta razón, hoy en día existe una inclinación a nivel global sobre la investigación para la caracterización de la conductividad térmica que poseen los materiales de construcción. De igual forma, **Mafioli et al. (2019)** expresan que, las modas que actualmente se están empleando en el diseño y construcción de edificios y recintos habitacionales, toman como principal criterio el consumo energético utilizado para generar ambientes más confortables en climas calidos y fríos; así mismo, **Wang et al. (2018)** hablan sobre los materiales de construcción porosos, como el hormigón ordinario, el hormigón celular y los materiales aislantes, se utilizan ampliamente en las estructuras de los edificios. Por su parte, **Lu et al. (2021)** exponen que, la conductividad térmica de los materiales de construcción porosos son uno de los parámetros térmicos de importancia a la hora de calcular la carga de refrigeración, calefacción y el consumo

de energía de los edificios. De acuerdo con lo anterior, [Wang et al. \(2018\)](#) exponen que, debido a los efectos de la absorción y la transferencia de humedad, considerando que en la mayoría de los materiales de construcción porosos hay contenido de humedad. [Dell'Isola et al. \(2012\)](#) comentan que los cálculos para determinar la conductividad térmica de los materiales suelen requerir la aplicación de un gradiente de temperatura a través del espécimen de muestra. En el caso de los materiales húmedos, este gradiente suele provocar el transporte de masa a causa de la evaporación y la condensación del agua. Alternativamente, la conductividad térmica puede medirse utilizando métodos de pulsos de calor transitorios para los cuales el bajo flujo de calor minimiza los gradientes térmicos y el transporte de masa. [Dubois \(2015\)](#) hablan acerca de que la determinación de la conductividad térmica de los materiales de construcción es primordial para resolver las cuestiones relacionados con el rendimiento de los edificios y el confort de los usuarios.

Existen varios métodos para medir la conductividad térmica de los materiales, tanto en estado estacionario como en condiciones transitorias. Los investigadores [Lira-Cortés et al. \(2008\)](#) en su trabajo de investigación comentaron que para determinar la conductividad térmica de materiales de carácter aislantes se puede utilizar un aparato de placa caliente con guarda. Los factores más sobresalientes que reportaron para la selección de la muestra son el tamaño, diámetro y espesor, paralelismo y planicidad de la muestra. El espesor es importante para mantener el error dentro del máximo permitido. El diámetro se debe elegir de tal forma que al menos cubra completamente el área de medición. En general, es necesario preparar las superficies de la muestra para asegurar un buen contacto térmico entre esta.

El método de placa caliente con guarda es tradicionalmente reconocido como el único método absoluto para la medición de la conductividad térmica en estado estacionario de materiales homogéneos, capaz de alcanzar una incertidumbre de medida global inferior al 2%. [Dubois \(2015\)](#) explica que, el principio del método consiste en reproducir la densidad de flujo de calor uniforme, unidireccional y constante que existe a través de una probeta en forma de losa homogénea infinita atrapada entre dos planos isotérmicos infinitos. Para la construcción de aparatos de placa caliente con guarda (APCG) se tienen normas nacionales e internacionales que establecen lineamientos para su implementación. La [ASTM-International \(2019\)](#) establece los parámetros que se deben tener en consideración al momento de llevar a cabo las mediciones adecuadas en estado estable en el APCG.

El APCG consta de, un plato/placa caliente, el cual, se compone de una sección de medición, zona de guarda primaria, un aro de medición, y dos placas frías. En algunos casos, donde es complejo controlar las condiciones climáticas, el equipo APCG también pueden contar con una cámara activa o pasiva para establecer dichas condiciones o evitar que la temperatura del entorno afecte la operación del APCG. La muestra que se utiliza debe ser ubicada a ambos lados de la placa caliente y tener un diámetro que recubra

la mayor parte de las placas para lograr el contacto suficiente entre ellas y asegurar una adecuada transferencia de calor. Los aislantes que se utilicen deben ser similares en características, por ejemplo: la densidad, el espesor, la conductividad térmica y las dimensiones.

De igual forma, la geometría juega un papel relevante en términos de transferencia de calor. Por lo cual, se requiere un material con una combinación homogénea para obtener una distribución uniforme de la temperatura. Cabe destacar que, si un material no es homogéneo, aumenta el valor de la incertidumbre en los resultados y ocasionan pérdidas de calor por los bordes. En cuanto a México se utiliza la norma NMX-C-189-ONNCCE-2010 [ONNCCE \(2010\)](#) que especifica las características generales del APCI de baja temperatura con unidades de enfriamiento y calentamiento (placa caliente), estas pueden ser redondas o cuadradas. Los especímenes deben de satisfacer las siguientes condiciones: la porción del espécimen sobre el área de ensayo debe ser representativa de toda la muestra, las partes restantes del espécimen adyacente al área de medición, en promedio, no deben distorsionar el flujo de calor. Esta norma recomienda que con el fin de obtener una correcta medición de la conductividad térmica es esencial dejar pasar el tiempo suficiente para que el APCI y los especímenes adquieran el estado estacionario.

Cabe destacar que, aunque existen trabajos reportados en donde se han desarrollado varios modelos para la caracterización de la conductividad térmica de materiales de construcción, generalmente carecen de validación con datos experimentales. Además, debido a que los materiales de construcción son implementados en diferentes condiciones ambientales, el análisis del comportamiento de la conductividad térmica bajo diferentes condiciones de uso del material, podrían proporcionar información que contribuya a un cálculo más preciso de la carga térmica de la edificación. Por lo tanto, en este proyecto se diseñará, construirá y caracterizará un dispositivo para la determinación de la conductividad térmica de materiales homogéneos de construcción, tomando en cuenta las condiciones de parámetros de medición del mensurado (tamaño del mensurado, espesor del mensurado, porosidad y/o humedad). Para ello, se utilizará un software CFD para el diseño del APCI y se considerarán los criterios y recomendaciones establecidas en la norma la NMX-C-189 ONNCCE-2010.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo General**

Desarrollar y caracterizar un dispositivo experimental para determinar la Conductividad Térmica de Materiales Homogéneos de Construcción (CTMHC) considerando, modelación en CFD y requerimientos normativos.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

1. Diseñar el dispositivo para determinar la CTMHC considerando las variables involucradas, criterios de diseño reportados en la norma NMX-C-189-ONNCCE- 2010 y simulación con un software de con el fin de establecer parámetros geométricos de diseño.
2. Construir e instrumentar el dispositivo para determinar la CTMHC utilizando manufactura CAD/CAM para la placa caliente, placas frías y sistemas de control.
3. Realizar pruebas experimentales para la evaluación de la conductividad térmica utilizando el dispositivo desarrollado y considerando muestras de materiales de construcción y muestras de materiales de referencias.
4. Verificar y caracterizar el dispositivo experimental para obtener las incertidumbres en la medición de la conductividad térmica, considerando tres valores de operación de cada material en la implementación de edificaciones.

## **1.4. Hipótesis**

Es posible determinar con precisión la CTMHC bajo diferentes condiciones de operación en las edificaciones utilizando un dispositivo desarrollado bajo los criterios de la norma NMX-C-189ONNCCE-2010.

## 1.5. Metas Alcanzables

- Obtener un dispositivo para determinar la CTMHC considerando, las variables involucradas, los criterios de diseño reportados en la norma NMX-C-189-ONNCCE-2010 y los resultados obtenidos de la simulación con un software de CFD con el fin de establecer parámetros geométricos de diseño.
- Obtener la conductividad térmica de dos muestras de materiales de construcción, considerando una muestra de referencia y el dispositivo desarrollado.
- Obtener las incertidumbres en la medición de la conductividad térmica, considerando tres valores de temperatura de operación de cada material, según se implementan en las edificaciones.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

## 1.6. Estructura de la Tesis

A continuación, se describen los capítulos siguientes que conforman este documento de tesis:

En el **Capítulo 1; *Introducción***, En este capítulo se presenta la investigación base con la que se sustenta el trabajo de tesis, en el se describe la importancia de conocer de manera precisa las conductividades térmicas empleados en la construcción de las edificaciones y recintos habitacionales así como también los principales métodos de medición.

En el **Capítulo 2; *Fundamentos teóricos***, En este capítulo se presenta la base teórica que sirve para entender y sustentar la parte matemática y experimental del APCG así como también los parámetros que se deben de tomar en cuenta para la medición de la conductividad térmica.

En el **Capítulo 3; *Diseño del APCG***, en este capítulo se presentan las características del dispositivo, así como también, el análisis geométrico del APCG, análisis de incertidumbre de los equipos de suministro de energía y las consideraciones de diseño del equipo con conformidad a la norma NMX-C-189-ONNCCE- 2010.

En el **Capítulo 4; *Construcción del APCG***, en este capítulo se presentan los materiales y el método de construcción de los componentes del APCG, asimismo se muestra el proceso de instrumentación del APCG y las pruebas de funcionalidad del equipo.

En el **Capítulo 5; *Metodología***, en este capítulo se presentan el método de la selección del material de ensayo, del mismo modo se describe las condiciones de operación de la prueba de medición de la conductividad térmica, así como, se presenta el procedimiento de control y toma de datos en el APCG.

En el **Capítulo 6; *Resultados y Discusión***, en este último capítulo, se presentan los resultados de las pruebas realizadas de conductividad térmica, donde se analizó el comportamiento de las temperaturas del APCG. Del mismo modo, se muestra el análisis y comparación de los resultados para determinar la eficiencia y factibilidad del uso de una prueba primaria empleada por el APCG que se diseñó y construyó para determinar la conductividad térmica de materiales homogéneos de construcción.

Finalmente, se presentan las **Conclusiones y Recomendaciones**, en la cual se presentan las principales conclusiones obtenidas a partir de la realización de este trabajo de investigación y se establecen recomendaciones para trabajos futuros.

## Bibliografía

- ASTM-International (2019). ASTM C177-19 Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus.
- Bautista, A. (2021). ¿cómo reducir costos en la operación de equipos de confort térmico? - kinenergy.
- CONUUE (2018). Energía y edificaciones en México: Importancia y políticas públicas presentes y futuras. Comisión nacional para el uso eficiente de la energía, Cuaderno No. 10.
- Dell'Isola, M., Alfano, F. R. D., Giovenco, G., and Ianniello, E. (2012). Experimental analysis of thermal conductivity for building materials depending on moisture content. International Journal of Thermophysics, 33:1674–1685.
- Dubois, S. (2015). Design, construction and validation of a guarded hot plate apparatus for thermal conductivity measurement of high thickness crop-based specimens. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 48:407–421.
- Iberdrola (2021). La población mundial | evolución histórica y causas - iberdrola.
- Lira-Cortés, L., Rodríguez, G., and Méndez-Lango, O. J. (2008). Medición de la conductividad térmica de algunos materiales utilizados en edificaciones. Simposio de Metrología 2008.
- Lu, J., Kan, A., Zhu, W., and Yuan, Y. (2021). Numerical investigation on effective thermal conductivity of fibrous porous medium under vacuum using lattice-boltzmann method. International Journal of Thermal Sciences, 160.
- López, J.-M. G., Estrada, A.-J., and Chavolla, F. (2020). Comparativo de eficiencia energética de sistemas de aire acondicionado con tecnologías on-off e inverter.
- Mafioli, C. D., Escobar, E. E. C., and Castillo, J. P. (2019). Medición de la conductividad térmica en materiales aislantes bajo régimen de flujo de calor no estacionario. Ingeniería y Ciencia, 15:101–116.
- ONNCCE (2010). Norma NMX-C-189-ONNCCE-2010, Determinación de la transmisión térmica (aparato de placa caliente aislada).
- Sáez, K. C. (2010). Impactos de las islas térmicas o islas de calor urbano, en el ambiente y la salud humana: Análisis estacional comparativo: Caracas, octubre- 2009, marzo-2010.

Wang, Y., Ma, C., Liu, Y., Wang, D., and Liu, J. (2018). A model for the effective thermal conductivity of moist porous building materials based on fractal theory. International Journal of Heat and Mass Transfer, 125:387–399.

Yang, L., Yan, H., and Lam, J. C. (2014). Thermal comfort and building energy consumption implications - a review. Applied Energy, 115:164–173.

## Capítulo 2

# FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo, se describen de manera general los conceptos y fundamentos de transferencia de calor. Haciendo énfasis en los diferentes tipos de dispositivos para medir la conductividad térmica en materiales homogéneos de construcción. También, se presentan los parámetros térmicos a considerar, los parámetros estadísticos. De igual manera, se presentan materiales de construcción utilizados para disminuir el consumo energético en edificaciones. Lo anterior, con el objetivo de tener un fundamento teórico y general sobre el Aparato de Placa Caliente con Guarda.

### 2.1. Transferencia de Calor

Actualmente, con el avance tecnológico, el ser humano ha sido capaz de realizar cualquier tipo de actividad aprovechando la energía. Existen diferentes tipos energía. La energía es la capacidad que tiene la materia de producir trabajo en forma de movimiento, luz, calor, etc. El trabajo realizado impulsado por calor, comúnmente se denomina energía calorífica o térmica. La energía térmica es aquella energía interna ( $U$ ) de un proceso termodinámico en estado de equilibrio que es proporcional a la temperatura absoluta y aumenta o decrece por transferencia de energía, la energía puede transferirse mediante interacciones de un sistema con su entorno.

De igual manera, el **calor** es la forma en que la energía se puede transferir de un sistema termodinámico a otro como resultado de un gradiente de temperatura. Así mismo, el calor entonces se define como la energía asociada con el movimiento al azar de los átomos y moléculas. La termodinámica (una rama de la Física), investiga la **cantidad de transferencia de calor** a razón que un sistema pasa por un proceso termodinámico, a partir de un estado de equilibrio a otro, pero no indica cuánto tiempo transcurrirá. Pero en

ingeniería, se interesa por el tiempo en el cual transcurre los procesos físicos, por ejemplo; el tiempo que le lleva enfriarse un fluido, mientras pasa en un intercambiador de calor, el tiempo necesario que necesita un recinto habitacional para que se enfríe empleando sistemas HVCA con el fin de mejorar el confort térmico. Lo cual es del tema de interés de la transferencia de calor.

Yunus A. Cengel menciona que, la transferencia de calor siempre se lleva a cabo del cuerpo con la temperatura más alta hacia el cuerpo con temperatura más baja y la transferencia termina cuando ambos alcanzan la misma temperatura (estado de equilibrio térmico), por lo que, para que ocurra la transferencia de calor es necesario exista una diferencia de temperatura entre un cuerpo y su entorno. Por lo tanto, no puede existir transferencia de calor entre dos sistemas que están a la misma temperatura. El gradiente de temperatura ( $\nabla T$ ) es la **fuerza impulsora para la transferencia de calor**, así como la diferencia de tensión es la fuerza impulsora para el flujo de corriente eléctrica y la diferencia de presión es la fuerza impulsora para el flujo de fluidos.

De manera similar, [Incropera et al. \(2011\)](#) define la transferencia de calor de manera simple: La transferencia de calor es la energía térmica que pasa debido a una diferencia de temperatura espacial.

Existen tres tipos de transferencia de calor; **conducción**, **convección** y **radiación**. En los siguientes apartados se explica como interactúan los fenómenos físicos con los cuerpos y su entorno. Acorde a este trabajo de investigación, se deja al final de este apartado la explicación del fenómeno de conducción.

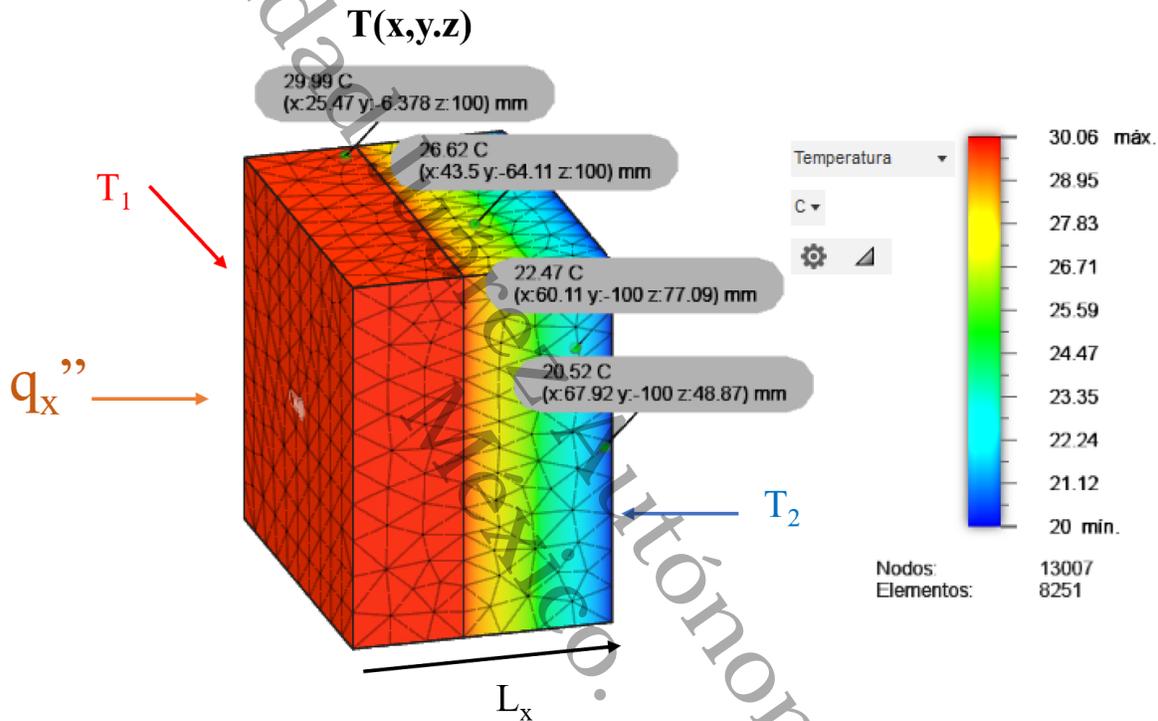
### 2.1.1. Conducción

La transferencia de calor por conducción tiene dirección y magnitud. En **Conducción**, la transferencia de calor se da en una dirección puntual y es proporcional al gradiente de temperatura ( $\partial T/\partial x$ ). El gradiente de temperatura, es la razón de cambio de la temperatura respecto al espacio en esa dirección. La conducción de calor de un material se lleva a cabo en tres dimensiones ( $x, y, z$ ) en coordenadas cartesianas ó en coordenadas cilíndricas ( $r, \theta, z$ ), y es dependiente del tiempo, por lo que la temperatura en un medio varía con el tiempo y punto espacial  $T(x, y, z, t)$ . De acuerdo a la bibliografía, se menciona que, la conducción en un medio es estacionaria cuando la temperatura no varía con el tiempo, y no estacionaria (estado transitorio), cuando la temperatura varía en función del tiempo y la posición.

Acorde con [Kreith et al. \(2011\)](#), la transferencia de calor por conducción es un proceso de difusivo, en el cual la energía térmica se transporta de un extremo con alta temperatura de un medio (usualmente sólido) a su extremo frío.

Por lo que, en la Figura 2.1, se observa el efecto de la transferencia de calor por conducción sobre una placa de aluminio alado de un material aislante (Poliestireno). Así también, en la Figura 2.1, se aprecia que, la transferencia de calor va en el sentido del cuerpo con temperatura más alta ( $T_1$ ) al cuerpo con temperatura más baja ( $T_2$ ), como menciona los autores Incropera et al. (2011).

**Figura 2.1**  
Simulación transferencia de calor por conducción.



*Nota.* Simulación de transferencia de calor en el Software Autodesk Fusion 360® con condición de frontera Dirichlet, con una  $T$  impuesta en el lado izquierdo de  $T_1 = 30^\circ C$  y lado derecho una  $T_2 = 20^\circ C$ . Fuente Propia.

Por otra parte, cuando el campo de temperatura solo depende de la posición, se dice que el sistema está en estado estacionario (estable o permanente) pero cuando además de la posición depende del tiempo, el sistema está en estado transitorio. En general, los modelos matemáticos (un modelo matemático se define como: una ecuación o sistema de ecuaciones que describe lo que físicamente ocurre en un estado específico) resultan ser de forma de ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales, por lo que su método de solución resulta ser complejo. Para obtener una solución a una ecuación diferencial, se considera la condición o condiciones iniciales y de frontera, para determinar las distribuciones de temperatura en un sistema sólido. Después, obtenida la distribución de temperatura, el flux de calor en conducción se puede evaluar aplicando la ley de Fourier.

### 2.1.1.1. Ley de Fourier

La ley de Fourier menciona que, siempre que exista en un medio sólido un gradiente de temperatura, el calor fluye de la zona con mayor temperatura a la de menor temperatura. Así mismo, la tasa de transferencia en el cual el calor pasa por conducción (Ec. 2.1),  $q_k$ , es proporcional a un gradiente de temperatura  $dT/dx$  por el área ( $A$ ) a través de la que se transfiere el calor.

$$q_k \propto A \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

En este modelo,  $T(x)$  es la temperatura específica y  $x$  es la longitud y dirección en la cual se encuentra el flujo de calor. El flujo de calor depende de la conductividad térmica  $\lambda$  (o  $k$  para el sistema inglés), que es una propiedad térmica de transporte del medio. Por lo tanto, la conducción de calor a través de un medio homogéneo, es la tasa de transferencia de calor y se expresa en la Ec. 2.2.

$$q_k = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

El signo menos esta ecuación, es resultado de la segunda ley de la termodinámica, lo cual requiere que el flujo de calor debe fluir en dirección de una temperatura alta a una temperatura menor (Kreith et al. (2011)). Como se ilustra en la figura 2.1. La conductividad térmica en la ecuación 2.2 es una propiedad térmica de un material que indica la cantidad de calor que se transferirá por unidad de tiempo a través de una unidad de área cuando el gradiente de temperatura es unitario.

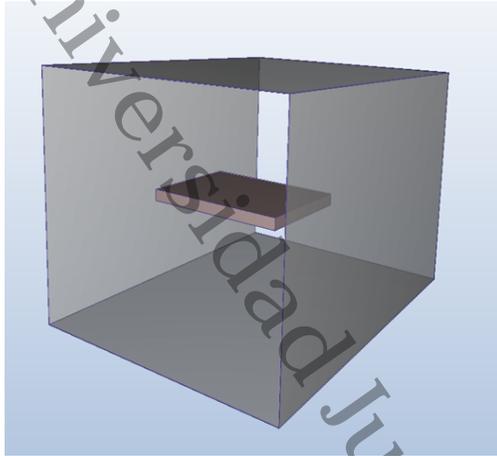
### 2.1.2. Convección

De acuerdo con los autores Incropera et al. (2011) y el compendio Refrigerating and of Heating (2021). Para que la transferencia de calor sea considerada como convección, el fluido en contacto con la superficie limitante debe estar en movimiento en presencia de una diferencia de temperatura. De igual manera, el fenómeno de transferencia de calor por convección se divide en dos: **convección forzada** y **convección natural** (o libre).

En el compendio Refrigerating and of Heating (2021) menciona que, la ley de enfriamiento de Newton, la razón de pérdida de calor de un elemento es proporcional a la diferencia entre la temperatura del cuerpo y del entorno que lo rodea. En la Figura 2.2 se observa una placa de aluminio que se encuentra dentro un espacio físico, y en la Figura 2.3 se observa que, el volumen del entorno tiene una temperatura ambiente libre de fluido ( $t_\infty$ ), y la placa de aluminio tiene una temperatura de superficie ( $t_s$ ).

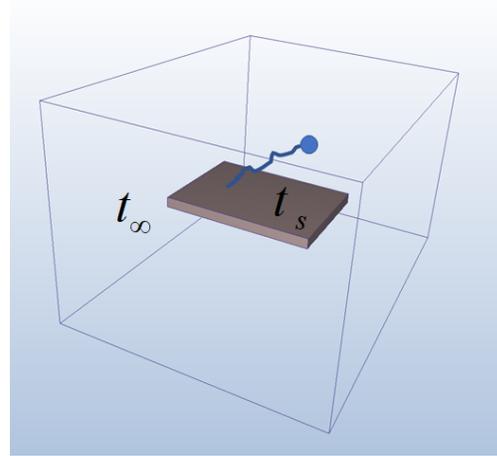
**Figura 2.2**

Placa de aluminio dentro de un espacio físico.



**Figura 2.3**

Placa de aluminio con una temperatura impuesta.



Por lo tanto, considerando una superficie con temperatura ( $t_s$ ) en contacto con un fluido con temperatura ( $t_\infty$ ), expresa que, la tasa de transferencia de calor en la superficie  $A_s$  y está dada por la Ec. 2.3.

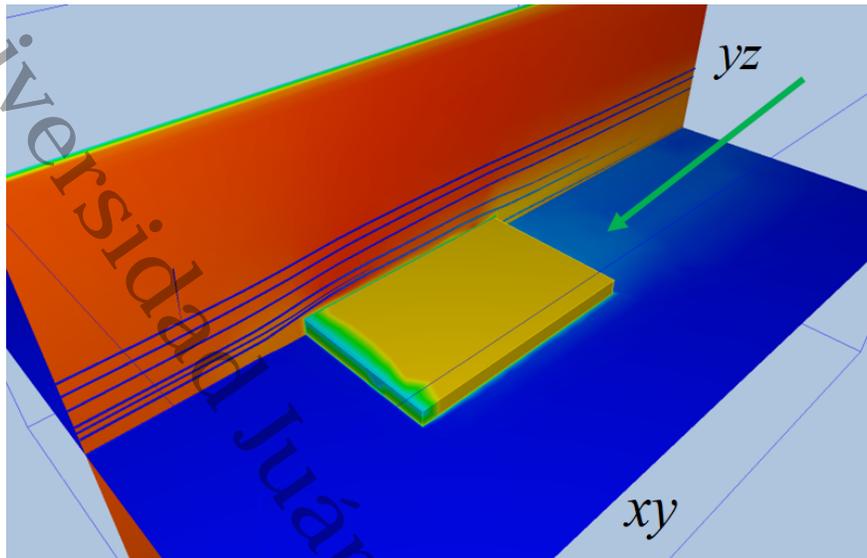
$$q = h_c A_s (t_s - t_\infty) = \frac{(t_s - t_\infty)}{1/(h_c A_s)} \quad (2.3)$$

### 2.1.2.1. Convección Forzada

Cengel (2007) menciona que, en la convección forzada, ocurre cuando el fluido fluye sobre una superficie o en un tubo por medios externos, como una bomba hidráulica, o un ventilador. En la Figura 2.4 podemos apreciar la convección forzada que se genera sobre la placa de aluminio.

**Figura 2.4**

*Efecto convectivo sobre la placa de aluminio. Fuente Propia*



*Nota.* En este ejemplo de convección forzada (Fuente propia), se realizó una simulación en Autodesk CFD®, con condiciones de temperatura de  $40^{\circ}\text{C}$  en la placa de aluminio, con una velocidad de entrada de aire de  $0,5\text{ m/s}$  y una temperatura de  $15^{\circ}\text{C}$ .

El plano  $yz$  (plano color rojo - naranja) representa el campo de velocidades del aire y se muestran líneas de corrientes de fluido que pasa sobre la placa de aluminio y en el plano  $xy$  representa el campo de temperaturas en el espacio físico en el cual está la placa de aluminio, en ese plano se aprecia una la flecha de color verde que indica el efecto convectivo generado por el contacto del fluido (aire) sobre la superficie de la placa de aluminio con una temperatura impuesta.

### 2.1.2.2. Convección Natural

De igual manera, los autores [Xamán \(2016\)](#) mencionan que, en la convección natural, la fuerza motora básica es el campo de temperaturas para problemas de transferencia de calor, sin embargo, en convección natural la variación de la densidad con la temperatura tiene una importancia. Para el análisis de los problemas de convección - difusión, en convección natural se toma en cuenta parámetros adimensionales para conocer las propiedades del fluido en movimiento. Por ejemplo: el número Prandtl y el número de Grashof como se muestra en la Tabla [2.1](#).

**Tabla 2.1**  
Grupos adimensionales empleados en el fenómeno de convección

Símbolo	Definición	Interpretación
Número de Prandtl ( $Pr$ )	$\frac{c_p \mu}{\lambda} = \frac{\nu}{\alpha}$	Razón de las difusividades de momento a la difusividad térmica
Número de Reynolds ( $Re_L$ )	$\frac{VL}{\nu}$	Razón a las fuerzas de inercias y las fuerzas viscosas.
Número de Grashof ( $Gr_L$ )	$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2}$	Razón de las fuerzas de flotación a las viscosas.

*Nota.* Números adimensionales de fenómenos de convección, adaptado de [Incropera et al. \(2011\)](#).

### 2.1.3. Radiación

La transferencia de calor por radiación, a comparación de la transferencia por conducción y convección, no requiere materia como medio de transporte de energía ([Refrigerating and of Heating \(2021\)](#)). La radiación entre las superficies de los cuerpos depende de la posición de unas respecto con las otras, así como de sus propiedades con respecto a la radiación y de las temperaturas. De acuerdo con el autor [Cengel \(2007\)](#), uno de los parámetros importantes que se toma en cuenta para el cálculo de la transferencia de calor es el factor de visión, que también es llamado factor de forma y factor de ángulo. El factor de forma se basa en la hipótesis de que las superficies son emisoras y reflectoras difusas. Por lo que el factor de visión  $F_{A_2 \rightarrow A_1}$ , se determina con la Ec. 2.4.

$$F_{12} = F_{A_2 \rightarrow A_1} = \frac{1}{A_2} \int_{A_2} \int_{A_1} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2 \quad (2.4)$$

Donde:  $A_1$  es el área del cuerpo uno,  $A_2$  es el área del cuerpo dos,  $\theta_1$  es el ángulo de visión de cuerpo uno,  $\theta_2$  es el ángulo de visión de cuerpo dos y  $r$  es la distancia entre los dos cuerpos. Del mismo modo, en el documento [Refrigerating and of Heating \(2021\)](#) describe que, la velocidad de emisión de energía radiante y las propiedades de una superficie dependen de la naturaleza del material subyacente, así como también la disposición microscópica y la temperatura absoluta. Por lo que, la energía total que es emitida por unidad de tiempo y por unidad de área de una superficie negra se denomina potencia emisiva de cuerpo negro  $W_b$  y viene dada por la Ley de Stefan-Boltzmann (Ec. 2.5).

$$W_b = \sigma T^4 \quad (2.5)$$

## 2.2. Ecuación general de conducción de calor en coordenadas cilíndricas

El modelado de transferencia de calor por conducción se puede realizar respecto a los tres sistemas ortogonales más comunes y las propiedades termofísicas pueden ser dependiente del tiempo o no. Para conocer el comportamiento de la transferencia de calor generalmente es de forma diferencial y se deben de tomar en cuenta las condiciones que se encuentran alrededor del sujeto de estudio (Condición de frontera).

La ecuación general de conducción de calor es una declaración matemática de la conservación de energía en un medio sólido. Para deducir esta ecuación se efectúa un balance de energía en un volumen de control del cuerpo en el que el calor se transfiere solo por conducción. Por lo que la ecuación general de conducción de calor diferencial parcial en tres dimensiones es se expresa en la Ec. 2.6 y se encuentra en estado transitorio con generación de calor.

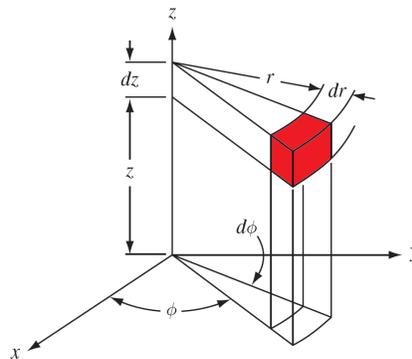
$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S \quad (2.6)$$

En la Ec. 2.7 se expresa la ecuación general de conducción de calor en coordenadas cilíndricas (Kreith et al., 2011, p.77 y Incropera et al., 2011, p.85) y en la Figura 2.5 se muestra el sistema coordenado para la ecuación mencionada.

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S \quad (2.7)$$

**Figura 2.5**

*Sistema coordenado cilíndrico.*



*Nota.* Esquema de un volumen de control en coordenadas cilíndricas. Fuente Propia.

Pero para el interés de este trabajo de investigación. No se considera la dimensión  $\phi$ ,

debido a la suposición de que las condiciones de frontera, condición inicial, geometría y propiedades del material no depende del ángulo, lo cual reduce la ecuación a la E.c. 2.8:

$$r \frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + r \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda r \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S r \quad (2.8)$$

Hay diferentes métodos para dar soluciones a los modelos de transferencias de calor que se presentaron anteriormente. Métodos analíticos, numéricos, experimentales, o teóricos-experimentales.

## 2.3. Dinámica de fluidos computacionales (CFD)

Como se mencionó anteriormente, existen métodos numéricos para la solución de problemas de calor. Una de las herramientas es la Dinámica de Fluidos Computacional o CFD (del inglés Computational Fluid Dynamics), esta, es la rama de la ingeniería que emplea la simulación numérica de flujos fluidos, transferencia de calor y de igual manera, problemas relacionados con reacciones químicas, aeronáutica, etc. El **CFD**<sup>1</sup> tuvo origen a partir de la unión de dos disciplinas de la física y matemática: la mecánica de los fluidos y cálculo numérico. Las ecuaciones que gobiernan el flujo fluido tienen comienzo en la mecánica de los fluidos y se pueden resolver por medio de diferentes métodos numéricos. De acuerdo con Xamán (2016), el método numérico de volumen finito consiste en discretizar la zona del espacio (se conoce por mallado) fraccionando una región en pequeños volúmenes de control. Después se da solución a cada uno de ellos con las ecuaciones de conservación (energía, momentum, velocidad) discretizadas, de forma tal que, se soluciona una matriz algebraica por cada celda de forma iterativa hasta que el residuo de la solución sea suficientemente pequeño.

La dinámica de fluidos computacional se ha convertido en un importante apoyo hoy en día para proyectos de ingeniería en las áreas de diseño, producción y mantenimiento. Así, mediante empleo de la herramienta de simulación CFD, permite evaluar problemas o cambios en equipos existentes, además de optimizar el diseño de equipos a través del análisis de una variedad amplia de casos y condiciones.

### 2.3.1. Método de volumen Finito

Como se mencionó en el apartado 2.2, para encontrar soluciones a los modelos planteados de transferencia de calor. Se pueden resolver de diferentes maneras. Pero, las dificultades

<sup>1</sup>Uno de los padres de este método de análisis fue Patankar (1980), que es actualmente profesor emérito de la Universidad de Minnesota.

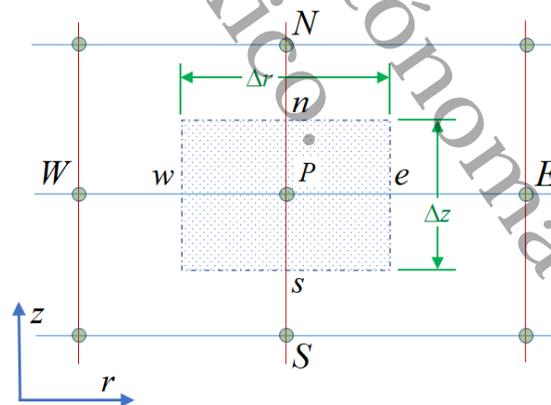
de los métodos analíticos es la complejidad del procedimiento matemático, debido a que el usuario debe tener dominio de las herramientas matemáticas avanzadas de acuerdo a Xamán (2016), de igual manera solo se pueden resolver problemas con linealidad y restricciones geométricas con fenómenos simples. Por otro lado, las desventajas, de una solución de manera experimental, se debe a que, se requiere de diferentes equipos de medición, hay problemas de escala, dificultad en las mediciones, y costos operacionales. Por otra parte, al emplear métodos numéricos debemos de contar con un equipo de cómputo, y conocer las condiciones de frontera.

En el libro de Xamán menciona que hay métodos numéricos, los cuales son: método de elementos finitos, método de diferencias finitas y el método de volumen finito (MVF), centrándose en este último.

El objetivo principal del método es emplear la forma integral de las ecuaciones de conservación. La región de análisis es fraccionado en un número finito de volúmenes de control (VC) adjuntos y las ecuaciones de conservación son empleadas para cada VC. En el centro de cada VC existe un nodo computacional el cual se calcula las magnitudes de las variables como se muestra en la Figura 2.6, en donde W, N, E y S son las direcciones cardinales de los nodos.

**Figura 2.6**

*Representación de VC finito en dos dimensiones en coordenadas cilíndricas.*



*Nota.* Esquema de un volumen de control finito en coordenadas cilíndricas. Adecuado de: *Dinámica de Fluidos Computacional para Ingenieros* (p.75), por Xamán, J, Gijón-Rivera, M, 2016, Cenidet.

Las integrales de superficie de cada nodo se aproximan utilizando alguna fórmula de cuadratura. Por lo que, para cada volumen de control se obtiene una ecuación algebraica, en la cual aparecen las magnitudes de los nodos vecinos. El MVF puede ser adecuado en cualquier tipo de mallado y, por lo tanto, puede ser utilizado a geometrías complejas (Xamán (2016), Patankar (1980)). La proximidad del MVF es tal vez el método más simple

de entender y programar.

El método de volumen finito es empleado en diferentes software de código abierto o comerciales. Alguno de ellos son: OpenFoam, PHOENICS, ANSYS FLUENT, FLOW3D, Autodesk CFD, Etc.

El algoritmo numérico consiste de la siguiente manera:

- Integración de la ecuación de conducción de calor sobre todos los volúmenes de control del dominio de solución.
- Discretización de un número finito de aproximaciones de los términos de las ecuaciones integradas. Esto convierte el conjunto de ecuaciones integrales a un sistema de ecuaciones algebraicas. La solución de estas ecuaciones algebraicas son mediante un método iterativo.

Por lo que, aplicando el MVF a la Ec. 2.8 de acuerdo con Patankar (1980) obtenemos la Ec. discretizada, donde convertimos la ecuación general de conducción de calor en coordenadas cilíndricas a un sistema de ecuaciones lineales (Ec. 2.9). En el Anexo A, se presenta los pasos de la discretización de la Ec. 2.8.

$$(a_P^0 + a_E + a_W + a_N + a_S)T_P = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + b \quad (2.9)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S - \bar{S} \Delta r \Delta z + \frac{\rho C_p \Delta r \Delta z}{\Delta t} \quad (2.10)$$

$$a_P^0 = \frac{\rho C_p \Delta r \Delta z}{\Delta t} \quad (2.11)$$

$$b = a_P^0 T_P^0 + \bar{S} r_c \Delta r \Delta z \quad (2.12)$$

## 2.4. Condiciones de Frontera

Las ecuaciones de conducción de calor mencionadas anteriormente se dedujeron (Incropera et al. (2011)) empleando un balance de energía sobre un elemento diferencial dentro del medio y no cambian sin importar las condiciones térmicas sobre las superficies del elemento. Los modelos matemáticos diferenciales no aportan ninguna información de correlación con las condiciones sobre las superficies del medio, como; temperatura de superficie o temperatura del entorno. Pero, se conoce que la transferencia de calor y la distribución de temperatura en un medio están relacionadas con las condiciones en las superficies, y la explicación completa de un fenómeno de transferencia de calor en un medio tiene que incluir las condiciones térmicas de las superficies en la zona limítrofes del mismo.

### 2.4.1. Condición de frontera de primera clase (Dirichlet)

Este tipo de condición establece el valor de la variable  $T$  (Ec. 2.13) sobre el límite del dominio físico y puede ser de igual manera dependiente del tiempo (Incropera et al.).

$$T(0, t) = T_s \quad (2.13)$$

### 2.4.2. Condición de frontera de segunda clase (Neumann)

Es la condición empleada para delimitar las fronteras de muchos fenómenos (Xamán). Consiste en imponer en las fronteras, un gradiente de temperatura que también puede ser dependiente del tiempo o no, pero en cualquiera de las situaciones, el gradiente es conocido. Así mismo, el flux de calor en orientación positiva  $x$ , en cualquier lugar del sistema, incluidas las fronteras, se expresa mediante la ley de Fourier de la conducción de calor expresada en la Ec. 2.14:

$$q'' = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2.14)$$

El signo negativo de la condición implica que la tasa de transferencia de calor ( $W/m^2$ ) va en sentido contrario a la dirección gradiente. Donde  $n$  indica la dirección normal a la frontera.

### 2.4.3. Condición de frontera de tercera clase (Robin)

Esta condición de frontera (condición de convección) es una unión de la condición de frontera de primera y segunda clase (Ec. 2.15). Esta condición establece que, la frontera analizada se encuentra gobernada por una ecuación diferencial de primer orden en forma ordinaria. Es frecuente que la condición de Robin sea la condición de frontera encontrada en los fenómenos físicos, debido a que, la mayor parte de las superficies de transferencia de calor están expuestas aún entorno y a una temperatura específica o variable.

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial T(0, t)}{\partial n} &= h_1 [T_{\infty 1} - T(0, t)] \\ -\lambda \frac{\partial T(0, t)}{\partial n} &= h_2 [T(0, t) - T_{\infty 2}] \end{aligned} \quad (2.15)$$

Donde  $h_1$  y  $h_2$  son los coeficientes convectivos de la transferencia de calor y  $T_{\infty 1}$  y  $T_{\infty 2}$  es la temperatura del medio que rodeo al modelo físico.

## 2.5. Dispositivos para determinar la conductividad térmica en materiales

De acuerdo con Mafioli et al. (2019), considerar en la selección de materiales de construcción, cargas térmicas de un edificio y la ubicación, hogar o establecimiento puede eficientar el desempeño energético hasta un 20 % y disminuir el costo de operación hasta un 40 %. Es decir, tener la envolvente adecuada permite disminuir los tiempos de operación de los sistemas de acondicionamiento de aire y como consecuencia reducir los consumos de energía eléctrica. Para precisar la conductividad térmica de materiales, se puede realizar a través de cálculos teóricos o utilizando dispositivos experimentales. Las principales técnicas para determinar la conductividad térmica de forma experimental son: Flash Laser (FLA), APCG o Placa Caliente con Guarda (del inglés GHP) y Medidores de flujo de calor (HFM).

### 2.5.1. Flash Laser FLA

El método de flash láser se utiliza para determinar la difusividad térmica (método secundario) de una variedad de materiales diferentes (Lian et al. (2016)). Este dispositivo (Figura 2.7) dispara un pulso de energía que calienta un lado de una muestra de plano paralelo y se detecta el aumento de temperatura resultante dependiente del tiempo en la parte posterior debido a la entrada de energía y su ecuación de trabajo es la Ec. 2.16. Este dispositivo mide conductividades térmicas de materiales sólidos, líquidos, pastas, polvos y capas finas.

$$\alpha = 0,1388x \frac{d^2}{t^{1/2}} \quad (2.16)$$

en donde  $\alpha$  es la difusividad térmica,  $d$  es el espesor del mensurado en  $cm$  y  $t$  es el tiempo hasta la mitad del máximo en segundos  $s$ .

#### Figura 2.7

Dispositivo Flash Láser (FLA) para determinar conductividades térmicas. Tomado de *Instruments*, 2021.



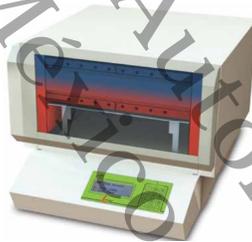
### 2.5.2. Medidores de flujo de calor

De acuerdo con [EL Assaad et al. \(2023\)](#), el método de medidor de flujo de calor consiste en provocar un flux de calor constante entre dos piezas o una pieza de las que ya se conoce su conductividad térmica y la muestra bajo prueba se ubica entre las dos anteriores. El flujo de calor es constante y el gradiente de temperatura ( $\partial T/\partial x$ ) es dependiente del tiempo y de la posición. La técnica de medidor de flujo de calor (HFM) se aplican a una gama más amplia de materiales. Como explica [Instruments \(2021\)](#), este método de evaluación de conductividad térmica permite conocer la propiedad de transporte de transferencia de calor en poco tiempo a comparación del método del APCG. La ecuación de trabajo para este dispositivo (Figura 2.8) está regida por Ec. 2.17.

$$\lambda_s = \frac{QL_x}{A\Delta T} \quad (2.17)$$

**Figura 2.8**

*Dispositivo Medidor de flujo de calor (HFM) para determinar conductividades térmicas. Tomado de [Instruments \(2021\)](#).*



### 2.5.3. Principio de medición de la conductividad térmica con un APCG

El aparato de placa caliente con guarda es un método primario que mide la resistencia y la conductividad térmica de materiales homogéneos. El parámetro  $\lambda$  es una propiedad de transporte conocida como conductividad térmica y es una propiedad térmica del material. Para la medición de la conductividad térmica en materiales homogéneos de construcción donde se realiza considerando: longitud, área, diferencia de temperatura del mensurado y flujo de calor suministrado. Por lo cual, se determina la conductividad térmica utilizando un aparato como el esquema mostrado en la Figura 2.9 que representa al llamado APCG.

De conformidad a la norma Mexicana **NMX-C-189-ONNCCE-2010** Industria de la Construcción – Materiales Termoaislantes - Determinación de la Transmisión Térmica (aparato de placa caliente aislada) ([ONNCCE \(2010\)](#)), en la Tabla 2.2 se observa los componentes generales que debe tener un APCG.



**Tabla 2.2**

*Tabla de las componentes y variables involucradas en la medición de la conductividad térmica.*

<b>Componentes del Dispositivo de medición de la conductividad térmica</b>	<b>Variables de medición de conductividad térmica en los materiales</b>
<b>A</b> Calentador del área de medición.	Temperatura de la placa Caliente ( $T_{pc}$ ).
<b>B</b> Superficie del área de medición.	Espesor de la muestra $e(CM)$
<b>C</b> es el calentador de la protección	Temperatura de la placa fría ( $T_{Pf}$ ).
<b>D</b> Placas calentadoras de guarda	temperatura de la muestra( $T_{em}$ )
<b>E</b> Unidades de enfriamiento	Calor generado en la PC $Q(W)$
<b>Es</b> Superficie de la unidad de enfriamiento.	Conductividad térmica de la muestra $\lambda (W/mK)$ .
<b>F</b> Termopares diferenciales.	Flux de calor la placa caliente $W/m^2$ .
<b>G</b> Termopares de la unidad de calentamiento.	<b>S</b> Superficies del área de medición ( $m^2$ ).

*Nota.* La Tabla 2.2 presenta los componentes de un APCG con base al esquema 2.9. Tomado de [ONNCCE \(2010\)](#).

Así mismo, como se muestra en la Figura 2.9, el APCG está compuesto por dos placas de enfriamiento, dos placas de protección calefactora y un calentador para el área de medición. Este arreglo de placas está hecho de tal modo que, exista sobre la muestra bajo prueba un gradiente de temperatura y para que la transferencia de calor vaya en dirección unidimensional de la placa caliente a la placa fría. Así mismo, se debe colocar dos especímenes de muestra con una densidad similar, tamaño y espesor en cada extremo de la placa caliente con guarda y se debe sujetar por medio de las placas frías. De esta manera, teóricamente, las placas frías y caliente se someten a condiciones de frontera de temperatura constante en las superficies de las muestras.

Por otra parte, el investigador [Martínez \(2003\)](#) menciona que, la placa de guarda o zona de guarda secundaria es omitida algunas veces cuando las condiciones de temperaturas de prueba son cercanas a la temperatura del entorno y el espesor del espécimen no es muy grande. De igual manera, cuando el espécimen es cuadrado y las placas son circulares, se coloca un aislamiento activo o pasivo con conductividad térmica similar que rodee al espécimen.

### 2.5.3.1. Ecuación de trabajo del APCG

El mensurado bajo prueba es una combinación de compuesto laminar compactado y puede tener porosidades o cavidades microscópicas en las que el calor se puede transferir por conducción, convección y radiación. Por lo que, con base a la ley de Fourier (2.1.1.1), se requiere una intensidad de corriente que circule por la resistencia del calefactor junto con una caída de voltaje en la misma (**efecto Joule**), por lo tanto, la Ec. 2.18 expresa la  $\lambda$  como:

$$\lambda = \frac{PL_x}{2A\Delta T} \quad (2.18)$$

en donde:

1.  $P$  = Potencia eléctrica suministrada en la placa caliente ( $W$ ).
2.  $L_x$  = Espesor de la muestra bajo prueba ( $m$ ).
3.  $A$  = Área de la zona de medición ( $m^2$ ).
4.  $\Delta T$  = Diferencia de temperatura entre las placas fría y la placa caliente ( $^{\circ}C$ ).

### 2.5.3.2. Efecto Joule

De acuerdo con el apartado anterior 2.5.3.1, para que aumente la temperatura de la placa caliente ( $T_{pc}$ ) se quiere un suministro de energía acorde a la conductividad térmica ( $\lambda$ ) de la muestra. Esa energía suministrada a la placa se convierte en energía térmica debido a que, los electrones en movimiento de una corriente eléctrica (*Amperios*) impactan con el material (cable de resistencia) a través del medio del cual están siendo conducidos. La energía cinética que poseen los electrones se convierte en energía térmica, aumentando la temperatura del material por el que circulan. Por lo que [Incropera et al.](#) menciona que, si esta generación de energía ( $W$ ) ocurre uniformemente en todo el medio del volumen  $V$ , la tasa de generación volumétrica ( $W/m^3$ ) se expresa como la Ec. 2.19.

$$\dot{q} = \frac{\dot{E}_g}{V} = \frac{I^2 R}{V} \quad (2.19)$$

## 2.6. Aparatos de placa caliente con guarda en México

De acuerdo, con la bibliografía, hay muchos investigadores del área de sistemas energéticos o el área de construcción que se interesan en determinar, la conductividad térmica en materiales homogéneos de construcción, como menciona Wang et al. (2018), una estimación precisa de la conductividad térmica de los materiales de construcción es crucial para la modelización de los fenómenos de transferencia de calor y el cálculo del consumo energético de los edificios. En el territorio mexicano, existen diferentes centros de investigación que tratan sobre sistemas energéticos y sistemas de referencias (metrología) por mencionar algunos, el centro de investigación **CENAM**, el **CENIDET** y el **IPN**. Algunos de los investigadores que han trabajado acerca del APCG son: Dr. Leonel Cortés Lira (CENIDET - CENAM,1998-2010), Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor (CENIDET,1999), Dr. Víctor Martínez Fuentes (IPN,2003), y M. Gustavo Marbán Betancourt. (CENIDET,2005). En la Tabla 2.3, se muestran los valores de diseño APCG construidos y los resultados obtenidos.

**Tabla 2.3**

Valores de conductividades térmicas ( $\lambda$ ) de materiales aislantes

Constructor	Forma del APCG	Dimensión Placa Caliente (cm)	Material de Prueba (cm)	Resultados ( $\lambda$ )
Xamán (1999)	Circular	$r = 15,25$ Aluminio	Owens Corning $30 \times 30 \times 2,54$ (aislante Térmico)	0,031174 $\pm 4\%$
Fuentes (2003)	Circular	$r = 15,2$ , <i>Espesor</i> = 1,2 $rm = 8,23$ Aluminio 6061	Fibra de Vidrio	0,03627 $\pm 0,49\%$
Betancourt (2005)	Circular	$r = 7,62$ <i>Espesor</i> = 1,905 Aluminio	Amofoam $r = 7,62$ <i>Espesor</i> = 5,08  Owens Corning	0,027 $\pm 4\%$  0,0365 $\pm 26\%$

Nota. Resultados de pruebas conductividad térmica realizadas en México.

## 2.7. Determinación de incertidumbre por propagación de error

Actualmente, se acepta de forma general que, cuando todas las variables y elementos, conocidas o supuestas, del error fueron evaluadas y se han explicado las correcciones, aún permanece una incertidumbre acerca de la fiabilidad del resultado expresado, lo cual se mantiene una duda acerca de, que tan bien se ha presentado el resultado de la medición con respecto al valor de la cantidad que está siendo medida.

Así mismo de conformidad con la norma NMX-CH-140-IMNC-2002 ([ONNCCE \(2010\)](#)). La palabra “incertidumbre” significa falta de certeza sobre algo, y, por lo tanto, en un sentido respecto a la medición, la *incertidumbre de medición* significa duda en la validez del resultado de una medición. De igual manera [Xamán et al. \(1999\)](#), resume que el objetivo de una medición es determinar el valor del espécimen de prueba (Magnitud particular, objeto de medición o magnitud sujeta a medición), y esto es el valor de la cantidad particular para ser medida.

### 2.7.1. Errores durante el proceso de medición

Normalmente, en el análisis de las variables involucradas en un proceso de medición permite detectar un sin número de elementos que participan directamente al efectuarla. Todos aquellos componentes provocan cierto nivel de desviación,  $\sigma$ , en la estimación del valor de la medición mensurando debido a la ignorancia o a la falta de control sobre la influencia de estos factores en el proceso de medición. Por lo que [Delgado et al. \(2005\)](#) dispone que, la desviación entre el valor obtenido y el valor verdadero se llama error.

### 2.7.2. Tipos de Incertidumbres

La incertidumbre en las mediciones se compone de aportaciones de diversas fuentes, algunas de ellas por las magnitudes de las variables de entrada respectiva ([de Guías en Metrologías \(2012\)](#)). De forma general, la incertidumbre de una medición de un mensurado incluye numerosas componentes. Algunas pueden calcularse mediante ([Delgado et al. \(2005\)](#)):

- Incertidumbre estándar: Es la Incertidumbre de un resultado de una medición presentada en forma de una desviación estándar (de Normalización (2003)).
- Una evaluación de incertidumbre **tipo A**: se da a partir de una distribución estadística de las magnitudes que proceden de las series de mediciones realizadas y pueden determinarse por desviaciones estándar acorde a las condiciones de medida definidas.
- **Incertidumbre combinada**: Es la incertidumbre estándar de un resultado de una medición cuando el valor obtenido se logra a partir de los valores de otras magnitudes, de acuerdo con el resultado de la medición que varía con respecto a los cambios en estas magnitudes.

### 2.7.2.1. Incertidumbre combinada

La  $u_c(y)$ , el cual comprende la incertidumbre del mensurado ( $Y$ ). La aportación  $u_i(y)$  de cada elemento a la incertidumbre combinada depende de la incertidumbre estándar  $u(x_i)$  de la propia fuente y del impacto de la fuente sobre el espécimen a medir, como se muestra en la Ec. 2.20

$$u_c(y) = C_i u(x_i) \quad (2.20)$$

En donde  $c_i$  es el coeficiente de sensibilidad y  $u(x_i)$  es la incertidumbre de la propia fuente. Dado que, el coeficiente de sensibilidad  $c_i$  se calcula mediante la derivada parcial de  $f$  con respecto a  $x_i$  dada por Delgado et al. (2005) en la Ec. 2.21.

$$c_i = \frac{\partial f(X_1, \dots, X_N)}{\partial X_i} \Big|_{X_1=x_1 \dots X_N=x_n} \quad (2.21)$$

Por lo que, para los valores de entrada no correlacionadas se determina la **ley de propagación de incertidumbre combinada**  $u_c(y)$  se calcula mediante la suma geométrica de las contribuciones de cada elemento como esta en la Ec. 2.22.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (2.22)$$

Por lo tanto, cambiando el valor de  $u_i(y)$  de la Ec.6 por la Ec. 2.20 y el valor de  $c_i$  de la Ec. 2.20 resulta el modelo estadístico de incertidumbre combinada Ec. 2.23.

$$u_c^2(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial X_i} \right]^2 \cdot u(x_i)} \quad (2.23)$$

### 2.7.3. Modelo estadístico para la determinación de la incertidumbre de la conductividad térmica

De acuerdo con el concepto anterior del apartado 2.7.2.1, aplicando la Ec. 2.23 a nuestro modelo matemático para determinar la conductividad térmica (Ec. 2.18), la incertidumbre de la conductividad térmica está dada por la Ec. 2.24:

$$u_c^2(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial \lambda}{\partial x_i} \right]^2 \cdot u(x_i)} \quad (2.24)$$

En donde  $\partial \lambda / \partial x_i$  es la derivada parcial de cada variable (coeficiente de sensibilidad). Por lo que al aplicar la ecuación 2.20 para cada término de la variable de nuestra ecuación de trabajo 2.18, obtenemos los coeficientes de sensibilidad (Ec. 2.26 - E. 2.29).

$$C_{L_x} = \frac{\partial \lambda}{\partial L_x} = \frac{P}{2A\Delta T} \quad (2.25)$$

$$C_p = \frac{\partial \lambda}{\partial P} = \frac{L_x}{2A\Delta T} \quad (2.26)$$

$$C_{\Delta T} = \frac{\partial \lambda}{\partial \Delta T} = -\frac{PL_x}{2A\Delta T^2} \quad (2.27)$$

$$C_A = \frac{\partial \lambda}{\partial A} = -\frac{PL_x}{2A^2\Delta T} \quad (2.28)$$

Así mismo, podemos calcular el aporte de incertidumbre de la potencia eléctrica y el área de medición. La incertidumbre del espesor de la muestra ( $\sigma_{L_x}$ ) y la diferencia de Temperatura  $\sigma_{\Delta T}$  está determinado por el equipo de medición del espesor (Bernier) y sensor de temperatura (Termopar).

#### 2.7.3.1. Incertidumbre de la Potencia Eléctrica

De acuerdo con la Ec. 2.20 podemos obtener la incertidumbre que aporta la potencia eléctrica ( $P$ ) acorde con Delgado et al. (2005). En donde la Ec. 2.20 es la ecuación de trabajo,  $C_V$  y  $C_R$  son los coeficientes de sensibilidad y  $\sigma_V$  y  $\sigma_R$  son las incertidumbres de

la tensión y resistencia que aporta el equipo de suministro de energía.

$$P = \frac{V}{R^2} \quad (2.29)$$

$$c_V = \frac{\partial p}{\partial V} = \frac{2V}{R} \quad (2.30)$$

$$c_R = \frac{\partial p}{\partial V} = -\frac{V^2}{R^2} \quad (2.31)$$

$$\sigma_P = \sqrt{c_V^2 \sigma_V^2 + c_R^2 \sigma_R^2} \quad (2.32)$$

Por lo que  $\sigma_P$  es el aporte de incertidumbre del equipo de suministro de energía y se considera la tensión ( $V$ ) que se suministra a la placa caliente y la resistencia ( $\Omega$ ).

### 2.7.3.2. Incertidumbre del área de medición

De igual manera acorde a [Delgado et al. \(2005\)](#) para determinar la incertidumbre en el área de medición se considera lo siguiente:

$$A = \pi r^2 \quad (2.33)$$

$$c_r = \frac{\partial A}{\partial r} = 2\pi r \quad (2.34)$$

$$c_A = c_r \sigma_r \quad (2.35)$$

en donde  $\sigma_r$  es la desviación estándar de medición del área. Lo cual este valor está especificado en el equipo de medición.

### 2.7.4. Propagación de error de la conductividad térmica en un APCG

Por lo que, sustituyendo los coeficientes de sensibilidad en la Ec. 2.24, y considerando la incertidumbre que aporta el equipo de suministro de energía ( $P$ ), la incertidumbre de medición del área ( $A$ ), espesor ( $L_x$ ) y la diferencia de temperatura ( $\Delta T$ ) obtenemos la propagación de error para determinar la  $\lambda$  (Ec. 2.36).

$$u_c(y) = \sqrt{c_P^2 \sigma_P^2 + c_{L_x}^2 \sigma_{L_x}^2 + c_{\Delta T}^2 \sigma_{\Delta T}^2 + c_A^2 \sigma_A^2} \quad (2.36)$$

## 2.8. Conductividades térmicas de materiales aislantes

Como se mencionó anteriormente en el apartado 1.2, es de vital importancia conocer la CTMHC para el cálculo del desempeño energético en edificaciones. Por lo que, de esta manera, el autor [Mendes et al. \(2022\)](#) menciona que, un valor más bajo de transmitancia térmica indica un mejor potencial de aislamiento. La transmitancia térmica está relacionada con el espesor del elemento y la **conductividad térmica** y de igual forma, cuanto mayor sea el espesor del elemento o menor sea su conductividad térmica, menor será su transmitancia térmica. Por lo que acorde a [Yang et al. \(2020\)](#) mencionan que, el empleo de envolventes aislantes mejora el rendimiento en edificaciones y al mismo tiempo se logra sinergias como el confort residencial y un ambiente interior saludable. En la Figura 2.10 y 2.11, se observan envolventes aislantes para edificaciones, el primer material es poliestireno extruido y el segundo es lana de fibra de vidrio.

**Figura 2.10**

*Placa de Foamular como envolvente térmico.*



**Figura 2.11**

*Lana mineral como envolvente térmico.*



La conductividad térmica del Foamular® ([Corning \(2022\)](#)) a temperatura de  $24^{\circ}\text{C}$  es de  $0,0288 \text{ W/mK}$  y la conductividad térmica de los diferentes tipos de lanas minerales se encuentran en un valor de  $0,030 \text{ W/mK}$  y  $0,040 \text{ W/mK}$ . En el apartado B, se muestra una tabla de conductividades de materiales de construcción.

## Bibliografía

- Betancourt, G. M., Cortes, L. L., and Villaseñor, J. P. X. (2005). Diseño, construcción y caracterización de un instrumento de placas planas paralelas con guarda con doble lado de medición y con cámara de ambiente controlado para determinar la conductividad térmica de materiales sólidos - CENIDET.
- Cengel, Y. A. (2007). Transferencia de Calor y Masa. Un enfoque práctico, volume 3. McGRAW-HILL, tercera edición.
- Corning, O. (2022). Ficha técnica de aislamiento térmico de espuma rígida de poliestireno extruido (xps).
- de Guías en Metrologías, C. C. (2012). Vocabulario internacional de metrología/ conceptos fundamentales y generales, y términos asociados.
- de Normalización, O. N. (2003). Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones, NMX-CH-140-IMNC-2002.
- Delgado, H., Guadalupe, A., Itandehui, E., Peña, M., Salazar, A. P., and Flores, M. F. (2005). Estimación de la incertidumbre en métodos de ensayos de construcción. Instituto Mexicano del Transporte.
- EL Assaad, M., Colinart, T., and Lecompte, T. (2023). Thermal conductivity assessment of moist building insulation material using a heat flow meter apparatus. Building and Environment, 234:110184.
- Incropera, F. P., Bergman, T. L., Bergman, T. L., DeWitt, D. P., and Lavine, A. S. (2011). Fundamentals of Heat and Mass Transfer 7th Edition. John Wiley and Sons, Incorporated, 7 edition.
- Instruments, T. (2021). Laser flash dlf 2800.
- Kreith, F., M. R., and S., B. M. (2011). Principios de Transferencia de Calor, volume 7. Cengage Learning, séptima edición.
- Lian, T.-W., Kondo, A., Akoshima, M., Abe, H., Ohmura, T., Tuan, W.-H., and Naito, M. (2016). Rapid thermal conductivity measurement of porous thermal insulation material by laser flash method. Advanced Powder Technology, 27(3):882–885. Special issue of the 5th Int'l Conf. on the Characterization and Control of Interfaces for High Quality Advanced Materials (ICCCI2015).
- Mafioli, C. D., Escobar, E. E. C., and Castillo, J. P. (2019). Medición de la conductividad térmica en materiales aislantes bajo régimen de flujo de calor no estacionario. Ingeniería y Ciencia, 15:101–116.

- Martínez, V. F. (2003). Sistema primario de medición de conductividad térmica de aislantes térmicos. Diseño y Construcción. Instituto Politécnico Nacional.
- Mendes, V. F., Fardin, W., Barreto, R. R., Caetano, L. F., and Mendes, J. C. (2022). Sensitivity analysis of coating mortars according to their specific heat, specific gravity, thermal conductivity, and thickness in contribution to the global thermal performance of buildings. Sustainable Materials and Technologies, 31:e00381.
- ONNCCE (2010). Norma NMX-C-189-ONNCCE-2010, Determinación de la transmisión térmica (aparato de placa caliente aislada).
- Patankar, S. V. (1980). Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere Publishing Corporation, i .title. ii. series edition.
- Refrigerating and of Heating, A.-C. E. A. S. (2021). 2021 ASHRAE HANDBOOK FUNDAMENTALS, volume 1. Inch-pound edition.
- Wang, Y., Ma, C., Liu, Y., Wang, D., and Liu, J. (2018). A model for the effective thermal conductivity of moist porous building materials based on fractal theory. International Journal of Heat and Mass Transfer, 125:387–399.
- Xamán, J. P. (2016). Dinámica de Fluidos Computacional para Ingenieros. Palibrio, primera edición.
- Xamán, J. P., Cortes, L. L., and Chena, Y. C. (1999). Análisis de la transferencia de calor de un aparato para determinar la conductividad térmica de materiales aislantes. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET).
- Yang, W., Liu, J., Wang, Y., and Gao, S. (2020). Experimental study on the thermal conductivity of aerogel-enhanced insulating materials under various hygrothermal environments. Energy and Buildings, 206:109583.

## Capítulo 3

### Diseño del APCG

En este capítulo se presenta, el diseño del Aparato de Placa Caliente con Guarda, explicando de manera detallada los análisis realizados para obtener el tamaño geométrico más eficiente del APCG, así como también, se presentan los componentes del equipo acorde con las simulaciones CFD y los criterios de diseño con conformidad a la norma NMX-C-189-ONNCCE-2010. Además, se presenta el análisis de incertidumbre de los equipos de suministro de energía y del APCG y por último, se describe el proceso de manufactura CAD/CAM del Aparato de Placa Caliente con Guarda.

#### 3.1. Simulación del APCG

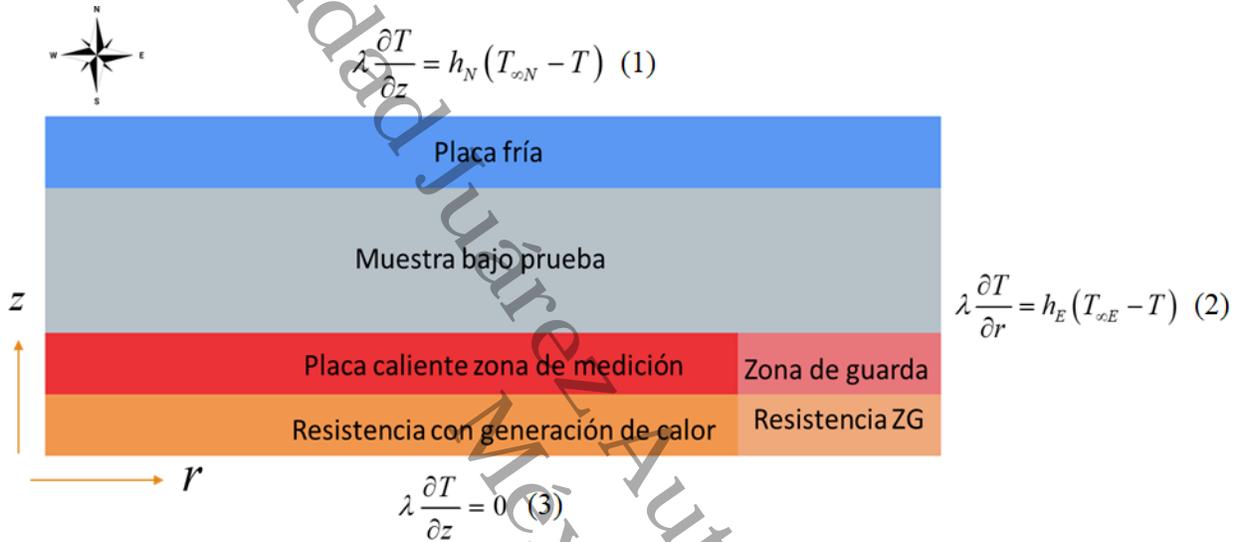
Para obtener el dimensionamiento adecuado del APCG se consideró la solución analítica de la Ec. 2.8 considerando que la conductividad térmica ( $\lambda$ ) depende del ángulo ( $\varphi$ ), el radio ( $r$ ) y el tiempo ( $t$ ). Así mismo, para calcular la distribución de temperaturas en la placa central y la guarda se realizó el análisis basado en el trabajo reportado por Xamán et al., (2009) en donde se realiza el análisis empleando la formulación de la función de Green obteniendo una desviación estándar del 3% en comparación con los datos obtenidos de forma analítica y los datos experimentales considerados.

Por otra parte, en el presente estudio también se consideraron los hallazgos reportados por Peralta et al., (2020) quienes utilizaron simulación CFD, con el software ANSYS Fluent, para el diseño del APCG. Lo cual mencionan que les permitió comprobar que la resistencia eléctrica construida es adecuada para el ensayo, logrando una temperatura de operación máxima de  $100^{\circ}\text{C}$  en cinco minutos.

### 3.1.1. Modelo Físico del APCG

En la Figura 3.1 se observa el modelo físico que se consideró para el APCG. Como se puede observar se consideran como componentes principales: una placa fría, una muestra bajo prueba y una placa caliente.

**Figura 3.1**  
Esquema físico del APCG con condiciones de frontera.



Con base en la Figura 3.1, podemos observar que las condiciones de frontera a las que se somete el APCG son de dos tipos: condición de frontera de tipo Robin y condición de frontera de tipo Neumann. Para las condiciones de frontera impuestas acorde al modelo de volumen finito (Xamán (2016)), se realizó la discretización explícita utilizando una aproximación con la serie de Taylor, lo cual se obtienen de las ecuaciones (Ec. 3.1, Ec. 3.2 y 3.3).

Frontera Sur:

$$\frac{\partial T}{\partial Z} = 0 \quad \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\delta_{z_n}} = 0 \quad T_{i,j} - T_{i,j+1} = 0 \quad (3.1)$$

Frontera Norte:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial Z} = h_N (T_{\infty N} - T)$$

$$\lambda_s \frac{T_{i,j} - T_{i,j-1}}{\delta_{z_s}} = h_N (T_{\infty N} - T_{i,j})$$

$$\left(1 + \frac{h_N \delta_{z_s}}{\lambda_s}\right) T_{i,j} - T_{i,j-1} = \frac{h_N \delta_{z_s}}{\lambda_s} T_{\infty N} \quad (3.2)$$

Frontera Este:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = h_E(T_{\infty E} - T)$$

$$\lambda_W \frac{T_{i,j} - T_{i-1,j}}{\delta_{rW}} = h_N(T_{\infty E} - T_{i,j})$$

$$\left(1 + \frac{h_E \delta_{rW}}{\lambda_W}\right) T_{i,j} - T_{i,j-1} = \frac{h_E \delta_{rW}}{\lambda_W} T_{\infty E} \quad (3.3)$$

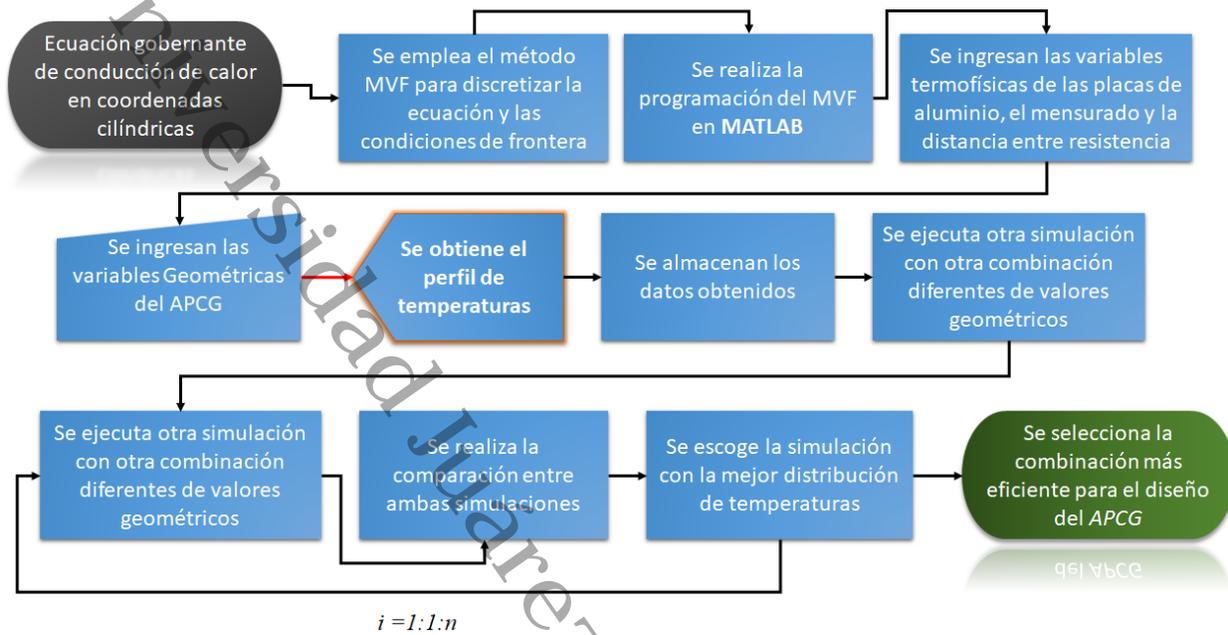
Aunado a lo anterior, para la solución de la ecuación general de conducción de calor en coordenadas cilíndricas con generación de energía al interior (Ec. 2.8) y las condiciones de frontera discretizadas, se utilizó el método de volumen finito (MVF), mediante una programación en MATLAB® para obtener: los perfiles de temperaturas en el APCG, las temperaturas de contacto entre la placa caliente y las placas frías, las temperaturas en el interior y las temperaturas de superficie.

### 3.1.2. Metodología de Simulación y obtención de resultados

A continuación, se enlista el procedimiento de las simulaciones geométricas del APCG, así como, también se muestra el diagrama de flujo (Ver Figura 3.2) del mismo procedimiento:

- Se aplica el método de volumen finito a la ecuación gobernante para discretizar la ecuación general de conducción de calor y las condiciones de frontera.
- Se realiza la codificación del programa de método de volumen finito.
- Se ingresan en el programa principal las variables termofísicas (calor específico, conductividad térmica, coeficiente convectivo) del material bajo pruebas y las placas de aluminio, así como, las distancia entre resistencias generadoras de calor y las variables geométricas del las placas de aluminio y el mensurado.
- Después de lo anterior, se obtienen los perfiles de temperaturas, se almacena los datos obtenidos y se ejecuta una simulación con una combinación diferente.
- Se realiza la comparación entre las simulaciones realizadas y se selecciona la simulación con la mejor distribución de temperaturas.
- Por último, se selecciona la combinación más eficiente para el diseño del APCG.

**Figura 3.2**  
Metodología para la selección de la geometría de APCI.



### 3.1.3. Análisis de Diseño Geométrico

Los hallazgos reportados por Martínez (2003); Xamán et al. (1999) se consideraron para el análisis de dimensionamiento geométrico, se propusieron las variables que pueden estar cambiando para el dimensionamiento del dispositivo de placa caliente, con base en la literatura. Como se observa en la Tabla 3.1, las variables que se tomaron en cuenta para las simulaciones fueron: espesor de la muestra ( $EM$ ) en  $mm$ , conductividad térmica de la muestra ( $\lambda$ ) en  $W/mK$ , espesor de la placa de aluminio ( $EPA$ ) en  $mm$ , distribución circular de resistencia ( $R$ ) en  $mm$  y el coeficiente convectivo (convección de aire libre) para el aire ( $h$ ) en  $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ .

**Tabla 3.1**  
Variables para utilizar en las simulaciones y valores numéricos

Radio de la placa $r$ ( $mm$ )	Espesor Placa aluminio ( $mm$ )	Espesor de la muestra ( $mm$ )	Distribución de resistencia ( $mm$ )	Conductividad Térmica ( $W/mK$ )	Coficiente convectivo $h$ ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ )
Z. Medición	$EPA_1$ 4	$EM_1$ 30	$R_1$ 12	2	$h_1$ 10
Z. Guarda	$EPA_2$ 13	$EM_2$ 50	$R_2$ 6		$h_2$ 8

Como se observa en la Tabla 3.1, el conjunto de valores representan la primera corrida de las 48 simulaciones realizadas del APCG. En la primera corrida de la simulación solo se consideró un valor de conductividad térmica ( $\lambda$ ), tres valores de distancias entre resistencias, dos valores de espesor de la placa de aluminio, dos valores de coeficiente convectivo y dos radios de la placa caliente ( $ER_{r_1}$  y  $ER_{r_2}$ ) incluida la zona de medición y zona de guarda. En este primer análisis, se realizó la comparación de la temperatura en la superficie entre la placa caliente y el material bajo prueba.

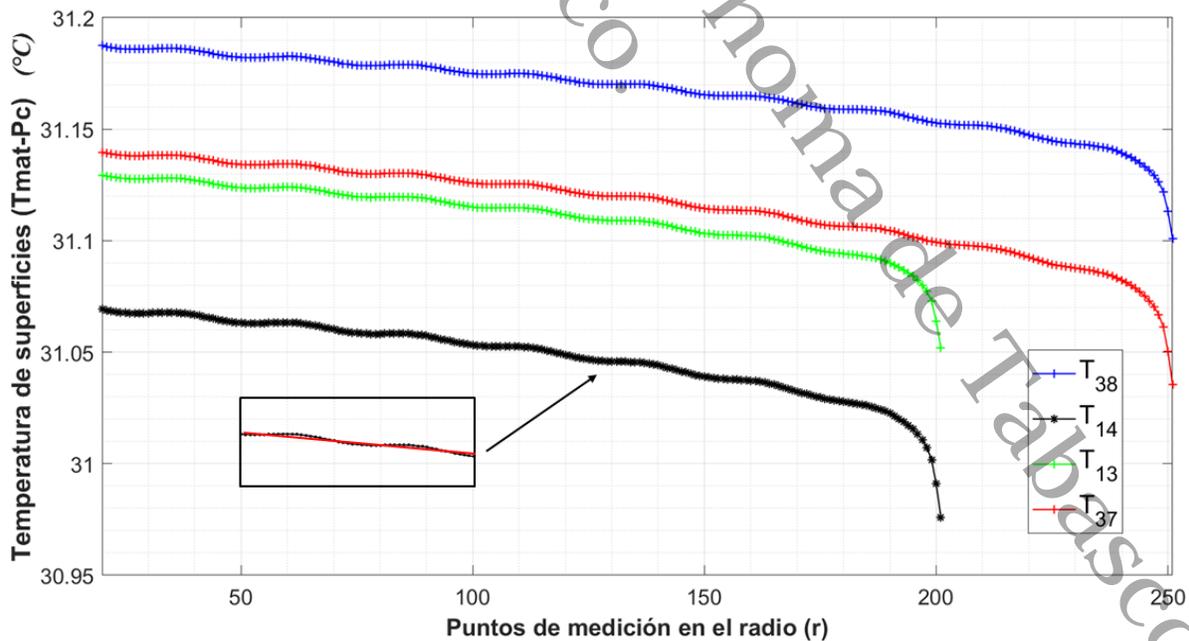
Como criterio de selección de una *distribución de temperaturas homogéneas*, se consideró lo siguiente:

- Comportamiento lineal de la temperatura de superficie entre el material y la placa caliente  $T_{mat} - P_c$ .
- Diferencia de temperatura  $\Delta T$  de  $10^\circ C$  entre la placa fría y la placa caliente.
- Comportamiento del efecto de borde.

Como resultado se obtuvo que las simulaciones con mejor distribución de temperatura son las simulaciones: 13, 14, 37 y 38, como se observa en la Figura 3.3.

**Figura 3.3**

*Temperatura de superficie de las simulaciones 13, 14, 37 y 38 empleando los dos radios (r) de las placas.*



Como se puede observar en la Figura 3.3 la diferencia entre las simulaciones 13 y 14 fue la variación de  $h$  de 8 a  $10 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ . De tal modo que entre mayor sea el valor de  $h$  se obtiene un aumento de temperatura. Las simulaciones 13 y 14 se realizaron con un radio de  $150 \text{ mm}$  de radio (radio de medición) y  $50 \text{ mm}$  de guarda.

Por otra parte, en las simulaciones 37 y 38 (Figura 3.3) ocurre el mismo efecto, ambas simulaciones están sometidas a las mismas condiciones, pero se empleó un radio de medición de  $200 \text{ mm}$  y un radio de  $50 \text{ mm}$  de guarda. En la Figura 3.3 se observa que, al acercarse a los  $200 \text{ mm}$  de guarda, se aprecia el efecto de borde. Aunque las simulaciones 13, 14, 37, y 38 obtienen una distribución de temperatura más uniforme en comparación a las simulaciones restantes. También, puede observarse, que para esos casos se presenta un perfil ondulado, el cual es más notorio cuando se observa la línea roja que representa un compartimento lineal para hacer contraste al efecto ondulatorio de las generaciones de calor generadas por las ubicaciones de las resistencias en la placa caliente. Estos resultados indicaron que el diseño inicial no presentaba una distribución térmica adecuada, lo cual implicaría altas incertidumbres en la determinación de conductividad térmica, como lo reporta Lira-Cortés et al. (2008). Así mismo se descartaron las 44 simulaciones restantes (Ver Anexo C), debido a que, se obtuvieron comportamientos de la temperatura de superficie no homogéneas (*no lineales*).

### 3.1.3.1. Análisis de Temperatura de contacto (segunda corrida de simulación)

Por lo tanto, con base a los resultados obtenidos en el apartado anterior, donde se empleó una conductividad térmica ( $\lambda$ ) de  $2 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ , se propusieron los valores que se muestra en la Tabla 3.2 para las siguientes simulaciones del APCG. Esto con el fin de buscar encontrar la configuración que permita obtener una distribución homogénea de temperatura.

**Tabla 3.2**

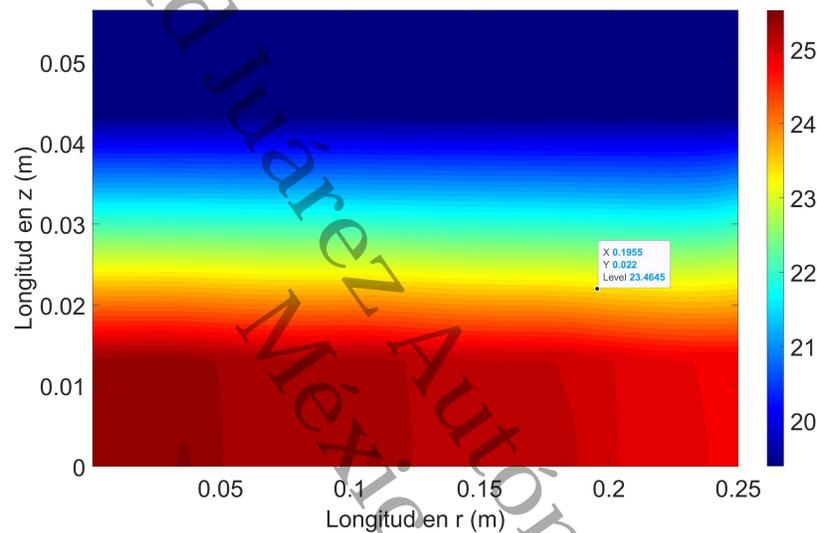
*Variables y valores numéricos empleados (Segunda corrida de simulación)*

Radio de la placa $r$ ( $mm$ )		Espesor Placa aluminio ( $mm$ )	Espesor de la muestra ( $mm$ )	Distribución de resistencia ( $mm$ )	Conductividad Térmica ( $W/mK$ )
Z. Medición	Z. Guarda	$EPA_1$ 4	$EM_1$ 50	$R_1$ 12	0,02
$ER_1$ 150	50	$EPA_2$ 13	$EM_2$ 40	$R_2$ 6	0,5
$ER_2$ 200	50		$EM_3$ 30		1,4
					2

Como se presenta en la Tabla 3.2, se mantuvieron ambas distancias en el radio de las placas de aluminio, muestra bajo prueba, y el radio de la guarda. Se extendió el tamaño de espesor de la muestra a tres valores. De la misma manera, al obtener una distribución ondulada (Figura 3.3), se propuso disminuir la distancia entre las resistencias para incrementar el área de contacto con la generación de calor, utilizando una separación entre resistencias de 6 y 12 mm. Esto con el objetivo evitar perfiles de temperaturas no homogéneos como se muestra en la Figura 3.4.

**Figura 3.4**

*Perfil de temperatura no homogéneo de la simulación 47.*



*Nota.* Simulación del APCG empleando un radio de 200 mm en la zona de medición, un radio de 50 mm en la zona de guarda, espesor de la placa de aluminio de 13 mm y espesor de la muestra de 30 mm con conductividad térmica de 2 W/mk.

Como último cambio, se propuso anexar tres valores más en la variable de conductividad térmica ( $\lambda$ ), debido a que, los materiales de construcción tienen diferentes valores de conductividad térmica. En el apartado de Anexos B, se encuentra una tabla con conductividades térmicas de materiales de construcción.

Por consiguiente, acorde a los cambios de valores mostrados en la Tabla 3.2 para el dimensionamiento del APCG, se recabó información sobre las temperaturas de superficie entre de la placa caliente y el material ( $T_{mat} - P_c$ ) y la temperatura de superficie entre del material y la placa fría ( $T_{mat} - P_f$ ) de 96 simulaciones realizadas.

Por lo anterior, se llevó a cabo una comparación de la desviación estándar ( $\sigma$ ) de ambas temperaturas de superficies de contacto ( $mat - P_c$  y  $mat - P_f$ ) como se muestra en las Tablas 3.3 y 3.4 para seleccionar el arreglo con una distribución homogénea de temperatura para la zona de medición correspondiente a flujo de calor unidimensional.

**Tabla 3.3**

Desviación estándar en las temperaturas  $T_{mat} - P_c$  y  $T_{mat} - P_f$  para conductividades de 0,02 y 0,5 W/mK

$(\lambda) 0,02 W/mK$					$(\lambda) 0,5 W/mK$				
$ER_1$		$ER_2$			$ER_1$		$ER_2$		
#C	mat-Pc	mat-Pf	mat-Pc	mat-Pf	#C	mat-Pc	mat-Pf	mat-Pc	mat-Pf
1	12.7964	0.7667	13.5057	0.8410	2	0.2736	0.0226	0.2975	0.0234
5	11.8739	0.8133	12.3543	0.8729	6	0.2113	0.0158	0.2211	0.0160
9	10.4970	0.8443	10.7143	0.8833	10	0.1517	0.0103	0.150	0.0098
13	12.8351	0.7714	13.0196	0.8093	14	0.1859	0.0217	0.2160	0.0211
17	11.9086	0.8183	11.9076	0.8397	18	0.1253	0.0146	0.1438	0.0139
21	10.5256	0.8495	10.3238	0.8493	22	0.0687	0.0092	0.0782	0.0084
25	7.1994	0.3979	7.8504	0.4561	26	0.1628	0.0152	0.1744	0.0158
29	6.8610	0.4313	0.1392	0.1569	30	0.1259	0.0110	0.1321	0.0107
33	0.1274	0.1768	6.7305	0.5177	34	0.0883	0.0086	0.0904	0.0075
37	7.2319	0.4005	7.5762	0.4384	38	0.1372	0.0151	0.1460	0.0146
41	6.8919	0.4342	7.1482	0.4686	42	0.1008	0.0108	0.1056	0.0099
45	6.3529	0.4694	6.4940	0.4969	46	0.0137	0.0156	0.0142	0.0142

**Tabla 3.4**

Desviación estándar en las temperaturas  $T_{mat} - P_c$  y  $T_{mat} - P_f$  para conductividades de 1,4 y 2 W/mK

$(\lambda) 1,4 W/mK$					$(\lambda) 2 W/mK$				
$ER_1$		$ER_2$			$ER_1$		$ER_2$		
#C	mat-Pc	mat-Pf	mat-Pc	mat-Pf	#C	mat-Pc	mat-Pf	mat-Pc	mat-Pf
3	0.1013	0.0062	0.0962	0.0054	4	0.0738	0.0071	0.0630	0.0063
7	0.0810	0.0067	0.0710	0.0059	8	0.06106	0.0072	0.0473	0.0065
11	0.0640	0.0070	0.0505	0.0063	12	0.0507	0.0067	0.0351	0.0063
15	0.0132	0.0070	0.0242	0.0061	16	0.0145	0.0090	0.0064	0.0081
19	0.0107	0.0083	0.0052	0.0073	20	0.0255	0.0098	0.0189	0.0089
23	0.0240	0.0094	0.0169	0.0084	24	0.0332	0.0102	0.0274	0.0093
27	0.0463	0.0074	0.0472	0.0064	28	0.0312	0.0083	0.0293	0.0076
31	0.0355	0.0081	0.0342	0.0072	32	0.0245	0.0084	0.0211	0.0079
35	0.0261	0.0084	0.0229	0.0077	36	0.0189	0.0081	0.0143	0.0077
39	0.0169	0.0078	0.0214	0.0071	40	0.0036	0.0089	0.0047	0.0084
43	0.0073	0.0086	0.0095	0.0080	44	0.0067	0.0092	0.0043	0.0088
47	0.0058	0.0092	0.0035	0.0086	48	0.011	0.0092	0.0099	0.0088

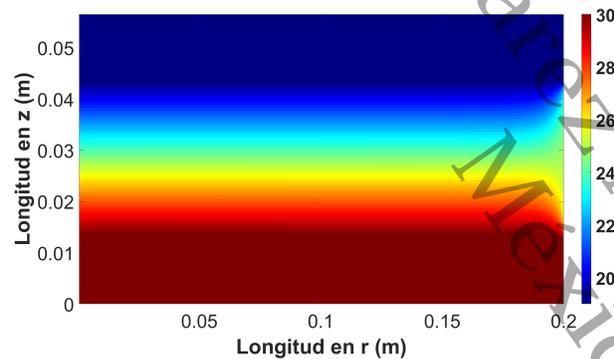
De acuerdo con los resultados obtenidos en las Tablas 3.3 y 3.4 en la siguiente sección se presenta la selección adecuada del dimensionamiento geométrico por cada valor de  $\lambda$  propuesto.

### 3.1.3.2. Selección del arreglo del APCG para la conductividad térmica de $0,02 W/mK$

Para la conductividad térmica de  $0,02 W/mK$  empleando  $ER_1$  y  $ER_2$ , en las Figuras 3.5 y 3.6 podemos observar dos perfiles de temperatura, con base en los resultados de la  $\sigma$  de la  $T_{mat} - P_c$  y  $T_{mat} - P_f$  (Tabla 3.3). Por lo que, en la Tabla 3.5 se muestra el arreglo de las simulaciones.

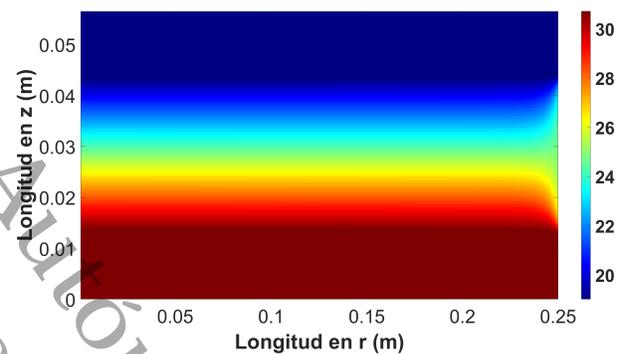
**Figura 3.5**

*Perfil de temperatura de la simulación 33.*



**Figura 3.6**

*Perfil de temperatura de la simulación 93.*



Para la selección del arreglo más adecuado de acuerdo con cada  $\lambda$  propuesta, se escogió el valor más bajo de  $\sigma$  de  $T_{mat} - P_c$  y  $T_{mat} - P_f$ . En las Figuras 3.5 y 3.6 podemos observar que ambos perfiles de temperatura alcanzaron un  $\Delta T$  de  $10^\circ C$  y el efecto de borde se presenta en el lado derecho exterior central del APCG. En el Anexo C.1, se puede observar perfiles de temperaturas con arreglos no adecuados para el APCG en el cual se observa que el efecto de borde es mayor con un comportamiento no homogéneo.

En la Tabla 3.3, se muestra que para ambos casos de radios de las placas del APCG ( $ER_1$  y  $ER_2$ ), el espesor adecuado en la placa caliente y las placas frías fue de  $13 mm$  (placas de aluminio de aleación 6061). Al utilizar una distancia entre resistencias de  $6 mm$ , se observa un aumento de temperatura en la placa caliente, debido a que se encuentran más círculos de resistencias en el interior de la placa caliente. Por otra parte, para la  $\lambda$  de  $0,02 W/mK$  las desviaciones estándar fueron mayores a  $6^\circ C$  en todos los casos de las simulaciones. Se pudo observar que solo las simulaciones 33 y 93 presentaron diferencias de temperaturas en la placa caliente en la zona de medición ( $ZM$ ) y zona de guarda ( $ZG$ ) menores al  $0,01^\circ C$ .

**Tabla 3.5**

Arreglo de las simulaciones 33 y 93 para la  $\lambda$  de  $0,02 W/mK$ .

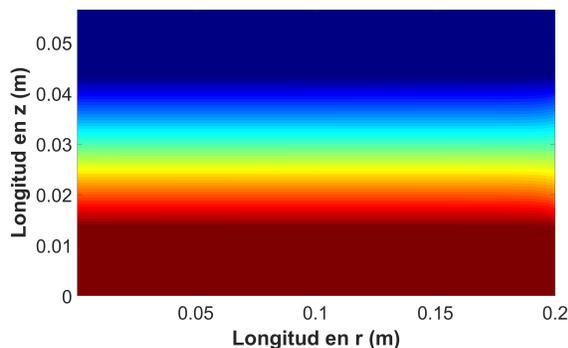
$\lambda$ $0,02 W/mK$	Simulación 33 ( $ER_1$ )		Simulación 93 ( $ER_2$ )	
Radios de las placas $Z_M$ (mm)	150		200	
Espesor de la placa de aluminio (mm)	13		13	
Distancia entre resistencias (mm)	12		6	
Temperatura media placa caliente $Z_M$ ( $^{\circ}C$ )	29.66		31.67	
Temperatura media placa caliente $Z_G$ ( $^{\circ}C$ )	29.67		31.68	
Espesor del mensurado (mm)	30		30	
Temperatura de superficie ( $^{\circ}C$ )	$T_{mat} - Pc$	$T_{mat} - Pf$	$T_{mat} - Pc$	$T_{mat} - Pf$
Desviación estandar $\sigma$ ( $^{\circ}C$ )	0.1274	0.1768	0.1392	0.1569

**3.1.3.3. Selección del arreglo del APCG para la conductividad térmica de  $0,5 W/mK$**

Por otra parte, para la conductividad térmica de ( $0,5 W/mK$ ) se encontró que, las simulaciones con menor  $\sigma$  presentan un arreglo similar presentado en la Tabla 3.5. De igual manera, en la Tabla 3.6 se muestra el arreglo con menor  $\sigma$  obtenido de las simulaciones 46 y 94. Así mismo, podemos observar que la diferencia de temperatura de la placa caliente en zona de medición  $ZM$  empleando el espesor  $EM_1$  y  $EM_2$  fue de  $0,04^{\circ}C$  y  $0,037^{\circ}C$  en la zona de guarda  $ZG$ . Como se pudo observar, el comportamiento del perfil de temperatura fue similar en ambas simulaciones, como se observa en la Figura 3.7 y 3.8.

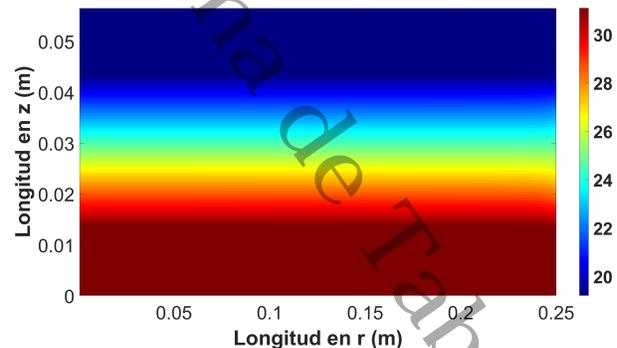
**Figura 3.7**

Perfil de temperatura de la simulación 46.



**Figura 3.8**

Perfil de temperatura de la simulación 94.



De manera similar, para la selección del arreglo para una conductividad térmica de  $0,5 W/mK$ , se seleccionó el valor de  $\sigma$  menor que se observa en la Tabla 3.3. Del mismo modo, en la Tabla 3.6 se observa que las temperaturas en ambas zonas ( $ZM$  y  $ZG$ ) para ambos espesores  $EM_1$  y  $EM_2$  solo presentan una diferencia porcentual del  $0,23\%$ ; por lo que, en la placa caliente no tendrá calentamientos localizados.

Por otra parte, utilizando el mismo programa de simulación del APCG se obtuvo para la simulación 46 una conductividad térmica de  $0,49 W/mK$ , mientras que, en la simulación 96 se obtuvo una conductividad térmica ( $\lambda$ ) de  $0,527 W/mK$ . Por lo que, el error porcentual (% de error) en la simulación 46 fue de  $1,998\%$  y  $5,22\%$  para la simulación 94. Lo cual indica que, al emplear radios de las placas de  $200 mm$  en el APCG obtenemos menores errores en la medición. Al mismo tiempo, para determinar la conductividad térmica en la simulación 94 se requiere una potencia eléctrica de  $24,969 W$  que es  $90,7\%$  veces mayor que la energía requerida para la simulación 46. Esto debido a que el área de muestra del material de prueba es mayor.

**Tabla 3.6**  
Arreglo de las simulaciones 46 y 94 para la  $\lambda$  de  $0,5 W/mK$ .

$\lambda$ $0,5 W/mK$	Simulación 46 ( $ER_1$ )		Simulación 94 ( $ER_2$ )	
Radios de las placas $Z_M$ (mm)	150		200	
Espesor de la placa de aluminio (mm)	13		13	
Distancia entre resistencias (mm)	6		6	
Temperatura media placa caliente $Z_M$ ( $^{\circ}C$ )	30.539		30.499	
Temperatura media placa caliente $Z_G$ ( $^{\circ}C$ )	30.541		30.504	
Espesor del mensurado (mm)	30		30	
Temperatura de superficie ( $^{\circ}C$ )	$T_{mat} - P_c$	$T_{mat} - P_f$	$T_{mat} - P_c$	$T_{mat} - P_f$
Desviación estandar $\sigma$ ( $^{\circ}C$ )	0.013	0.015	0.014	0.014

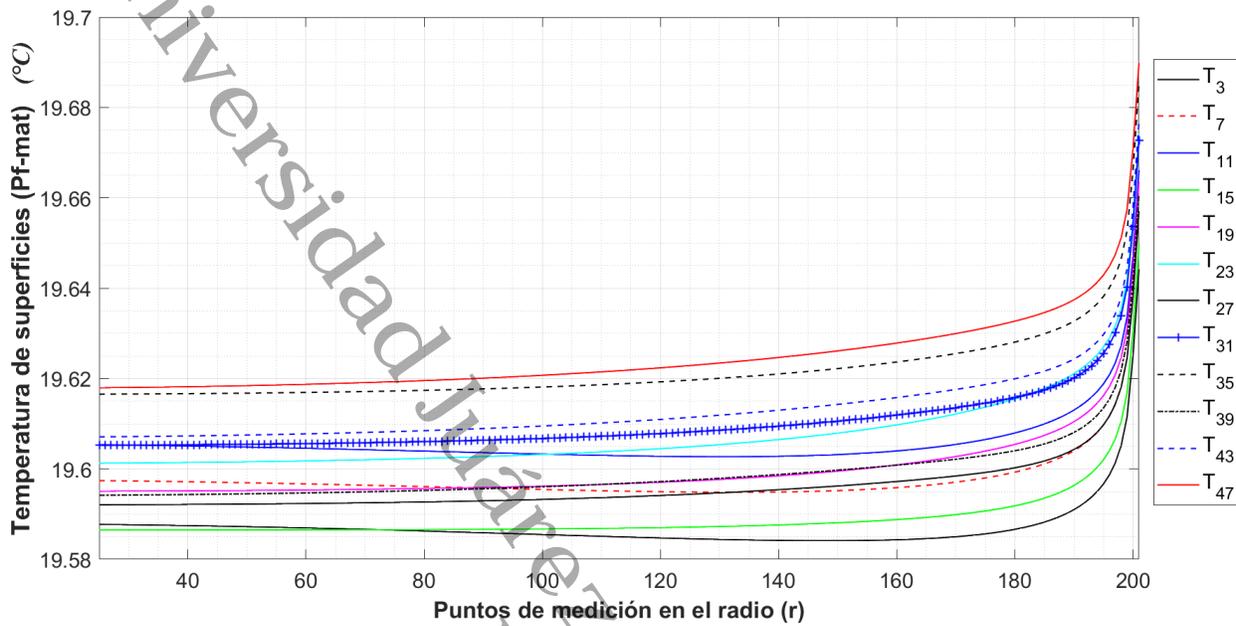
### 3.1.3.4. Selección del arreglo del APCG para la conductividad térmica de $1,4 W/mK$

De acuerdo con, la Tabla 3.4, para determinar el arreglo del APCG empleando la conductividad térmica de  $1,4 W/mK$ , las simulaciones 43 y 47 presentaron una  $\sigma$  menor con un valor de  $0,007^{\circ}C$  y  $0,006^{\circ}C$  para la  $T_{mat} - P_c$  empleando él  $ER_1$ . Por otra parte, aunque la desviación estándar en la  $T_{mat} - P_f$  en la simulación 15 es gradualmente menor respecto a los demás resultados, como se observa la Figura 3.9, la temperatura promedio en la zona de medición fue de  $34,516^{\circ}C$  (Figura 3.10).

Por otra parte, se puede observar en la gráfica (Figura 3.9) que, la temperatura de contacto entre la placa fría y el material para ambos casos fue de:  $19,612^{\circ}C$  y  $19,624^{\circ}C$ , lo cual tienen valores similares y el comportamiento de la distribución de temperatura en la placa fría no tendrá variaciones significativas para ambos arreglos.

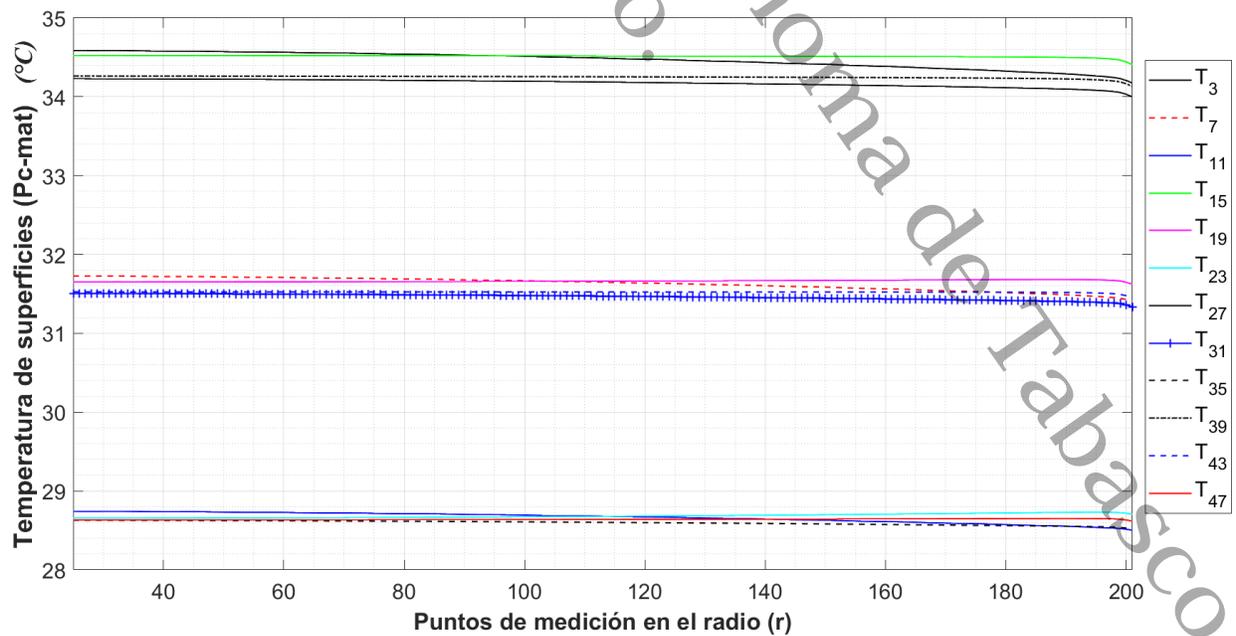
**Figura 3.9**

Temperatura de superficie  $T_{mat} - Pf$  con  $\lambda$  de  $1,4 \text{ W/mK}$  empleando el radio ( $Er_1$ ) en las placas.



**Figura 3.10**

Temperatura de superficie  $T_{ma} - Pc$  con  $\lambda$  de  $1,4 \text{ W/mK}$  empleando el radio ( $Er_1$ ) en las placas.

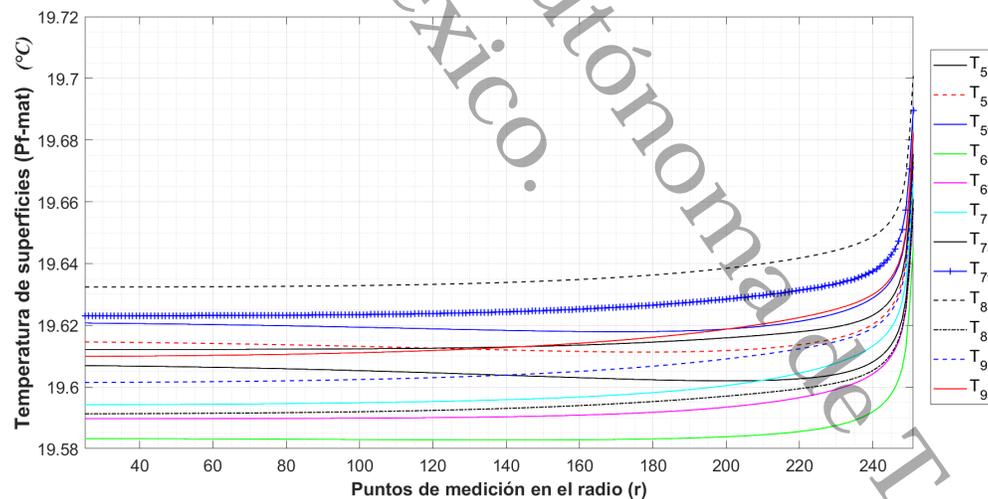


De igual forma, acorde a las Figuras 3.9 y 3.10 en la simulación 15 se obtuvo una  $\Delta T > 10\text{ }^\circ\text{C}$ , por lo se descartó la simulación 15. Al mismo tiempo, en la simulación 43, la temperatura promedio sobre la superficie de contacto entre la placa caliente y el material fue de  $31,523\text{ }^\circ\text{C}$  y  $28,642\text{ }^\circ\text{C}$  en la simulación 47. Por lo que, podemos descartar el arreglo empleado en la simulación 47 debido a que con esto se obtuvo una  $\Delta T$  de  $9,011\text{ }^\circ\text{C}$  entre ambas superficies de contacto, lo que ocasionaría que el gradiente de temperatura en la muestra no es el suficiente para realizar la determinación de la conductividad térmica ( $\lambda$ ). Por lo tanto, se considera la simulación 43 empleando el radio  $ER_1$  en las placas del APCG.

Aunado a esto, para el comportamiento de la distribución de temperatura con conductividad térmica de  $1,4\text{ W/mK}$  empleando el  $ER_2$ , se encontró que, aunque la simulación 91 y 95 presentan desviaciones estándar ( $\sigma$ ) menores con respecto a la  $T_{mat} - Pf$ , el comportamiento de la temperatura entre la placa fría y el material en ambas simulaciones no es del todo lineal, como se observa en la Figura 3.11 y en la Tabla 3.4. Lo anterior, puesto que se aprecia el aumento en la pendiente a partir de los  $140\text{ mm}$ .

**Figura 3.11**

Temperatura de superficie  $T_{mat} - Pf$  con  $\lambda$  de  $1,4\text{ W/mK}$  empleando el radio ( $Er_2$ ) en las placas.



Así mismo, con respecto a la Figura 3.11, la simulación 63 tiene un comportamiento más constante hasta los  $220\text{ mm}$  de radio en la  $T_{mat} - Pf$ . Sin embargo, la  $T_{mat} - Pe$  para la simulación 67 presentó una  $\sigma$  menor que la simulación 63 con una diferencia de  $0,019\text{ }^\circ\text{C}$ . Por lo que, por consideración, se toma en cuenta la distribución de temperatura que presenta mejor homogeneidad entre las temperaturas de superficies de contacto de la placa caliente y el mensurado. Por lo que, en la Tabla 3.7 se muestra el arreglo del APCG empleando una conductividad térmica de  $1,4\text{ W/mK}$ .

**Tabla 3.7**

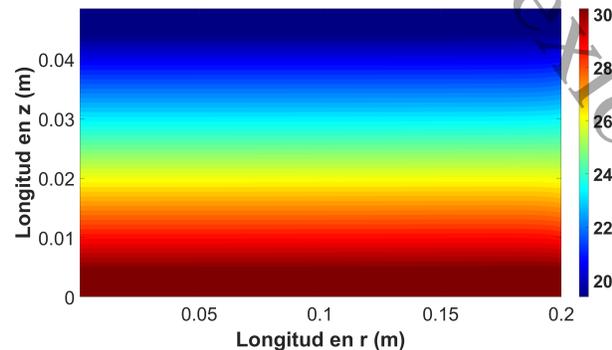
Arreglo de las simulaciones 43 y 67 para la  $\lambda$  de  $1,4 W/mK$ .

$\lambda$ $1,4W/mK$	Simulación 43 ( $ER_1$ )		Simulación 67 ( $ER_2$ )	
Radios de las placas $Z_M$ (mm)	150		200	
Espesor de la placa de aluminio (mm)	4		4	
Distancia entre resistencias (mm)	6		6	
Temperatura media placa caliente $Z_M$ ( $^{\circ}C$ )	31.52		30.67	
Temperatura media placa caliente $Z_G$ ( $^{\circ}C$ )	31.87		30.92	
Espesor del mensurado (mm)	40		50	
Temperatura de superficie ( $^{\circ}C$ )	$T_{mat} - Pc$	$T_{mat} - Pf$	$T_{mat} - Pc$	$T_{mat} - Pf$
Desviación estandar $\sigma$ ( $^{\circ}C$ )	0.007	0.008	0.005	0.007

Por lo tanto, para la conductividad térmica de  $1,4 W/mK$  empleando  $ER_1$  y  $ER_2$ , en las Figuras 3.12 y 3.13 podemos observar dos perfiles de temperatura obtenidos con base al análisis de la  $\sigma$  de la  $T_{mat} - Pc$  y  $T_{mat} - Pf$ .

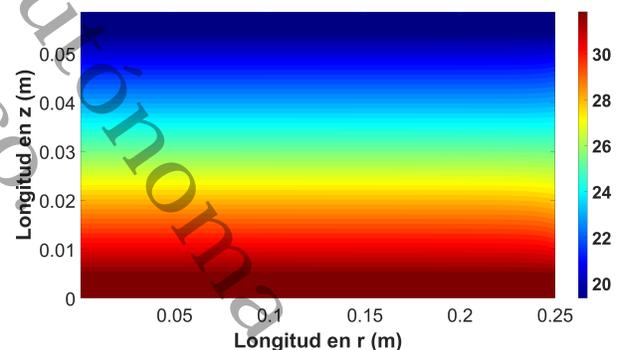
**Figura 3.12**

Perfil de temperatura de la simulación 43.



**Figura 3.13**

Perfil de temperatura de la simulación 67.



**3.1.3.5. Selección del arreglo del APCI para la conductividad térmica de  $2 W/mK$**

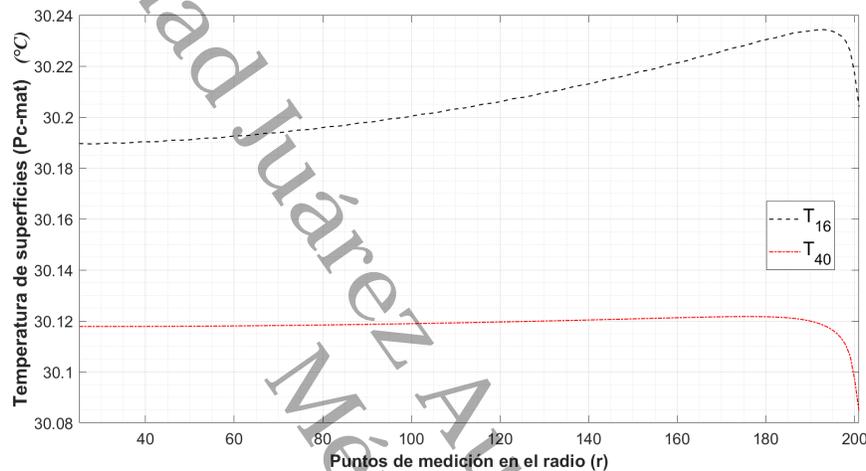
Para el análisis de las temperaturas de contacto empleando una conductividad térmica de  $2 W/mK$ , acorde a los resultados mostrados de la Tabla 3.4, se encontró que utilizando el radio  $ER_1$  en el APCI, las simulaciones 16, 40, 44 y 48 presentaron valores menores de  $\sigma$ . Sin embargo, para el caso de las simulaciones 44 y 48 presentaron una temperatura promedio ( $T_m$ ) de  $28,09^{\circ}C$  y  $25,98^{\circ}C$  en la  $T_{mat} - Pc$ . Por lo que, se tiene una  $\Delta T$  de  $8,51^{\circ}C$  y  $6,39^{\circ}C$  que está por debajo de la  $\Delta T$  mínima de  $10^{\circ}C$ . Sin embargo, para el caso de las simulaciones 16 y 40, presentaron una  $T_m > 30^{\circ}C$ , como se muestra en la Figura 3.14. Por lo que, podemos decir que, la simulación 40 tiene una distribución de

temperatura mejor que la simulación 16, debido a que, la  $\Delta T$  es 83,24 % veces menor que el valor obtenido con respecto a la 16.

Así mismo, en la Figura 3.14 podemos observar que la simulación 40 tiene un comportamiento más lineal en la  $T_{mat} - P_f$ . Por consiguiente, en la Figura 3.15, se muestra el comportamiento de la  $T_{mat} - P_f$  en ambos casos.

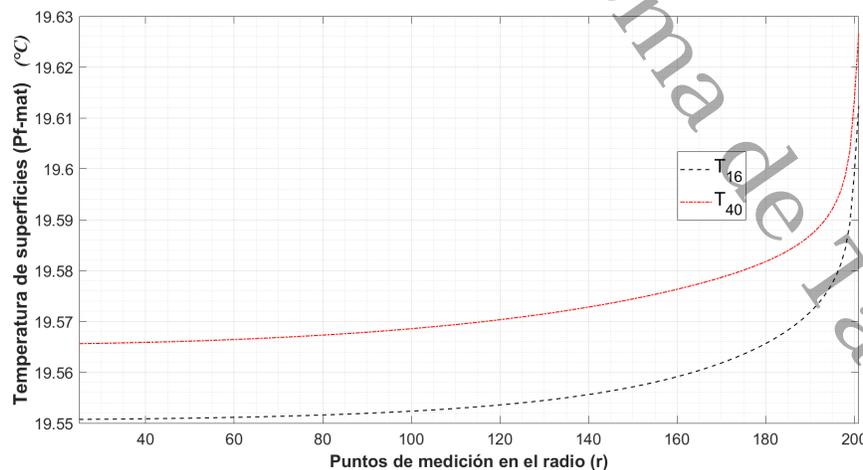
**Figura 3.14**

Temperatura de superficie  $P_c - mat$  con  $\lambda$  de  $2 W/mK$  empleando el radio ( $ER_1$ ) en las placas.



**Figura 3.15**

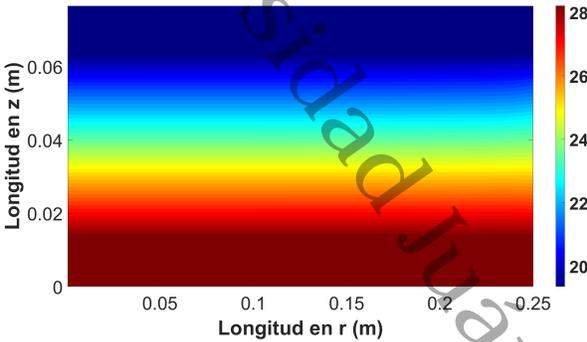
Temperatura de superficie  $P_f - mat$  con  $\lambda$  de  $2 W/mK$  empleando el radio ( $ER_1$ ) en las placas.



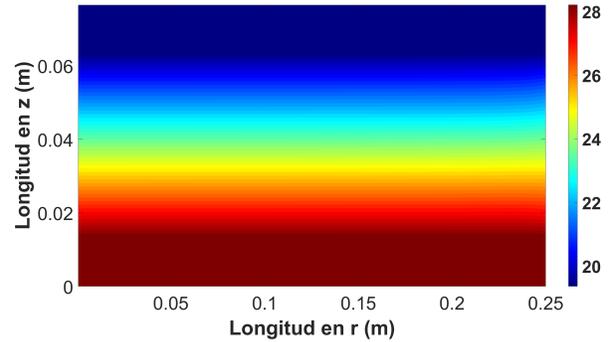
De igual forma, realizando la misma comparación empleando un  $ER_2$  en las placas del APCG, se encontró el mismo comportamiento en la simulación 88 de ambas temperaturas de superficie. En el cual, se obtuvo una distribución similar con respecto a las demás simulaciones con el mismo arreglo de la simulación 40.

Por lo que, en las Figuras 3.16 y 3.17, se observan los perfiles de la simulación 40 y 88, así también, en la Tabla 3.8 se muestra el arreglo del APCG para una conductividad térmica de  $2 \text{ W/mK}$ .

**Figura 3.16**  
Perfil de temperatura de la simulación 40.



**Figura 3.17**  
Perfil de temperatura de la simulación 88.



**Tabla 3.8**  
Arreglo de la simulación 40 y 88 para la  $\lambda$  de  $1,4 \text{ W/mK}$ .

$\lambda \text{ 2 W/mK}$	<b>Simulación 40 (<math>ER_1</math>)</b>		<b>Simulación 88 (<math>ER_2</math>)</b>	
Radios de las placas $Z_M$ (mm)	150		200	
Espesor de la placa de aluminio (mm)	13		13	
Distancia entre resistencias (mm)	6		6	
Temperatura media placa caliente $Z_M$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	29.766		29.672	
Temperatura media placa caliente $Z_G$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	29.869		29.778	
Espesor del mensurado (mm)	50		50	
Temperatura de superficie ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{mat} - P_c$	$T_{mat} - P_f$	$T_{mat} - P_c$	$T_{mat} - P_f$
Desviación estandar $\sigma$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	0.003	0.008	0.047	0.008

### 3.1.3.6. Análisis de temperatura en el interior del material

Para el análisis de la temperatura interna del material, de acuerdo con la Figura 3.1, se presenta el radio de la zona de medición ( $r_{ZM}$ ) y el radio de la zona de guarda ( $r_{ZG}$ ). La zona de guarda es el área donde se evita la transferencia de calor en dirección radial (axial) hacia los alrededores del APCG. Su principal objetivo es disminuir la pérdida de calor por el efecto de borde y hacer que el flujo de calor sea unidimensional en el eje  $z$  del APCG. Para determinar cuál es la distancia óptima de la zona de guarda en el APCG, se realizó un análisis del error estándar de estimación ( $SEE$ ) considerando la Ec. 3.4 como

menciona [Smith \(2012\)](#):

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{n - (k + 1)}} \quad (3.4)$$

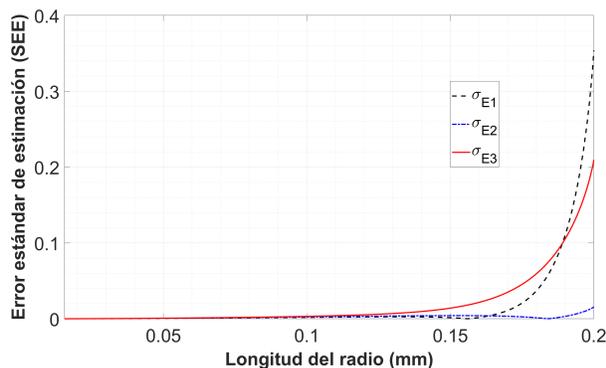
Donde  $Y$  es valor de la temperatura en dirección al eje  $z$  y  $\hat{Y}$  es la temperatura media ( $T_m$ ) en cada punto del radio del material. Se utilizan  $n$  observaciones para estimar  $k + 1$  parámetros, el cual los parámetros son: la conductividad térmica ( $\lambda$ ) del material y el espesor de las muestras del material bajo prueba, por lo que, tenemos  $n - (k + 1)$ , que son los grados de libertad del  $SEE$ .

Por tanto, empleando la Ec. 3.4 en la distribución de temperaturas del mensurado, se propusieron los casos de simulación, el cual se contempló los cuatro valores de  $\lambda$  propuestos en la Tabla 3.2, los dos espesores de radio de las placas del APCG  $ER_1$  y  $ER_2$  y los tres espesores de los mensurados ( $EM_1$ ,  $EM_2$  y  $EM_3$ ) para determinar la distancia adecuada del  $r_{ZG}$ .

En las 12 simulaciones resultantes, se consideró una distribución de resistencias de  $6 \text{ mm}$  de separación y un espesor de la placa de aluminio ( $EPA$ ) de  $13 \text{ mm}$  para materiales de conductividad térmica de  $0,02$ ,  $0,5$  y  $2 \text{ W/mK}$ . Para materiales con conductividad térmica de  $1,4 \text{ W/mK}$  solo se consideró el espesor de la placa de aluminio de  $4 \text{ mm}$ . Esto, debido a que tiene mejor distribución de temperaturas sobre las superficies de contacto con respecto a los resultados obtenidos en la segunda corrida. En la Figura 3.18 y 3.19, se muestra el  $SEE$  empleando un material con conductividad térmica de  $0,02 \text{ W/mK}$ .

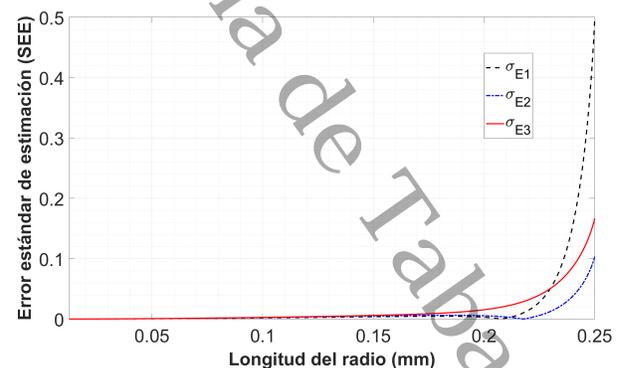
**Figura 3.18**

*Radio de las placas de 200 mm con  $\lambda$  de  $0,02 \text{ W/mK}$ .*



**Figura 3.19**

*Radio de las placas de 250 mm con  $\lambda$  de  $0,02 \text{ W/mK}$ .*



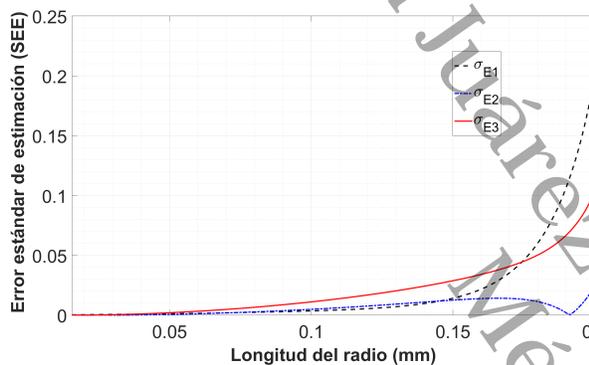
Por lo tanto, como se observa en las Figuras 3.18 y 3.19, se encontró que, para la conductividad térmica de  $0,02 \text{ W/mK}$ , con un espesor del mensurado de  $30 \text{ mm}$  ( $EM_3$ ) se obtiene menor  $SEE$ , como se observa en la Figura 3.18. En la Figura se evalúa que el comportamiento deja de ser lineal hasta los  $160 \text{ mm}$ , en contraste a la Figura 3.19

que tiene un comportamiento lineal hasta los  $200 \text{ mm}$ . De igual forma, aunque se aprecia que, utilizando espesores mayores en ambos casos, el efecto convectivo es menor, la temperatura es menos homogénea debido a que las temperaturas empiezan a variar a los  $120 \text{ mm}$  para el caso de los radios de  $200 \text{ mm}$  y  $250 \text{ mm}$ .

Por otra parte, para la conductividad térmica de  $1,4 \text{ W/mK}$ , se tiene un mejor comportamiento utilizando un radio de las placas de  $250 \text{ mm}$  respecto a las placas de materiales de la placa caliente (de  $200 \text{ mm}$ ) como se observa en las Figuras 3.20 y 3.21.

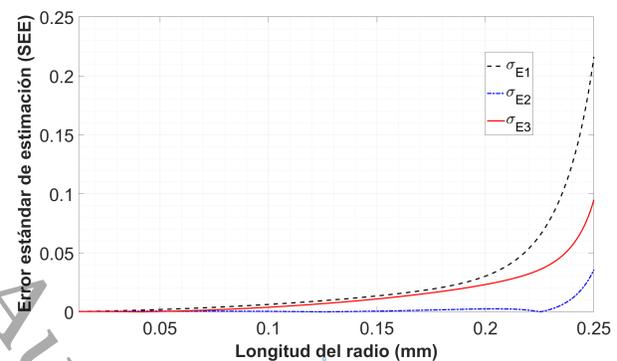
**Figura 3.20**

Radios de las placas de  $200 \text{ mm}$  con  $\lambda$  de  $1,4 \text{ W/mK}$ .



**Figura 3.21**

Radios de las placas de  $250 \text{ mm}$  con  $\lambda$  de  $1,4 \text{ W/mK}$ .



Aunado a lo anterior, en las Figuras 3.20 y 3.21 se puede observar que, en ambas simulaciones, el espesor de la muestra de  $40 \text{ mm}$  obtuvo un menor  $SEE$ . Por otra parte, se aprecia en la Figura 3.21, que aunque sigue el mismo comportamiento de la Figura 3.20, esta sigue una distribución más líneas hasta los  $220 \text{ mm}$ .

### 3.1.4. Análisis de incertidumbre

Como se mencionó anteriormente en el apartado 2.7 y de acuerdo con lo explicado por los autores Schmid and Martínez (2000), la incertidumbre se constituye de contribuciones de diferentes fuentes, algunas de ellas detalladas por las magnitudes de entrada respectiva.

Por lo que en este apartado, se explican los resultados obtenidos de la incertidumbre que aporta la ecuación de trabajo del APCG. Esto considerando la (Ec. 2.18) y las definiciones descritas en el apartado 3.1.4.1 donde se explica la incertidumbre que aportan las fuentes de suministros de energía que alimentan al APCG.

Las fuentes de suministro de energía para el APCG son: BK Precision® modelo 1761 y BK Precision® modelo 1673. Lo anterior tomando en consideración una diferencia de

temperatura de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , radios de  $200\text{ mm}$  en los mensurados y espesores de  $30$  y  $50\text{ mm}$ .

### 3.1.4.1. Incertidumbres en las fuentes de suministro de energía

Para la generación de calor en la placa caliente, se suministró una cantidad fija de voltaje ( $V$ ) y de corriente eléctrica ( $A$ ). Para ello, se utilizó un cable de resistencia de constantán mediante el efecto Joule. Por lo que, se realizó una comparación entre dos fuentes de suministro de energía, como se aprecia en las Figuras 3.22 y 3.23. En la Tabla 3.9, se muestran los valores de voltaje y corriente de cada fuente.

**Tabla 3.9**  
Fuentes de suministro de energía

Fuente de suministro de energía	Voltaje (V)	Desviación de Voltaje (A)	Intensidad de corriente (A)	Desviación intensidad de corriente (A)
BK Precision modelo 1761	0 - 35 V	<0.01 % + 3 mV	0 - 3A	<0.2 % + 3 mA
BK Precision modelo 1673	0 - 32 V	<0.55 % + 10 mV	0 - 6A	<0.4 % + 8 mV

**Figura 3.22**  
BK Precision® modelo 1761.



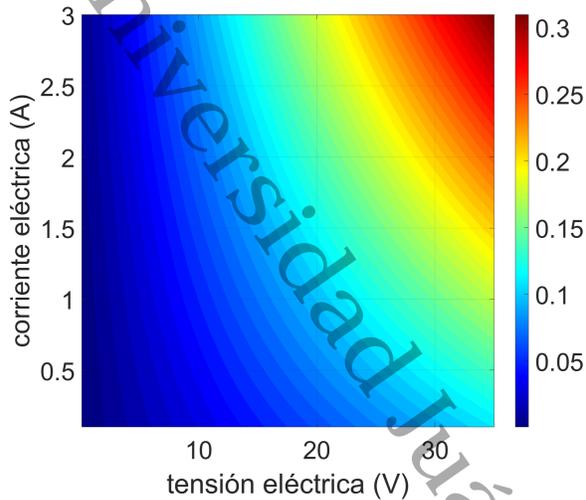
**Figura 3.23**  
BK Precision® modelo 1673.



En las Figuras 3.24 y 3.25 podemos observar las incertidumbres de la potencia eléctrica ( $W$ ) que aporta cada fuente (de acuerdo con los resultados de la ecuación 2.32 que aparece en el apartado 2.7.3.1). En la Figura 3.24 se muestra que, la fuente Bk 1761 aporta menos incertidumbre al valor de la potencia eléctrica respecto a la fuente Bk 1673 (Figura 3.25). Así mismo, podemos observar que ambas figuras, el parámetro que aporta más valor a la incertidumbre es la tensión eléctrica ( $V$ ). Por lo que, se realizaron simulaciones con el código computacional en MATLAB® empleando la ecuación de trabajo del APCG (Ec. 2.36), con lo cual se obtuvo parámetro del APCG que afecta más en la medición de la conductividad térmica.

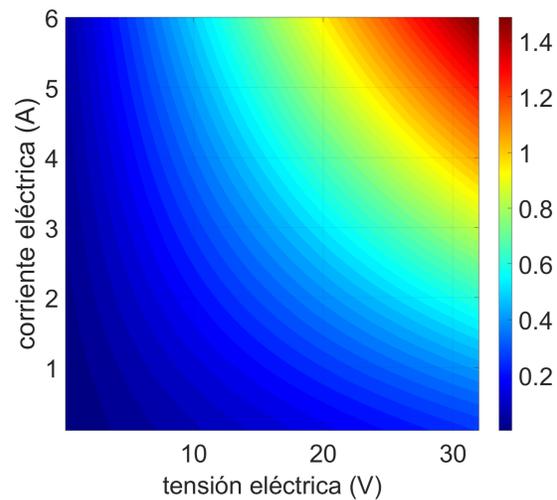
**Figura 3.24**

*Incertidumbre de la fuente Bk 1761.*



**Figura 3.25**

*Incertidumbre de la fuente Bk 1673.*



### 3.1.4.2. Incertidumbre en la conductividad térmica de materiales homogéneos de construcción

Para la obtención de los resultados de incertidumbre en la medición se tomaron en consideración los siguientes parámetros: tensión eléctrica ( $V$ ), Corriente eléctrica ( $A$ ), el espesor del mensurado ( $L_x$ ), el radio ( $r$ ), el área del mensurado ( $A_m$ ) y una diferencia de temperatura en el interior del material ( $\Delta T$ ). De igual forma, se consideraron los siguientes valores para la determinación de incertidumbre que aparecen en la Tabla 3.10.

**Tabla 3.10**

*Valores de Simulación para el cálculo de incertidumbre*

$\lambda$ ( $W/mK$ )	$L_x$ (m)	Radio de la muestra (m)	Diferencia de temperatura $\Delta T$ (K)
0,02	0,03	0.125	10
0.05	0.03	0.125	10
1.4	0.03 - 0.05	0.125	10
2	0.03 - 0.05	0.125	10

En la Tabla 3.10, se consideró que el área de medición sea de  $125 \text{ mm}$  de radio, acorde a los resultados obtenidos en el apartado 3.1.3.6, por lo que, se decidió por un radio menor para asegurar la uniformidad de la temperatura en el interior del mensurado. De igual forma, se encontró que la conductividad térmica entre  $0,02 \text{ W/mK}$  a  $0,5 \text{ W/mK}$  mostraron mejores perfiles de temperaturas con espesores del mensurado de  $30 \text{ mm}$ . Así mismo, se

empleó un espesor de 50 mm para una conductividad térmica de 1,4 W/mK a 2 W/mK, todas las simulaciones se realizaron con un radio de 400 mm y generación de calor en la placa caliente cada 6 mm. Por lo que, en la Tabla 3.11 se muestran los resultados de las incertidumbres.

**Tabla 3.11**  
Resultado de Incertidumbres del APCG

<b>Valores Obtenidos</b>	Conductividad térmica (0.02 W/mK)	Conductividad térmica (0.5 W/mK)	Conductividad térmica (1.4 W/mK)	Conductividad térmica (2 W/mK)
Potencia eléctrica Requerida (W)	0.625	16.3625	27.4889	36.2699
<b>BK Precision modelo 1761</b>				
Voltaje máximo (V)			35	
Corriente mínima (A)	0.018	0.467	0.785	1.122
Voltaje mínimo (V)	0.218	5.454	9.163	13.091
Corriente máxima (A)			3	
<b>Incertidumbre a Voltaje máximo (W/mK)</b>	0.003	0.005	0.012	0.016
<b>Incertidumbre a corriente máxima (W/mK)</b>	0.0003	0.004	0.011	0.015
<b>BK Precision modelo 1673</b>				
Voltaje máximo (V)			32	
Corriente mínima (A)	0.021	0.467	0.859	1.227
Voltaje mínimo (V)	0.109	2.727	4.581	6.545
Corriente máxima (A)			6	
<b>Incertidumbre a Voltaje máximo (W/mK)</b>	0.008	0.011	0.022	0.027
<b>Incertidumbre a corriente máxima (W/mK)</b>	0.002	0.006	0.015	0.021

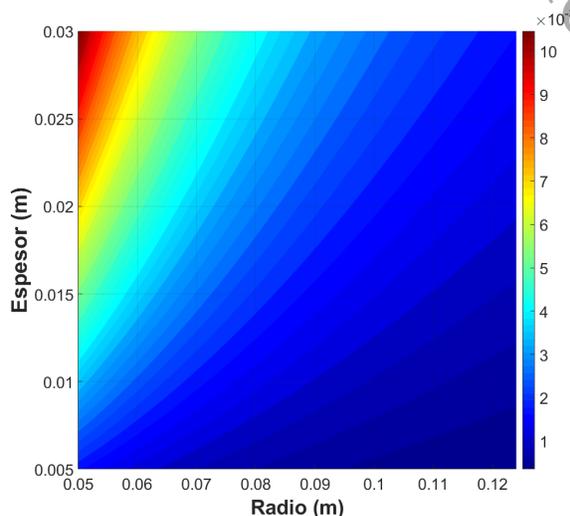
Como se mostró en la Tabla 3.11, se observa que empleando la fuente **Bk Precision modelo 1673** se obtiene mayor incertidumbre empleando los valores de  $\lambda$  propuestas. De igual modo, se aprecia que la incertidumbre fue menor con una corriente máxima a un voltaje mínimo. Considerando lo anterior, se modificó el programa principal para determinar qué variable con respecto a la Ec. 2.18, afecta más al valor de incertidumbre, con respecto a la  $\Delta T$ ,  $L_x$  y  $r$ .

### 3.1.4.3. Variables que afectan la incertidumbre en la medición de la conductividad térmica

En cuanto al suministro de energía (Potencia eléctrica) para el APCI, en los apartados anteriores, se llegó al resultado de que la fuente que aporta menos incertidumbre es el modelo **Bk precisión 1761** y que a mayor voltaje mayor será la incertidumbre que aporta la fuente de suministro de energía. Por lo que, se modificó el programa principal de incertidumbre para variar los valores del  $L_x$ ,  $r$  y la  $\Delta T$  en el interior del material; los resultados se muestran en la Figura 3.26 y 3.27.

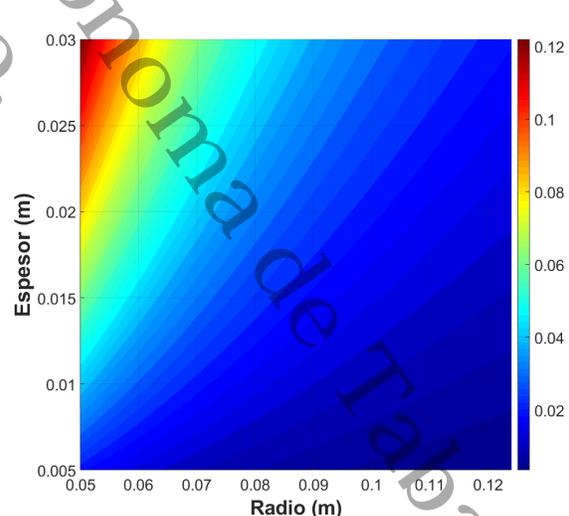
**Figura 3.26**

*Incetudumbre de la fuente BK modelo 1761 a corriente máxima con conductividad de 0,02 W/mK.*



**Figura 3.27**

*Incetudumbre de la fuente BK modelo 1761 a voltaje máximo con conductividad de 0,02 W/mK.*

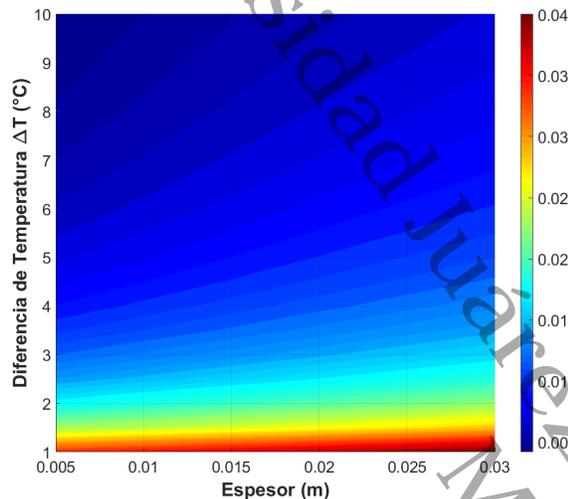


En la Figura 3.26 se puede apreciar que para la conductividad térmica de 0,02 W/mK la incertidumbre se ve más afectada por el espesor del mensurado que por el radio. De igual en la Figura 3.27, el espesor sigue siendo el que aporta más incertidumbre empleando el suministro de energía a voltaje máximo ( $V$ ). De la misma manera, como se muestra en las

Figuras 3.28 y 3.29 la incertidumbre aumenta cuando el espesor incrementa y disminuye al aumentar la  $\Delta T$  en el interior del material.

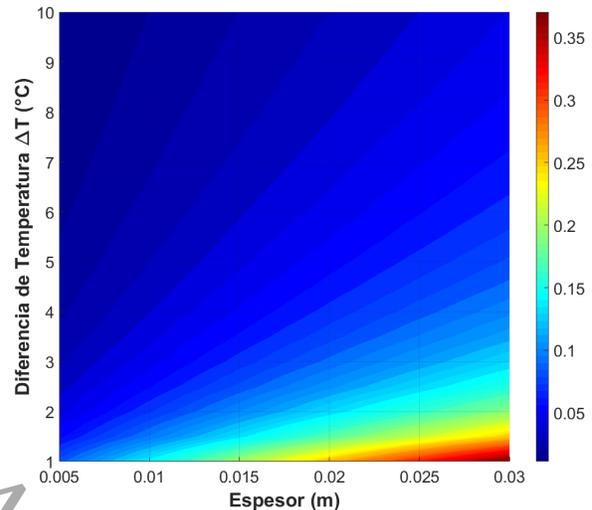
**Figura 3.28**

Incertidumbre de la fuente BK modelo 1761 a corriente máxima con conductividad de 0.5  $W/mK$ .



**Figura 3.29**

Incertidumbre de la fuente BK modelo 1761 a voltaje máximo con conductividad de 0.5  $W/mK$ .



### 3.1.5. Discusión de resultados del análisis geométrico del APCG

Para el diseño del APCG, se planteó un modelo físico de placa caliente con guarda con placas circulares, debido a que la pérdida de calor por bordes fue menor que utilizando placas rectangulares. En el análisis del dimensionamiento geométrico que se realizó, se llegó a la conclusión que a partir del  $SEE$ , el radio adecuado para las placas del APCG deben de ser de 400  $mm$ , debido a que se requiere menor potencia de suministro de energía y presenta menor efecto de borde.

La comparación de las desviaciones estándar en las temperaturas de superficies  $T_{mat-Pc}$  y  $T_{mat-Pf}$ , dio como resultado que los mejores perfiles de temperaturas se obtuvieron utilizando de mensurado de 30  $mm$  en materiales con conductividad térmica de 0,02 a 0,5  $W/mK$  y espesores de mensurado con conductividad térmica de 1,4 a 2  $W/mK$ . Simultáneamente, se encontró que para todos los mensurados con las conductividades térmicas propuestas, se obtiene una mejor distribución de temperaturas si se emplean una distribución de resistencias de generación de calor de 6  $mm$  de distancia en el interior de placa caliente. También, se concluye que se obtiene mejor distribución de temperatura de contacto entre la placa caliente y el mensurado, cuando se usa una placa de aluminio (6061) con 13  $mm$  de espesor para conductividades térmicas mayores a 1,4  $W/mK$ .

Mientras que, para conductividades térmicas menores a  $1,4 \text{ W/mK}$ , se pueden utilizar espesores de placas de aluminio de  $4 \text{ mm}$ . De igual manera, se comprobó que utilizando diferentes conductividades térmicas, el espesor del mensurado tiene que cambiar. Por lo que, se concluye que, para el diseño de un APCG se debe emplear distancias de resistencia menores o iguales a  $6 \text{ mm}$ . Así mismo, el uso de una placa de aluminio de  $4 \text{ mm}$  de espesor es adecuado para la medición de la conductividad térmica en materiales homogéneos de construcción  $\leq$  a  $0,5 \text{ W/mK}$ .

## 3.2. Manufactura CAD/CAM del APCG

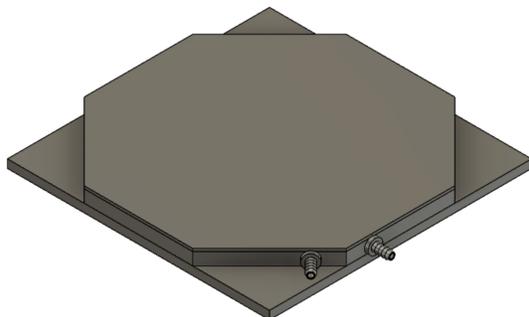
Con base a los resultados obtenidos en los análisis anteriores, se realizó diseño del APCG en el software CAD/CAM Autodesk Fusion 360®.

### 3.2.1. Diseño de la placa fría

Para el diseño de la placa fría, se consideró como factor principal, la distribución homogénea de temperatura en la base cuadrada de la placa fría (Figura 3.30), debido a que la base estará en contacto con la superficie del mensurado (Figura 3.31). Por lo que, se realizaron simulaciones en el programa Autodesk CFD® para simular el comportamiento de distribución de la temperatura. Para ello, se propuso que las tapas de la placa fría sean de aluminio con espesor de  $4 \text{ mm}$  con un serpentín en el interior lo cual actúa como un intercambiador de calor. Las paredes del intercambiador se diseñó con soleras de aluminio de  $3/4 * 3/16$  de pulgada de aleación 6063-T5, el cual tiene como ventaja, buena maquinabilidad. Por último, la base cuadrada de aluminio tiene un espesor de  $3/8$  de pulgada. Los planos de la placa fría se encuentran en el apartado de Anexos D.1.

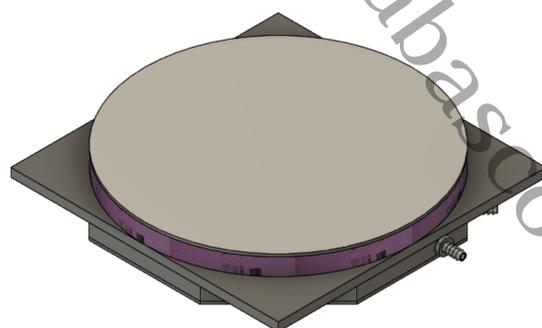
**Figura 3.30**

*Diseño de la placa fría.*



**Figura 3.31**

*Placa fría con el mensurado.*



### 3.2.1.1. Simulación CFD de la placa fría

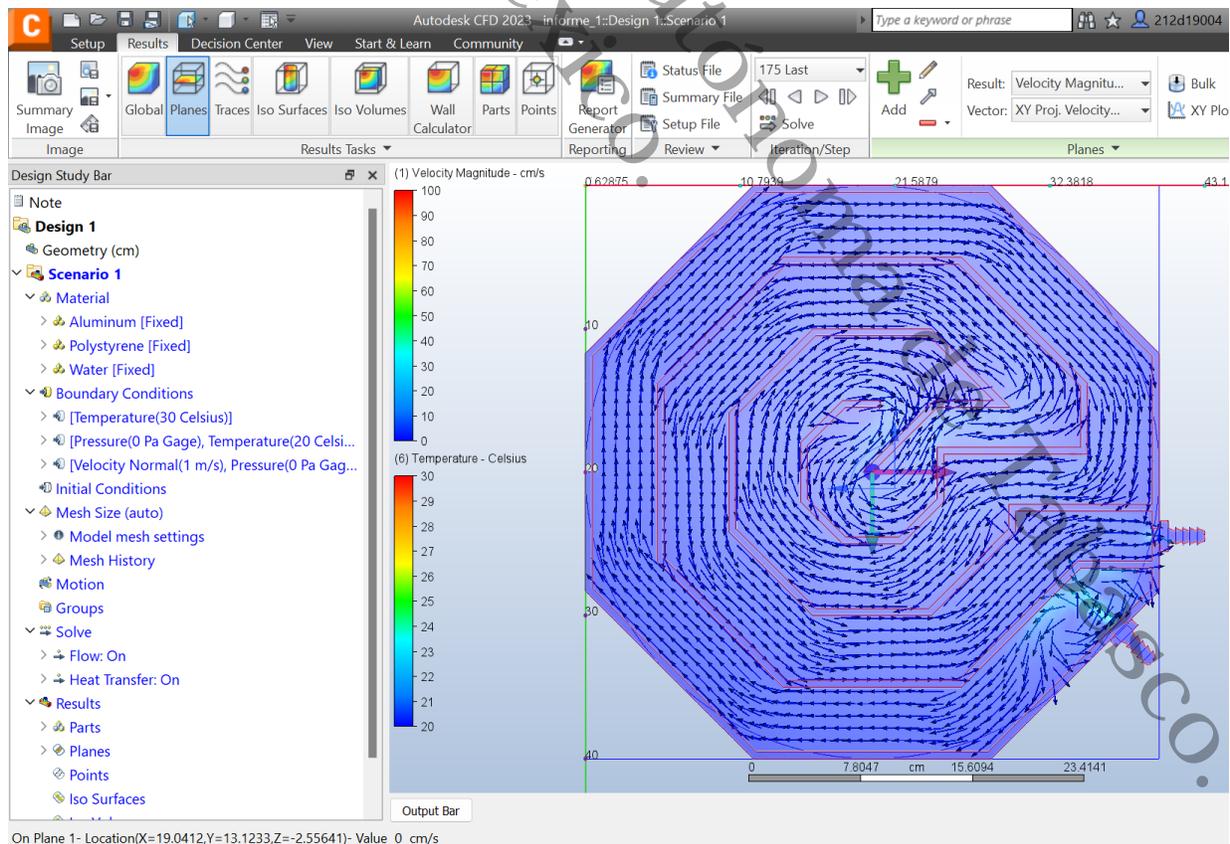
Para realizar las simulaciones en el programa CFD, primero se realizó el diseño CAD/CAM en el Software Autodesk Fusion 360® como se muestran en las Figuras 3.30 y 3.31. Después, se importó el diseño (Figura 3.31) al programa CFD. De acuerdo con los resultados de las simulaciones, en la Figura 3.32, se observó que el movimiento del refrigerante no afecta la transferencia de calor en el interior de la placa fría. Esto se debe a que la entrada del fluido refrigerante (agua a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) tiene un comportamiento de flujo turbulento en la entrada de la placa fría y al centro del intercambiador de calor. De acuerdo con los datos obtenidos, solo se afecta la temperatura en la placa fría si la temperatura del refrigerante en la entrada está variando.

Para las simulaciones se tomó en consideración las siguientes condiciones:

- Condición de primera clase sobre la placa caliente ( $T_{PC} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).
- Condición de tercera clase en la placa fría ( $T_{PF} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $h = 10\text{ W/m}^2$ , velocidad de entrada del agua de  $1\text{ m/s}$  y salida a  $1\text{ atm}$ ).

**Figura 3.32**

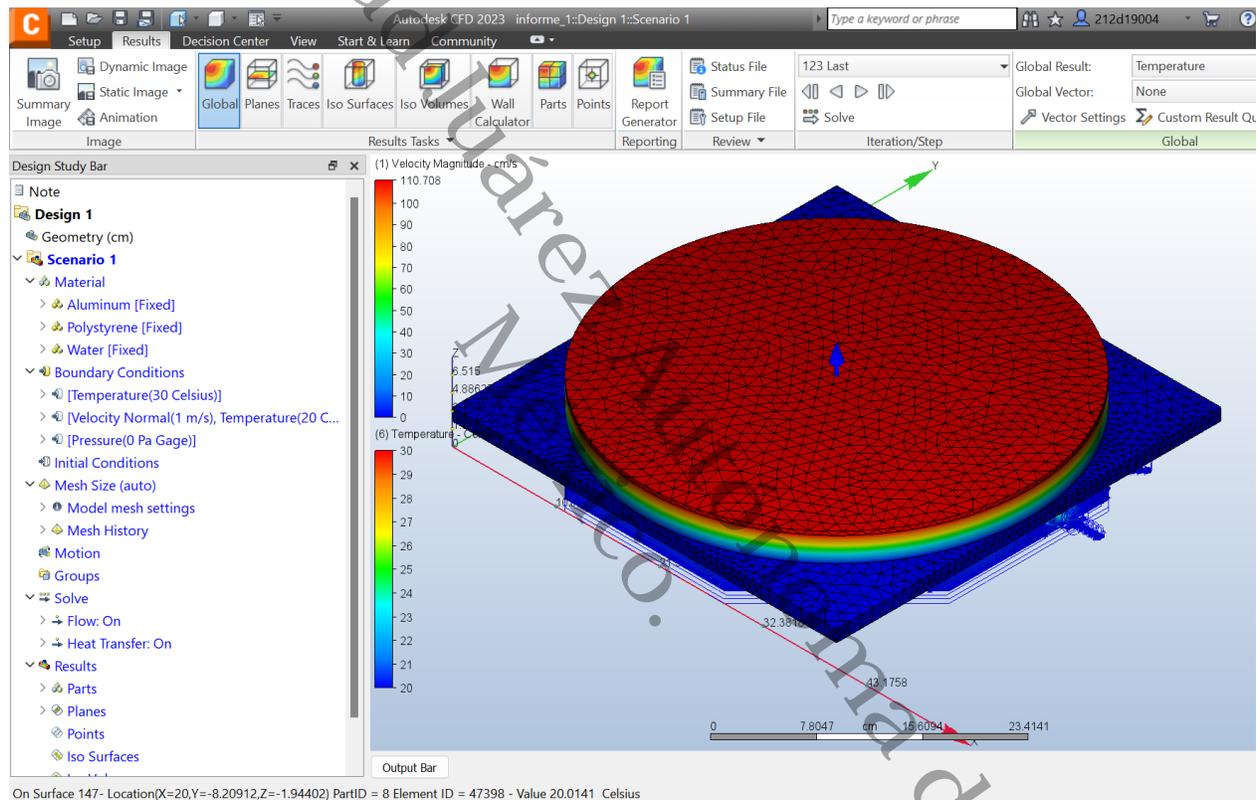
*Simulación de la dinámica de fluido en el interior de la placa fría.*



De igual modo, en la Figura 3.33 se puede observar que la temperatura en toda la zona de la base donde se coloca el medido se encuentra completamente homogéneo. Además, podemos observar el efecto de transferencia de calor entre la placa fría, el medido y la placa caliente.

**Figura 3.33**

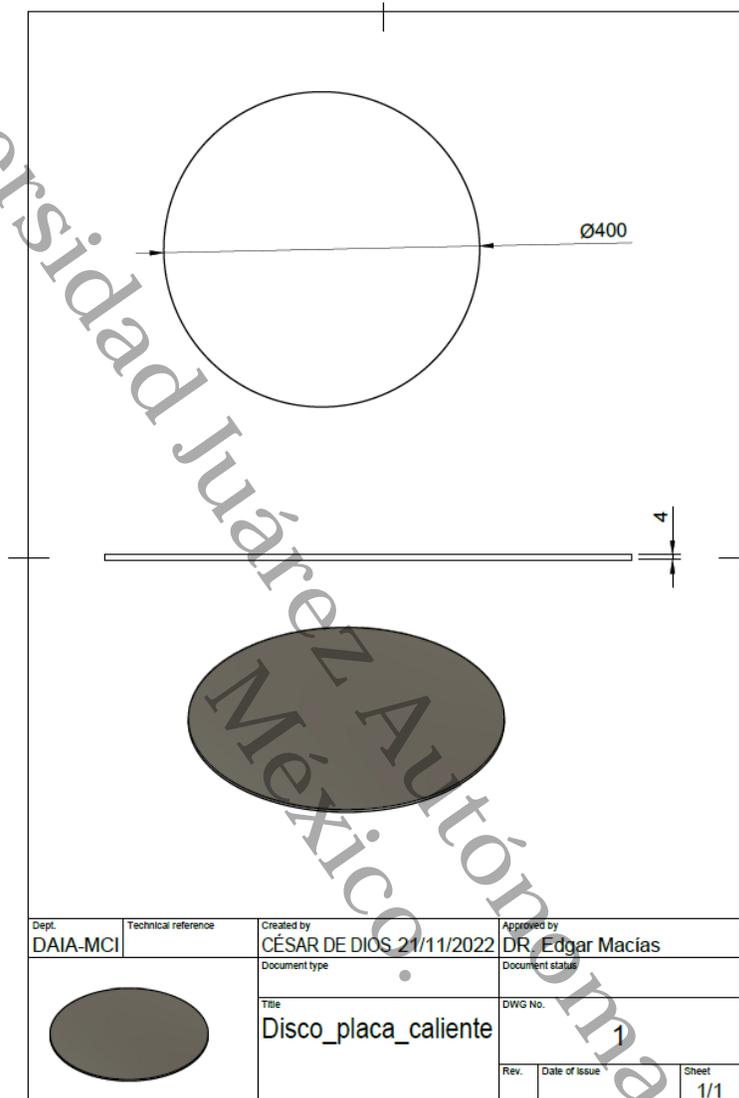
*Simulación de la placa fría con el medido y la placa caliente.*



### 3.2.2. Diseño de la placa caliente

En este trabajo se propuso emplear un disco de aluminio (6061) de 400 mm de diámetro y 4 mm de espesor como tapas de la placa caliente, Con base a los resultados obtenidos en el análisis del dimensionamiento geométrico. En la Figura 3.34 se muestra el plano del disco de la placa caliente.

**Figura 3.34**  
Plano de placa caliente del APCG.



Cabe mencionar que el anillo de guarda en la placa caliente se encuentra dentro de la misma placa de aluminio, el cual se explicó en el apartado 3.2.3.

### 3.2.3. Diseño de la distribución de resistencia

Acorde con los resultados del análisis geométrico del APCG, los arreglos con mejor perfil de temperatura fueron las conductividades térmicas de  $0,02 W/mK$  a  $2 W/mK$  en el APCG. Esto debido a que es el que tiene una distribución de cable de resistencia constantán <sup>1</sup>

<sup>1</sup>El constantán es una aleación, constituida por 55 % de cobre, 45 % de níquel ( $Cu_{55}Ni_{45}$ ) y se distingue por tener una resistencia eléctrica constante en un amplio rango de temperaturas

con separación de 6 mm. Por lo tanto, se optó por un diseño de espiral de Arquímedes (la espiral de Arquímedes se expresa matemáticamente por la Ec. 3.5) debido a que su longitud radial aumenta con un ángulo constante. Esto para colocar adecuadamente la resistencia eléctrica en el interior de la placa caliente. De manera que, se empleó espirales dobles con una entrada y salida cada una.

$$L = \frac{a\varphi_1}{4\pi} \sqrt{\varphi_1^2 + 1} + \frac{a}{4\pi} \ln \left( \varphi_1 + \sqrt{\varphi_1^2 + 1} \right) - \dots$$

$$\dots - \frac{a\varphi_0}{4\pi} \sqrt{\varphi_0^2 + 1} - \frac{a}{4\pi} \ln \left( \varphi_1 + \sqrt{\varphi_0^2 + 1} \right) \quad (3.5)$$

Por otro lado, para encontrar la longitud máxima que debe de tener la resistencia, se consideraron dos tipos de cable de resistencia, la primera resistencia es gruesa con 2,66 Ω/m y la segunda resistencia es delgada con 10,67 Ω/m. Por lo que, se empleó la Ec. 3.6 para determinar la resistencia de la fuente Bk modelo 1761.

$$R = V/I \quad (3.6)$$

Donde  $R$  es la resistencia eléctrica (ohmios Ω),  $V$  es la caída de tensión (V) y  $A$  es la corriente eléctrica en Amperes (A).

Aplicando la Ec. 3.6, se obtuvo una resistencia de 11,66 Ω para la fuente BK precisión 1761. Por tanto, podemos emplear 4,386 m de resistencia gruesa para la fuente BK precisión 1761 y 2,66 Ω/m de resistencia gruesa usando la fuente Bk precisión 1673. En el caso de la resistencia de constantán de 10,67 Ω/m, se obtiene una longitud de 1,09344 m, lo que es muy poco material para distribuir la resistencia en la placa caliente acorde a los 6 mm de separación.

Por consiguiente, se dividió el disco de aluminio para la placa caliente en tres zonas diferentes, así también se dividió las resistencias en tres espirales dobles de tres radios diferentes. El primer radio es la zona de medición, el segundo es de la zona de guarda y el tercero es la zona del anillo de efecto de borde, el radio de la zona de medición ( $r_{zm}$ ) es de 125 mm (apartado 3.1.4.2) y sabemos que el radio exterior ( $r_3$ ) es de 400 mm, con lo que se dedujo la Ec. 3.7 para obtener el radio de la zona de guarda ( $r_{zg}$ ).

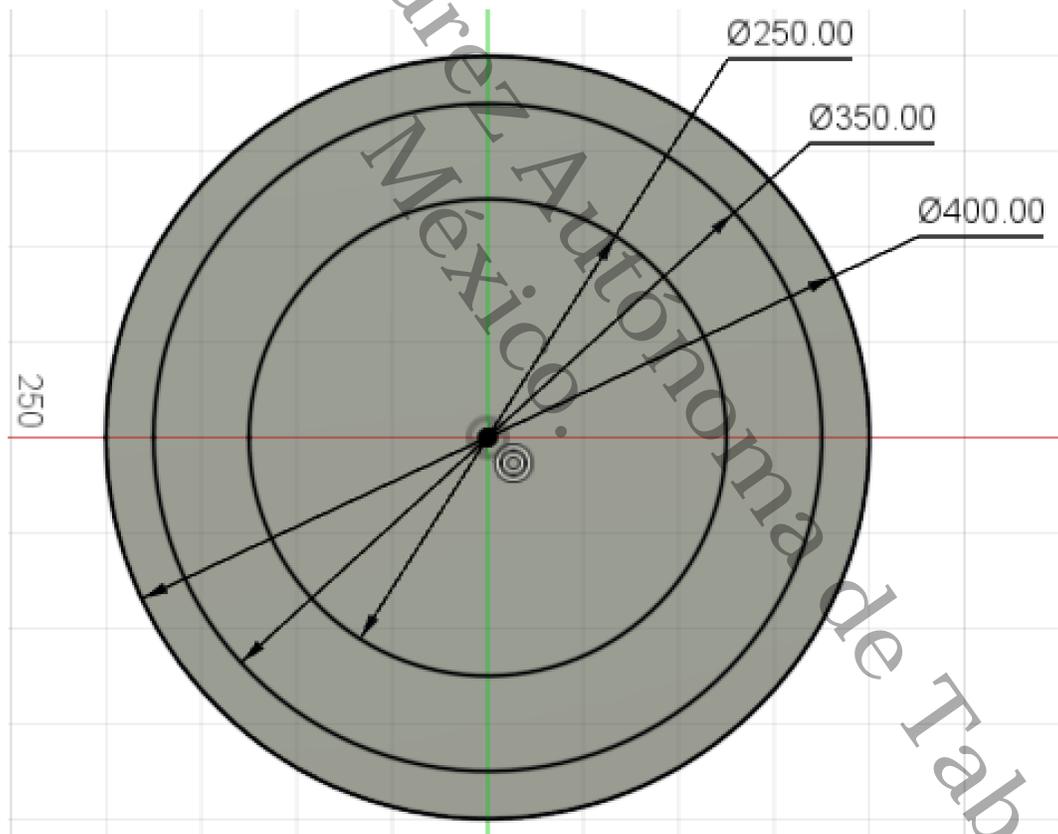
$$\pi r_3^2 - \pi r_{zg}^2 = \pi r_{zm}^2 \quad (3.7)$$

$$\pi r_{zg}^2 = \pi r_3^2 - \pi r_{zm}^2 \therefore r_{zg} = \sqrt{r_3^2 - r_{zm}^2} \quad (3.8)$$

Como resultado se obtuvo que, el radio de la zona de guarda  $r_{zg}$  es de 346.41 mm, por lo que, se redondeó a 350 mm como se muestra en la figura 3.35.

**Figura 3.35**

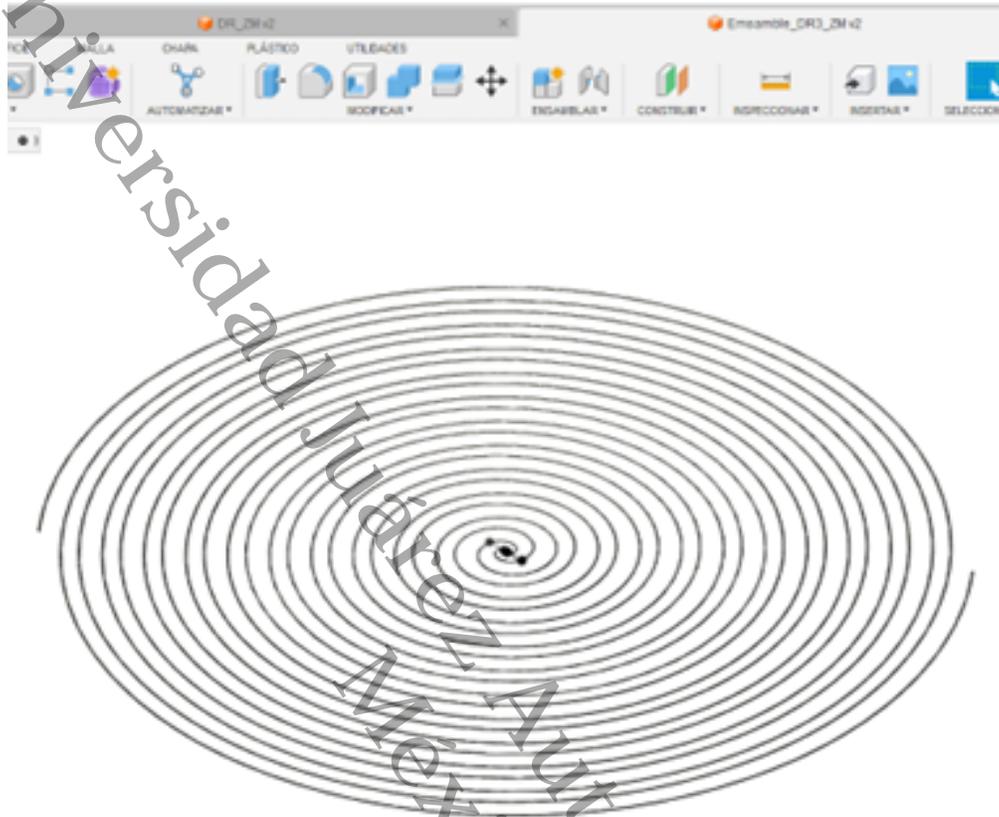
*Radios de zona de medición, guarda y anillo de efecto de borde.*



Con base en esto, se presenta en la Figura 3.36 el diseño de la distribución de resistencia en la zona de medición de la placa caliente. Cabe resaltar que, el área de efecto de borde tiene como objetivo disminuir la pérdida de calor de manera axial por la zona de guarda.

**Figura 3.36**

Distribución de resistencia en la zona de medición.



Por otra parte, se determinó las longitudes de resistencias de constantán para la zona de medición ( $Z_M$ ), la zona de guarda ( $Z_g$ ) y la zona de efecto de borde ( $Z_{eb}$ ). Lo anterior, considerando una separación de las resistencias de  $6 \text{ mm}$ . Por lo que, en la Tabla 3.12 se muestra la cantidad de metros de resistencia por cada zona de medición, la cantidad de giros de las espirales dobles, y la distancia entre vueltas de las espirales (distancia entre resistencias).

**Tabla 3.12**

Distribución de resistencia en la placa caliente

Diseño de resistencia	Longitud de la resistencia (m)	Número de giros de la espiral	Distancia entre espiral (mm)
Resistencia en zona de medición.	17.544	11.156	5.602
Resistencia en zona de guarda.		4.578	5.909
Resistencia en zona de efecto de borde.	3.647	3	4.333

Como se presenta en la Tabla 3.12, se obtuvieron distancias entre resistencias menores a  $6 \text{ mm}$  en las tres zonas, por lo que se asegura una temperatura homogénea en la placa

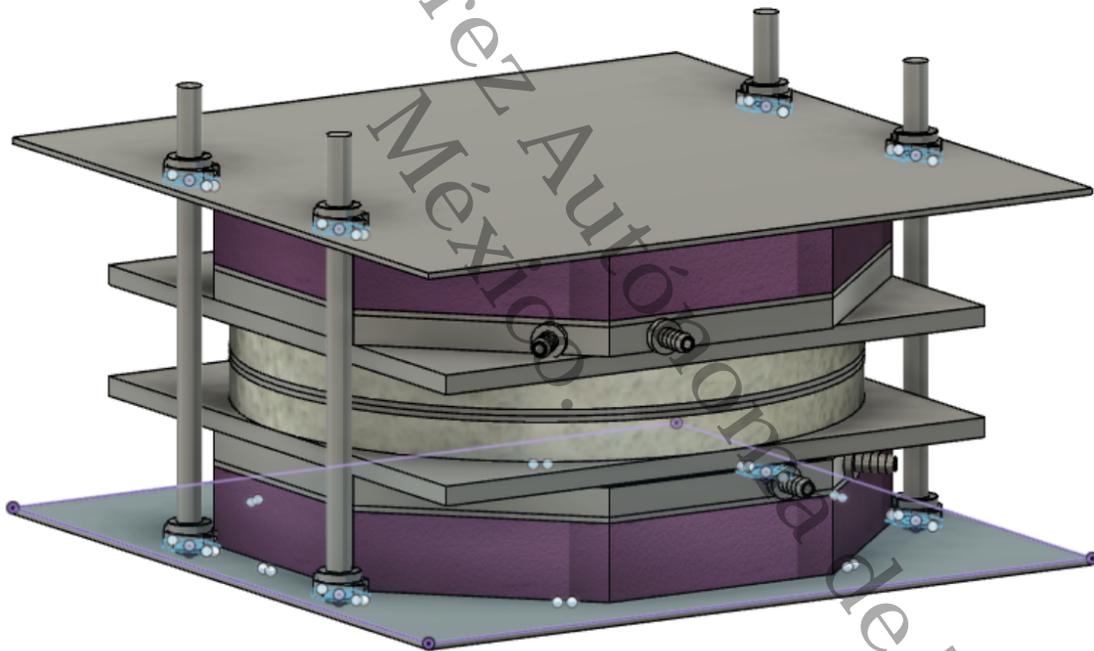
caliente. Por otra parte, los planos de las distribuciones de resistencias se encuentran en el apartado de Anexos D.3.

### 3.2.4. Diseño completo del APCG

Con respecto a los resultados anteriores, se concluyó el diseño completo del APCG. Para ello, se realizó todo el diseño del APCG con el software CAD/CAM Autodesk Fusion 360®. En la Figura 4.5, se puede apreciar el APCG con las placas frías, la placa caliente, los materiales de prueba y en la Figura 3.38 se puede observar el APCG con vista explosionada de todos los componentes.

**Figura 3.37**

*Aparato de placa caliente con guarda.*

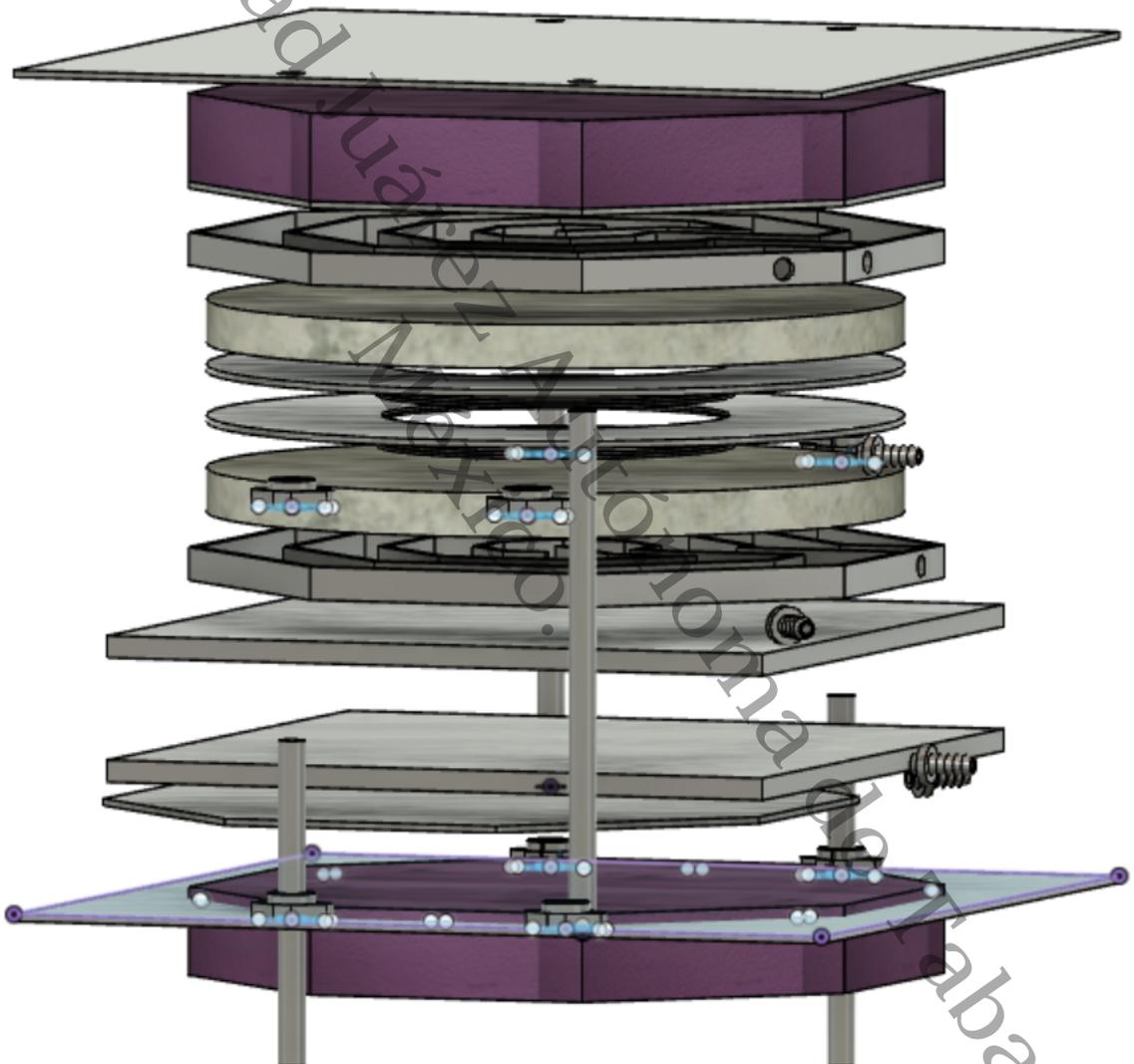


En la Figura 4.5, se muestran que, las placas aislantes cuentan con una forma octagonal, tiene como objetivo evitar el efecto convectivo y pérdida de calor en la placa fría inferior y superior sobre los alrededores. Las placas aislantes son de Foamular con un espesor de  $50,8 \text{ mm}$  ( $2 \text{ in}$ ). El Espesor de la placa caliente es de  $10 \text{ mm}$ , teniendo en cuenta que las resistencias se encuentran en el interior de la placa caliente, las placas de aluminio rectangulares inferior y superior tiene una dimensiones de  $492,80 \text{ mm} \times 492,80 \text{ mm}$  y  $4 \text{ mm}$  de espesor. En el apartado de Anexos D, se muestran los planos de los componentes del APCG.

Como se mencionó anteriormente, la Figura 3.38 es una vista explosionada del APCG. En esta figura se puede apreciar el intercambiador de calor en forma octagonal que se encuentra en el interior de la placa fría. En el objetivo principal de que el APCG cuente con placas cuadradas en extremo superior e inferior es asegurar que no dañe las demás placas con funcionalidad (Placas frías y placa caliente) y que el dispositivo experimental se pueda colocar de manera cómoda en superficies planas para su uso.

**Figura 3.38**

*Aparato de placa caliente con guarda vista explosionada.*



## Bibliografía

- Lira-Cortés, L., Rodríguez, G., and Méndez-Lango, O. J. (2008). Medición de la conductividad térmica de algunos materiales utilizados en edificaciones. Simposio de Metrología 2008.
- Martínez, V. F. (2003). Sistema primario de medición de conductividad térmica de aislantes térmicos. Diseño y Construcción. Instituto Politécnico Nacional.
- Schmid, W. A. and Martínez, R. J. L. (2000). Guía para estimar la incertidumbre de la medición. CENAM.
- Smith, G. (2012). Multiple regression. Essential Statistics, Regression, and Econometrics, pages 297–331.
- Xamán, J. P. (2016). Dinámica de Fluidos Computacional para Ingenieros. Palibrio, primera edición.
- Xamán, J. P., Cortes, L. L., and Chena, Y. C. (1999). Análisis de la transferencia de calor de un aparato para determinar la conductividad térmica de materiales aislantes. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET).

## Capítulo 4

# Construcción del APCG

En este capítulo, se describe el proceso de manufactura que se llevó a cabo para la construcción de los componentes del APCG. De la misma manera, se detalla como se llevó a cabo el proceso de diseño e instrumentación del APCG, seguido del ensamble completo del APCG. Por último, se detalla el funcionamiento del equipo de medición de conductividad térmica para materiales homogéneos de construcción y se presentan las variables principales de medición.

### 4.1. Manufactura del APCG

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante el análisis de las simulaciones del APCG, en el apartado 3.2, podemos observar las dimensiones para la construcción de las placas frías, la placa caliente; así como la distribución de resistencias necesarias para alcanzar una distribución homogénea de temperaturas. Para ello, en la manufactura de las placas frías, se emplearon herramientas de corte y soldaduras, así como, también herramientas capaces de mecanizar piezas geométricas de revolución (Torno).

### 4.1.1. Construcción de la placa fría

Con base a, los resultados obtenidos de los análisis para el dimensionamiento geométrico del APCG (apartado 3.2.1.1) mediante las simulaciones, en la *Figura D.2* del apartado de anexo D, se presentó el plano del diseño de las placas frías. En la construcción de las placas frías se utilizaron los siguientes materiales y equipos para llevar a cabo el proceso de soldadura:

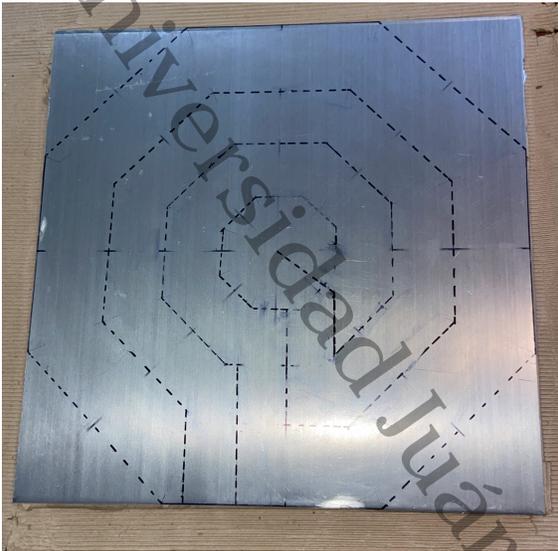
1. Placa de aluminio de  $3/8''$ , [Figura 4.1](#).
2. Lámina de aluminio de  $4\text{ mm}$ , [Figura 4.2](#).
3. Solera de aluminio de  $3/4'' \times 3/16''$  de aleación 6063 T5, lo cual tiene como ventaja: *buena maquinabilidad* y que no es un material tóxico.
4. Rollos de microalambre de aluminio (aleación ER4043 AISi<sub>5</sub>) LINCOLN de  $0,035''$  de espesor.
5. El equipo de soldadura Millermatic 212 Auto-Set [Miller \(2009\)](#).

De acuerdo con lo anterior, en la [Figura 4.1](#) se puede observar una placa cuadrada de aluminio de  $3/8$  de pulgada de espesor y  $40\text{ cm}$  de lado, esta placa funciona como base para colocar los especímenes de muestra. Esto debido a su planicidad, también, en la placa podemos observar que el diseño del serpentín para el sistema de enfriamiento al interior de la placa fría con el objetivo de colocar adecuadamente el serpentín (solera de aluminio) para el proceso de soldadura. De igual forma, en la [Figura 4.2](#) se muestra el corte de una lámina de aluminio con forma octagonal de espesor de  $4\text{ mm}$  y  $165,69\text{ mm}$  por lado, con el fin de funcionar como tapa de la placa fría. Por otra parte, en la [Figura 4.3](#)

se observa el proceso de soldadura para unir las soleras de aluminio de  $3/4'' \times 3/16''$  a la placa de aluminio de  $3/8''$  de espesor a una temperatura  $\geq 3500\text{ }^{\circ}\text{C}$  utilizando gas argón.

**Figura 4.1**

*Placa de aluminio de 3/8" de espesor.*



**Figura 4.2**

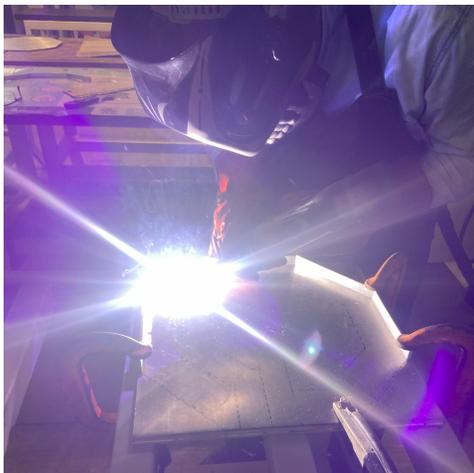
*Placa de aluminio de 4 mm de espesor.*



De la misma manera, en la Figura 4.4 podemos observar que la mitad del anillo octagonal exterior ya se encontraba fijo. Se tuvo precaución al momento de realizar la soldadura de las soleras de aluminio, que tiene la función de ser las paredes del intercambiador de calor en el interior de la placa fría, a través del cual circulará el fluido de trabajo. El proceso de soldadura de las soleras de aluminio se realizó lentamente y se dejó reposar la placa de aluminio de 3/8" de espesor en lapsos de tiempo de 5 a 10 minutos. Esto con el fin de no generar calentamientos localizados y minimizar la deformación en la placa de aluminio.

**Figura 4.3**

*Proceso de soldadura en la placa fría, equipo de soldadura Miller 252 MIG Welder.*



**Figura 4.4**

*Esquema del proceso de soldadura de la geometría para el fluido de trabajo (llamado refrigerante).*



### 4.1.1.1. Boquilla de la placa fría

Como observó en el apartado de diseño del APCG 3.2.4, las placas frías cuenta con boquillas que tiene como objetivo dar entrada y salida al fluido refrigerante, el diseño de la boquilla se encuentra en la sección de anexos D.4. Para ello, se seleccionó una varilla de aluminio de 1/2" de diámetro. El objetivo del diseño de las boquillas fue contar con accesorios que puedan soldarse a las placas frías y así evitar uniones con empaques u otros materiales que ocasionen fugas del refrigerante.

**Figura 4.5**

*Boquilla de la placa fría.*



### 4.1.2. Corte de la placa caliente

Para la construcción de la placa caliente, se utilizó una lámina de aluminio con dimensiones de 1,08 m x 3,2 m con un espesor de 4 mm. Para cortar las placas de aluminio se empleó el equipo inversor de corte por plasma de corriente continua CUT-100 (Figura 4.6). Este equipo de corte tiene un rango de temperatura de 2500 °C y 400 °C. De igual forma, en la Figura 4.7, se observa el proceso de corte de las placas caliente empleando el equipo de seguridad adecuado para trabajos a exposición a altas temperaturas.

**Figura 4.6**  
*Inversor de corte por plasma, CUT-100.*

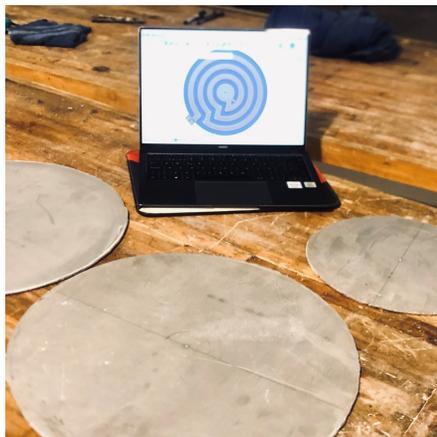


**Figura 4.7**  
*Inversor de corte por plasma, CUT-100.*



Después de haber cortado los discos de aluminio con un diámetro de  $420\text{ mm}$  para la placa caliente, como se muestra en la Figura 4.8, se procedió al post-procesado (Figura 4.9) para eliminar imperfecciones que faciliten el proceso de soldadura y ensamble, obteniendo un disco de  $400\text{ mm}$  de diámetro. El cálculo del diámetro del disco fue determinado de acuerdo al procedimiento mostrado en el apartado 3.1.3.

**Figura 4.8**  
*Discos de la placa caliente cortada.*



**Figura 4.9**  
*Disco de placa caliente en torno.*



## 4.2. Distribución de resistencias en la placa caliente

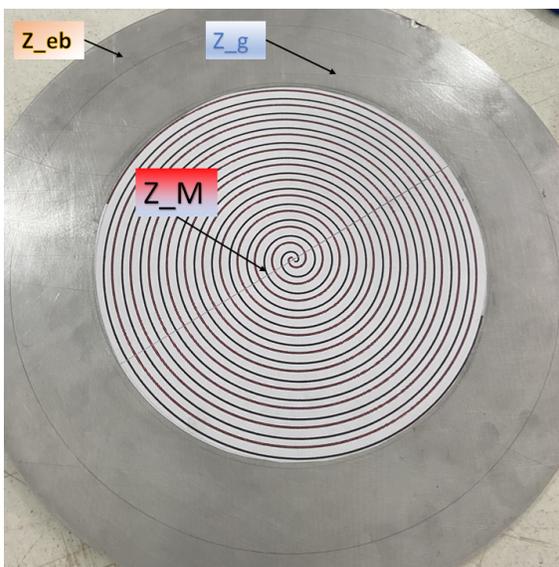
Acorde al análisis realizado en el apartado 3.2.3 se propuso utilizar la forma geométrica de espiral de Arquímedes para colocar adecuadamente la resistencia eléctrica constantán

en el interior de la placa caliente. De manera que, se utilizaron espirales dobles con una entrada y salida cada una. Para ello, considerando los planos diseñados para la distribución de resistencia que aparecen en el apartado de anexos D.3, se procedió a colocar la resistencia de constantán en la placa caliente de acuerdo con los siguientes pasos:

1. Los diseños de espirales dobles a escala real de la zona de medición ( $Z_M$ ), zona de guarda ( $Z_g$ ) y la zona de efecto de borde ( $Z_{EB}$ ) se adhirieron sobre la superficie de aluminio de la placa, Figura 4.10.
2. Luego se procedió a fijar las resistencias al diseño de las espirales con un pegamento industrial, Figura 4.11.
3. Después, se fijaron tiras de papel aluminio entre los espacios de las espirales para mejorar la transferencia de calor entre los espacios vacíos. Cabe mencionar que esto no afecta a la transferencia de calor en la placa caliente, debido a que el papel aluminio posee una conductividad térmica de  $205 \text{ W/mK}$ . Figura 4.12.
4. Por último, se colocó silicon como elemento de unión para mantener unidas ambas placas de aluminio y así completar la construcción de la placa caliente, Figura 4.13.

**Figura 4.10**

*Zonas de distribución de resistencia en la placa caliente.*



**Figura 4.11**

*Resistencia adherida al disco de aluminio de la placa caliente.*



**Figura 4.12**

*Acoplamiento de la resistencia eléctrica con recubrimiento de aluminio.*

**Figura 4.13**

*Resistencia eléctrica acoplada con silicón como elemento de unión y fijación.*



### 4.3. Instrumentación del APCG

Para poder conocer con fiabilidad el valor de aparente de la conductividad térmica de los materiales homogéneos de construcción es necesario contar con instrumentos, sensores y equipos de medición adecuados para monitorear en tiempo real el comportamiento de cada sección del sistema.

Para ello, el APCG fue instrumentado utilizando termopares Tipo T (Cobre - constantán) de  $0,13 \text{ mm}$  para la medición de la temperatura, los cuales tienen una incertidumbre de  $\pm 0,5 \text{ K}$ . Los termopares en el APCG se emplean para medir un diferencial de temperatura en el borde de la sección de medición y en el límite interior del anillo de la sección de la zona de guarda. Por ejemplo, para determinar las diferencias de temperatura entre la zona de medición y la sección de aislamiento en la placa caliente, se empleó una termopila diferencial fabricada con termopar tipo T colocada en diferentes puntos de medición. La termopila diferencial es un arreglo de termopares en serie.

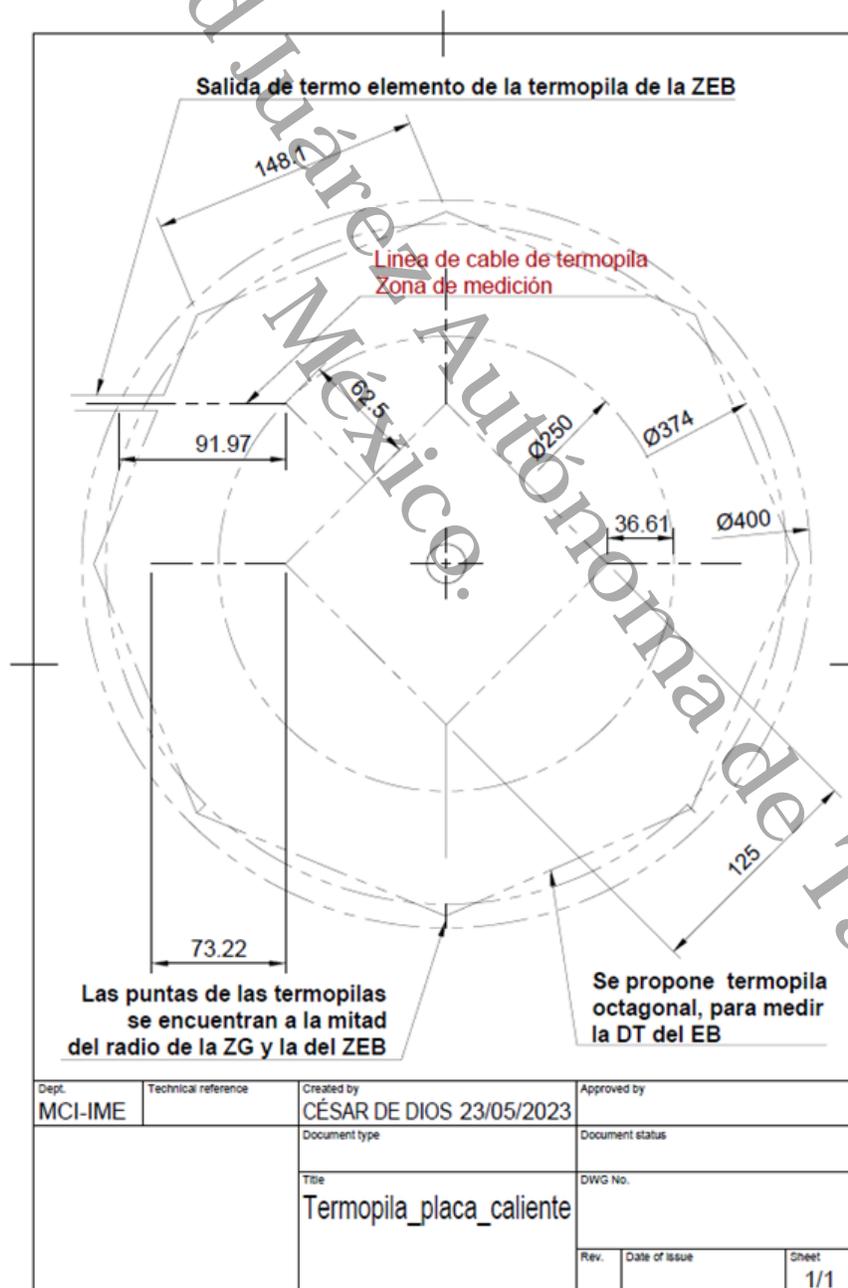
#### 4.3.1. Diseño de termopilas de la placa caliente

En el capítulo anterior se realizó el análisis del comportamiento de la temperatura en el APCG acorde a la distribución de los puntos de generación de calor en la placa caliente. El estudio está basado en la hipótesis que, las distribuciones de temperaturas

son homogéneas e independientes del ángulo. Sin embargo, en un APCG real con fuente de calor lineal, la simetría angular puede generar perturbación por la generación de calor debido al sistema de alimentación del calefactor. El investigador (Martínez (2003)) planteo un arreglo de medición de la temperatura en la placa caliente por medio de termopilas. De manera que, en este trabajo se fijó dos termopilas, la primera entre la zona de medición y zona de guarda, la segunda entre la zona de guarda y la zona de efecto de borde, lo cual, esto nos proporciona lecturas más precisas de la distribución de la temperatura en la placa caliente. Ver Figura 4.14.

**Figura 4.14**

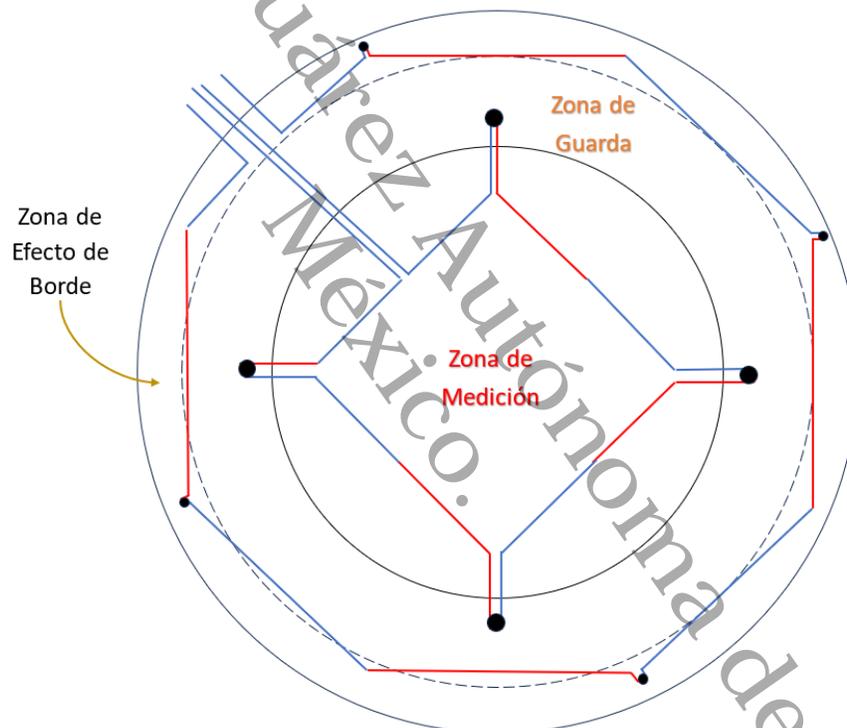
*Plano de distribución geométrica de la termopila en la placa caliente.*



De acuerdo con el plano mostrado anteriormente, se presentó la disposición de las termopilas en la placa caliente, cabe mencionar que, aunque son dos discos de aluminio que componen la placa caliente, esta distribución de termopila se presenta en la parte superior de la placa caliente. Por otra parte, en la Figura 4.15 se observa dos distribuciones termopilas independientes una de la otra. La termopila de forma cuadrada mide la diferencia de temperatura entre la zona de medición y la zona de guarda, y la termopila en forma de octagonal mide el diferencial de temperatura entre la zona de guarda y la zona de efecto de borde. Los puntos negros representan uniones de soldadura con estaño. El color azul (+) y rojo (-) representa la polaridad del termopar.

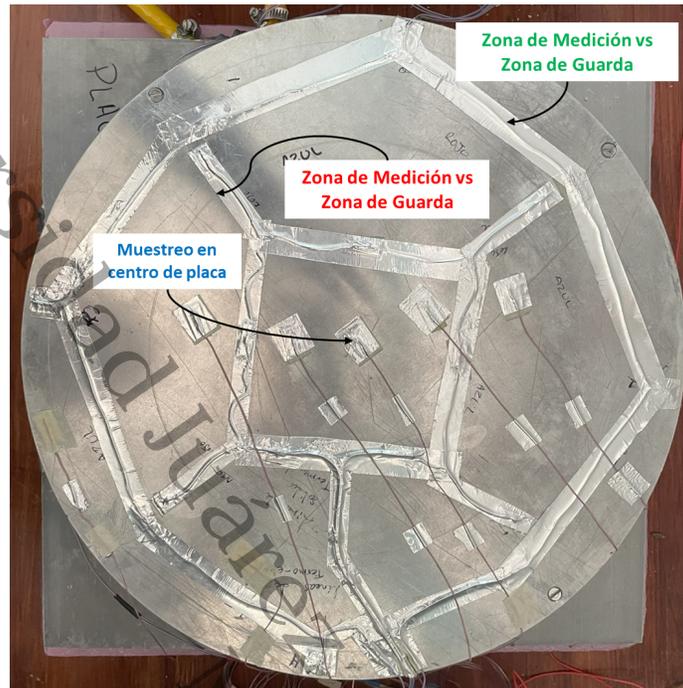
**Figura 4.15**

*Conexión de la distribución de termopilas.*



Por otra parte, en la Figura 4.16 se muestra ambas termopilas fijadas a la placa caliente acorde al plano que se observa en la Figura 4.14. En la figura se puede apreciar que las termopilas se encuentran en dos zonas de medición, esto con el objetivo de medir el diferencial de temperatura entre las tres zonas diferentes (Medición, Guarda y efecto de borde). Así mismo, los arreglos de termopila se revistieron con cinta de aluminio para evitar contacto con la placa de aluminio y tener lecturas erróneas de temperatura. Además, en la Figura 4.16, se observa un termopar que se encuentra en el centro de la placa caliente, esto, con el fin de monitorear la temperatura en el centro de la placa caliente en comparación a las termopilas.

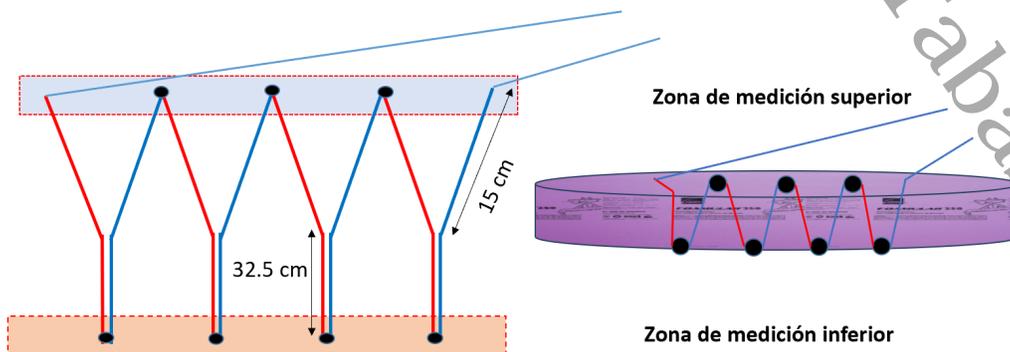
**Figura 4.16**  
Placa caliente con termopares y termopilas adheridas.



### 4.3.2. Diseño de termopila para los mensurados

Con base al arreglo anterior, para realizar una medida diferencial de temperatura sobre una superficie se requiere que el termopar esté sobre puntos distintos sobre la superficie. Por lo cual el arreglo de la termopila del mensurado se muestra en la Figura 4.17. Así mismo, en la Figura 4.18 y la Figura 4.19 se observa como la termopila está adherida al material bajo prueba. Cabe mencionar que este arreglo también se empleó en la placa caliente para conocer la temperatura en la parte inferior y superior de la placa caliente.

**Figura 4.17**  
Termopila del mensurado.



**Figura 4.18**

Termopila adherida la parte superior del mensurado.

**Figura 4.19**

Termopila adherida en la parte inferior del mensurado.

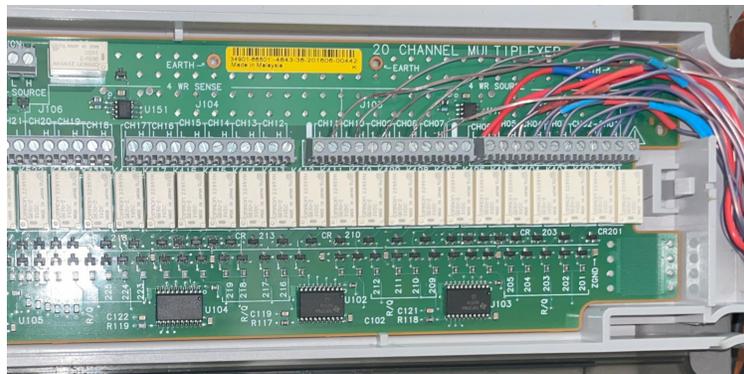


#### 4.4. Sistema de adquisición de datos

Como se mencionó en el segundo capítulo, la conductividad térmica de los materiales homogéneos de construcción está regida por la Ec. 2.18. Para esto, es necesario conocer el diferencial de temperatura entre el material de construcción, la placa caliente y la placa fría. Para ello, se realizó el diseño y manufactura de los arreglos de termopilas en la placa caliente y en el mensurado. Los diferenciales de temperaturas que se obtienen a partir de los termopares y las termopilas están relacionadas con fuerza electromotriz ( $f_{em}$ ). Las lecturas adquiridas por los termopares y termopilas pasan por una tarjeta multiplexora Keysight 34901A (Ver Figura 4.20).

**Figura 4.20**

Tarjeta multiplexora Keysight 34901A.



El objetivo de la tarjeta multiplexora (Figura 4.20) es recibir varias entradas de datos y transmitir las por una única salida sistema. Su función es dividir el medio de transmisión en múltiples canales, para que varias ramas puedan comunicarse al mismo tiempo. La tarjeta Keysight 34901A cuenta con 20 canales, de los cuales solo se emplearon 10 canales para el presente trabajo. Al mismo tiempo, la tarjeta multiplexora está conectada a un sistema de adquisición de datos Keysight 34972A (ver Figura 4.21) para transmitir y almacenar las mediciones en tiempo real que a su vez está conectada a un sistema de cómputo.

**Figura 4.21**  
Sistema de adquisición de datos Keysight 34972A.



#### 4.4.1. Procesamiento de datos

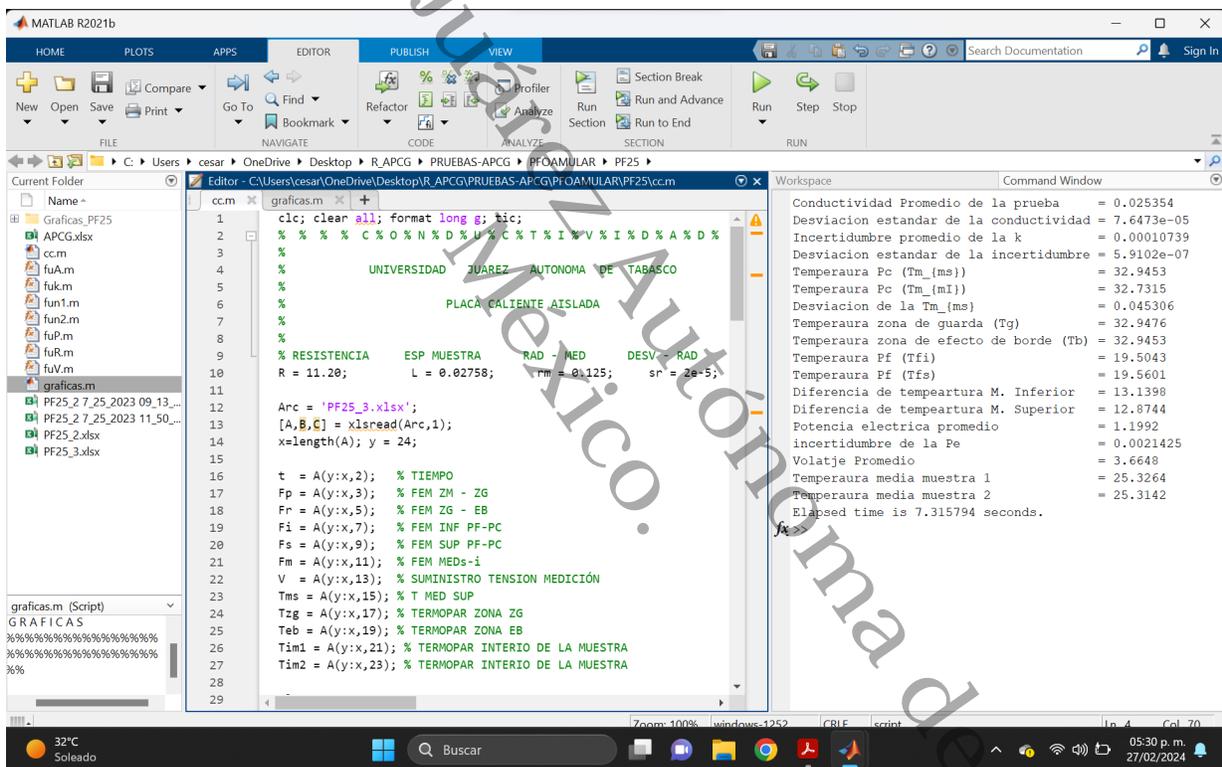
Los datos medidos con el dispositivo Keysight 34972A, pasan a través de un Software de almacenamiento de datos (Anexo E), el cual va mostrando en tiempo real el comportamiento de las mediciones de temperaturas de las termopilas y termopares. Por otra parte, como se mencionó anteriormente, las mediciones de los diferenciales de temperaturas obtenidos mediante las termopilas y los termopares están relacionadas con  $fem$ . Por lo que, de acuerdo a la norma ASTM E230-03 (ASTM-internacional (2003)) que especifica el estándar y tablas de temperatura-fuerza electromotriz para termopares. Se convirtió las mediciones  $fem$  en mediciones de temperaturas  $^{\circ}C$  mediante las ecuaciones 4.1 y 4.2.

$$\begin{aligned}
 FEM(T) = & 3,8748106364e - 2 * T + 3,3292227880e - 5 * T^2 + ... \\
 & + 2,0618243404e - 7 * T^3 + 2,1882256846e - 9 * T^4 + 1,0996880928e - 11 * T^5 - ... \\
 & - 3,0815758772e - 14 * T^6 + 4,5479135290e - 17 * T^7 - 2,7512901673e - 20 * T^8 \quad (4.1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T(FEM) = & 25,928 * FEM - 0,7602961 * FEM^2 + 0,04637791 * FEM^3 - ... \\
 & - 0,002165394 * FEM^4 + 0,00006048144 * FEM^5 - 0,0000007293422 * FEM^6 \quad (4.2)
 \end{aligned}$$

El proceso de tratamiento de datos y pos-tratamiento se llevó a cabo mediante un código computacional desarrollado en el Software MATLAB® como se muestra en la Figura 4.22. Este código computacional contiene subrutinas donde se importan los datos obtenidos y se calcula las temperaturas en las tres zonas de la placa caliente, la temperatura de las placas frías, la temperatura media de las muestras bajo prueba, la potencia eléctrica suministrada, la conductividad térmica, la incertidumbre de la conductividad térmica entre otros parámetros. De igual forma, en el código se emplearon las ecuaciones 4.1 y 4.2 acorde con conformidad de a la norma ASTM E230-30.

**Figura 4.22**  
Programa principal para determinar la Conductividad Térmica.

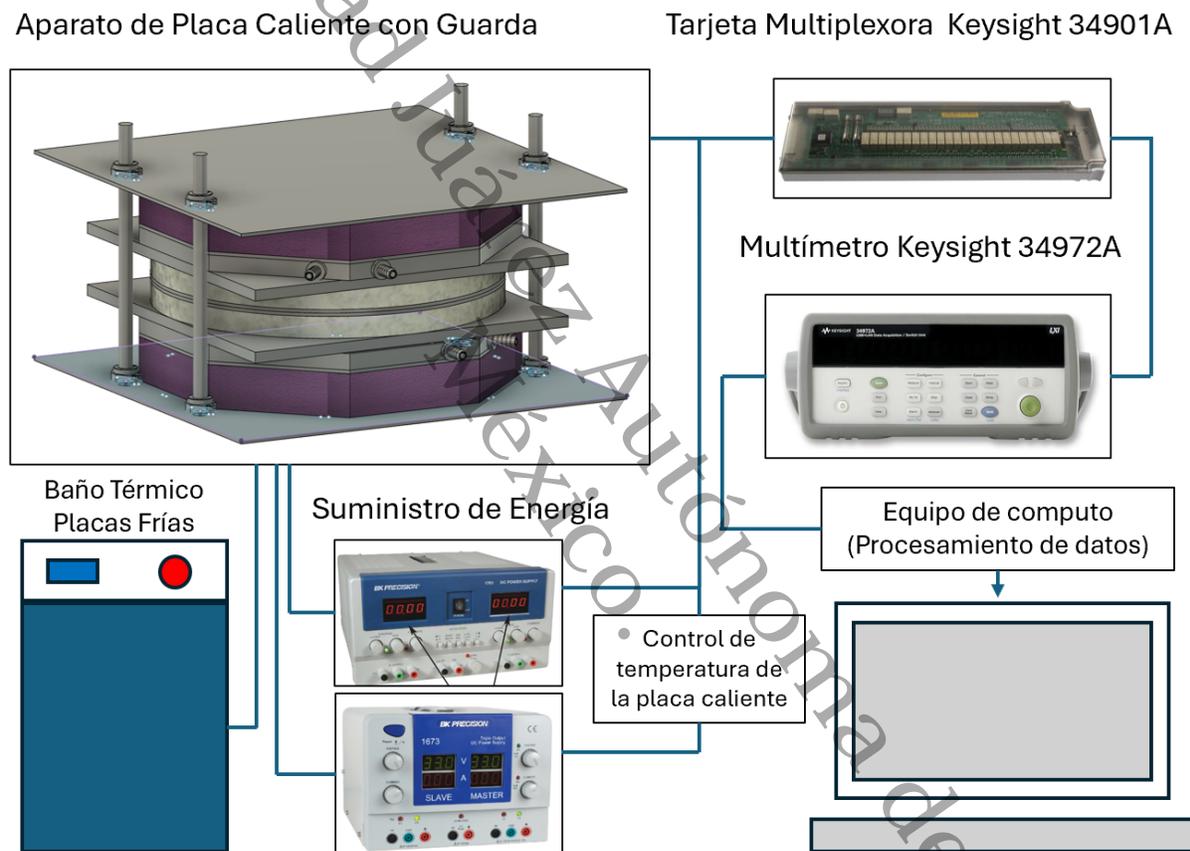


## 4.5. Ensamble del APCI

De acuerdo a los descritos en las secciones anterior de este capítulo, se realizó la instrumentación del disco de placa caliente, y la configuración de termopilas en los especímenes de muestra. Por lo que, en la Figura 4.24 se muestra el esquema general que compone el dispositivo de medición de APCI.

**Figura 4.23**

*Esquema general de la instrumentación del sistema de medición de conductividad térmica.*

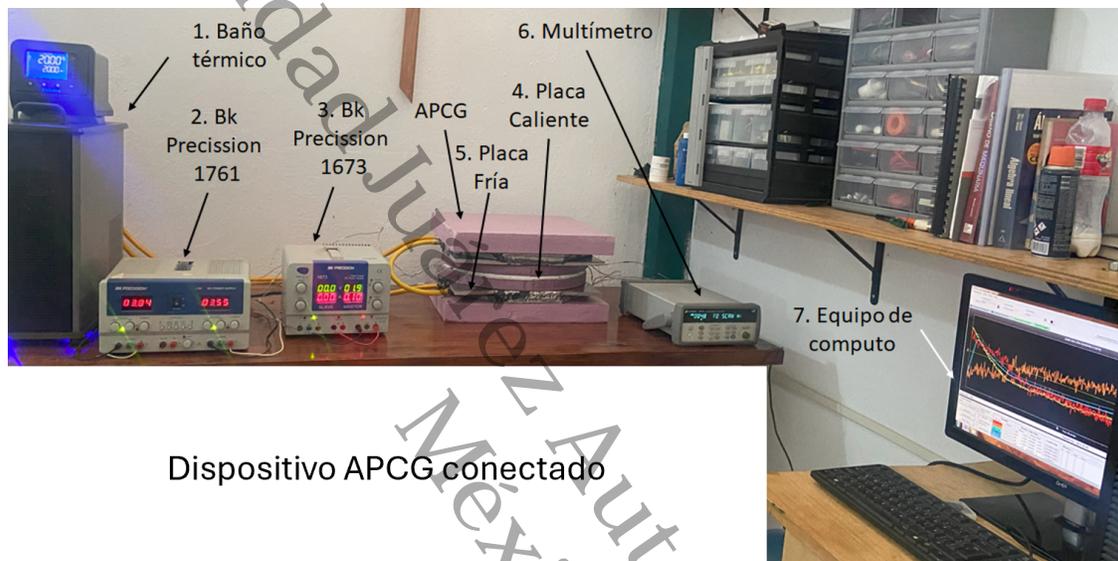


Como se puede observar en el esquema (Figura 4.24), el Control de temperatura y potencia en la placa caliente tiene dos controles independientes. Los controles mantienen la temperatura de la sección de medición, de guarda y efecto de borde a un valor determinado por el punto de ajuste. Por lo tanto, el criterio que se emplea para saber que la temperatura es estable depende del monitoreo de temperatura respecto al tiempo de varias mediciones y cuando se detecta una meseta que indica la estabilidad a largo plazo de la temperatura (la temperatura es independiente del tiempo) y solo se observan variaciones a corto plazo.

### 4.5.1. Funcionamiento del APCG

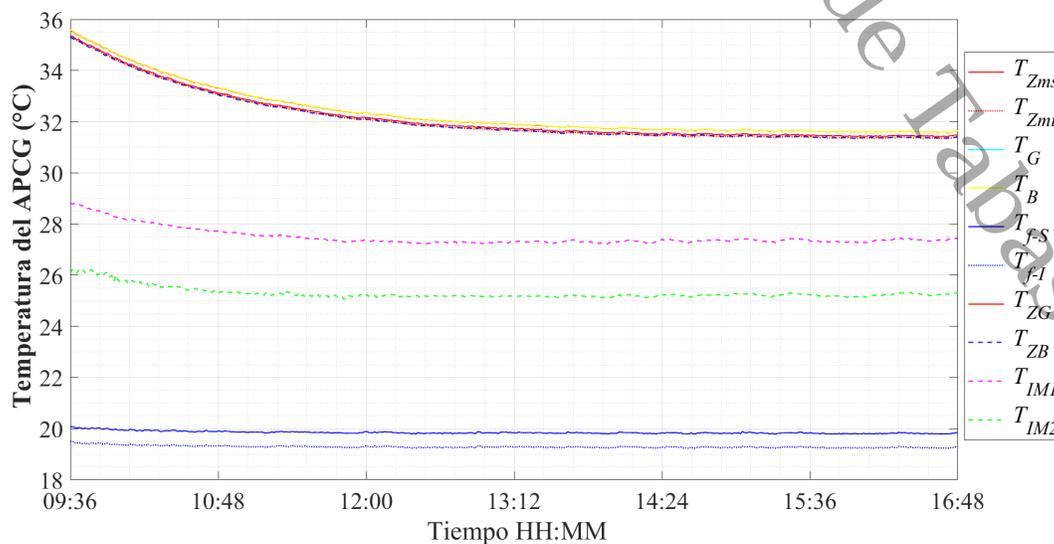
De acuerdo con en análisis del capítulo tres y la instrumentación implementada en este capítulo, se puede observar en funcionamiento del sistema que compone el aparato de placa caliente con guarda. Figura 4.24

**Figura 4.24**  
Dispositivo APCG en funcionamiento.



En la Figura 4.25 podemos observar el comportamiento de todas las variables de temperaturas registradas del APCG.

**Figura 4.25**  
Temperatura de la placa caliente a una temperatura promedio de 25 °C del unicel.



## Bibliografía

ASTM-international (2003). ASTM E230-30 Standard Specification and Temperature-  
Electromotive Force (EMF) Tables for Standardized Thermocouples.

Martínez, V. F. (2003). Sistema primario de medición de conductividad térmica de aislantes  
térmicos. Diseño y Construcción. Instituto Politécnico Nacional.

Miller (2009). Procesos descripción fuente de poder para soldadura de arco alimentador  
de alambre millermatic 212 auto-set r soldadura con alambre tubular soldadura mig.



# Capítulo 5

## Metodología

En este capítulo, se describe las muestras de ensayo que se seleccionaron para la prueba de medición de conductividad térmica. De igual manera, se explica las condiciones de operación de las pruebas. así mismo, se detalla la metodología del procedimiento experimental. Por último, se establece los criterios para determinar el estado permanente de la prueba.

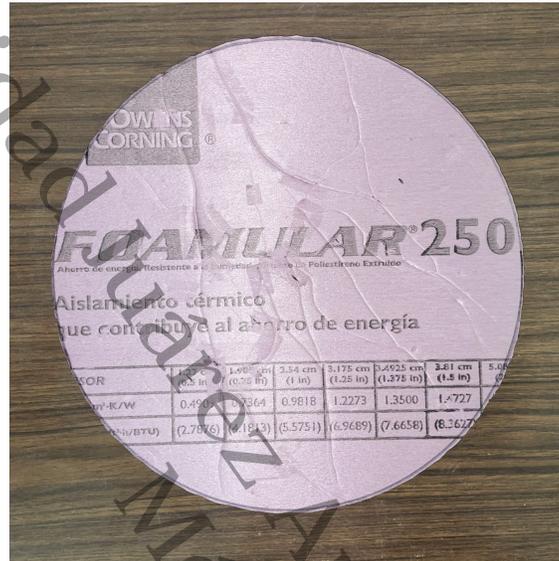
### 5.1. Muestras bajo prueba

Los materiales que se seleccionaron para las pruebas de conductividad térmica fue lana mineral, poliestireno expandido (EPS) y se empleó el poliestireno extruido (XPS) Foamular® como material de referencia. Cabe destacar que los materiales empleados en las pruebas son materiales que se usan principalmente en la industria de la construcción. Todos los materiales seleccionados son materiales aislantes, que ayudan a mitigar la carga térmica en una edificación, lo cual como se mencionó en el primer capítulo, si se considera una selección de materiales de construcción adecuada puede ayudar a mejorar el desempeño energético hasta un 20 % y disminuir el precio de operación hasta un 40 % en una edificación.

De conformidad con la norma NMX-C189-ONNCCE (2010), para la selección de las muestras se escogieron dos muestras del mismo lote y panel. De igual forma son libres de zonas de baja resistencia térmica, así mismo el tamaño del espécimen del área de ensayo es representativa de toda la muestra.

En la Figura 5.1, se presenta la muestra de referencia compuesta por poliestireno extruido (XPS), la muestra de ensayo es una placa circular con un diámetro de 400 mm y un espesor de 25,4 mm. La muestra posee una conductividad térmica reportada (Corning (2022)) de 0,0288 W/mK a 24 °C.

**Figura 5.1**  
Muestra de referencia Foamular®.

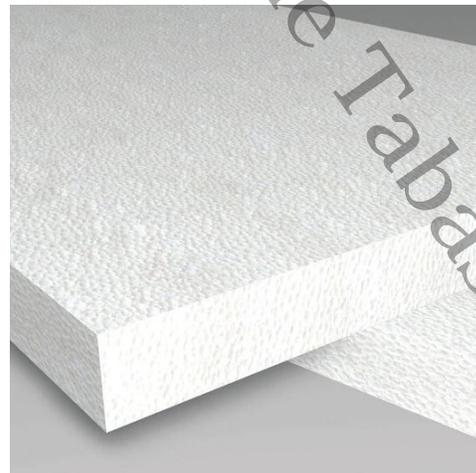


En las Figuras 5.2 y 5.3, se observa el poliestireno y la lana mineral como materiales de pruebas. Ambos materiales se cortaron de forma circular con un diámetro de 400 mm pero la lana mineral tiene un espesor de fábrica de 50,8 mm y el poliestireno expandido tiene un espesor de 25,4 mm.

**Figura 5.2**  
Comaudi Industrial, Panel de lana mineral, 5 de abril del 2024.



**Figura 5.3**  
Materiales y peso, Poliestireno expandido, 5 de abril del 2024.



## 5.2. Procedimiento experimental

### 5.2.1. Preparación de las muestras

Como cualquier otro diseño de experimento, al momento de llevar a cabo la prueba de medición se debe de tomar en cuenta diversos factores que no afecten a la misma prueba. Para esta prueba de medición de la conductividad térmica, de conformidad a la norma ASTM C518 ([ASTM-International \(2013\)](#)) y la norma NMX-C-189-ONNCEE-2010, es necesario:

- El entorno de las condiciones ambientales de la muestra debe estar en el rango de los 10 °C a 40 °C. De igual forma, el límite máximo de un 50 % de humedad relativa (*HR*) en el interior del material. El espesor máximo de la muestra debe de ser de 500 mm (Acorde al análisis de las simulaciones del comportamiento de la temperatura del APCG). Para materiales rígidos, las superficies de las muestras no deben exceder el 0,025 % de planicidad y deben estar totalmente paralela al área de medición.

### 5.2.2. Pruebas y condiciones

En tabla 5.1 podemos observar nueve pruebas propuestas para determinar la conductividad térmica. Las pruebas PF están asociadas a mediciones de Foamular®, las prueba PU están asociadas al poliestireno expandido (Unicel) y las pruebas PL a la medición de la lana mineral. Los números 25, 45 y 65 indican a cuál temperatura media se realizó la prueba.

**Tabla 5.1**

*Tabla de pruebas y condiciones para determinar la conductividad térmica*

Prueba	Material	Temperatura media de la prueba (°C)
PF25	Poliestireno Extruido (XPS)	25
PF45		45
PF65		65
PU25	Poliestireno Expandido (EPS)	25
PU45		45
PU65		65
PL25	Lana Mineral	25
PL45		45
PL65		65

### 5.3. Pasos del procedimiento experimental

Para empezar a realizar la medición de la conductividad térmica de manera adecuada, se debe tomar en cuenta lo mencionado en la sección de preparación de las muestras. De igual manera, se debe asegurar que las termopilas de la placa caliente y el mensurado estén adecuadamente colocadas, como se mencionó en las secciones 4.3.1 y 4.3.2. Seguido de esto, se debe colocar ambas muestras de poliestireno expandido debidamente conectadas a las termopilas y termopares correspondientes (Figura 5.4).

**Figura 5.4**

*Muestras de poliestireno expandido sobre la placa fría y placa caliente*



Al final se debe conectar todos los instrumentos, por ejemplo: el baño térmico, los equipos de suministro de energía y el sistema de adquisición de datos y empezar a tomar puntos de muestreos como se muestra en la Figura 5.5.

**Figura 5.5**

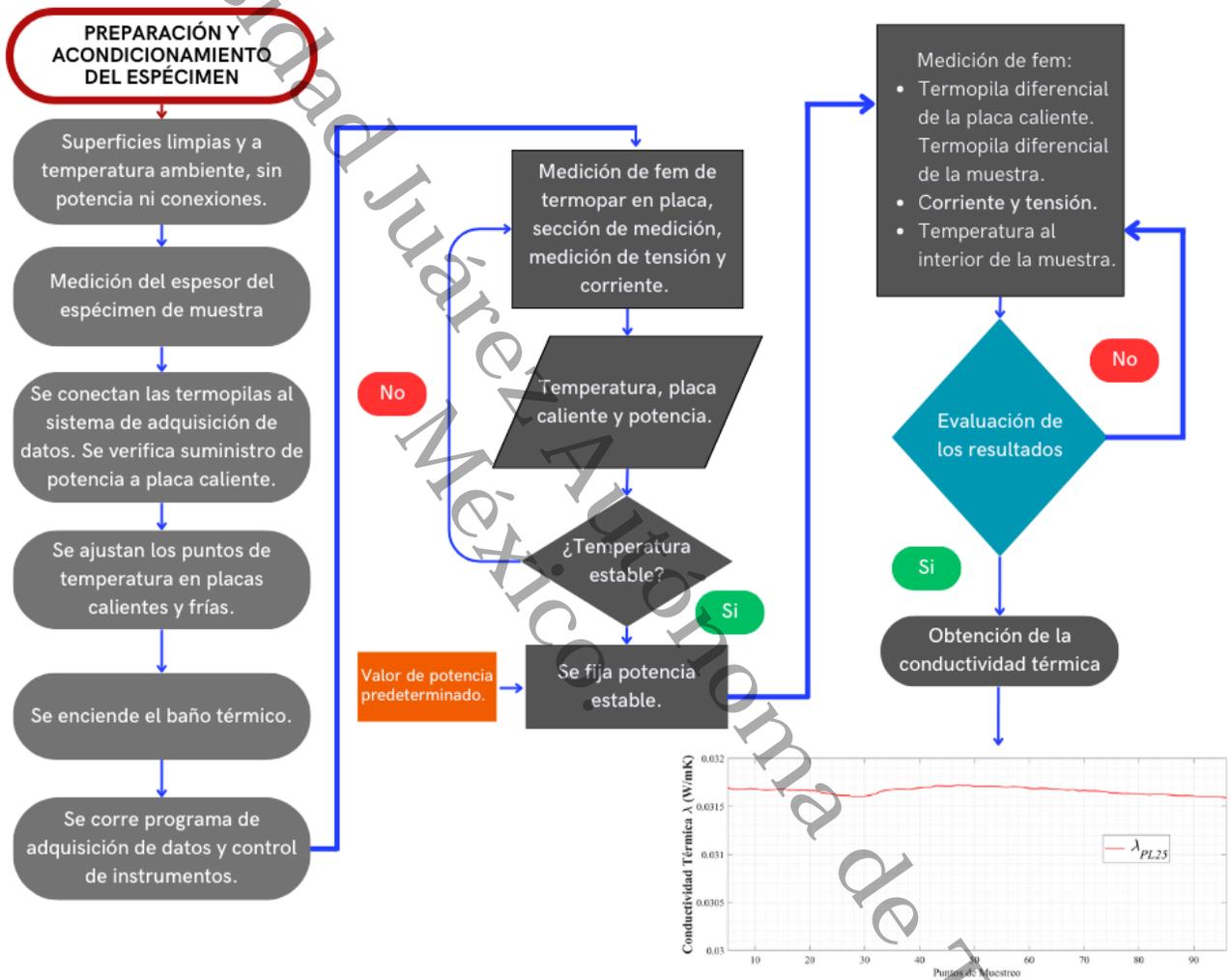
*Muestras de poliestireno expandido con el dispositivo APCG completo.*



### 5.3.1. Diagrama de procedimiento experimental.

De acuerdo a lo anterior, en la Figura 5.6 se muestra de manera detallada los pasos a seguir para la obtención de la conductividad térmica.

**Figura 5.6**  
Diagrama de flujo del procedimiento experimental.



*Nota.* Diagrama de flujo para determinar la conductividad térmica de las muestras bajo prueba.

## 5.4. Reporte de medición de la conductividad térmica en materiales homogéneos de construcción

Como parte de la metodología para la medición de la conductividad térmica de los materiales homogéneos de construcción, es necesario indicar los resultados obtenidos mediante un reporte que se propone para este experimento y como se muestra en la Figura 5.7. Este reporte contiene datos como: la identificación de las muestras, dimensiones de las muestras, etc. Los resultados obtenidos serán los valores promedio que se obtengan de la prueba.

**Figura 5.7**

*Reporte de conductividad Térmica de los materiales homogéneos de construcción.*

Folio: F001-22	
<b>Universidad Juárez Autónoma de Tabasco</b> <b>Laboratorio de Termofluidos</b> Cuerpo Académico, UJAT-CA-270	
<b>Reporte de Medición de Conductividad Térmica Aparente</b>	
<b>Operador de la Prueba:</b> César Augusto de Dios de la Cruz	<b>Numero de Prueba:</b> Indicar el número de prueba
	<b>Duración de la Prueba:</b> Indicar la duración total de la prueba
<b>TIPO DE MATERIAL:</b>	Indicar el material bajo muestra
<b>DIMENSIONES:</b>	Indicar el diámetro y el espesor de la muestra
<b>FECHA DE PRUEBA DEL MATERIAL:</b>	
<b>DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL APCG:</b> Aparato de placa caliente con guarda de doble lado de medición (APCG-001_UJAT_2023) con guardas aislantes en el exterior de las placas frías y guardas pasivas alrededor el dispositivo con orientación horizontal en las placas del APCG.	
<b>Procedimiento de Prueba:</b> Norma <b>NMX-C-189-ONNCEE-2010</b>	
<b>RESULTADOS EXPERIMENTALES A TEMPERATURA MEDIA DE 25 °C</b>	
Potencia eléctrica Suministrada (W)	
Voltaje suministrado (V)	
Temperatura superior en la zona de medición (°C)	
Temperatura inferior en la zona de medición (°C)	
Temperatura en la zona Guarda (°C)	
Temperatura en la zona de borde (°C)	
Temperatura de superficie de placa fría inferior (°C)	
Temperatura de superficie de placa fría superior (°C)	
Área de medición (m <sup>2</sup> )	
Conductividad Térmica (W/mK)	
Incertidumbre en la medición (W/mK)	
Conductividad Térmica Aparente (W/mK)	
Colocar Grafica de la conductividad térmica	
<b>Jefe de Laboratorio</b> <b>César Augusto de Dios de la Cruz</b> Fenómenos de transporte en la optimización del uso de la energía en sistemas.	

## 5.5. Establecimiento del estado permanente térmico

De acuerdo con el capítulo anterior que se observó como están hechos los arreglos de las termopilas en la placa caliente y las muestras de ensayo para tomar las mediciones de las temperaturas en el APCG. De igual forma, en este capítulo se describió en que condiciones deben de estar las muestras bajo pruebas y se determinó cuáles materiales son los de prueba y se seleccionó una muestra de referencia con conductividad térmica conocida y avalada por [Corning \(2022\)](#) y [ASTM-International \(2013\)](#).

Por lo tanto, para obtener los datos pertinentes y determinar la conductiva térmica de los materiales homogéneos de construcción de manera adecuada es necesario saber cuando debemos de parar las pruebas. Con conformidad a la norma ASTM C518 (Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus) menciona que:

- El tiempo de prueba e intervalo de medición, se debe de verificar la existencia de estado estacionario observando y registrando la fem, observar el cambio de la temperatura media de las muestras.
- Se debe realizar observaciones en intervalos de tiempo de por lo menos 10 minutos hasta que cinco observaciones continuas muestren temperaturas estables y el valor de la conductividad térmica se encuentran dentro de  $1/2\%$  del valor medio para estas cinco lecturas. Pero, si estas cinco lecturas muestran un crecimiento o decrecimiento continuo en las temperaturas, significa que no ha alcanzado un estado estacionario, lo cual se tomaran lecturas adicionales y se aplicara de nuevo este mismo criterio.

Aunado a lo anterior, para el análisis de datos con el dispositivo de APCG diseñado en este trabajo de tesis, se propuso tomar puntos de muestreo por cada minuto que duro la prueba y se analizó, el comportamiento de las temperaturas en las muestras de ensayo y en la placa caliente durante cada hora que duro la prueba para asegurarse tener mínimas perdidas de calor por los bordes. Ya que, al tener una diferencia de temperatura de tan solo  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  entre la zona de medición (*ZM*) y la zona de efecto de borde (*ZEB*) ocasionaba perdidas de calor en un flujo axial y lo cual no permitió alcanzar el equilibrio térmico, aun cuando la prueba duraba más de  $12\text{ hr}$ .

## Bibliografía

ASTM-International (2013). ASTM C518 Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus (ASTM C518-13).

Corning, O. (2022). Ficha técnica de aislamiento térmico de espuma rígida de poliestireno extruído (xps).



## Capítulo 6

### Resultados y discusión

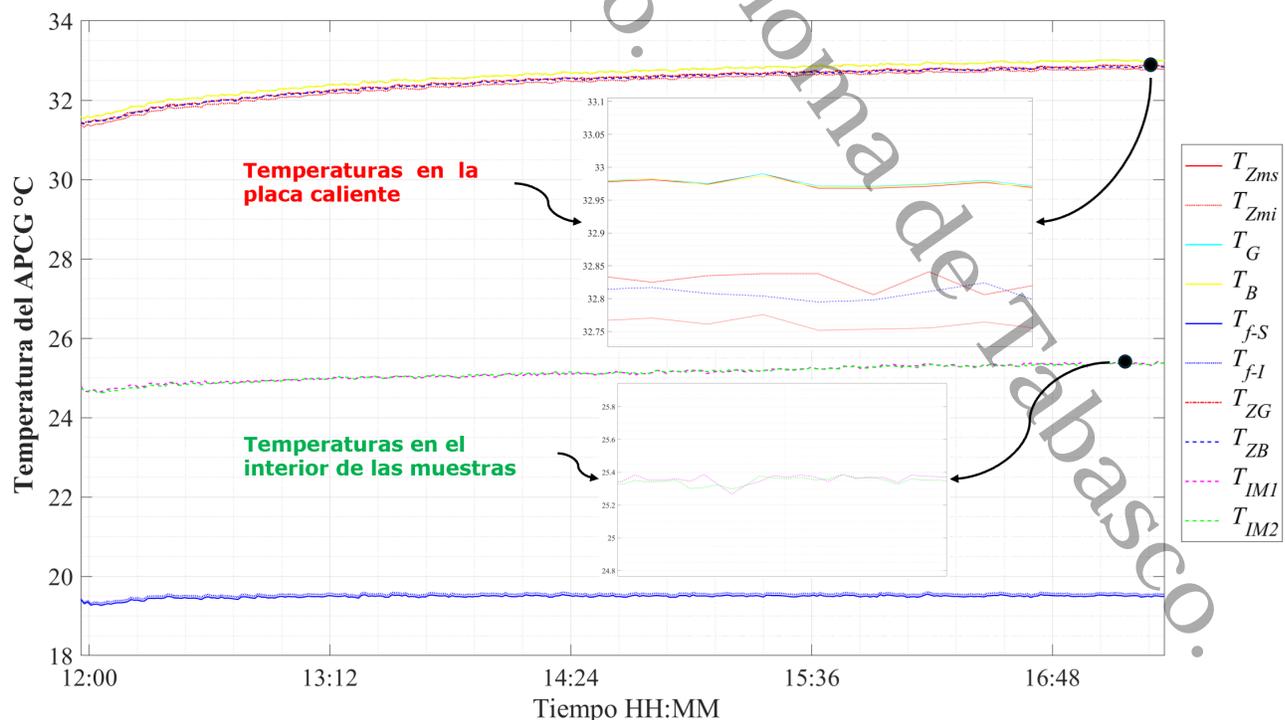
En el capítulo anterior se describió el proceso a detalle, sobre los pasos de selección de las muestras para llevar a cabo las pruebas de medición de la conductividad térmica, de igual forma se establecieron los criterios para la medición. El presente y último capítulo tiene como finalidad mostrar los resultados de las pruebas de medición de conductividad térmica a diferentes condiciones de operación. Los resultados de conductividad térmica ( $\lambda$ ), se obtuvieron a partir del análisis del comportamiento de las diferentes temperaturas del APCG. De manera consecuente, se describe un análisis y comparación de los resultados con respecto a otros investigadores para determinar la eficiencia y factibilidad del uso de un método primario empleado en un APCG para determinar la conductividad térmica de materiales homogéneos de construcción.

## 6.1. Comportamiento del APCG de la prueba PF25

En el capítulo anterior, se describió los criterios para decidir el momento adecuado para finalizar la prueba de la medición de conductividad térmica. En la Figura 6.1, se observa el comportamiento de las temperaturas del APCG empleando las muestras de referencias (Foamular®) a una temperatura media en el interior de la muestra de  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Efecto Zoom de temperaturas al interior de las muestras). En la parte inferior de la imagen se observa que, la duración de la prueba fue cinco horas y 36 minutos. De igual forma, en el lado derecho se puede notar 10 variables de temperaturas que se tomaron en cuenta durante de la medición de conductividad térmica. La  $T_{Zmi}$  y  $T_{Zms}$  son las temperaturas de la zona de medición inferior y superior de la placa caliente. Por otra parte, las temperaturas de guarda y borde ( $T_G$ ,  $T_B$ ) fueron indicadores que permitieron controlar las perdidas de calor por el efecto de borde en el APCG asegurando que estas temperaturas estuvieran por encima de las temperaturas de las zonas de medición, como se muestra en el efecto Zoom de temperaturas de placa caliente.

En la Figura 6.1, se puede notar el efecto de asíntota de las temperaturas en la placa caliente a partir de las cuatro horas de prueba, lo cual es similar al efecto de lineal que se presentaron en los arreglos para las simulaciones del APCG (3.1.3.1).

**Figura 6.1**  
Temperatura del APCG prueba PF25.

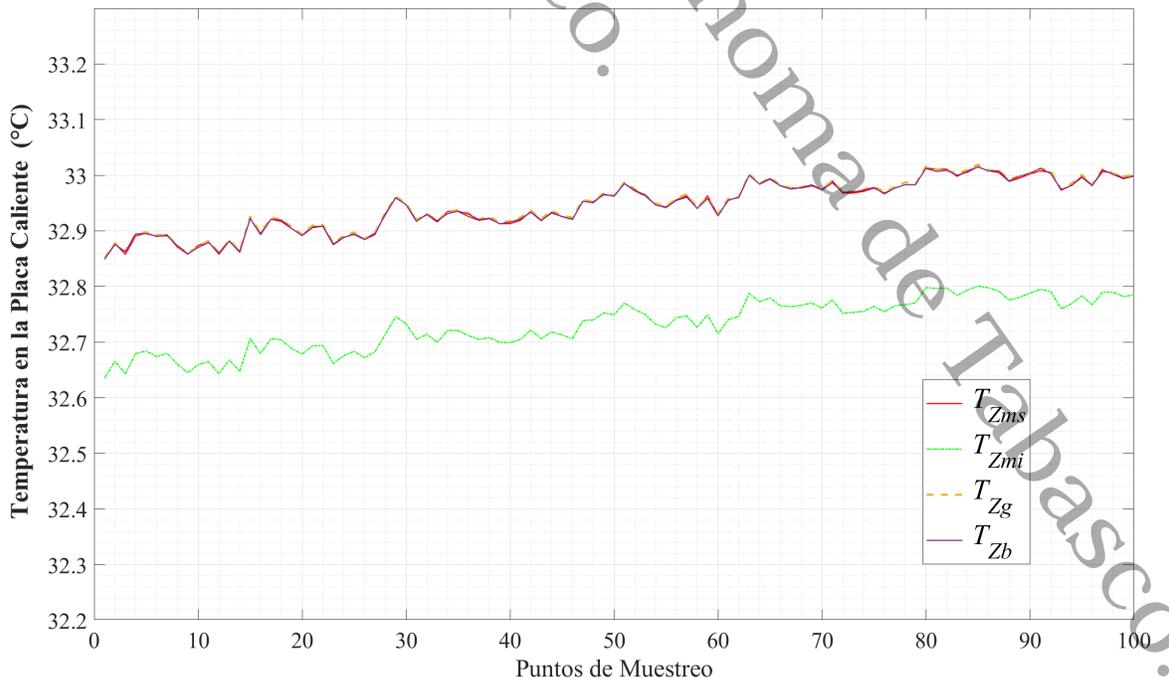


Acorde con el apartado 5.5, el estado estacionario depende de, que tan controlada sean las pérdidas de calor por el efecto de borde, pero, esto no indica cuanto tiempo debe de durar una prueba de medición de conductividad térmica, ya que, la duración de la medición depende del material de ensayo y el espesor.

Investigadores como: [Xamán et al. \(1999\)](#), [Martínez \(2003\)](#) y [Betancourt et al. \(2005\)](#) indicaron en sus trabajos que, el tiempo promedio para materiales aislantes como Amfoam® y fibra de vidrio (con conductividad térmica similar al Foamular®) tarda aproximadamente de seis a 10 horas en alcanzar el estado permanente durante el tiempo de prueba. De igual manera, [Martínez \(2003\)](#) y [Betancourt et al. \(2005\)](#), tomaron en cuenta los últimos 30 minutos de la medición para determinar la conductividad térmica de aquellos materiales. Dicho esto, en este trabajo se fijó tomar como base los últimos 100 puntos de muestreo para determinar la conductividad térmica. En la Figura 6.2 se muestra el comportamiento de las temperaturas  $T_{Zms}$ ,  $T_{Zmi}$ ,  $T_{Zg}$  y  $T_{Zb}$ . A primera vista se observa que, la temperatura en la zona inferior de medición es menor a las demás, pero la diferencia en los puntos de muestreo no es mayor en promedio a  $0.213\text{ }^{\circ}\text{C}$  con respecto a la zona superior, por lo cual no afecta a la medición de la muestra inferior. Aunado a lo anterior, aunque se aprecia que se superpone las mediciones de  $T_{Zg}$  y  $T_{Zb}$  sobre la  $T_{Zms}$ , la temperatura  $T_{Zg}$  es mayor a la  $T_{Zms}$  por  $0.002\text{ }^{\circ}\text{C}$  y la  $T_{Zb}$  es mayor por  $0.002\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo cual indica que la placa caliente es altamente homogénea y las pérdidas de calor por el efecto de borde se minimizaron.

**Figura 6.2**

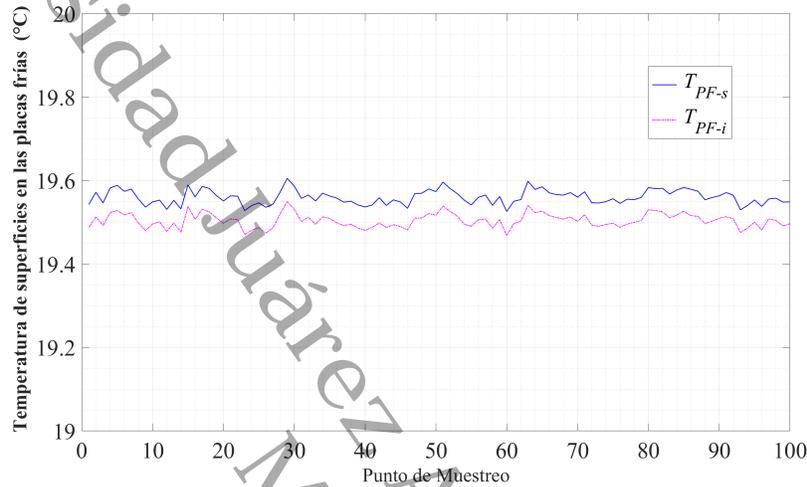
*Temperaturas en la placa caliente PF25.*



En la Figura 6.3, se muestra el comportamiento de la temperatura en las superficies de

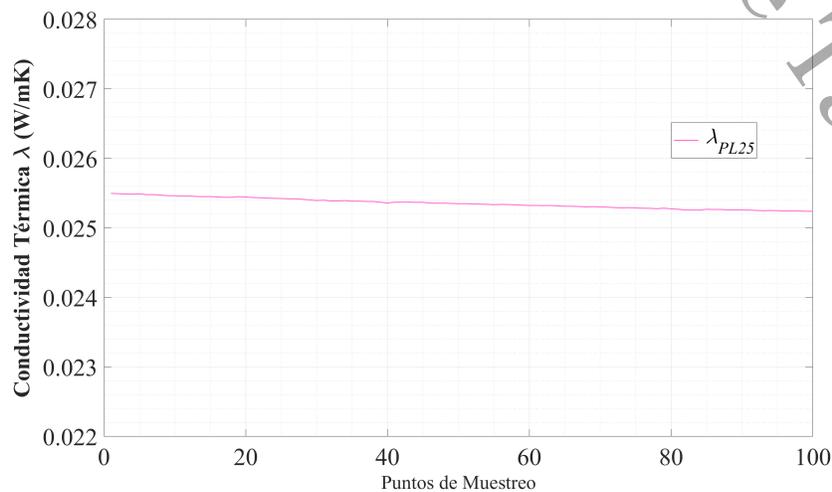
las placas frías ( $T_{PF}$ ). En la imagen se contempla que, la temperatura en promedio en la placa fría superior  $T_{PF-s}$  es de  $19,560\text{ }^{\circ}\text{C}$  y la temperatura promedio en la placa fría inferior ( $T_{PF-i}$ ) es  $19,504\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Por lo cual, la diferencia de temperaturas de ambas placas, es de tan solo  $0,056\text{ }^{\circ}\text{C}$  y no afecta en las mediciones.

**Figura 6.3**  
Temperaturas de superficies de las placas frías PF25.



Por lo tanto, con base en los resultados obtenidos de las temperaturas en la placa caliente y las placas frías, se obtuvo un valor promedio de conductividad térmica de  $0,0253\text{ W/mK}$  (Figura 6.4) con una incertidumbre de  $\pm 0,0001\text{ W/mK}$  o  $\pm 0,40\%$ . De manera que, a lo reportado por Corning (2022) y certificado por ONNCCE con conformidad a la NOM-018-ENER-2011, la conductividad térmica del Foamular® es de  $0,02587\text{ W/mK}$ , dando como resultado una diferencia porcentual del  $2,25\%$  lo que se encuentra dentro de lo permisible.

**Figura 6.4**  
Conductividad térmica (Foamular®) prueba PF25.



### 6.1.1. Reporte de conductividad térmica PF25

Por consiguiente, los resultados obtenidos de la prueba PF25 se muestran en reporte de medición de conductividad aparente (Figura 6.5). De la misma forma, en el reporte se observa los valores de temperaturas en la placa caliente, placas frías, voltaje, potencia eléctrica, conductividad térmica e incertidumbre. En el apartado de anexo F se muestran los reportes de las ocho pruebas de  $\lambda$  restantes.

**Figura 6.5**  
Reporte de conductividad Térmica Poliestireno Extruido.

<b>Folio: F001-22</b>	
<b>Universidad Juárez Autónoma de Tabasco</b> <b>Laboratorio de Termofluidos</b> Cuerpo Académico, UJAT-CA-270	
<b>Reporte de Medición de Conductividad Térmica Aparente</b>	
<b>Operador de la Prueba:</b> César Augusto de Dios de la Cruz	<b>Numero de Prueba:</b> PF25
	<b>Duración de la Prueba:</b> 5 horas y 36 minutos
<b>TIPO DE MATERIAL:</b>	Lana mineral
<b>DIMENSIONES:</b>	Placa circular de 27.58 mm de espesor con 400 mm de diámetro
<b>FECHA DE PRUEBA DEL MATERIAL:</b>	Lunes 31 de julio del 2023
<b>DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL APCG:</b> Aparato de placa caliente con guarda de doble lado de medición (APCG-001_UJAT_2023) con guardas aislantes en el exterior de las placas frías y guardas pasivas alrededor el dispositivo con orientación horizontal en las placas del APCG.	
<b>Procedimiento de Prueba:</b> Norma <b>NMX-C-189-ONNCEE-2010</b>	
<b>RESULTADOS EXPERIMENTALES A TEMPERATURA MEDIA DE 25 °C</b>	
Potencia eléctrica Suministrada (W)	1.999
Voltaje suministrado (V)	3.664
Temperatura superior en la zona de medición (°C)	32.945
Temperatura inferior en la zona de medición (°C)	32.731
Temperatura en la zona Guarda (°C)	32.947
Temperatura en la zona de borde (°C)	32.945
Temperatura de placa fría inferior (°C)	19.504
Temperatura de placa fría superior (°C)	19.560
Área de medición (m <sup>2</sup> )	0.0490
Conductividad Térmica (W/mK)	0.0253
Incertidumbre en la medición (W/mK)	0.0001
Conductividad Térmica Aparente (W/mK)	0.0253 ± 0.40 %
Figura 1. Grafica de la conductividad Térmica Aparente	
Jefe de Laboratorios <b>Dr. Edgar Vicente Macias Melo</b> Fenómenos de transporte en la optimización del uso de la energía en sistemas.	

## 6.2. Resultados de la conductividad térmica en los materiales homogéneos de construcción

De acuerdo con, los materiales propuestos para realizar las pruebas de medición de conductividad térmica, el cual, son de carácter aislante: Foamular® (Poliestireno extruido), Poliéstireno expandido (unicel) y Lana mineral. Los especímenes de ensayo estuvieron sometidos a tres diferentes temperaturas medias de pruebas, debido a que, con base a lo reportado, el comportamiento de la conductividad térmica de los materiales aumenta conforme a la temperatura a la que están expuestos.

En la Tabla 6.1, se muestran los resultados obtenidos de las pruebas de medición de las conductividades térmicas de los materiales aislantes. Así mismo, se presentan los valores de las temperaturas en las zonas de medición inferior y superior de la placa caliente ( $T_{Zms}$ ,  $T_{Zmi}$ ). Del mismo modo, en la Tabla 6.2, se observan las temperaturas de las placas fría inferior y superior ( $T_{F-i}$ ,  $T_{F-s}$ ), la temperatura en la zona de guarda ( $T_{ZG}$ ) y la temperatura en la zona de borde ( $T_{ZB}$ ). A demás, en la Tabla 6.3, se muestran los valores de desviaciones estándar ( $\sigma$ ) de la conductividad térmica, así como también la incertidumbre, potencia eléctrica y voltaje suministrado.

Cabe destacar que, el laboratorio donde se ubicó el **APCG** y se realizaron las pruebas de medición de la conductividad térmica, se mantuvo a una temperatura media de ambiente de  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , empleando un sistema de aire acondicionado. También, se empleó una guarda pasiva de material aislante de poliestireno extruido de  $25,4\text{ mm}$  de espesor, para reducir el efecto de conductancia superficial en el APCG y las pérdidas de calor por convección.

**Tabla 6.1**

*Tabla de resultados de medición de la conductividad térmica*

Prueba	$T_{Zms}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{Zmi}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Material	Conductividad térmica ( $\text{W/mK}$ )	Incertidumbre ( $\text{W/mk}$ )	Fecha de prueba
PL25	32.75	32.61	Lana mineral	0.0316	0.00013	06/05/2023
PL45	49.83	49.65		0.0403	0.00021	07/06/2023
PL65	68.52	68.22		0.0455	0.00026	24/07/2023
PF25	32.94	32.73	Foamular	0.0253	0.0001	25/07/2023
PF45	51.94	51.63		0.0269	0.00011	26/07/2023
PF65	68.70	68.39		0.0359	0.0002	27/07/2023
PU25	31.61	31.37	Unicel	0.0329	0.00015	28/07/2023
PU45	50.99	50.68		0.0341	0.00016	29/07/2023
PU65	68.29	67.92		0.0437	0.00025	31/07/2023

De acuerdo con, la Tabla 6.1, se presentan los diferentes valores de conductividad térmica acorde a cada material y temperatura media de prueba. En la Tabla se observa que, los valores de conductividad térmica aumenta conforme incrementa la temperatura media de prueba. Si observamos el comportamiento de la Lana mineral, se puede observar que, la conductividad térmica aumento de manera significativa en 27,53 % en la prueba PF45 con respecto a la prueba PF25, pero la incertidumbre de la PF45 solo representa el 0,52 %. Pero, al pasar de una temperatura de prueba de 45 °C a 65 °C, la  $\lambda$  solo incremento un 12,90 % con un porcentaje de incertidumbre del 0,52 %. Por lo que, de acuerdo con lo reportado ([Refrigerating and of Heating \(2021\)](#)), los valores obtenidos de  $\lambda$  de la lana mineral se encuentra en un intervalo de 0,034 W/mK a 0,040 W/mK. Lo cual, concuerda bien dentro de los límites de incertidumbre de medición.

Aunado a lo anterior, el comportamiento de la  $\lambda$  del poliestireno expandido (unicel), es un poco diferente al comportamiento de la lana mineral. Debido a que, como se observa en la Tabla 6.1, la conductividad térmica incrementa solo un 3,6 % al pasar de la prueba PU25 a la prueba PU45 con un porcentaje de incertidumbre del 0,45 %. Pero aumenta de manera significativa el valor de la conductividad térmica en un 28 % al someter el material de prueba a una temperatura media de 65 °C. Lo cual, se puede notar que la conductividad térmica del unicel aumenta de manera significativa al exponerlo a temperaturas más altas. Como resultado, se muestran que, los valores obtenidos de la conductividad térmica del poliestireno expandido se encuentra en un intervalo de 0,0329 hasta 0,0437 W/mK. A lo cual, con base en lo reportado por [Baldinelli et al. \(2019\)](#), realizaron una prueba Round Robin con en seis laboratorios europeos (Madrid, Bolonia, Latvia, Modena, Perugia y Torino) con una temperatura media de prueba entre los 25 °C y 45 °C. Obteniendo resultados de conductividad térmica del poliestireno expandido entre 0,0324 W/mK - 0,0372 W/mK. Lo que, significa que las mediciones realizadas por el APCG construido concuerda con lo ya reportado en otras investigaciones.

Finalmente, el objeto de medir un material de referencias es para conocer que tan exactas son las mediciones realizadas por el APCG. Por lo que, en la Tabla 6.1, observamos la conductividad térmica del poliestireno extruido (Foamular ®) a una temperatura media de prueba de 25 °C fue de 0,0253 W/mK con una diferencia porcentual del 2,25 % con respecto al la medición emitida por la ONNCCE.

Aunado a los valores encontrados en la medición del APCG construido, los datos que obtuvieron [Jannot et al. \(2017\)](#) para el poliestireno XPS fue de 0,0283 W/mK con una diferencia porcentual del 2,4 % con respecto al material de referencia. La diferencia entre que obtuvieron y el que se obtuvo en el APCG construido, fue la dimensión y disposición geométrica. Debido a que, el poliestireno XPS que emplearon, fue un prisma rectangular ortogonal (51 mm x 51 mm) con un espesor de 29,6 mm. A lo cual, comparando ambas variaciones porcentuales, se puede decir que son similares.

Como se mencionó al principio de la presente sección, se presentó la Tabla 6.1, el cual, en las dos primeras columnas, se observan la temperatura que alcanzó la placa caliente en la parte superior e inferior. Ahora bien, en la Tabla 6.2, se presentan las temperaturas de las placas frías inferior y superior, la temperatura en la zona de guarda y de borde. Realizando una comparación entre las  $T_{Zms}$  y  $T_{Zmi}$  de la Tabla 6.1 con respecto a las  $T_{PF-s}$  y  $T_{PF-i}$  de la Tabla 6.2, se puede observar que la diferencia promedio de temperatura para las pruebas medias a 25 °C es 12,96 °C, 11,82 °C para las pruebas medias de 45 °C y 9,61 °C para las pruebas medias a 65 °C. Lo cual, está en el rango de lo permitido conforme a la norma NMX-C-189-ONNCCE-2010 ONNCCE (2010).

Del mismo modo, comparando la  $T_{Zms}$  y  $T_{Zmi}$  con respecto a la  $T_{ZG}$  y  $T_{ZB}$ . Se observa que, la diferencia promedio de temperatura entre la zona de borde y la zona medición superior e inferior es de 0,032 °C y 0,295 °C. Y aunque, la diferencia de temperatura entre la zona de medición inferior y la zona de borde es mayor, no afecta a la prueba de conductividad térmica. Debido a que se requieren 0,5 °C para que el efecto de pérdida de calor axial sea considerable y ocasione que, la  $T_{Zms}$  y  $T_{Zmi}$  no permanezca estable. Así mismo, la diferencia promedio de temperatura entre la zona de guarda y las zonas de medición superior e inferior es de 0,003 °C y 0,266 °C. Mientras tanto, la diferencia de temperatura promedio de todas las pruebas entre la zona de borde y la zona de guarda fue de tan solo 0,029 °C, lo cual es no significativo y se confirma que la temperatura de toda la placa caliente tiene una temperatura homogénea.

**Tabla 6.2**

*Tabla de temperaturas de las mediciones de los materiales de prueba*

Prueba	Temperatura $T_{PF-s}$ (°C)	Temperatura $T_{PF-i}$ (°C)	Temperatura $T_{ZG}$ (°C)	Temperatura $T_{ZB}$ (°C)
PL25	19.53	19.59	32.76	32.77
PL45	39.26	39.37	49.83	49.86
PL65	59.07	59.19	68.54	68.61
PF25	19.50	19.56	32.94	32.94
PF45	39.57	38.96	51.93	51.94
PF65	59.51	58.81	68.70	68.76
PU25	19.81	19.26	31.61	31.61
PU45	39.68	38.96	50.98	50.99
PU65	59.55	58.68	68.30	68.38

De acuerdo con lo anterior, se discutió el comportamiento de las temperaturas y los resultados de la conductividad térmica de los materiales de pruebas a diferentes temperaturas. Sin embargo, en la Tabla 6.3 se presenta la potencia suministrada en cada prueba, voltaje,

y las desviaciones estándar de la conductividad térmica y la incertidumbre. A primera vista, observamos que, ambos valores de desviaciones estándar ( $\lambda$  e *incertidumbre*) se encuentran en un rango el cual, la dispersión de los 100 valores que se tomaron en cuenta para determinar la conductividad térmica no varía de manera significativa. Lo cual, estos resultados confirman que, empleando la última hora con 40 minutos de medición, no afecta a la medición, aun cuando investigadores como [Martínez \(2003\)](#), [Xamán \(2016\)](#) solo emplearon los últimos 30 minutos de prueba.

Ahora bien, como se muestra en la Tabla 6.3 los voltajes son similares para cada material de prueba a diferente temperatura, pero estos deberían ser los mismos en las tres mediciones para cada material de construcción. Pero la diferencia es de tan solo 0,012 V para la lana mineral, 0,003 V para el Foamular y 0,003 V para el poliestireno expandido y lo mismo ocurre con la potencia eléctrica. Por lo cual, se concluye que, es mínimo y no afecta en las mediciones. Dicho de otro modo, se puede asegurar que los valores escogidos para la conductividad térmica, los equipos de suministro de energía y los equipos de medición en tiempo real son los adecuados para medir la conductividad térmica.

**Tabla 6.3**

*Tabla de desviación estándar, suministro de energía y voltaje de las mediciones de los materiales de prueba*

Prueba	Desviación Estándar de $\lambda$ ( $W/mK$ )	Desviación Estándar de la Incertidumbre ( $W/mK$ )	Potencia Eléctrica ( $W$ )	Voltaje (V)
PL25	3.90e-05	3.24e-07	0.783	2.963
PL45	7.26e-05	7.11e-07	0.794	2.983
PL65	0.00063	7.19e-06	0.794	2.982
PF25	7.64e-05	5.91e-07	1.199	3.664
PF45	5.14e-05	4.10e-07	1.202	3.669
PF65	6.88e-05	7.45e-07	1.202	3.669
PU25	2.08e-05	1.85e-07	1.400	3.963
PU45	7.01e-05	5.99e-07	1.398	3.958
PU65	9.57e-07	8.51e-05	1.399	3.958

## Bibliografía

- Baldinelli, G., Bianchi, F., Gendelis, S., Jakovics, A., Morini, G. L., Falcioni, S., Fantucci, S., Serra, V., Navacerrada, M. A., Díaz, C., Libbra, A., Muscio, A., and Asdrubali, F. (2019). Thermal conductivity measurement of insulating innovative building materials by hot plate and heat flow meter devices: A round robin test. International Journal of Thermal Sciences, 139:25–35.
- Betancourt, G. M., Cortes, L. L., and Villaseñor, J. P. X. (2005). Diseño, construcción y caracterización de un instrumento de placas planas paralelas con guarda con doble lado de medición y con cámara de ambiente controlado para determinar la conductividad térmica de materiales sólidos - CENIDET.
- Corning, O. (2022). Ficha técnica de aislamiento térmico de espuma rígida de poliestireno extruido (xps).
- Jannot, Y., Degiovanni, A., Grigороva-Moutiers, V., and Godefroy, J. (2017). A passive guard for low thermal conductivity measurement of small samples by the hot plate method. Measurement Science and Technology, 28.
- Martínez, V. F. (2003). Sistema primario de medición de conductividad térmica de aislantes térmicos. Diseño y Construcción. Instituto Politécnico Nacional.
- ONNCCE (2010). Norma NMX-C-189-ONNCCE-2010, Determinación de la transmisión térmica (aparato de placa caliente aislada).
- Refrigerating and of Heating, A.-C. E. A. S. (2021). 2021 ASHRAE HANDBOOK FUNDAMENTALS, volume 1. Inch-pound edition.
- Xamán, J. P. (2016). Dinámica de Fluidos Computacional para Ingenieros. Palibrio, primera edición.
- Xamán, J. P., Cortes, L. L., and Chena, Y. C. (1999). Análisis de la transferencia de calor de un aparato para determinar la conductividad térmica de materiales aislantes. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET).

# Conclusiones

En este trabajo se desarrolló y caracterizó un dispositivo para determinar la conductividad térmica de materiales homogéneos de construcción con fuente de calor lineal circular de placas planas de doble lado de medición. Para ello, se diseñó y construyó un dispositivo experimental de un APCG que opera en el rango de temperatura de operación de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ , para conductividades térmicas de materiales de hasta de  $2\text{ W/mK}$ . Para el diseño se realizaron simulaciones empleando el método numérico de volumen finito, donde se discretizó la ecuación general de conducción de calor en coordenadas cilíndricas, tomando en cuenta la dirección  $r$  y  $Z$ , debido a la suposición de que la conductividad térmica no depende del ángulo del material. Lo anterior, con el objetivo de encontrar el dimensionamiento geométrico óptimo para obtener perfiles de temperaturas lo más homogéneas posible.

Dentro de los aspectos más destacados de este estudio se encuentra que, se realizó un estudio exhaustivo para determinar la distribución y dimensionamiento más eficiente de las resistencias de calentamiento como parte del diseño del dispositivo experimental. También, se consideró en el diseño un arreglo de doble guarda para evitar el efecto de borde y poder tener control de la energía suministrada al sistema para contrarrestar el efecto de borde. Las pruebas experimentales se realizaron considerando tres valores de operación de cada material para su implementación en las edificaciones, con el fin de conocer el impacto de la variación de esta variable en el valor de la conductividad térmica.

Como parte del análisis para la distribución y dimensionamiento de las resistencias de calentamiento, se realizaron 146 simulaciones en el cual se variaron parámetros como el radio de las placas, el espesor de los materiales, el espesor de la placa caliente, la distancia entre resistencias generadoras de calor, y se consideraron cuatro valores diferentes de conductividades térmicas; esto último con el fin de simular el empleo de muestras de ensayo de diferentes materiales de construcción. Como resultado de las simulaciones se obtuvo que:

- Los radios de las placas con las que se obtuvieron los resultados más adecuados fueron de  $200\text{ mm}$ , debido a que al realizar el cálculo inverso de la conductividad térmica solo mostraba una diferencia porcentual del  $1,99\%$  y una diferencia promedio

## CONCLUSIONES

---

de temperatura de  $0,11\text{ }^{\circ}\text{C}$ , considerando la zona de medición y la zona de guarda para las cuatro conductividades térmicas propuestas.

- La distancia óptima entre las resistencias eléctricas para la generación de calor homogéneo fue de  $6\text{ mm}$ , este comportamiento se presentó para los cuatro grupos de conductividades térmicas propuestas.
- De acuerdo con el análisis del error estándar de estimación ( $SEE$ ), se obtuvo que, para placas de  $250\text{ mm}$  de radio, las temperaturas en el interior del material fueron homogéneas hasta un radio de  $220\text{ mm}$ . Sin embargo, para las placas con radio de  $200\text{ mm}$  la temperatura en el interior del material fue homogénea hasta los  $180\text{ mm}$  de radio. Lo anterior, está dentro de un rango aceptable, debido a que la zona de medición de la placa caliente solo llega hasta  $125\text{ mm}$  del radio de la placa.
- De acuerdo con los resultados de análisis de incertidumbre, se obtuvo que la fuente de suministro de energía con menor aporte de incertidumbre fue la fuente BK precisión 1761, mientras que, el parámetro físico que aumenta de manera considerable en la medición de la conductividad térmica fue el espesor de las muestras, la cual disminuye al aumentar la  $\Delta T$  en el interior del mensurado.

El dispositivo experimental se construyó e instrumento con base en las dimensiones geométricas y distancias de generación de calor en el interior de la placa caliente, obtenidos del análisis de las simulaciones. A partir de esto, la geometría de la placa fría fue octogonal y se consideró una distribución de las resistencias eléctricas en forma de espiral de Arquímedes, donde la espiral va aumentando con un radio y ángulo constante. La placa caliente se dividió en tres zonas: zona de medición, zona de guarda y zona de efecto de borde. Esto con el fin de asegurar la correcta medición de la conductividad térmica y disminuir lo menor posible las pérdidas de calor por los bordes. Finalmente, se fijaron tres termopilas en la placa caliente para medir la diferencia de temperatura entre la zona de medición - zona de guarda, zona de guarda - zona de borde, así como, la diferencia de temperatura entre la zona de medición inferior y superior. Con base a lo anterior, se realizaron pruebas de funcionalidad del equipo y se obtuvo una estabilidad en las condiciones de prueba.

El estudio experimental constó de nueve pruebas, en donde se evaluaron tres materiales de construcción (poliestireno extruido, poliestireno expandido y lana mineral) bajo tres condiciones de temperatura de prueba ( $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Lo anterior, con el fin de evaluar el comportamiento de estos materiales bajo diferentes condiciones de operación en las edificaciones. Como resultado se encontró que:

- La diferencia porcentual obtenida de los valores de la conductividad térmica fue de 2,25 % entre la medición del poliestireno extruido y los valores reportados por el ONNCCE, para el mismo material. Así mismo, en las seis pruebas restantes se obtuvo una incertidumbre menor al 0,6 % con diferencias porcentuales con base a lo reportado con un valor menor al 3 %.
- La variación de temperatura de prueba tuvo un efecto sobre la conductividad térmica obtenida, así como, en los valores de la incertidumbre. Respecto a la variación de la temperatura de prueba, la conductividad térmica en general vario de 24,71 hasta 30,55 %, siendo el poliestireno expandido (Unicel) el que presento el menor porcentaje de variación. Por otra parte, se pudo observar que el poliestireno extruido (Foamular) fue el que presento los menores valores de conductividad térmica, con una diferencia porcentual promedio de 24,96 %, respecto a la lana mineral, que fue el que presento los valores más altos de conductividad térmica.
- El sistema experimental desarrollado permitió la obtención de la conductividad térmica de los materiales de construcción bajo prueba, con valores de incertidumbre máximas de  $0,00026 \text{ W/mK}$ .

Por lo anterior, se puede concluir que con el sistema experimental desarrollado es posible obtener mediciones para la determinación de la conductividad térmicas de materiales homogéneos de construcción de forma confiable. Lo anterior, con el fin de retribuir a la selección adecuada de materiales para la mejora del comportamiento térmico de las edificaciones, lo cual contribuye crear espacios más confortables, manteniendo una temperatura interior estable y agradable para los ocupantes, independientemente de las condiciones exteriores. Además, se contribuye al cumplimiento de normativas y sostenibilidad debido a que contar con mediciones como la conductividad térmica ayudan a asegurar que los materiales cumplen con las normativas de construcción en cuanto a eficiencia energética, contribuyendo al desarrollo de edificaciones más sostenibles y con menor impacto ambiental.

# Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos de los valores de conductividad térmica en los materiales homogéneos de construcción, los cuales se encuentran dentro del rango reportado por diversos investigadores e instituciones, se extiende las siguientes recomendaciones para mejorar y ampliar las mediciones de la conductividad térmica:

- Realizar las operaciones de corte y maquinado de las piezas del APCI empleando equipos de CNC para aumentar la confiabilidad, en exactitud dimensional del equipo y disminuir el tiempo de construcción del equipo APCI.
- Se recomienda construir un APCI con dimensiones más grandes para realizar mediciones de mensurados mayores a 400 *mm* de diámetro.
- Se recomienda seguir empleando la metodología de volumen finito (MVF) para las simulaciones de equipos de APCI debido a la precisión obtenida en los resultados obtenidos en el Capítulo 3, en comparación a los resultados obtenidos del Capítulo 6.
- Se recomienda realizar mediciones de la conductividad térmica a temperaturas mayores de 100° *C*, para evaluar otras condiciones de operación que se pudieran presentar en el sector industrial.
- Se recomienda realizar un modelo teórico del comportamiento de la  $\lambda$  con los resultados obtenidos para aplicar a modelos de cálculo energético en edificaciones.
- Se recomienda realizar mediciones en conjunto con los equipos del Centro Nacional de metrología (CENAM) para determinar el grado de exactitud del APCI construido en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT).

# Productos Extracurriculares



RENOVANDO TALENTOS  
en energías renovables

Universidad Nacional Autónoma de México  
Instituto de Energías Renovables

Otorga la presente

## CONSTANCIA

**a: César Augusto de Dios de la Cruz**

Por su participación como asistente en el:

### Crash Course de Python y Jupyter Notebook

Realizado en modalidad a distancia del 17 al 21 de enero de 2022, con una duración de 20 horas.

"Por mi raza hablará el espíritu"

Temixco, Morelos, a 27 de enero de 2022.



Dra. Marina Elizabeth Rincón González  
Directora del  
IER-UNAM



Lic. Celeste Morales Santiago  
Coordinadora de la Unidad de Educación  
Continua del IER-UNAM



RENOVANDO TALENTOS  
en energías renovables

Universidad Nacional Autónoma de México  
Instituto de Energías Renovables

Otorga la presente

## CONSTANCIA

a **César Augusto de Dios de la Cruz**

Por su participación como asistente en el:

Aplicaciones de ingeniería en Python: +20 ejercicios de manejo y visualización de datos

Realizado en modalidad a distancia de 24 al 28 de enero, con una duración de 20 horas.

"Por mi raza hablará el espíritu"

Temixco, Morelos, a 4 de febrero de 2022.

Dra. Marina Elizabeth Rincón González  
Directora del  
IER-UNAM

Lic. Celeste Morales Santiago  
Coordinadora de la Unidad de  
Educación Continua IER-UNAM

Folio: IER/UEC/C/2022/0008



Instituto Tecnológico de Orizaba  
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, 23/septiembre/2022  
ASUNTO: CARTA DE ACEPTACIÓN

César Augusto de Dios de la Cruz  
Edgar Vicente Macías Melo  
Karla María Aguilar Castro  
Isa Yadira Pérez Olán  
Rurik Nahum Azcanio Hernández  
P R E S E N T E:

Por este conducto les informamos que el comité de arbitraje ha aceptado su artículo titulado "Análisis de la transferencia de calor unidimensional-transitorio en paredes compuestas con diferentes factores de peso" para ser publicado en la revista electrónica "Coloquio de investigación multidisciplinaria" (ISSN 2007-8102), indizada en Latindex <https://www.latindex.org/latindex/ficha/22645>

Para que su trabajo in extenso sea publicado en la revista electrónica del Coloquio de Investigación Multidisciplinaria CIM-Orizaba-2022, evento internacional, será necesario el envío, al coordinador de facturación, de una carta de responsabilidad firmada por todos los autores del artículo y el pago de la cuota de recuperación, a más tardar el viernes 30 septiembre de 2022, enviando su ficha de pago, con sus datos al correo electrónico que se notificara en breve.

**ATENTAMENTE**

Excelencia en Educación Tecnológica  
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA

  
**Dr. Gerardo Aguila Rodríguez.**  
**RESPONSABLE DEL ÁREA ING. ELECTRICA ELECTRÓNICA**  
**COLOQUIO DE INVESTIGACIÓN MULTIDISCIPLINARIA**  
**Evento internacional CIM-Orizaba-2022**



Av. Oriente 9 Núm.852, Colonia Emiliano Zapata. C.P. 94320 Orizaba, Veracruz. Tel. 01 (272)1105360 e-mail: [mi@orizaba.tecnm.mx](mailto:mi@orizaba.tecnm.mx) [tecnm.mx](http://tecnm.mx) | [orizaba.tecnm.mx](http://orizaba.tecnm.mx)



## Análisis de la transferencia de calor unidimensional-transitorio en paredes compuestas con diferentes factores de peso

C.A. de Dios<sup>1\*</sup>, E.V. Macias Melo<sup>1</sup>, K. M. Aguilar Castro<sup>1</sup>, I. Y. Pérez-Olan<sup>1</sup>, R.N Azcanio<sup>1</sup>  
División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
Carretera Cunduacán - Jalpa de Méndez Km 1, C.P. 86690, Cunduacán, Tabasco  
\*cesar.dedios@outlook.com

Área de participación: Ingeniería Eléctrica y Electrónica

### Resumen

Se presenta el estudio de la transferencia de calor unidimensional transitorio de una pared compuesta. Esta pared consta de la unión de tres materiales en cuatro capas: revoco (capa exterior), placa de concreto, placa de aislante, y revoco (capa interior). La solución del modelo matemático de la ecuación gobernante se obtuvo mediante el método de volumen finito (MVF) empleando esquemas mixtos con diferentes factores de peso, donde se analizaron los tiempos computacionales, las temperaturas en las superficies, la carga térmica, el tiempo de retraso, y el factor de amortiguamiento. Para la solución, se desarrolló un código computacional. El tiempo de simulación fue de 48 h, y se encontró, que la temperatura promedio en la superficie interior de la pared fue 26.158°C, el factor de amortiguamiento se mantuvo en promedio con 0.0465, así como, el tiempo computacional disminuyó en 30% al emplear un paso del tiempo mayor.

**Palabras clave:** Transferencia de calor, MVF, Carga Térmica

### Abstract

The study of transient one-dimensional heat transfer of a composite wall is presented. This wall consists of the union of three materials in four layers: concrete plaster (outer layer), concrete plate, insulation plate, and concrete plaster (inner layer). The heat transfer is analyzed using mixed schemes with different weighting factors, where computational times are analyzed (simulation of two days). The comparison parameters are the temperatures on the surfaces, the thermal load, the delay time, and the damping factor. For the solution, a computational code with two analytical solution methods was developed. The first numerical method used was implicit discretization, and the second was the Crank - Nicolson discretization method, varying the damping factor between the first and second methods. As a result of a simulation time of 48 hours for each solution method. In the same way, the behavior of the temperature in the composite wall was obtained depending on the time, the thermal load generated, the damping factor, and the delay time.

**Key words:** Heat Transfer, MFV, Thermal Load

### Introducción

El clima en el planeta ha sido alterado como resultado del crecimiento de la población humana y desarrollo urbano de las ciudades a escala mundial. El desarrollo urbano de las ciudades ha ocasionado islas térmicas, lo que conduce a un aumento en el consumo de energía provocando la elevación de emisiones de gases de invernadero [1]. Por lo cual, esto causa la aceleración del deterioro ambiental y degradan el nivel de vida en los asentamientos urbanos, pone en riesgo la salud humana, el confort térmico e incrementa la temperatura. El confort térmico es una condición importante para que los ocupantes de un recinto puedan desarrollar sus actividades cotidianas. Un sistema de acondicionamiento térmico sirve para abastecer o extraer calor dentro de una vivienda habitacional o sitio delimitado. El gasto porcentual de los equipamientos de calefacción en un inmueble alcanza hasta el 44%, al mismo tiempo que, un sistema de acondicionamiento de aire puede llegar a ser hasta de un 45% conforme a la Encuesta Nacional de Consumos de Energéticos en VIVIENDA, México [2]. En México, los sistemas acondicionamiento de aire y equipos de acondicionamiento térmico en promedio trabajan constantemente entre 2 y 5 horas, debido a que las viviendas no están diseñadas adecuadamente para el clima ni su entorno[3]. Por lo que, para la obtención de un espacio con condiciones de confort térmico intervienen a la vez parámetros y factores diversos, como son los tipos de ámbito de actividades que se realizan, los diversos equipos electrónicos y de iluminación que se utilizan, la cantidad de ocupantes, el tamaño de la edificación, así como, los diferentes tipos de materiales utilizados en la construcción.

Se ha reportado que, el empleo adecuado de los materiales de construcción ayuda a mejorar la eficacia energética en un 20% y disminuir el costo del consumo de energía hasta un 40%. Los investigadores han presentado soluciones a múltiples sistemas de paredes compuestas para edificaciones, tomando en cuenta diversos materiales de construcción y sus propiedades térmicas, lo que permite el diseño adecuado de edificaciones [4], [5]. Li et al., [5] mencionan que en el diseño térmico del edificio se utilizan ampliamente parámetros como: la conductividad térmica, el coeficiente de almacenamiento térmico, la capacidad calorífica específica, la densidad y otros parámetros físicos térmicos de la envolvente de las edificaciones. En el área de la ingeniería civil existen diversos tipos de materiales de construcción y agregados que se pueden incorporar dependiendo de las técnicas de construcción, el tipo de edificación y la ubicación en el cual se va a edificar. Por lo cual, un estudio de la transferencia de calor con distintos materiales empleados en paredes compuestas, darán como resultado parámetros que contribuyan a la selección y diseño térmico de las edificaciones.

La transferencia de calor está presente en todos los objetos y se produce siempre que exista un gradiente térmico o cuando dos o más sistemas con diferentes temperaturas se ponen en contacto. Para el estudio de la propagación de calor diferencial se pueden aplicar diferentes metodologías de solución como son los métodos analíticos, experimentales o numéricos. El método analítico permite obtener una solución en la cual se conoce la distribución de temperatura al interior del dominio físico en cualquier tiempo bajo diferentes tipos de condiciones de frontera. Los métodos numéricos normalmente se emplean para obtener la solución del modelo matemático cuando: el sistema físico tiene una geometría compleja, las condiciones de frontera dependen del tiempo y las propiedades del sistema son función de la temperatura. Algunos de los métodos numéricos son: Método de Elemento Finito (MEF), Método de Volumen Finito (MVF), Método de Diferencias Finitas (MDF) y Método de Elementos Discretos (MED)[6]. La solución usando un método numérico permitirá obtener una solución que caracterice el comportamiento de la pared de estudio.

Por lo que, en este trabajo se plantea analizar la transferencia de calor unidimensional transitoria, bajo condiciones de frontera de tercera clase, en una pared compuesta que se implementa en las construcciones actuales (cimbramex). Para ello, se utilizó el MVF como método de solución utilizando el software Matlab® para el desarrollo del código computacional. Lo anterior, con el fin de encontrar soluciones «aproximadas» para el modelo matemático de transferencia de calor diferencial, comparando los tiempos computacionales, las temperaturas en las superficies, la carga térmica, el tiempo de retraso, y el factor de amortiguamiento.

## Metodología de solución

### Pared Compuesta

En la **Figura 1**, se muestra una pared compuesta que consta de un arreglo de revoco, cimbramex, aislante térmico Foamular® y revoco. La transferencia de calor en la pared está sujeta a condiciones de fronteras de tercera clase en el lado Oeste (W) y Este (E). Las condiciones de frontera de tercera clase (Robin) son condiciones que consideran el efecto combinado de la convección y radiación. La conductancia superficial exterior (o lado Este),  $h_e$ , se considera de  $13 \text{ W/m}^2\text{°C}$  [7]. Para este estudio, el comportamiento de la temperatura exterior ( $T_{\infty e}$ ) es sinusoidal dependiente del tiempo. Las propiedades térmicas del muro son descritas en la **Tabla 1**.

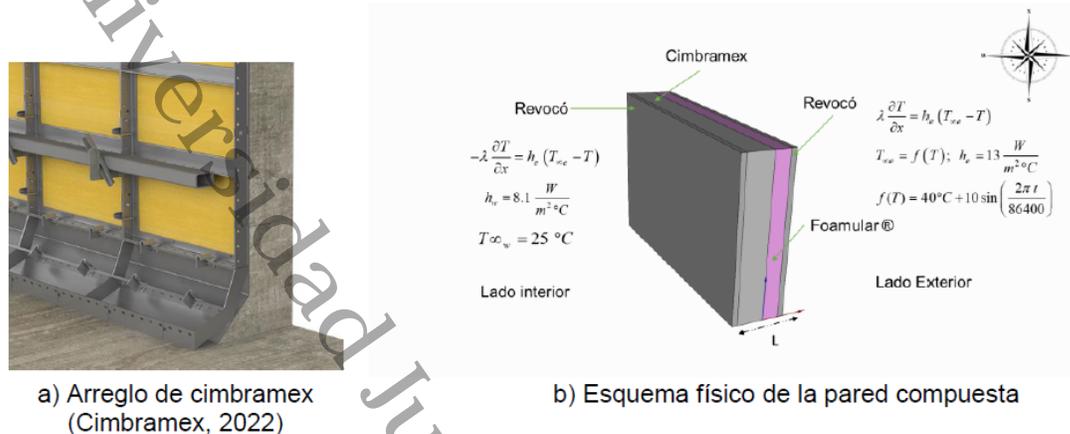


Figura 1. Modelo físico, a) imagen de una pared de cimbramex, y b) condiciones de frontera de la pared compuesta.

Tabla 1. Propiedades térmicas de muro.

Material	Espesor L (m)	Conductividad Térmica, λ (W/m°C)	Calor específico c (J/Kg°C)	Densidad ρ (kg/m³)
Revoco	0.01	1.01	780	1460
Cimbramex	0.07	1.1	1350	2400
Foamular®	0.025	0.028	750	40.47

Fuente: [8], [9]

La ecuación que gobierna la transferencia de calor en el sistema se representa con la Ecuación (1).

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad 0 < x < L, \quad t \geq 0 \quad (1)$$

Donde,  $T$  es la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\lambda$  es la conductividad térmica ( $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ ) y  $L$  es el espesor (m).

### Método de solución

La solución del caso de estudio de la pared compuesta de la **Figura 1**, se obtuvo aplicando el MVF con esquemas de solución mixtos para diferentes factores de peso. El MVF es un método numérico que conlleva en una proximidad de las derivadas parciales mediante expresiones algebraicas. Este método resulta útil cuando se aplica en materiales compuestos por placa de caras paralelas. Para ello, se discretizó el dominio físico en volúmenes de control donde su centro se llama *nodo*, y se encuentra una solución para cada nodo considerando los efectos de las condiciones de frontera, como se muestra en la **Figura 2**.

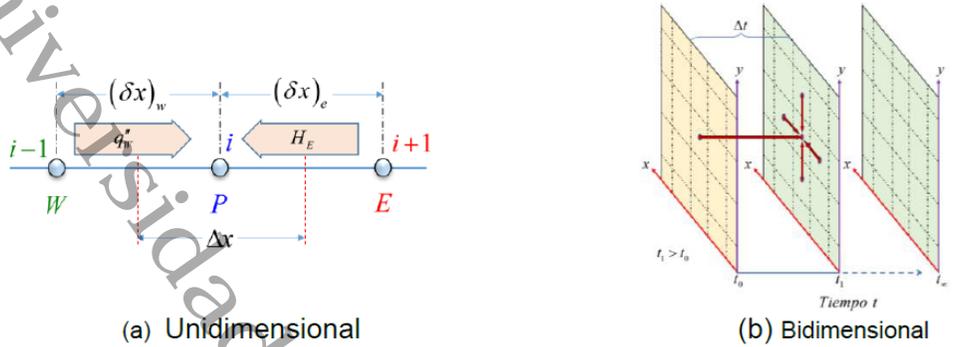


Figura 2. Representación del volumen de control, P, sobre una malla.

La ecuación gobernante (Ecuación 1) es discretizada de acuerdo al MVF y se obtienen las Ecuaciones (2) – (5).

$$\rho c \int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T}{\partial t} dt dx = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt \tag{2}$$

$$\int_t^{t+\Delta t} T_p dt = [f T_p^1 + (1-f) T_p^0] \Delta t \tag{3}$$

$$\rho c \frac{\Delta x}{\Delta t} (T_p^1 - T_p^0) = f \left[ \frac{\lambda_e (T_E^1 - T_p^1)}{(\delta x)_e} - \frac{\lambda_w (T_p^1 - T_W^1)}{(\delta x)_w} \right] + (1-f) \left[ \frac{\lambda_e (T_E^0 - T_p^0)}{(\delta x)_e} - \frac{\lambda_w (T_p^0 - T_W^0)}{(\delta x)_w} \right] \tag{4}$$

Donde  $f$  es el factor de peso entre  $0.25 < 1$

$$a_p T_p = a_E [f T_E + (1-f) T_E^0] + a_W [f T_W + (1-f) T_W^0] + [a_p^0 - (1-f)a_E - (1-f)a_W] T_p^0 \tag{5}$$

$$a_E = \frac{\lambda_e}{(\delta x)_e} \quad a_W = \frac{\lambda_w}{(\delta x)_w} \quad a_p^0 = \frac{\rho c \Delta x}{\Delta t} \quad a_p = f a_E + f a_W + a_p^0$$

Donde,  $a_E$  es el coeficiente de los nodos al Este,  $a_W$  es el coeficiente de los nodos al Oeste,  $a_p^0$  es el coeficiente del nodo central. De igual manera se discretizaron las condiciones de frontera, como se muestra de forma resumida en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Discretización de condiciones de frontera este y oeste.

Condiciones de Frontera	
Oeste (W)	Este (E)
$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = h_w (T_{\infty w} - T)$ (6)	$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = h_e (T_{\infty e} - T)$ (10)
$-\lambda \frac{T_{i+1}^{k+1} - T_i^{k+1}}{\delta x_e} = h_w (T_{\infty w} - T_i^{k+1})$ (7)	$\lambda \frac{T_i^{k+1} - T_{i-1}^{k+1}}{\delta x_w} = h_e (T_{\infty e} - T_i^{k+1})$ (11)
$T_i^{k+1} - T_{i+1}^{k+1} = h_w \delta x_e / \lambda (T_{\infty w} - T_i^{k+1})$ (8)	$T_i^{k+1} - T_{i-1}^{k+1} = h_e \delta x_w / \lambda (T_{\infty e} - T_i^{k+1})$ (12)
$\underbrace{(1 + h_w \delta x_e / \lambda)}_{a_p} T_i^{k+1} = 1 \underbrace{T_{i-1}^{k+1}}_{a_w} + \underbrace{h_w \delta x_e T_{\infty w} / \lambda}_B$ (9)	$\underbrace{(1 + h_e \delta x_w / \lambda)}_{a_p} T_i^{k+1} = 1 \underbrace{T_{i-1}^{k+1}}_{a_e} + \underbrace{h_e \delta x_w T_{\infty e} / \lambda}_B$ (13)

Ordenando los coeficientes agrupados para el sistema de ecuaciones que representan el interior y las fronteras, ecuaciones (5) – (13), se forma una matriz tridiagonal que se resuelve mediante el algoritmo TDMA (*Tridiagonal Matrix Algorithm*). En la **Figura 3** se presenta la metodología para el desarrollo del código computacional, para la solución del caso de estudio. La solución inicia con la definición de la geometría, luego se proporcionan las propiedades termofísicas del material y el periodo de análisis. Posteriormente, se discretizan las ecuaciones gobernantes y se resuelve el sistema de ecuaciones derivado, para obtener el comportamiento de la temperatura a través de la pared. Lo anterior, permitirá también estimar las cargas térmicas (Ecuación 13).

$$Q = \Sigma q \Delta t \tag{13}$$

Donde:  $Q$  es la energía total que pasa en un intervalo de tiempo (kWh),  $q$  es el flujo de calor (kW) y  $\Delta t$  es el incremento de tiempo en la ecuación en (h).

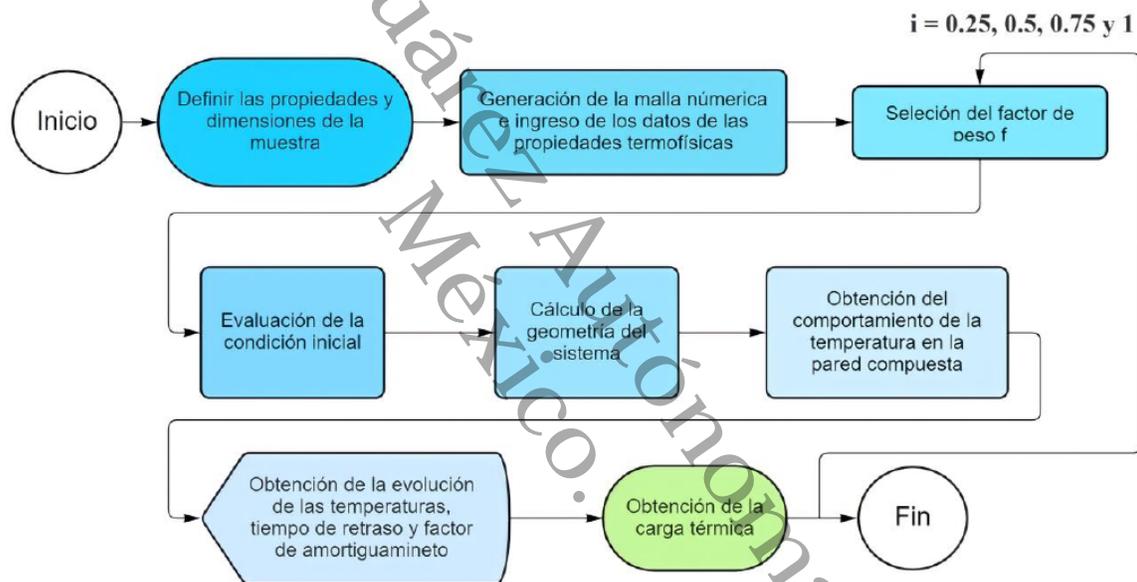


Figura 3. Algoritmo de solución.

## Resultados y discusión

Para la simulación del comportamiento del efecto de la transferencia de calor de la pared compuesta que se expone en la **Figura 1**, se realizaron simulaciones alternando los pasos del tiempo ( $\Delta t$ ), el tamaño de malla ( $Dx$ ) y el factor de peso ( $f$ ), como se muestra en la **Tabla 3**. El factor del peso empleado se propuso en el intervalo de 1 a 0.25, debido a que al emplear el cero el método es completamente explícito y hace que la solución pueda ser divergente. Los pasos del tiempo empleado son:  $\Delta t$  de 5 s a 60 s, debido que se quiere conocer si al incrementar el paso del tiempo en la solución, el tiempo computacional disminuye sin reducir la precisión de la solución. El uso de una malla con más nodos reduce los errores de truncamiento de la aproximación empleada mejorándola precisión de la solución, por lo cual se va a comparar el comportamiento de la solución utilizando mallas con diferentes tamaños. Como resultado de la variación de los parámetros se obtuvieron las siguientes combinaciones para las simulaciones mostradas en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Combinación de parámetros usados en la simulación del efecto de la transferencia de calor.

Caso	Paso del Tiempo $\Delta t$ (s)		Tamaño de malla, $Dx$		Factor de Peso ( $f$ )	
$\Delta t1Dx1f1$			Dx1	13	$f1$	1
$\Delta t1Dx1f2$					$f2$	0.75
$\Delta t1Dx1f3$					$f3$	0.5
$\Delta t1Dx1f4$					$f4$	0.25
$\Delta t1Dx4f1$	$\Delta t1$	5	Dx4	43	$f1$	1
$\Delta t1Dx4f2$					$f2$	0.75
$\Delta t1Dx4f3$					$f3$	0.5
$\Delta t1Dx4f4$					$f4$	0.25
$\Delta t2Dx1f1$	$\Delta t2$	60	Dx1	13	$f1$	1
$\Delta t2Dx1f2$					$f2$	0.75
$\Delta t2Dx1f3$					$f3$	0.5
$\Delta t2Dx1f4$					$f4$	0.25
$\Delta t2Dx4f1$			Dx4	43	$f1$	1
$\Delta t2Dx4f2$					$f2$	0.75
$\Delta t2Dx4f3$					$f3$	0.5
$\Delta t2Dx4f4$					$f4$	0.25

De acuerdo con el fenómeno de transferencia de calor por conducción en la pared compuesta, en la **Figura 4** se presenta el efecto de emplear un aislante térmico (Foamular®) en una pared convencional con un arreglo formado por revoco, cimbramex y revoco. Se observó que, la temperatura de la superficie exterior ( $T_{se}$ ) osciló entre 30°C y 50°C. Mientras tanto, la temperatura promedio de la superficie en el interior de la pared ( $T_{si}$ ) fue de 26.15°C. Lo anterior, muestra que el uso del aislante térmico ayuda a disminuir de manera significativa la transferencia de calor en la pared compuesta, debido a que la diferencia de temperatura en la superficie exterior e interior se encuentra en un valor promedio de 12.27°C.

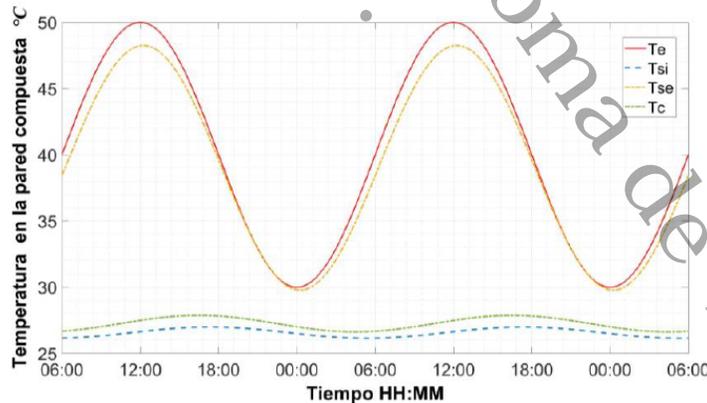


Figura 4. Comportamiento de la temperatura en la pared compuesta en 2 días de simulación.

En la **Figura 5** se muestra la evolución de la temperatura ambiente exterior ( $T_e$ ) sobre la pared compuesta, así como, la temperatura de superficie interior para diferentes valores del factor de peso, donde  $T_{si1}$  es la temperatura de superficie interior con un  $f$  de 1,  $T_{si2}$  es la temperatura de superficie interior con un  $f$  de 0.75,  $T_{si3}$  es la temperatura de superficie interior con un  $f$  de 0.5,  $T_{si4}$  es la temperatura de superficie interior con un  $f$  de 0.25. Lo

anterior, empleando un tamaño de malla de 43 nodos y un paso de tiempo  $\Delta t = 5$  s para todos los factores de peso. Se puede observar que presentan un comportamiento similar de forma sinusoidal con diferencias poco significativas en la primera hora de simulación, y se observa que la solución usando los diferentes factores de peso se superponen por la exactitud en las soluciones. Este comportamiento se debe a que la ecuación de conducción de calor unidimensional transitorio se resuelve para propiedades constantes para cada una de las placas que componen la pared compuesta, lo cual, la hace una ecuación lineal. Por lo que, podría observarse un cambio debido a los factores de peso, si se consideran propiedades de los materiales dependientes de la temperatura. En la **Figura 6** se muestra el comportamiento de las temperaturas de superficie interior ( $T_{si}$ ) con los cuatro factores de peso utilizados en la **Figura 5**.

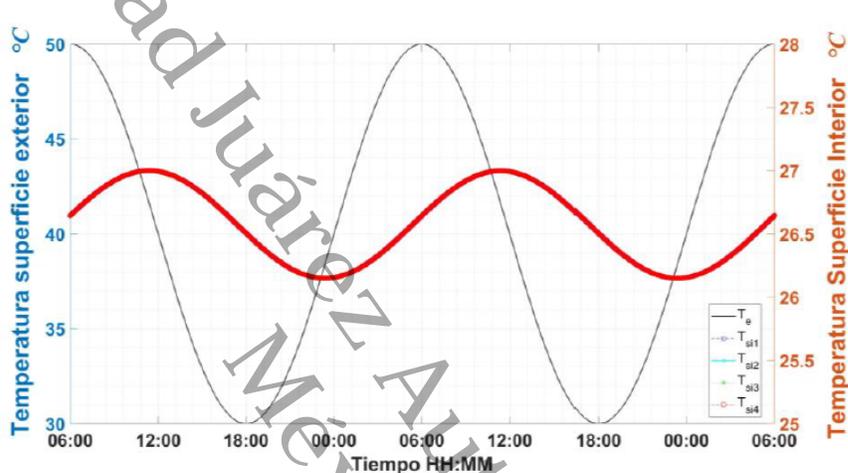


Figura 5. Comportamiento de la temperatura en la pared compuesta con  $f = 1, 0.75, 0.5$  y  $0.25$ , para un  $\Delta t1$ .

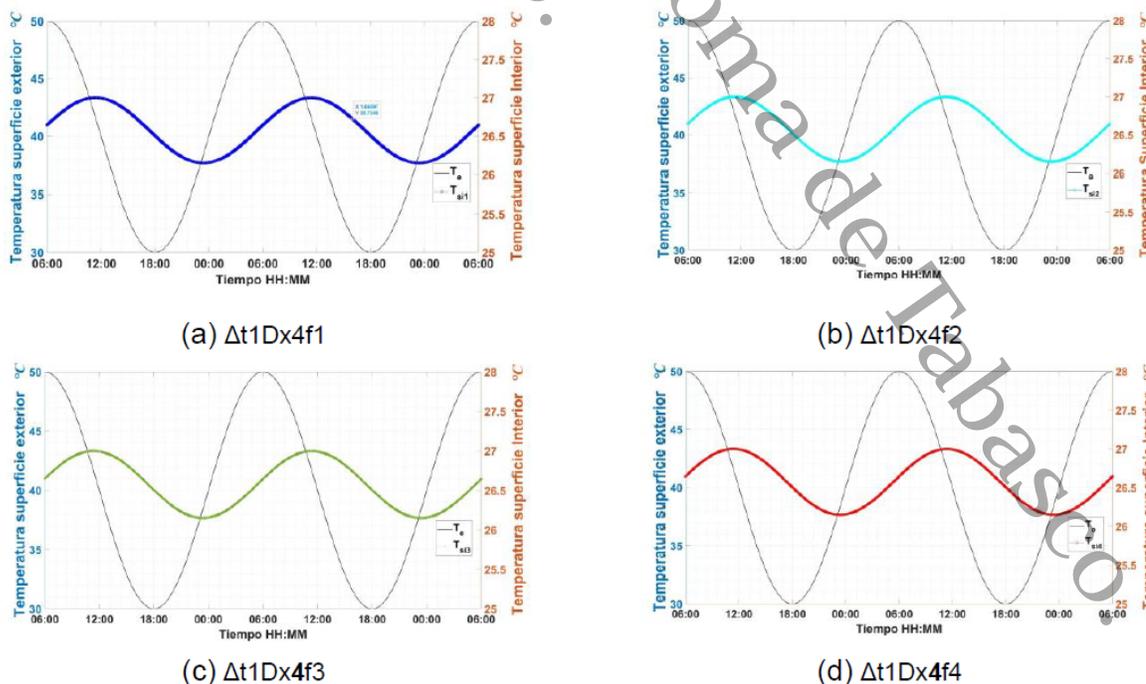


Figura 6. Comportamiento de la Temperatura superficie interior ( $T_{sei}$ ) con diferentes factores de peso.

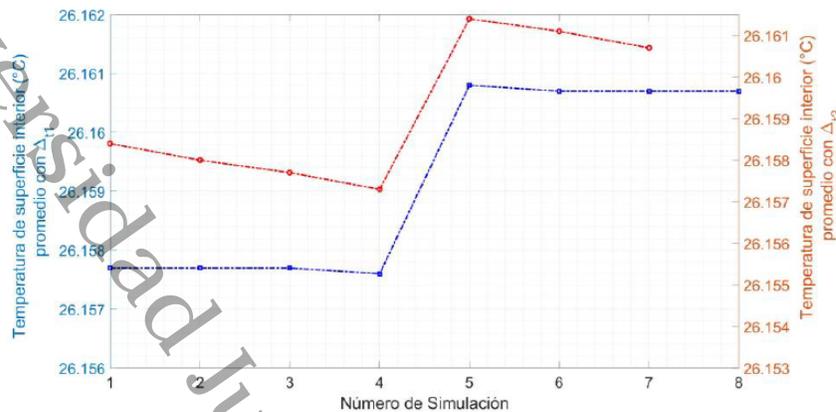


Figura 7. Temperatura de superficie interiores con  $\Delta t$  diferentes.

## Conclusión

Se realizó el estudio de la transferencia de calor unidimensional transitorio de una pared compuesta con una solución numérica mediante el MVF a través de un código computacional, considerando diferentes factores de peso con dos métodos de discretización para el tiempo. Con base en los resultados mostrados a partir de las simulaciones, se encontró que el uso de materiales termoaislantes (Foamular®) en paredes convencionales podría contribuir de manera significativa para disminuir la transferencia de calor en una vivienda habitacional. Esto debido a que, disminuyó la temperatura entre la superficie exterior e interior en un 31%. De igual manera se observó que, el empleo de un factor de peso menor a 0.47 y un paso de tiempo mayor a 7s, ocasiona que la solución se vuelva divergente.

Por lo cual, este trabajo da guía a futuros estudios donde se podría emplear mallas más grandes con pasos de tiempo menores para refinar la exactitud de las soluciones, así mismo, utilizar los mismos factores de peso para evitar soluciones divergentes. De igual manera, a partir del código desarrollado podría realizarse un estudio con una disposición de capas de los materiales en la pared compuesta para conocer el arreglo más eficiente que contribuya a disminuir la transferencia de calor en las viviendas habitacionales, incluyendo condiciones de fronteras con condiciones climáticas reales para conocer la eficacia de usar materiales termoaislantes.

## Referencias

- [1] PNUMA, "Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente." *Report*, pp. 1–5, 2012, doi: 10.1016/J.CLLC.2016.02.001.
- [2] Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, "Cuaderno No.10," *SECRETARÍA DE ENERGÍA*, vol. Cuaderno No. 10, p. 9, Mar. 2018.
- [3] "¿Cómo reducir costos en la operación de equipos de confort térmico? - KINENERGY." <https://www.kin.energy/blogs/post/%C2%BFc%C3%B3mo-reducir-costos-en-la-operaci%C3%B3nde-equipos-de-confort-t%C3%A9rmico> (accessed Nov. 02, 2021).
- [4] E. Cuce, "Accurate and reliable U-value assessment of argon-filled double glazed windows: A numerical and experimental investigation," *Energy and Buildings*, vol. 171, pp. 100–106, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.04.036.
- [5] A. Li, X. Xu, J. Xie, and Y. Sun, "Development of a simplified heat transfer model of hollow blocks by using finite element method in frequency domain," *Energy and Buildings*, vol. 111, pp. 76–86, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.09.004.



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba  
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, **19/septiembre/2022**  
ASUNTO: **CARTA DE ACEPTACIÓN**

Rurik Nahúm Azcanio Hernández  
Edgar Vicente Macías Melo  
Karla María Aguilar Castro  
Iván Alejandro Hernández Pérez  
César Augusto de Dios de la Cruz  
**P R E S E N T E:**

Por este conducto les informamos que el comité de arbitraje ha aceptado su artículo titulado "Análisis comparativo de la transferencia de calor a través de diferentes muros de mampostería." para ser publicado en la revista electrónica "Coloquio de investigación multidisciplinaria" (ISSN 2007-8102), indizada en Latindex <https://www.latindex.org/latindex/ficha/22645>

Para que su trabajo in extenso sea publicado en la revista electrónica del Coloquio de Investigación Multidisciplinaria CIM-Orizaba-2022, evento internacional, será necesario el envío, al coordinador de facturación, de una carta de responsabilidad firmada por todos los autores del artículo y el pago de la cuota de recuperación, a más tardar el viernes 30 septiembre de 2022, enviando su ficha de pago, con sus datos al correo electrónico que se notificara en breve.

**A T E N T A M E N T E**  
*Excelencia en Educación Tecnológica.*  
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

Dr. Ignacio Herrera Aguilar  
Responsable de Ing. Mecánica - Mecatrónica  
COLOQUIO DE INVESTIGACIÓN MULTIDISCIPLINARIA  
Evento internacional CIM-Orizaba-2022



Av. Oriente 9 Núm.852, Colonia Emiliano Zapata. C.P. 94320 Orizaba, Veracruz.  
Tel. 01 (272)1105360 e-mail: [mii@orizaba.tecnm.mx](mailto:mii@orizaba.tecnm.mx) [tecnm.mx](http://tecnm.mx) | [orizaba.tecnm.mx](http://orizaba.tecnm.mx)



Ricardo  
**2022 Flores**  
Año de Maón  
PRELUDIO DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA



UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División  
Académica  
de Ingeniería  
y Arquitectura



Otorga la presente

# CONSTANCIA

**A: César Augusto De Dios De la Cruz**

Por su participación en el Curso-Taller "Uso y manejo Básico de Fresadora CNC sinumerik 802SC", en el marco de la Jornada de Cursos Disciplinarios de Ingeniería Mecánica Eléctrica, llevado a cabo en nuestra División Académica durante los días del 22 al 26 agosto del presente, con una duración de 25 horas.

Cunduacán, Tabasco; 12 de septiembre de 2022.

Dra. Dora María Frías Márquez  
Directora



DIRECCIÓN

Folio: CDCE/2022/2618



**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**  
"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División  
Académica  
de Ingeniería  
y Arquitectura



2022 Flores  
Magón

Otorga la presente

# CONSTANCIA

**A: César Augusto De Dios De la Cruz**

Por su participación en el Curso-Taller "Modelado 3D Básico con Software CAD Autodesk Fusión 360", en el marco de la Jornada de Cursos Disciplinarios de Ingeniería Mecánica Eléctrica, llevado a cabo en nuestra División Académica durante los días del 8 al 12 de agosto del presente, con una duración de 25 horas.

Cunduacán, Tabasco; 12 de septiembre de 2022.



**DIRECCION**

**Dra. Dora María Frías Márquez**  
Directora

Folio: CDCE/2022/2611



La Dirección Divisional de Promoción y  
Servicios de Información Tecnológica

Otorga la presente

# CONSTANCIA

a: **César Augusto de Dios de la Cruz**

Por su asistencia al taller virtual:

**“Taller básico de redacción de  
solicitudes de invención”**

Impartido en línea en Ciudad de México  
del 5 al 9 de septiembre de 2022.

**Alberto Olguín Nava**  
Subdirector Divisional de Servicios  
de Información Tecnológica

## Apéndice A

### Discretización de la ecuación gobernante

Como se mencionó anteriormente en el apartado 2.2, para obtener la solución de la de la ecuación general de conducción de calor en coordenadas cilíndricas (Ec. 2.8) procedemos aplicar el MVF.

Integrando la Ec. 2.8 con respecto a las diferencias en  $\Delta r$ ,  $\Delta z$  y  $\Delta t$  (incremento en el tiempo) obtenemos la Ec. A.1:

$$\begin{aligned} \rho C_p \int_w^e \int_s^n \int_t^{t+\Delta t} r \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) dr dz dt = \int_w^e \int_s^n \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr dz dt + \dots \\ \dots + \int_w^e \int_s^n \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) dr dz dt + \int_w^e \int_s^n \int_t^{t+\Delta t} S r dr dz dt \quad (\text{A.1}) \end{aligned}$$

Por lo que el resultado de la Ec. A.1 es la Ec. A.2

$$\begin{aligned} \frac{r_c \rho C_p \Delta r \Delta z}{\Delta t} (T_p - T_p^0) = \left[ r_e \lambda_e \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_e - r_w \lambda_w \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_w \right] \Delta z \Delta t + \dots \\ \dots + \left[ \lambda_n \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)_n - \lambda_s \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)_s \right] r_c \Delta r \Delta t + \bar{S} \Delta r \Delta z \Delta t \quad (\text{A.2}) \end{aligned}$$

## APÉNDICE A. DISCRETIZACIÓN DE LA ECUACIÓN GOBERNANTE

Por lo tanto, evaluando las integrales de la (Ec. A.2) con respecto a los límites impuestos, obtenemos la Ec. A.3 y la Ec. A.4.

$$\int_w^e \int_s^n \int_t^{t+\Delta t} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr dz = \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_e - r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_w \right) \Delta z \Delta t = \dots$$

$$\dots \frac{\lambda_e r_e \Delta z (T_E - T_P) \Delta t}{\delta r_e} - \frac{\lambda_w r_w \Delta z (T_P - T_W) \Delta t}{\delta r_w} \quad (\text{A.3})$$

$$\int_w^e \int_s^n \int_t^{t+\Delta t} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) dr dz = \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_n - r \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_s \right) r_c \Delta r \Delta t = \dots$$

$$\dots \frac{r_c \lambda_n \Delta r (T_N - T_P) \Delta t}{\delta z_n} - \frac{r_c \lambda_s \Delta r (T_P - T_S) \Delta t}{\delta z_s} \quad (\text{A.4})$$

Agrupando los resultados de las integrales da como resultado la Ec. A.5

$$\frac{r_c \rho C_p \Delta r \Delta z}{\Delta t} (T_P - T_P^0) = \frac{\lambda_e r_e (T_E - T_P) \Delta z \Delta t}{\delta r_e} - \dots$$

$$\dots - \frac{\lambda_w r_w (T_P - T_W) \Delta z \Delta t}{\delta r_w} - \frac{\lambda_n r_c (T_N - T_P) \Delta r \Delta t}{\delta z_n} - \dots$$

$$\dots - \frac{\lambda_s r_c (T_P - T_S) \Delta r \Delta t}{\delta z_s} + \bar{S} \Delta r \Delta z \Delta t \quad (\text{A.5})$$

Ahora bien, haciendo las siguientes asignaciones de nuevas variables con los valores de la ecuación A.5, se obtienen los coeficientes de la ecuación lineal.

$$a_p^0 = \frac{r_c \rho C_p \Delta z \Delta r}{\Delta t} \quad (\text{A.6})$$

$$a_E = \frac{\lambda_e r_e \Delta z}{\delta r_e} \quad (\text{A.7})$$

$$a_N = \frac{\lambda_n r_c \Delta r}{\delta z_n} \quad (\text{A.8})$$

$$a_W = \frac{\lambda_w r_w \Delta z}{\delta r_w} \quad (\text{A.9})$$

$$a_S = \frac{\lambda_s r_c \Delta z}{\delta z_s} \quad (\text{A.10})$$

## APÉNDICE A. DISCRETIZACIÓN DE LA ECUACIÓN GOBERNANTE

---

Por lo que, realizando las operaciones algebraicas y agrupando los términos semejantes, obtenemos la Ec. A.11:

$$(a_P^0 + a_E + a_W + a_N + a_S)T_P = a_E T_e + a_W T_W + \dots \\ \dots + a_N T_N + a_S T_S + a_P^0 T_P^0 + \bar{S}r_c \Delta r \Delta z \quad (\text{A.11})$$

Por último, asignando el término de generación  $b$  (Ec. A.12). a la Ec. A.11, obtenemos la Ec.A.13 que es la ecuación algebraica principal para el sistema de ecuaciones que son resultado de la solución de la ecuación gobernante Ec. 2.2.

$$b = a_P^0 T_P^0 + \bar{S}r_c \Delta r \Delta z \quad (\text{A.12})$$

$$(a_P^0 + a_E + a_W + a_N + a_S)T_P = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + b \quad (\text{A.13})$$

## Apéndice B

### Tabla de conductividades térmicas

En este apartado de anexo se presenta una tabla de las conductividades térmicas de materiales homogéneos y no homogéneos de construcción de acuerdo con los autores ASHRAE (2021)\*, Bergman et al., (2011)\*\* y Cengel (2007)\*\*\*.

Material	Conductividad Térmica (W/mK)	Calor específico (kJ/kgK)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
<b>Materiales Aislantes</b>			
Bloques de fibra de vidrio*	0.046 - 0.047	0.83736	9.771 - 12.013
Lana de roca y escoria*	0.036 - 0.037	0.837	32.03 - 36.8
Lana mineral, fieltado**	0.040 - 0.034	—	16.01 - 48.05
Vidrio celular***	0.041	0.837	120.138
Placas de fibra de cemento*	0.072 - 0.076	1.297	400.4 - 432.4
Caucho expandido (rígido)*	0.028	1.46 - 1.674	64.0739
Poliestireno expandido, cuentas moldeadas**	0.034 - 0.037	—	16.018 - 24.027
Baldosas acústicas*	0.051 - 0.053	0.586 - 0.795	336.3 - 368.4
Tablero de lana de roca* (Suelos y paredes)	0.033 - 0.036	0.837	64.07 - 128.1
<b>Relleno Suelto</b>			
Fibra de celulosa, relleno suelto (Aplicación en el ático hasta 4 in*)	0.038 - 0.040	1.381	56.06
Vermiculita exfoliada*	0.067	1.339	112.1 - 131.3

## APÉNDICE B. TABLA DE CONDUCTIVIDADES TÉRMICAS

<b>Material</b>	<b>Conductividad Térmica (W/mK)</b>	<b>Calor específico (kJ/kgK)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Fibra de vidrio** (Áticos, 4 a 12 in)	0.051 - 0.054	—————	6.407 - 8.009
<b>Aplicado en spray</b>			
Celulosa, rociada en las cavidades abiertas de la pared***	0.038 - 0.040	1.465	25.629 - 41.648
Fibra de vidrio, rociada en cavidades abiertas de la pared o del ático*	0.038 - 0.041	—————	16.0185
Espuma de poliuretano*(Baja densidad, célula abierta)	0.037 - 0.041	1.465	7.2 - 10.4
<b>Construcción</b>			
Placa de asbesto /cemento**	0.576	1.004	1922.22
Placa de cemento***	0.245	0.837	1137.31
Tablero de fibra/cemento*	0.245	0.837	1409.62
<b>Materiales de Techo</b>			
Placa de yeso o escayola*	0.158	0.879	640.739
Tejas de asbesto/cemento**	—————	0.879	1922.22
Techos de rollo de asfalto**	—————	1.256	1121.29
Fieltro para tejados*	1.199	—————	2258.6
Paja de pino*	0.070	—————	240.277
<b>Revestimiento</b>			
Yeso de cemento, agregado de arena**	0.7206	0.837	1858.14
Revestimiento de yeso*	0.379	—————	1121.29
Yeso de arena/cemento/-cal, acondicionado	0.479	—————	1441.66
Perlita de yeso*	0.079	—————	400.462
Cartón o papel de yeso*	.069	—————	608.702
<b>Mampostería</b>			
Ladrillo ligero**	0.200	—————	800.923

## APÉNDICE B. TABLA DE CONDUCTIVIDADES TÉRMICAS

Material	Conductividad Térmica (W/mK)	Calor específico (kJ/kgK)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
Ladrillo, arcilla cocida*	0.922 - 1.124	0.795	2082.4
	0.807 - 0.980	0.795	1922.22
	0.706 - 0.850	0.795	1762.03
<b>Concretos</b>			
Concretos de arena y grava o agregados de piedra*	1.4413 - 2.882	—————	2402.77
Los concretos con >50 % de cuarzo o arena de cuarcita*	1.297 - 2.594	0.795 - 1.004	2242.58
Cemento/cal, mortero y estuco*	1.008 - 1.873	0.795 - 1.004	2082.4
	1.398	—————	1922.22
Concretos de espuma*	0.965	—————	1601.85
	0.778	—————	1922.22
	0.590	—————	1601.85
Concreto celular (secado al horno) *	0.201	0.837	432.4 - 800.9
Concreto polimérico*	1.643	—————	1954.25
Concreto de escoria*	0.776	—————	1874.16

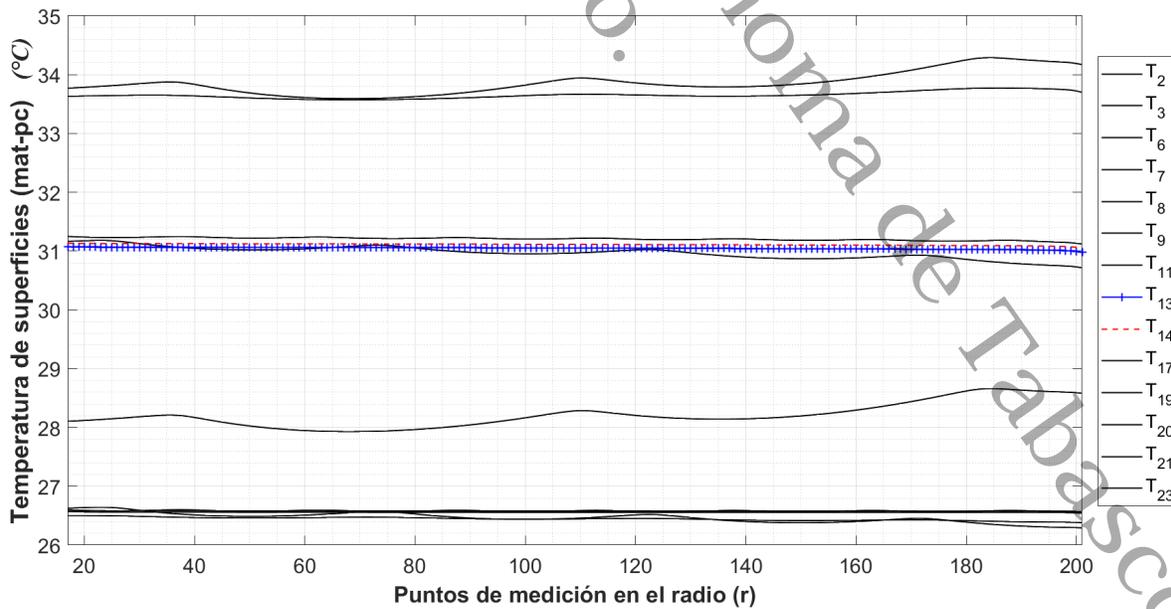
# Apéndice C

## Primera corrida de simulación

De acuerdo con lo mencionado en el apartado 3.1.3. Se Descartaron 44 simulaciones en la primera corrida de simulaciones del APCG, debido a que las los arreglos presentaban temperaturas de superficie entre la placa caliente y el material  $T_{Pc-mat}$  no homogéneas (*no lineales*). En la Figura C.1 se presenta una gráfica de las simulaciones con comportamiento no lineales.

**Figura C.1**

Simulaciones de la primera corrida con espesor  $ER_1$ .

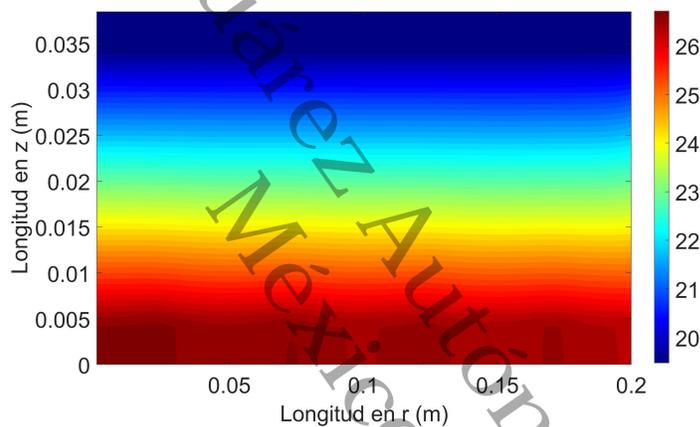


## C.1. Perfiles de temperaturas no homogéneos

Como se mencionó en el apartado 3.1.3.2, se descartaron simulaciones de arreglos del APCG, en el cual las Figuras C.2 y C.3, se observa que la temperatura no es homogénea. Por lo cual, para esta simulación se empleó un radio de las placas de  $200\text{ mm}$ , el espesor de la placa de aluminio de  $4\text{ mm}$  con un espesor del mensurado de  $30\text{ mm}$ , una distribución de resistencia  $48\text{ mm}$  en el interior de la placa caliente con un coeficiente convectivo de  $10\text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ , resaltando que, la conductividad térmica del material que se analizó fue de  $2\text{ W/mK}$ .

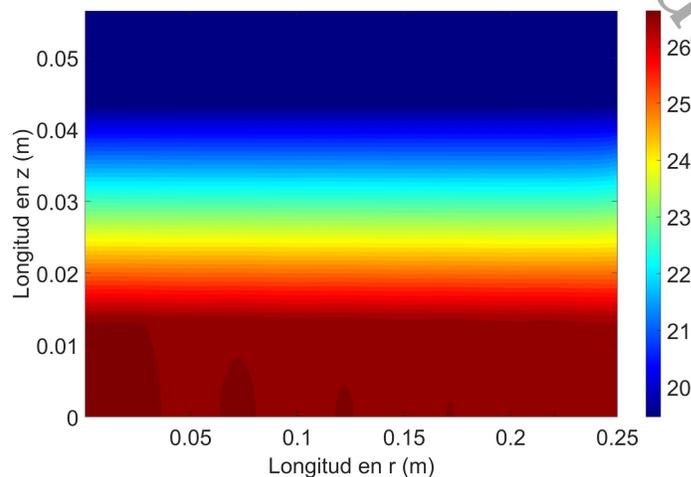
**Figura C.2**

Perfil de temperatura de la simulación nueve con  $\lambda$  de  $2\text{ W/mK}$  con espesor  $ER_1$ .



**Figura C.3**

Perfil de temperatura de la simulación 46 con  $\lambda$  de  $2\text{ W/mK}$ .



## Apéndice D

### Planos del APCG

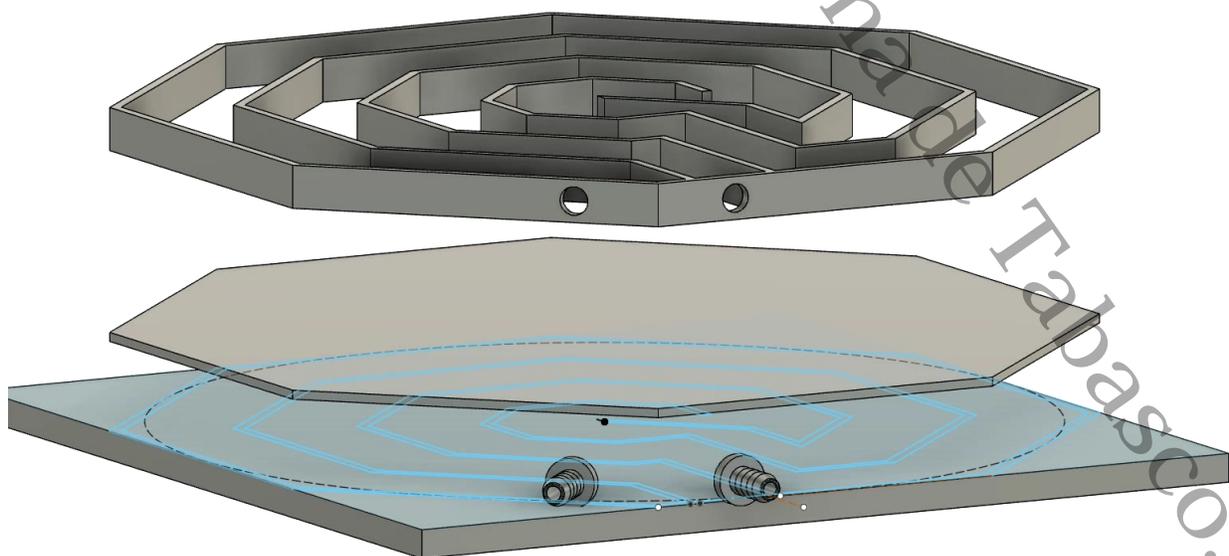
En este apartado se muestran los planos de los componentes del APCG que se mencionan en la sección de *Diseño del APCG 3.2.4.*

#### D.1. Plano de placa Fría

En la Figura D.1, se muestra la placa fría con vista explosionada.

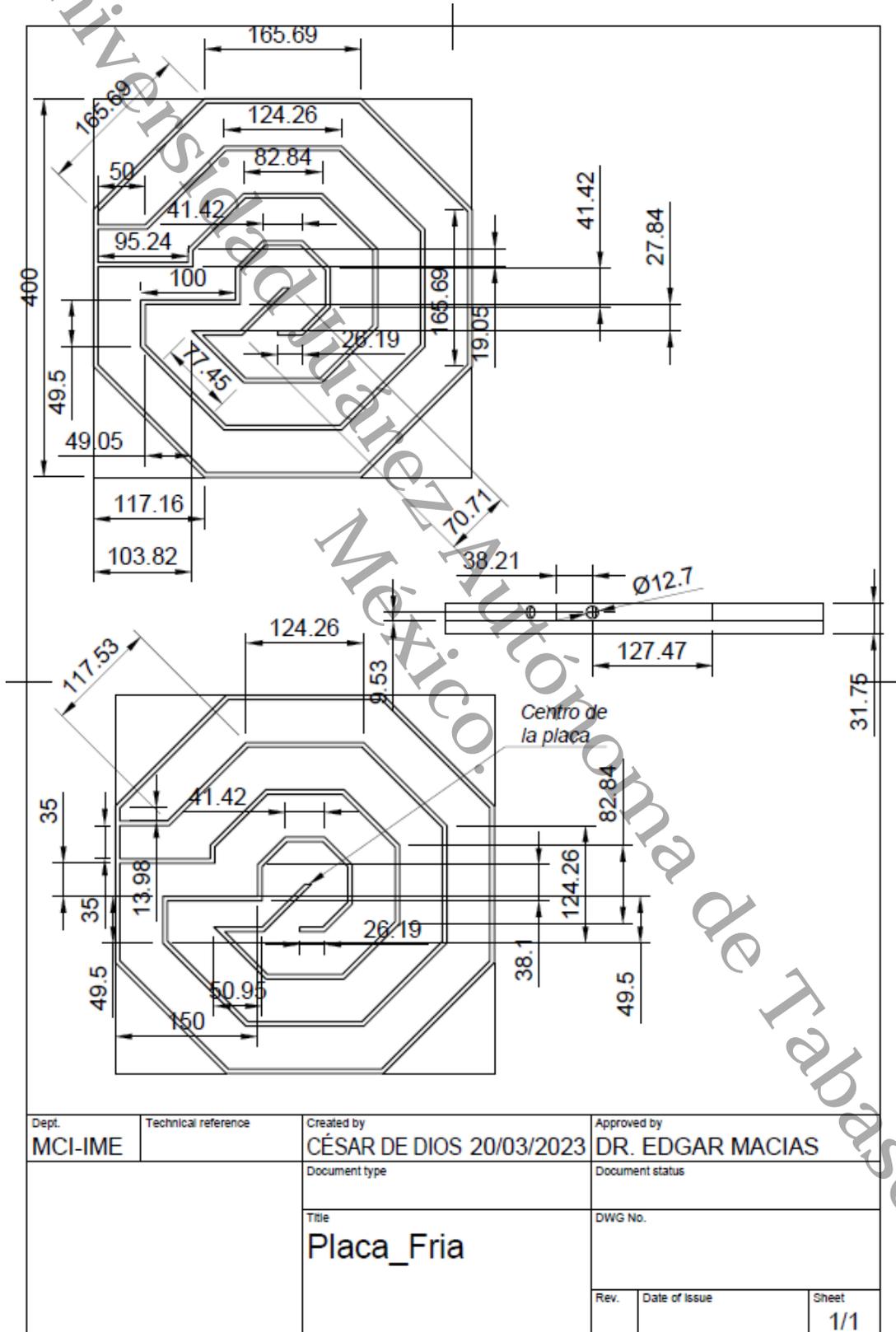
**Figura D.1**

Placa fría con vista explosionada.



**Figura D.2**

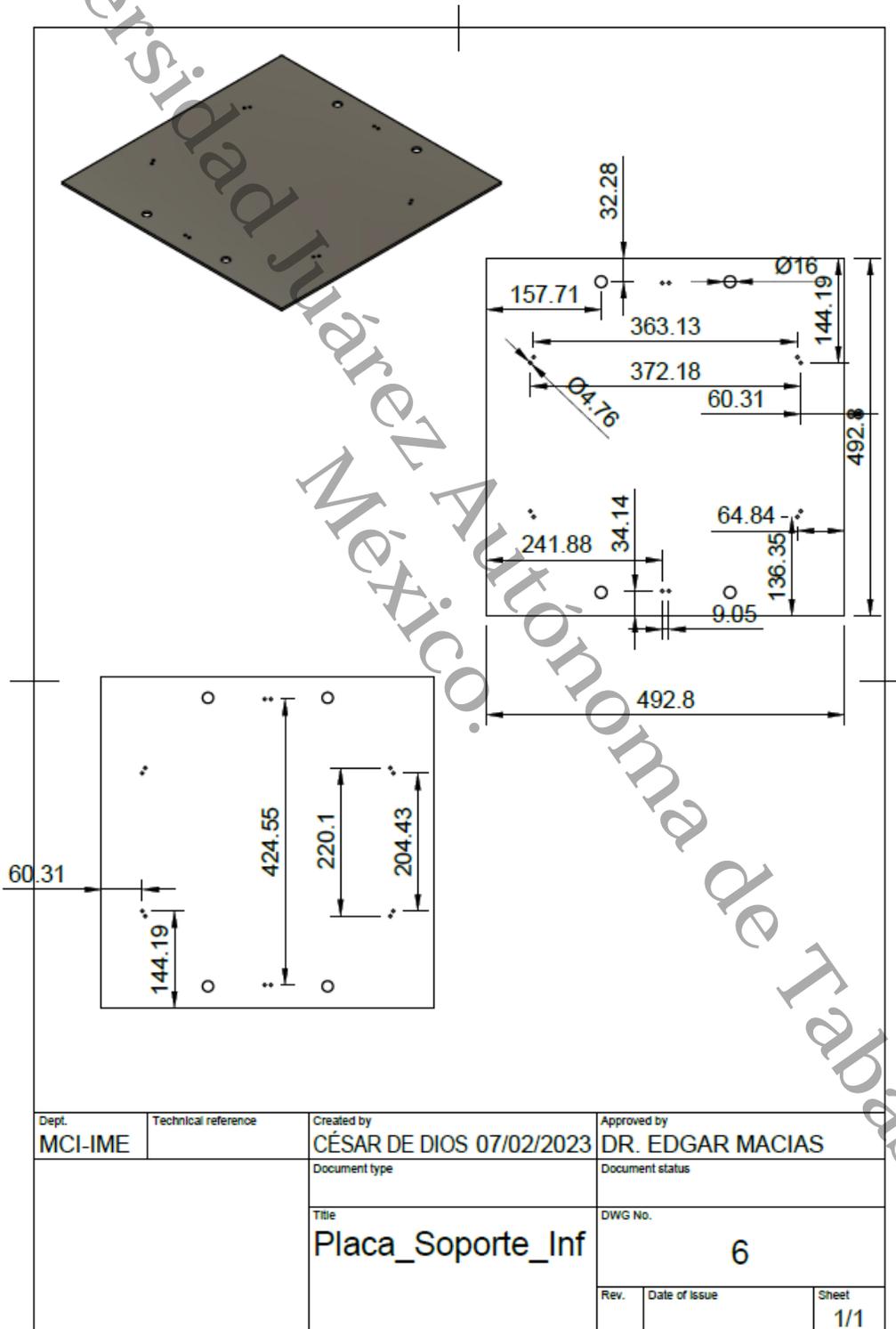
Plano de la placa fría



## D.2. Plano de la base cuadrada del APCG

**Figura D.3**

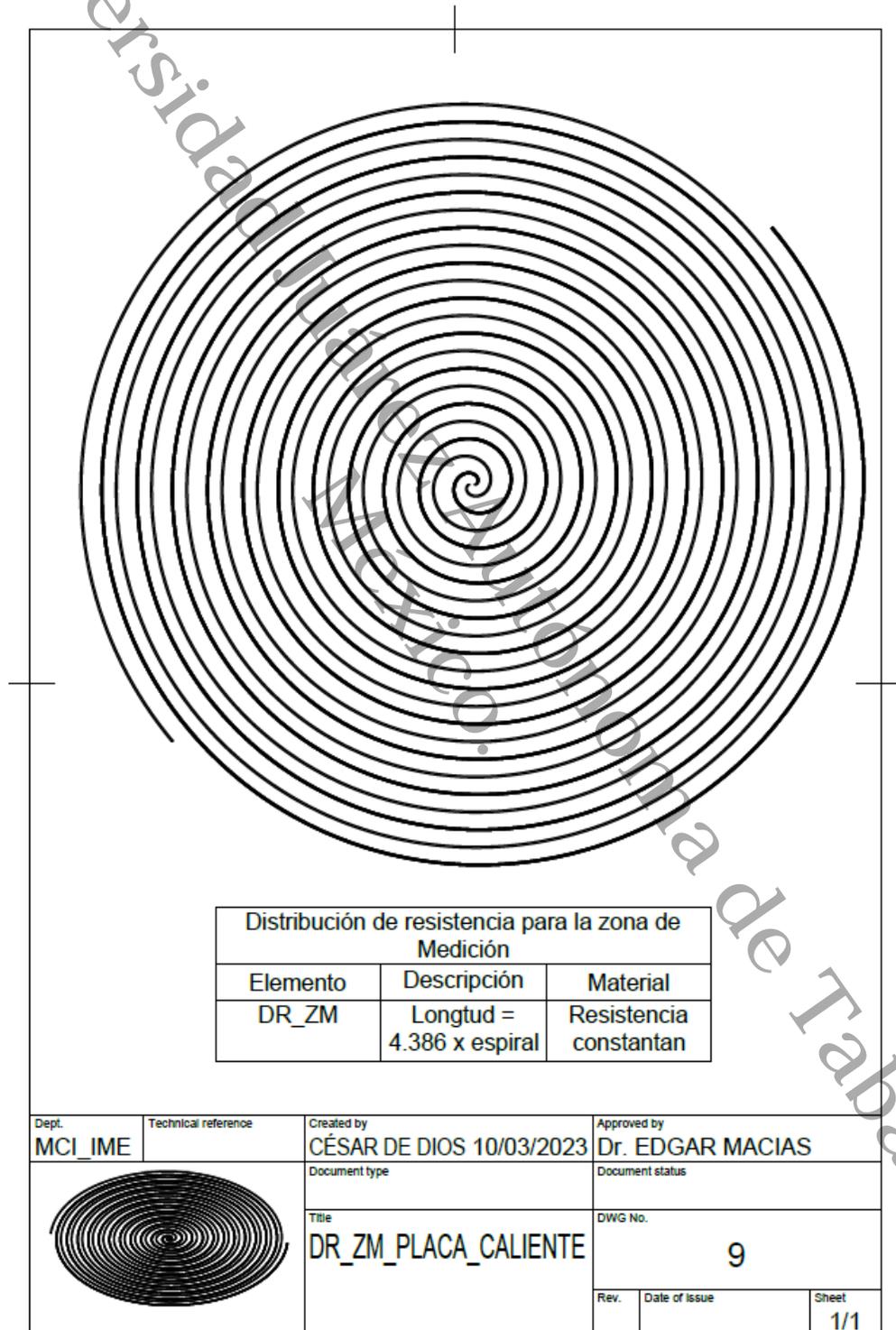
Plano de la base inferior del APCG.



### D.3. Plano de distribución de resistencias

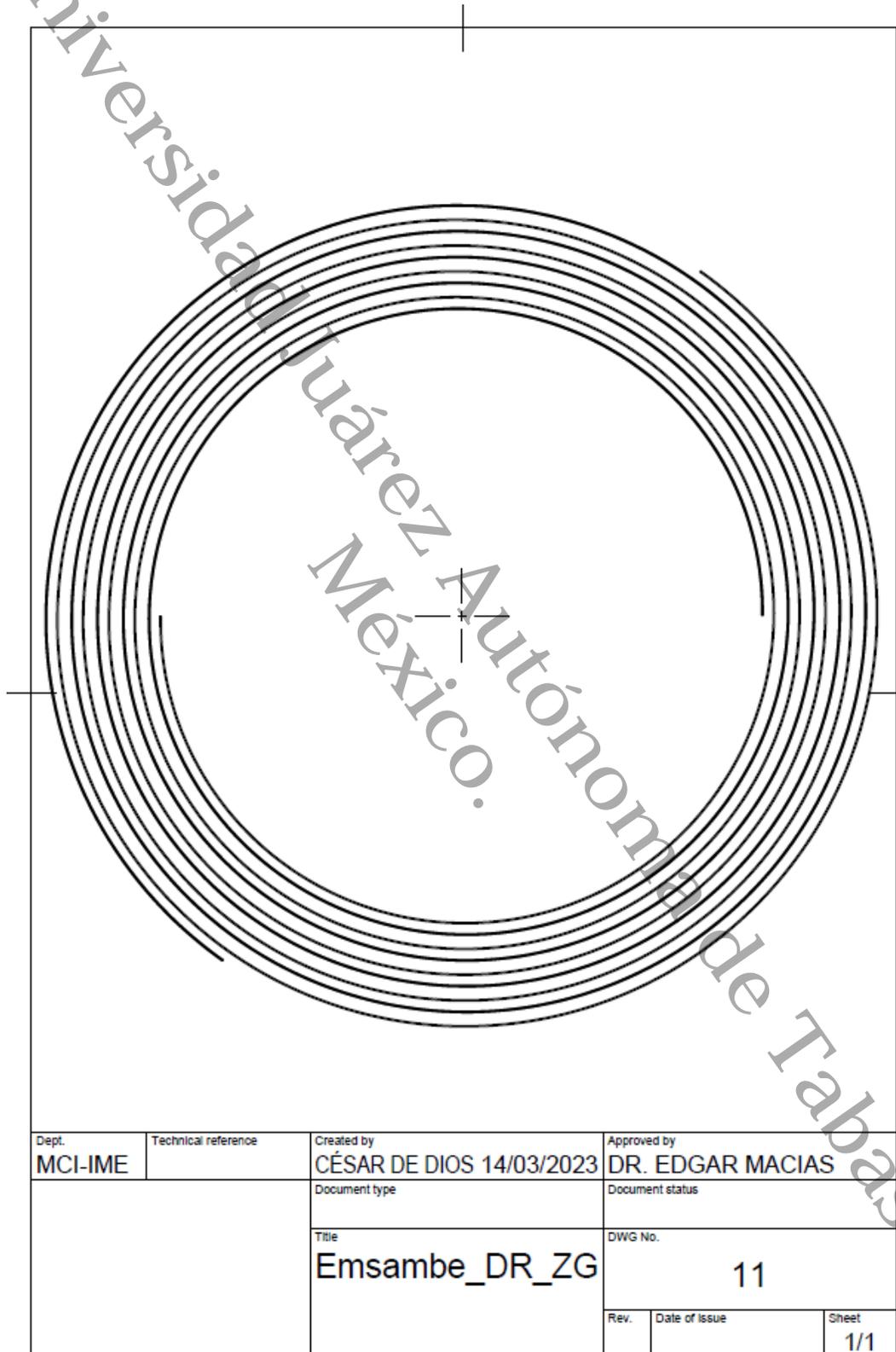
**Figura D.4**

Plano de distribución de resistencias, zona de medición.



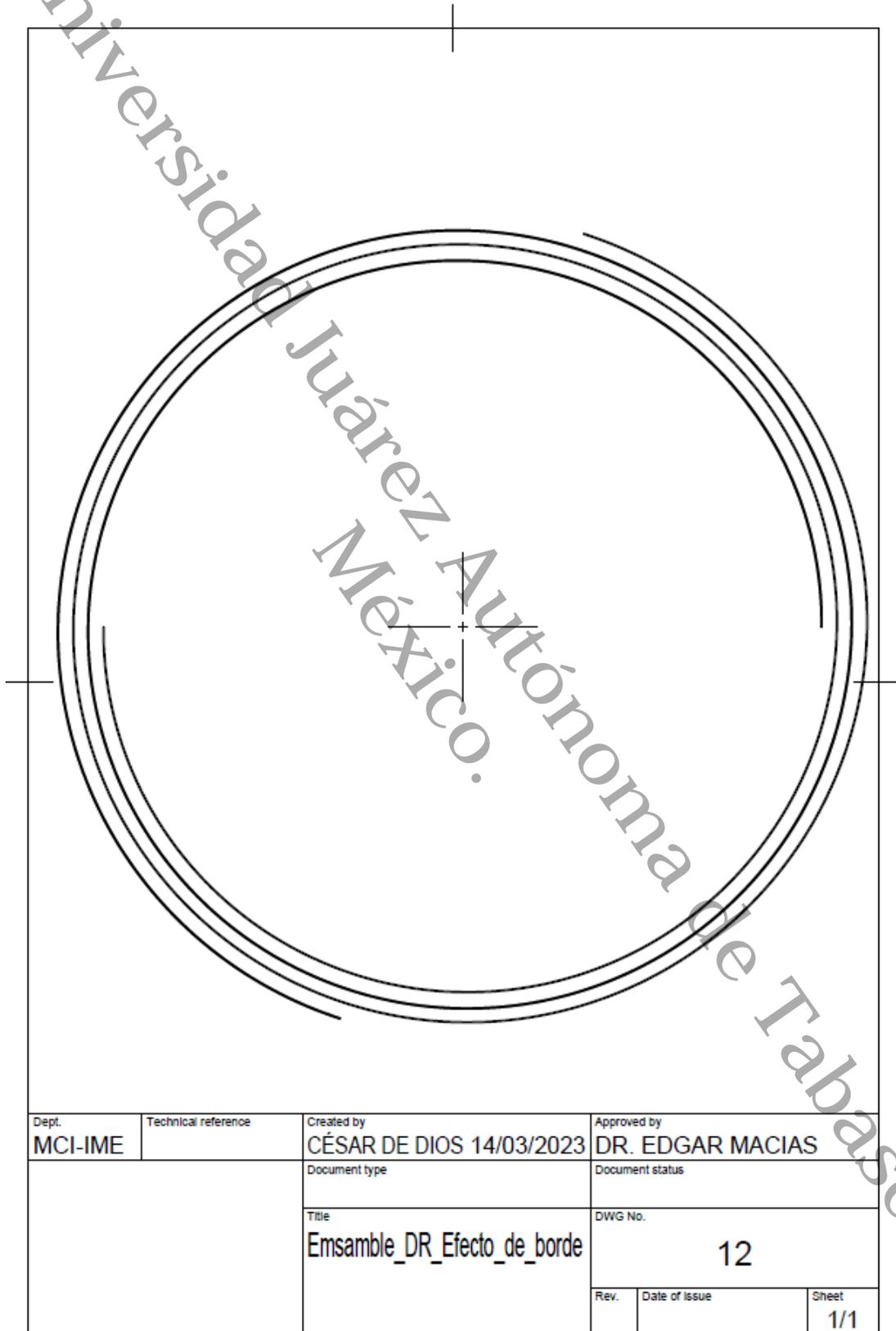
**Figura D.5**

Plano de distribución de resistencias, zona de guarda.



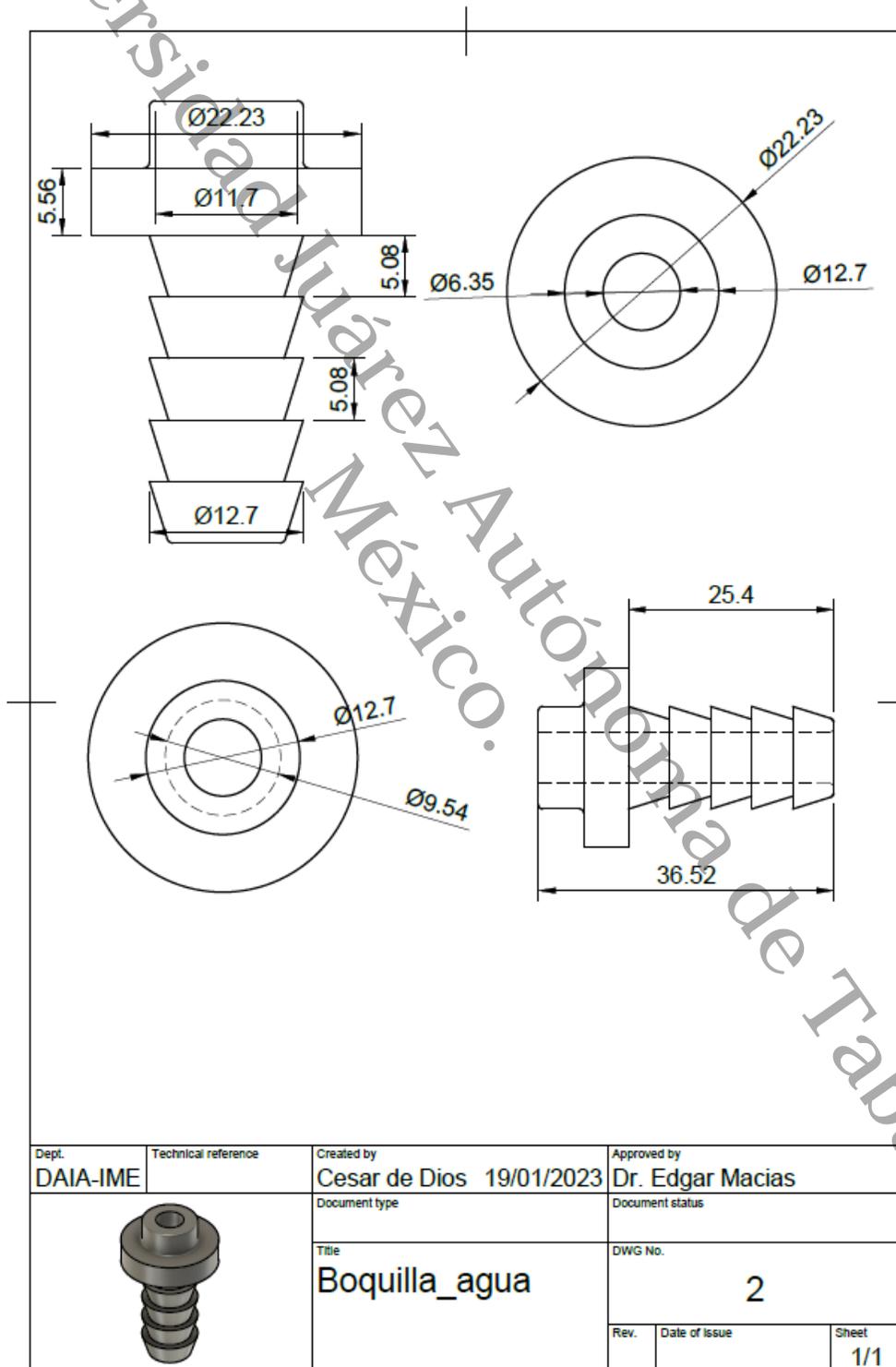
**Figura D.6**

Plano de distribución de resistencias, zona de efecto de borde.



### D.4. Plano de boquilla de la placa fría

**Figura D.7**  
Plano de boquilla de la placa fría.

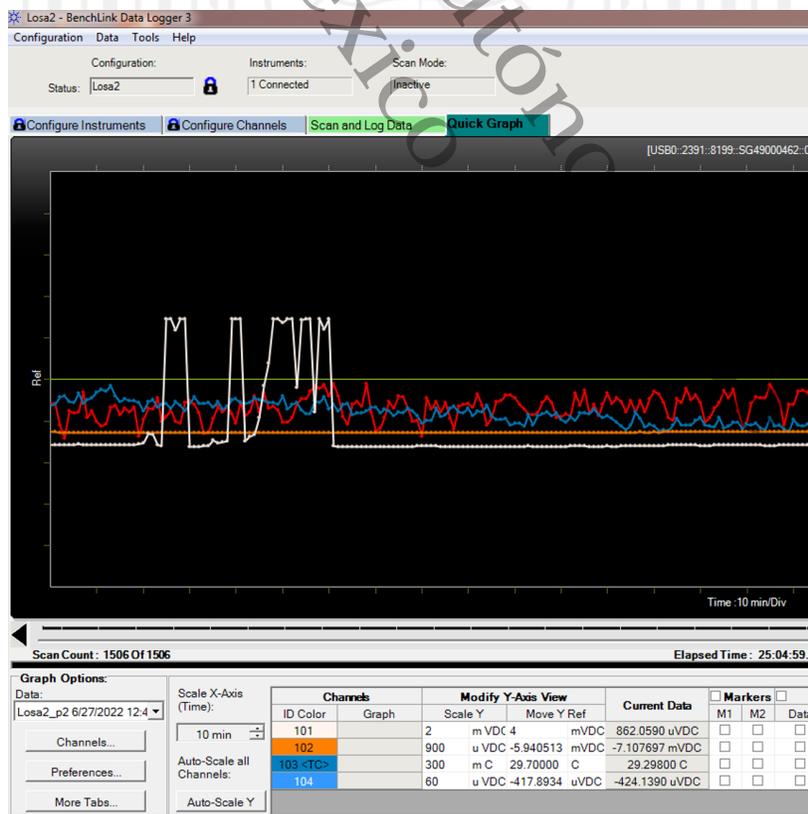


# Apéndice E

## Instrumentación del APCG

De acuerdo con el capítulo cuatro, para el almacenamiento de datos en tiempo real se ocupó el software Bench Link data Logger. Este sistema de adquisición de datos permitió conocer el momento cuando la temperatura de la prueba alcanzo el estado permanente.

**Figura E.1**  
Software Bench Link data Logger.



## Apéndice F

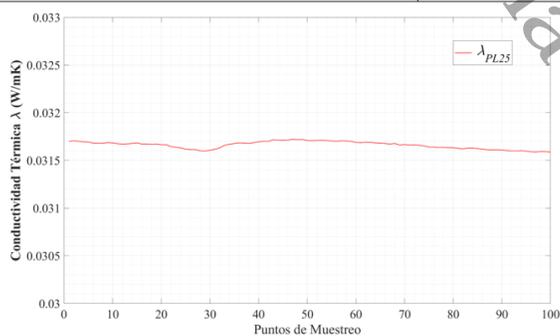
# Reportes de Conductividad Térmica

Como se mencionó en el capítulo seis (6.1.1), los resultados de la prueba PF25 se presentó mediante un reporte de medición de conductividad térmica aparente y los parámetros en el reporte son:

- Potencia Eléctrica Suministrada ( $W$ ).
- Voltaje suministrado ( $V$ ).
- Temperatura superior en la zona de medición ( $^{\circ}C$ ).
- Temperatura inferior en la zona de medición ( $^{\circ}C$ ).
- Temperatura en la zona Guarda ( $^{\circ}C$ ).
- Temperatura en la zona de borde ( $^{\circ}C$ ).
- Temperatura de superficie de placa fría inferior ( $^{\circ}C$ ).
- Temperatura de superficie de placa fría superior ( $^{\circ}C$ ).
- Área de medición ( $m^2$ ).
- Conductividad Térmica ( $W/mK$ ).
- Incertidumbre en la medición ( $W/mK$ ).
- Conductividad Térmica Aparente ( $W/mK$ ).

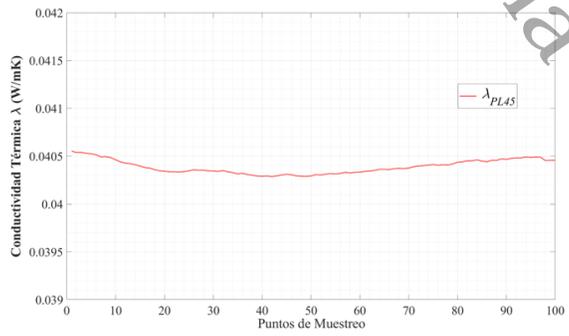
En esta sección se presenta los reportes de las mediciones de conductividad térmica.

## F.1. Reporte de conductividad térmica Prueba PL25

Folio: F001-22	
<b>Universidad Juárez Autónoma de Tabasco</b> <b>Laboratorio de Termofluidos</b> Cuerpo Académico, UJAT-CA-270	
<b>Reporte de Medición de Conductividad Térmica Aparente</b>	
<b>Operador de la Prueba:</b> César Augusto de Dios de la Cruz	<b>Numero de Prueba:</b> PL25
	<b>Duración de la Prueba:</b> 5 horas y 54 minutos
<b>TIPO DE MATERIAL:</b>	Lana mineral
<b>DIMENSIONES:</b>	Placa circular de 52.08 mm de espesor con 400 mm de diámetro
<b>FECHA DE PRUEBA DEL MATERIAL:</b>	Miércoles 6 de julio del 2023
<b>DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL APCG:</b> Aparato de placa caliente con guarda de doble lado de medición (APCG-001_UJAT_2023) con guardas aislantes en el exterior de las placas frías y guardas pasivas alrededor el dispositivo con orientación horizontal en las placas del APCG.	
<b>Procedimiento de Prueba:</b> Norma <b>NMX-C-189-ONNCEE-2010</b>	
<b>RESULTADOS EXPERIMENTALES A TEMPERATURA MEDIA DE 25 °C</b>	
Potencia eléctrica Suministrada (W)	0.7839
Voltaje suministrado (V)	2.9631
Temperatura superior en la zona de medición (°C)	32.7582
Temperatura inferior en la zona de medición (°C)	32.6121
Temperatura en la zona Guarda (°C)	32.7677
Temperatura en la zona de borde (°C)	32.7742
Temperatura de placa fría inferior (°C)	19.5346
Temperatura de placa fría superior (°C)	19.596
Área de medición (m <sup>2</sup> )	0.0490
Conductividad Térmica (W/mK)	0.0316
Incertidumbre en la medición (W/mK)	0.00013
Conductividad Térmica Aparente (W/mK)	0.0316 ± 0.44 %
 <p>Figura 1. Grafica de la conductividad Térmica Aparente</p>	
Jefe de Laboratorios <b>Dr. Edgar Vicente Macias Melo</b> Fenómenos de transporte en la optimización del uso de la energía en sistemas.	

Reporte de conductividad térmica de Lana Mineral (PL25).

## F.2. Reporte de conductividad térmica Prueba PL45

Folio: F001-22	
<b>Universidad Juárez Autónoma de Tabasco</b> <b>Laboratorio de Termofluidos</b> Cuerpo Académico, UJAT-CA-270	
<b>Reporte de Medición de Conductividad Térmica Aparente</b>	
<b>Operador de la Prueba:</b> César Augusto de Dios de la Cruz	<b>Numero de Prueba:</b> PL45
	<b>Duración de la Prueba:</b> 8 horas y 21 minutos
<b>TIPO DE MATERIAL:</b>	Lana mineral
<b>DIMENSIONES:</b>	Placa circular de 52.08 mm de espesor con 400 mm de diámetro
<b>FECHA DE PRUEBA DEL MATERIAL:</b>	Jueves 7 de julio del 2023
<b>DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL APCG:</b> Aparato de placa caliente con guarda de doble lado de medición (APCG-001_UJAT_2023) con guardas aislantes en el exterior de las placas frías y guardas pasivas alrededor el dispositivo con orientación horizontal en las placas del APCG.	
<b>Procedimiento de Prueba:</b> Norma <b>NMX-C-189-ONNCEE-2010</b>	
<b>RESULTADOS EXPERIMENTALES A TEMPERATURA MEDIA DE 25 °C</b>	
Potencia eléctrica Suministrada (W)	0.7943
Voltaje suministrado (V)	2.9827
Temperatura superior en la zona de medición (°C)	49.8219
Temperatura inferior en la zona de medición (°C)	49.6426
Temperatura en la zona Guarda (°C)	49.8227
Temperatura en la zona de borde (°C)	49.8552
Temperatura de placa fría inferior (°C)	39.2591
Temperatura de placa fría superior (°C)	39.362
Área de medición (m <sup>2</sup> )	0.0490
Conductividad Térmica (W/mK)	0.0403
Incertidumbre en la medición (W/mK)	0.00021
Conductividad Térmica Aparente (W/mK)	0.0403 ± 0.52 %
	
Figura 1. Grafica de la conductividad Térmica Aparente	
Jefe de Laboratorios <b>Dr. Edgar Vicente Macias Melo</b> Fenómenos de transporte en la optimización del uso de la energía en sistemas.	

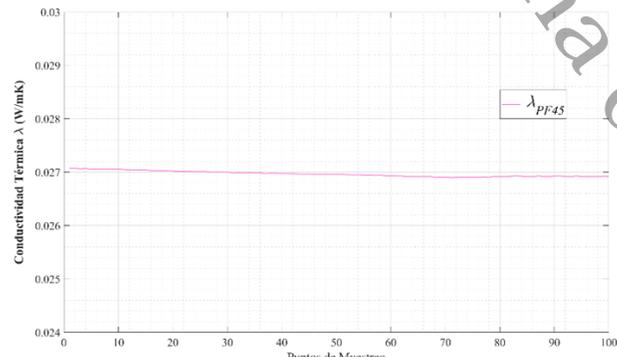
Reporte de conductividad térmica de Lana Mineral (PL45).

### F.3. Reporte de conductividad térmica Prueba PL65

Folio: F001-22	
<b>Universidad Juárez Autónoma de Tabasco</b> <b>Laboratorio de Termofluidos</b> Cuerpo Académico, UJAT-CA-270	
<b>Reporte de Medición de Conductividad Térmica Aparente</b>	
<b>Operador de la Prueba:</b> César Augusto de Dios de la Cruz	<b>Numero de Prueba:</b> PL65
	<b>Duración de la Prueba:</b> 8 horas y 42 minutos
<b>TIPO DE MATERIAL:</b>	Lana mineral
<b>DIMENSIONES:</b>	Placa circular de 52.08 mm de espesor con 400 mm de diámetro
<b>FECHA DE PRUEBA DEL MATERIAL:</b>	Lunes 24 de julio del 2023
<b>DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL APCG:</b> Aparato de placa caliente con guarda de doble lado de medición (APCG-001_UJAT_2023) con guardas aislantes en el exterior de las placas frías y guardas pasivas alrededor el dispositivo con orientación horizontal en las placas del APCG.	
<b>Procedimiento de Prueba:</b> Norma <b>NMX-C-189-ONNCEE-2010</b>	
<b>RESULTADOS EXPERIMENTALES A TEMPERATURA MEDIA DE 25 °C</b>	
Potencia eléctrica Suministrada (W)	0.7839
Voltaje suministrado (V)	2.9824
Temperatura superior en la zona de medición (°C)	68.5272
Temperatura inferior en la zona de medición (°C)	68.2293
Temperatura en la zona Guarda (°C)	68.5471
Temperatura en la zona de borde (°C)	68.6143
Temperatura de placa fría inferior (°C)	59.0756
Temperatura de placa fría superior (°C)	59.1979
Área de medición (m <sup>2</sup> )	0.0490
Conductividad Térmica (W/mK)	0.0455
Incertidumbre en la medición (W/mK)	0.00026
Conductividad Térmica Aparente (W/mK)	0.0455 ± 0.57 %
<p>Figura 1. Grafica de la conductividad Térmica Aparente</p>	
Jefe de Laboratorios <b>Dr. Edgar Vicente Macias Melo</b> Fenómenos de transporte en la optimización del uso de la energía en sistemas.	

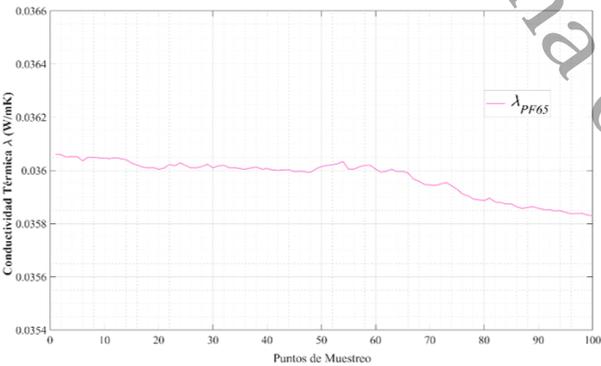
Reporte de conductividad térmica de Lana Mineral (PL65).

**F.4. Reporte de conductividad térmica Prueba PF45**

Folio: F001-22	
<b>Universidad Juárez Autónoma de Tabasco</b> <b>Laboratorio de Termofluidos</b> Cuerpo Académico, UJAT-CA-270	
<b>Reporte de Medición de Conductividad Térmica Aparente</b>	
<b>Operador de la Prueba:</b> César Augusto de Dios de la Cruz	<b>Numero de Prueba:</b> PF45
	<b>Duración de la Prueba:</b> 6 horas y 22 minutos
<b>TIPO DE MATERIAL:</b>	Lana mineral
<b>DIMENSIONES:</b>	Placa circular de 27.58 mm de espesor con 400 mm de diámetro
<b>FECHA DE PRUEBA DEL MATERIAL:</b>	miércoles 26 de julio del 2023
<b>DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL APCG:</b> Aparato de placa caliente con guarda de doble lado de medición (APCG-001, UJAT_2023) con guardas aislantes en el exterior de las placas frías y guardas pasivas alrededor el dispositivo con orientación horizontal en las placas del APCG.	
<b>Procedimiento de Prueba:</b> Norma <b>NMX-C-189-ONNCEE-2010</b>	
<b>RESULTADOS EXPERIMENTALES A TEMPERATURA MEDIA DE 25 °C</b>	
Potencia eléctrica Suministrada (W)	1.2021
Voltaje suministrado (V)	3.6692
Temperatura superior en la zona de medición (°C)	51.943
Temperatura inferior en la zona de medición (°C)	51.6367
Temperatura en la zona Guarda (°C)	51.9357
Temperatura en la zona de borde (°C)	51.9485
Temperatura de placa fría inferior (°C)	39.5734
Temperatura de placa fría superior (°C)	38.9618
Área de medición (m <sup>2</sup> )	0.0490
Conductividad Térmica (W/mK)	0.0269
Incertidumbre en la medición (W/mK)	0.00011
Conductividad Térmica Aparente (W/mK)	0.0269 ± 0.37 %
 <p>Figura 1. Grafica de la conductividad Térmica Aparente</p>	
Jefe de Laboratorios <b>Dr. Edgar Vicente Macias Melo</b> Fenómenos de transporte en la optimización del uso de la energía en sistemas.	

Reporte de conductividad térmica del poliestireno extruido (PF45).

## F.5. Reporte de conductividad térmica Prueba PF65

Folio: F001-22	
<b>Universidad Juárez Autónoma de Tabasco</b> <b>Laboratorio de Termofluidos</b> Cuerpo Académico, UJAT-CA-270	
<b>Reporte de Medición de Conductividad Térmica Aparente</b>	
<b>Operador de la Prueba:</b> César Augusto de Dios de la Cruz	<b>Numero de Prueba:</b> PF65
	<b>Duración de la Prueba:</b> 5 horas y 52 minutos
<b>TIPO DE MATERIAL:</b>	Lana mineral
<b>DIMENSIONES:</b>	Placa circular de 27.58 mm de espesor con 400 mm de diámetro
<b>FECHA DE PRUEBA DEL MATERIAL:</b>	Jueves 27 de julio del 2023
<b>DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL APCG:</b> Aparato de placa caliente con guarda de doble lado de medición (APCG-001_UJAT_2023) con guardas aislantes en el exterior de las placas frías y guardas pasivas alrededor el dispositivo con orientación horizontal en las placas del APCG.	
<b>Procedimiento de Prueba:</b> Norma <b>NMX-C-189-ONNCEE-2010</b>	
<b>RESULTADOS EXPERIMENTALES A TEMPERATURA MEDIA DE 25 °C</b>	
Potencia eléctrica Suministrada (W)	1.2022
Voltaje suministrado (V)	3.6694
Temperatura superior en la zona de medición (°C)	68.7061
Temperatura inferior en la zona de medición (°C)	68.3962
Temperatura en la zona Guarda (°C)	68.7069
Temperatura en la zona de borde (°C)	68.7614
Temperatura de placa fría inferior (°C)	59.5102
Temperatura de placa fría superior (°C)	58.8151
Área de medición (m <sup>2</sup> )	0.0490
Conductividad Térmica (W/mK)	0.0359
Incertidumbre en la medición (W/mK)	0.0002
Conductividad Térmica Aparente (W/mK)	0.0359 ± 0.55 %
	
Figura 1. Grafica de la conductividad Térmica Aparente	
Jefe de Laboratorios	
<b>Dr. Edgar Vicente Macias Melo</b>	
Fenómenos de transporte en la optimización del uso de la energía en sistemas.	

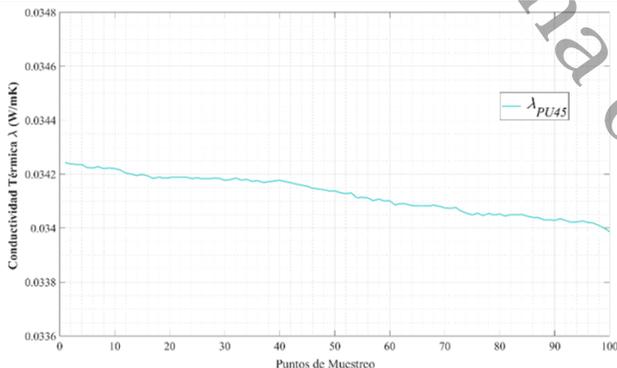
Reporte de conductividad térmica del poliestireno extruido (PF65).

**F.6. Reporte de conductividad térmica Prueba PU25**

Folio: F001-22	
<b>Universidad Juárez Autónoma de Tabasco</b> <b>Laboratorio de Termofluidos</b> Cuerpo Académico, UJAT-CA-270	
<b>Reporte de Medición de Conductividad Térmica Aparente</b>	
<b>Operador de la Prueba:</b> César Augusto de Dios de la Cruz	<b>Numero de Prueba:</b> PU25
	<b>Duración de la Prueba:</b> 5 horas y 52 minutos
<b>TIPO DE MATERIAL:</b>	Lana mineral
<b>DIMENSIONES:</b>	Placa circular de 27.58 mm de espesor con 400 mm de diámetro
<b>FECHA DE PRUEBA DEL MATERIAL:</b>	Jueves 27 de julio del 2023
<b>DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL APCG:</b> Aparato de placa caliente con guarda de doble lado de medición (APCG-001 UJAT_2023) con guardas aislantes en el exterior de las placas frías y guardas pasivas alrededor el dispositivo con orientación horizontal en las placas del APCG.	
<b>Procedimiento de Prueba:</b> Norma <b>NMX-C-189-ONNCEE-2010</b>	
<b>RESULTADOS EXPERIMENTALES A TEMPERATURA MEDIA DE 25 °C</b>	
Potencia eléctrica Suministrada (W)	1.400
Voltaje suministrado (V)	3.9603
Temperatura superior en la zona de medición (°C)	31.6122
Temperatura inferior en la zona de medición (°C)	31.3732
Temperatura en la zona Guarda (°C)	31.616
Temperatura en la zona de borde (°C)	31.6152
Temperatura de placa fría inferior (°C)	19.8143
Temperatura de placa fría superior (°C)	19.2613
Área de medición (m <sup>2</sup> )	0.0490
Conductividad Térmica (W/mK)	0.0329
Incertidumbre en la medición (W/mK)	0.00015
Conductividad Térmica Aparente (W/mK)	0.0329 ± 0.30 %
Figura 1. Grafica de la conductividad Térmica Aparente	
Jefe de Laboratorios <b>Dr. Edgar Vicente Macias Melo</b> Fenómenos de transporte en la optimización del uso de la energía en sistemas.	

Reporte de conductividad térmica del poliestireno expandido (PU25).

## F.7. Reporte de conductividad térmica Prueba PU45

Folio: F001-22	
<b>Universidad Juárez Autónoma de Tabasco</b> <b>Laboratorio de Termofluidos</b> Cuerpo Académico, UJAT-CA-270	
<b>Reporte de Medición de Conductividad Térmica Aparente</b>	
<b>Operador de la Prueba:</b> César Augusto de Dios de la Cruz	<b>Numero de Prueba:</b> PU45
	<b>Duración de la Prueba:</b> 8 horas y 27 minutos
<b>TIPO DE MATERIAL:</b>	Lana mineral
<b>DIMENSIONES:</b>	Placa circular de 27.58 mm de espesor con 400 mm de diámetro
<b>FECHA DE PRUEBA DEL MATERIAL:</b>	viernes 28 de julio del 2023
<b>DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL APCG:</b> Aparato de placa caliente con guarda de doble lado de medición (APCG-001 UJAT 2023) con guardas aislantes en el exterior de las placas frías y guardas pasivas alrededor el dispositivo con orientación horizontal en las placas del APCG.	
<b>Procedimiento de Prueba:</b> Norma <b>NMX-C-189-ONNCEE-2010</b>	
<b>RESULTADOS EXPERIMENTALES A TEMPERATURA MEDIA DE 25 °C</b>	
Potencia eléctrica Suministrada (W)	1.3988
Voltaje suministrado (V)	3.9581
Temperatura superior en la zona de medición (°C)	50.9909
Temperatura inferior en la zona de medición (°C)	50.6828
Temperatura en la zona Guarda (°C)	50.9827
Temperatura en la zona de borde (°C)	50.9918
Temperatura de placa fría inferior (°C)	39.6808
Temperatura de placa fría superior (°C)	38.9627
Área de medición (m <sup>2</sup> )	0.0490
Conductividad Térmica (W/mK)	0.0341
Incertidumbre en la medición (W/mK)	0.00016
Conductividad Térmica Aparente (W/mK)	0.0341 ± 0.30 %
	
Figura 1. Grafica de la conductividad Térmica Aparente	
<b>Jefe de Laboratorios</b> <b>Dr. Edgar Vicente Macias Melo</b> Fenómenos de transporte en la optimización del uso de la energía en sistemas.	

Reporte de conductividad térmica del poliestireno expandido (PU45).

## F.8. Reporte de conductividad térmica Prueba PU65

Folio: F001-22	
<b>Universidad Juárez Autónoma de Tabasco</b> <b>Laboratorio de Termofluidos</b> Cuerpo Académico, UJAT-CA-270	
<b>Reporte de Medición de Conductividad Térmica Aparente</b>	
<b>Operador de la Prueba:</b> César Augusto de Dios de la Cruz	<b>Numero de Prueba:</b> PU65
	<b>Duración de la Prueba:</b> 7 horas y 27 minutos
<b>TIPO DE MATERIAL:</b>	Lana mineral
<b>DIMENSIONES:</b>	Placa circular de 27.58 mm de espesor con 400 mm de diámetro
<b>FECHA DE PRUEBA DEL MATERIAL:</b>	Lunes 31 de julio del 2023
<b>DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL APCG:</b> Aparato de placa caliente con guarda de doble lado de medición (APCG-001_UJAT_2023) con guardas aislantes en el exterior de las placas frías y guardas pasivas alrededor el dispositivo con orientación horizontal en las placas del APCG.	
<b>Procedimiento de Prueba:</b> Norma <b>NMX-C-189-ONNCEE-2010</b>	
<b>RESULTADOS EXPERIMENTALES A TEMPERATURA MEDIA DE 25 °C</b>	
Potencia eléctrica Suministrada (W)	1.3991
Voltaje suministrado (V)	3.9585
Temperatura superior en la zona de medición (°C)	68.293
Temperatura inferior en la zona de medición (°C)	67.9238
Temperatura en la zona Guarda (°C)	68.3061
Temperatura en la zona de borde (°C)	68.382
Temperatura de placa fría inferior (°C)	59.556
Temperatura de placa fría superior (°C)	58.6842
Área de medición (m <sup>2</sup> )	0.0490
Conductividad Térmica (W/mK)	0.0437
Incertidumbre en la medición (W/mK)	0.00025
Conductividad Térmica Aparente (W/mK)	0.0437 ± 0.57 %
Figura 1. Grafica de la conductividad Térmica Aparente	
Jefe de Laboratorios	
<b>Dr. Edgar Vicente Macias Melo</b>	
Fenómenos de transporte en la optimización del uso de la energía en sistemas.	

Reporte de conductividad térmica del poliestireno expandido (PU65).

<b>Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional</b>	
<b>Título de Tesis:</b>	Desarrollo y Caracterización de un Dispositivo para Determinar la Conductividad Térmica de los Materiales Homogéneos de Construcción
<b>Autor de la Tesis:</b>	César Augusto de Dios de la Cruz
<b>ORCID:</b>	<a href="https://orcid.org/0009-0008-6030-2912">https://orcid.org/0009-0008-6030-2912</a>
<b>Resumen de la Tesis:</b>	<p>En este trabajo, se presenta el desarrollo y caracterización de un dispositivo experimental para determinar la Conductividad Térmica de Materiales Homogéneos de Construcción (CTMHC) considerando modelación en CFD y requerimientos normativos. Para determinar la conductividad térmica se diseñó, construyó e instrumentó un aparato de Placa Caliente con Guarda (APCG). El método de placa caliente con guarda es un método primario en estado estacionario. El APCG consta de una unidad de calentamiento, dos especímenes de muestra y dos unidades de enfriamiento. Las muestras utilizadas en el estudio fueron poliestireno extruido (Foamular), lana mineral y poliestireno expandido (Unicel). El comportamiento de las temperaturas en los materiales de muestras entre la placa fría (TPF) y la placa caliente (TPC) se midieron con la finalidad de determinar la conductividad térmica en tres valores de temperatura media de operación de las muestras (pruebas a 25°C, 45°C y 65°C). El diseño de las placas del APCG se realizó mediante un código computacional desarrollado en MATLAB, de carácter CFD, para establecer la geometría y la distancia de la distribución de la resistencia eléctrica en la placa caliente. Como resultado del diseño se obtuvieron temperaturas homogéneas con una distancia entre resistencia de 6 mm, espesor de la placa caliente de 10 mm, y radios de las placas de 200 mm. Se realizaron nueve pruebas de conductividad térmica con valores en el intervalo de 0,0253 a 0,0455 W/m°C. Simultáneamente, se realizó un análisis de incertidumbre para determinar la variable que afecta más en la medición, dando como resultado una incertidumbre de <math>\pm 2,19</math> % respecto al material termo aislante Foamular® como material de referencia. Por otro lado, se realizó un análisis de sensibilidad y se encontró que la variable de mayor afectación en las mediciones es el voltaje que es suministrado a la placa caliente. Como pudo observarse, la variación de temperatura de prueba tuvo un efecto sobre la conductividad térmica obtenida, así como, en los valores de la incertidumbre. Respecto a la variación de la temperatura de prueba, la conductividad térmica en general vario de 24,71 – 30,55 %, siendo el poliestireno expandido (Unicel) el que presento el menor porcentaje de variación.</p>
<b>Palabras claves de la Tesis:</b>	Conductividad Térmica, APCG, Foamular, Incertidumbre, Modelación CFD.
<b>Referencias citadas:</b>	<p>[1] Iberdrola. (2021, April 22). Evolución población mundial. Iberdrola: Iberdrola. <a href="https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/evolucion-poblacion-mundial">https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/evolucion-poblacion-mundial</a></p> <p>[2] Sáez, K. C. (2010). Impactos de las islas térmicas o islas de calor urbano, en el ambiente y la salud humana: Análisis estacional comparativo: Caracas, octubre-2009, marzo- 2010.</p> <p>[3] Yang, L., Yan, H., and Lam, J. C. (2014). Thermal comfort and building energy consumption implications - a review. Applied Energy, 115:164–173.</p> <p>[4] Wang, Y., Ma, C., Liu, Y., Wang, D., Liu, J. (2018). A model for the effective thermal conductivity of moist porous building materials based on fractal theory. International Journal of Heat and Mass Transfer, 125:387–399.</p> <p>[5] Kreith, F., M., M. R., and S., B. M. (2011). Principios de Transferencia de Calor, volume 7. Cengage Learning, septime edition.</p>

[6] Bergman, T. L., Bergman, T. L., Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Lavine, A. S. (2011).

Fundamentals of Heat and Mass Transfer 7th Edition. John Wiley and Sons, Incorporated, 7 editions.

[7] Xamán, J. P. (2016). Dinámica de Fluidos Computacional para Ingenieros. Palibrio, primera edición, 7 2016. ISBN 978-1-5065-0904-4. México.

[8] Schmid, W., Lazos Martínez, R., Marqués, E., Schmid, W., & Lazos, R. (2000). Guía para estimar la incertidumbre de la medición / CENAM / WSchmid y RLazos / mayo 2000 Centro Nacional de Metrología Guía para Estimar la Incertidumbre de la Medición de 2000. [https://paginaspersonales.unam.mx/app/webroot/files/5404/GUIAPARAESTI MARLA INCERTIDUMBRE\(CENAM\) 26566.pdf](https://paginaspersonales.unam.mx/app/webroot/files/5404/GUIAPARAESTI%20MARLA%20INCERTIDUMBRE(CENAM)_26566.pdf)

[9] Delgado, H., Guadalupe, A., Itandehui, E., Peña, M., Salazar, A. P., Flores, M. F. (2005). Estimación de la incertidumbre en métodos de ensayos de construcción. ISSN 0188-7297 Certificación ISO 9001:2000, Laboratorios acreditados por EMA. <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnicapt275.pdf>

[10] ONNCCE (2010). Norma NMX-C-189-ONNCCE-2010, determinación de la transmisión térmica (aparato de placa caliente aislada).

[11] Owens Corning. (2022). Ficha técnica de aislamiento térmico de espuma rígida de poliestireno extruido (XPS), 9 2022. URL <https://owenscorning.com.mx/wp-content/uploads/2023/03/Ficha-Foamular-Residencial-ONNCCE-2023.pdf>.

[12] ASTM C518-21. Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. (2021). Astm.org. <https://www.astm.org/c0518-21.html>

[13] NMX-C-189-ONNCCE-2010. Industria de la construcción-materiales termoaislantes-determinación de la transmisión térmica (aparato de placa caliente aislada (esta norma cancela a la NMX-C-189-1984). ONNCCE, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.

[14] ASTM E230/E230M-17. Standard Specification for Temperature-Electromotive Force (emf) Tables for Standardized Thermocouples. (2024). Astm.org. [https://www.astm.org/e0230\\_e0230m-17.html](https://www.astm.org/e0230_e0230m-17.html)

[15] Xamán, J.P., Lira Cortes, L., Chávez Chena, Y. (1999). Análisis de la transferencia de calor de un aparato para determinar la conductividad térmica de materiales aislantes, 9.

[16] Fuentes Martínez V. (2003) Sistema primario de medición de conductividad térmica de aislantes térmicos. diseño y construcción, 5.

[17] Bentancour G. M., Lira Cortes L., Xamán Villaseñor J. P. (2005). Diseño, construcción y caracterización de un instrumento de placas planas paralelas con guarda con doble lado de medición y con cámara de ambiente controlado para determinar la conductividad térmica de materiales sólidos. Tesis de Maestría, CENIDET 002-2002.

[18] NORMA Oficial Mexicana NOM-018-ENER-2011, Aislantes térmicos para edificaciones. (2024). Dof.gob.mx. <https://dof.gob.mx/normasOficiales/4576/sener/sener.htm>

[19] ASHRAE (2021). Refrigerating and Air-Conditioning Engineers American Society of Heating. 2021 ASH- RAE Handbook Fundamentals, Volume 1, Inch-pound edition, ISBN 9781947192898. URL [www.ashrae.org](http://www.ashrae.org).

[20] Baldinelli G., Bianchi F., Gendelis S., Jakovics A., Morini G. L., Falcioni S., Fantucci S., Serra V., Navacerrada M. A., Díaz C., Libbra A., Muscio A., Asdrubali F. (2019). Thermal conductivity measurement of insulating innovative building materials by hot plate and heat flow meter devices: A round robin test. *International Journal of Thermal Sciences*, 139:25–35, 5 2019. ISSN 12900729. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2019.01.037.

[21] Jannot Y., Degiovanni A., Grigorova-Moutiers V., Godefroy J. (2017). A passive guard for low thermal conductivity measurement of small samples by the hot plate method. *Measurement Science and Technology*, 28, 1 2017. ISSN 13616501. doi: 10.1088/1361-6501/28/1/015008.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.