

**CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES TÉRMICAS Y MECÁNICAS DE
AISLAMIENTOS EN BASE A VACÍO EN CONFIGURACIÓN PLACA PLANA**

ANDRES MAURICIO MARTINEZ MORENO

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
DIVISION DE INGENIERIAS
BOGOTÁ D.C.**

2013

**CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES TÉRMICAS Y MECÁNICAS DE
AISLAMIENTOS EN BASE A VACÍO EN CONFIGURACIÓN PLACA PLANA**

MARTINEZ MORENO ANDRES MAURICIO

**Trabajo de Grado en la modalidad de solución de un problema de
ingeniería para optar al título de Ingeniero Mecánico**

Director

Ing. Jair Alexander Ladino Ospina

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA

DIVISION DE INGENIERIAS

BOGOTÁ D.C.

2013

CONTENIDO

Pág.

RESUMEN.....	10
INTRODUCCIÓN.....	11
1 OBJETIVOS	13
1.1 GENERAL.....	13
1.2 ESPECÍFICOS.....	13
2 MATERIALES AISLANTES TERMICOS	14
2.1 TRANSFERENCIA DE CALOR EN MATERIALES AISLANTES (POROSOS).....	14
2.1.1 Transferencia de calor por conducción (básica).....	15
2.1.2 Transferencia de calor por convección natural.....	15
AISLAMIENTOS TÉRMICOS.	16
2.1.3 Espuma de Poliuretano (PUR)	17
2.1.4 Espuma de Poliestireno (EPS).....	17
2.1.5 Fibra de vidrio y lana de roca	18
2.1.6 Paneles de aislamiento al vacío (VIP Vacuum Insulation Panels)	18
3 MÉTODOS PARA MEDIR CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	22
3.1 MÉTODO ALAMBRE CALIENTE.	22
3.2 MÉTODO PULSO LASER	23
3.3 MÉTODO COMPARATIVO.....	24
3.4 CAJA CALIENTE VIGILADA (GUARDED HOT BOX)	24
3.5 MEDIDOR DE FLUJO DE CALOR (HEAT FLOW METER).....	25
3.6 PLACA CALIENTE VIGILADA PCV (GUARDED HOT PLATE).....	26
3.6.1 Equipos comerciales/investigación.....	27
4 MODELO ANALÍTICO PANEL CON CELDAS CUBICAS DE VACIO.	29
5 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.....	31
5.1 DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO	31
5.2 PARAMETRIZACIÓN DE LAS VARIABLES TÉRMICAS	31
5.3 DIMENSIONAMIENTO DE COMPONENTES.	32
5.3.1 Placa caliente	32
5.3.2 Placa fría	34

5.3.3	Riel	35
5.3.4	Contenedor	36
5.3.5	Numero de sensores requeridos	37
5.4	PROCESOS DE FABRICACIÓN	38
5.5	SELECCIÓN DE LA FORMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	38
5.6	ENSAMBLE	39
5.6.1	DISPOSITIVOS TÉRMICOS Y MECÁNICOS.	39
6	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	41
6.1	MEDICIÓN EXPERIMENTAL DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE AISLAMIENTOS	41
6.1.1	Equipos requeridos	41
6.1.2	Montaje	43
6.1.3	Especificaciones de las muestras	45
6.1.4	Toma de datos	45
6.1.5	Posprocesamiento.....	46
6.2	MODELADO COMPUTACIONAL DE TRASFERENCIA DE CALOR A TRAVÉS DE LA MUESTRA.	47
6.2.1	Objetivo:	47
6.2.2	Dominio a simular.....	47
	Tabla de comparación resultados experimentales vs computacionales	48
6.3	COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES	50
6.3.1	Procesos experimental vs teórico.....	50
6.3.2	Transmisión térmica resultados obtenidos	51
7	CONCLUSIONES	53
8	RECOMENDACIONES.....	54
	BIBLIOGRAFÍA.....	55
	ANEXOS.....	58

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1 Clasificación a partir de la temperatura de operación	17
Tabla 2 variables iniciales de diseño	31
Tabla 3 Código de colores termopares por grupos	40
Tabla 4 Conexión de termopares a tarjeta de adquisición	40
Tabla 5 lista equipos requeridos	41
Tabla 6 Propiedades muestra 1	45
Tabla 7 Propiedades muestra 2	45
Tabla 8 Propiedades muestra 3	45
Tabla 9 Propiedades muestra 4	45
Tabla 10 reporte fibrocemento	46
Tabla 11 reporte icopor	46
Tabla 12 reporte PUR	46
Tabla 13 Reporte VIP	47
Tabla 14 consideraciones generales para la simulación.....	48
Tabla 15 Real vs teórico ensayos	50
Tabla 16 memorias de cálculo método analítico	59
Tabla 17 Lista de materiales	63
Tabla 18 calibración termopares.....	64

LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
Ilustración 1 medios por los cuales puede fluir el calor y tipo de transferencia de calor	14
Ilustración 2 conducción unidimensional estacionaria a través de una superficie plana	15
Ilustración 3 estructura modelo de panel aislado a vacío	18
Ilustración 4 conductividad de diferentes materiales núcleo con respecto a presión	19
Ilustración 5 foto tamaño del poro fumed de sílice	20
Ilustración 6 Configuración VIP	20
Ilustración 7 Configuración sobre VIP con barreras metalizadas.....	21
Ilustración 8 esquema método hilo caliente	22
Ilustración 9 aparato para medir la conductividad térmica TCT 426	23
Ilustración 10 Esquema general de la técnica de medida de la Difusividad térmica por pulso laser	23
Ilustración 11 esquema generala del método comparativo	24
Ilustración 12 Caja caliente vigilada.....	25
Ilustración 13 Esquema general de medidor de flujo de calor	25
Ilustración 14 DPCV.....	26
Ilustración 15 idealización del flujo de calor en DPCV	26
Ilustración 16 λ -Meter EP500e.....	27
Ilustración 17 ejemplo perfil de temperaturas λ -Meter EP500e	27
Ilustración 18 GHP 456 Titan	28
Ilustración 19 esquema GHP 456 Titán	28

Ilustración 20 Sistema de resistencias pared con cámaras de vacío	29
Ilustración 21 vista frontal y lateral pared con cámaras de vacío	29
Ilustración 22 comparación de diferentes paneles variando espesor.....	30
Ilustración 23 balance global de energías.....	32
Ilustración 24 estructura placa caliente.....	33
Ilustración 25 Diagrama dimensionamiento placa caliente.	33
Ilustración 26 Perfil calentador zona de medida y zona de vigilancia	34
Ilustración 27 Placa fría	35
Ilustración 28 Sistema riel.....	36
Ilustración 29 tubo cuadrado.....	36
Ilustración 30 R_value container.....	37
Ilustración 31 Diagrama de flujo proceso de fabricación.....	38
Ilustración 32 Módulo de Entrada Analógica de 32 Canales NI 9205	39
Ilustración 33 componentes DPCV	39
Ilustración 34 DPCV.....	41
Ilustración 35 fuente salida dúplex.....	41
Ilustración 36 tarjeta NI9205	41
Ilustración 37 conector tarjeta adquisición	41
Ilustración 38 NI cDAQ 9178.....	42
Ilustración 39 banco hidráulico.....	42
Ilustración 40 PC.....	42
Ilustración 41 Logo LabView	42
Ilustración 42 montaje esquemático	43
Ilustración 43 montaje experimental	43
Ilustración 44 conexión entrada	43

Ilustración 45 conexión salida	43
Ilustración 46 montaje muestras	44
Ilustración 47 interfaz gráfica programa de censado.	44
Ilustración 48 Imagen placa caliente, placa fría y placa de guarda y condiciones de borde.....	47
Ilustración 49 Simulación PUR.....	48
Ilustración 50 Simulación ICOPOR	48
Ilustración 51 Simulación Fibrocemento	49
Ilustración 52 Simulación VIP	49
Ilustración 53 <i>Uvalue</i> vs espesor en diferentes materiales aislantes a partir de los coeficientes experimentales	51
Ilustración 54 <i>Uvalue</i> vs espesor en diferentes materiales aislantes a partir de los coeficientes entregados por la bibliografía.	52

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A Memorias de cálculo método analítico.	59
Anexo B Rutina empleada para el modelo analítico.	62
Anexo C Lista de materiales.	62
Anexo D Calibración termopares.	64
Anexo E Costos de fabricación.	65
Anexo F Costos del proyecto.	67
Anexo G practica de laboratorio.....	68
Anexo H Ficha técnica del dispositivo.....	71
Anexo I Planos.....	72
Anexo J Memorias de cálculo coeficiente conectivo.	73
Anexo K Tabla de Axel con formulas	74
Anexo L Validación e datos mediante simulación térmica	75
Anexo M Memorias de cálculo comparación de resultados	80

RESUMEN

Este documento presenta la información correspondiente a un estudio térmico del aislamientos de uso general y su comparativo con aislamiento en base a vacío, los cuales son una tecnología emergente en el área de aislamientos térmicos. La configuración de estudio es placa plana. Así pues, la motivación particular del trabajo es el de estudiar nuevas alternativas de aislamiento frente a las convencionales, principalmente las basadas en poliuretano y Poliestireno.

Para este fin se realizó un modelo analítico básico de transferencia de calor considerando la conductividad térmica equivalente a vacío dada por la literatura. Posteriormente, se realizó la caracterización térmica de una probeta en base a vacío y aislamientos convencionales así como su comparativo.

Para ello se fabricó un dispositivo acorde al método de PCV (placa caliente vigilada siglas en ingles GHP) según norma ASTM C177, con un hardware y software de censado basado en LabView, el apartado experimental tuvo un costo de nueve millones novecientos sesenta mil pesos. Por último se realizó un conjunto de simulaciones computacionales para validación experimental-computacional de los resultados.

Todo esto para concluir Los paneles de aislamiento al vacío representa a futuro una alternativa altamente viable como aislante térmico, esto debido a que el espacio requerido por los mismos puede llegar a ser de hasta 5 veces menos que los paneles convencionales, en donde una de las principales limitaciones que tienen estos paneles en la actualidad es que comparado con el panel de tipo sándwich su ciclo de vida es corto debido a la pérdida de presión en su interior.

INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la eficiencia energética para edificios y cuartos fríos nace la necesidad de un tipo de aislante que nos ofrezca una baja conductividad térmica y reducción de espacio con respecto a otros aislantes, es ahí cuando debemos analizar que nuevas alternativas de aislamientos existentes como es el caso de los paneles de aislamiento en base a vacío, y como esta alternativa influyen en la reducción de variables como consumo de energía y espacio.

El objetivo de este proyecto fue hacer un estudio de las variables térmicas de los paneles en base a vacío esto se desarrolló desde el punto de vista analítico, computacional y experimental.

En el marco del proyecto se desarrollaron distintas actividades abarcando desde estudios analíticos donde se generó un modelo matemático de un panel con celdas cubicas de vacío y se comparó con un panel de poliuretano. Desde el punto de vista experimental se desarrolló un prototipo de un banco de pruebas para medir la conductividad térmica mediante el método de Placa Caliente Vigilada (PCV) y se caracterizó una serie de muestras de aislamientos que se usan actualmente en Colombia como son Poliestireno (ICOPOR o EPS), poliuretano (PUR), y fibrocemento como elemento constructivo y aislante termo-acústico.

En el trabajo también se caracterizó una muestra del panel a vacío OPTIM R que trabaja en el mismo rango de temperaturas que los aislamientos caracterizados. Esto con el fin de realizar un comparativo experimental respecto a los paneles que se usan actualmente en el mercado colombiano.

El proyecto está estructurado de la siguiente manera:

Una parte de fundamentación en donde se dan los conceptos básicos para entender el comportamiento de los aislantes térmicos con una descripción de los aislamientos para la industria con énfasis en los componentes de un panel de aislamiento en base vacío.

Una reseña de los diferentes métodos que existen actualmente para medir conductividad térmica como los son: Método alambre caliente ASTM C1113 Caja Caliente Vigilada (Guarded Hot Box) ASTM C236, Medidor De Flujo De Calor (Heat Flow Meter) ASTM C518, Método pulso laser ASTM E1461, Método comparativo ASTM E1225, Placa Caliente Vigilada PCV (Guarded Hot Plate) ASTM C177. En donde este último fue el seleccionado para la caracterización térmica.

El desarrollo de un modelo analítico basado en celdas de vacío para tener una primera aproximación a lo que va a ser el comportamiento de los paneles en base a vacío.

El diseño y construcción de un dispositivo para la caracterización térmica en base a los lineamientos dados por la norma ASTM C177 que es en base al método de placa caliente vigilada.

Un desarrollo experimenta a partir del dispositivo fabricado en donde se determinó la conductividad térmica de Espuma de poliuretano, espuma de Poliestireno, fibrocemento y por último el panel a vacío OPTIM R finalizando con la comparación del espesor requerido para una transmisibilidad deseada.

1 OBJETIVOS

1.1 GENERAL

- ✓ Determinar mediante un estudio analítico y experimental, las características térmicas y mecánicas de aislamientos al vacío en configuración placa plana y establecer su desempeño frente a aislamientos convencionales usados actualmente en Colombia.

1.2 ESPECÍFICOS

- ✓ Establecer el estado del arte de los aislamientos basados en vacío para caso placa plana.
- ✓ Generar un modelo analítico basado en principios de transferencia de calor para el comportamiento de un aislamiento basado en cámaras de vacío.
- ✓ Generar una serie de prototipos de paneles aislados al vacío y caracterizarlos térmica y mecánicamente.
- ✓ Establecer un comparativo en el desempeño térmico del aislamiento al vacío frente a los tradicionales.

2 MATERIALES AISLANTES TERMICOS

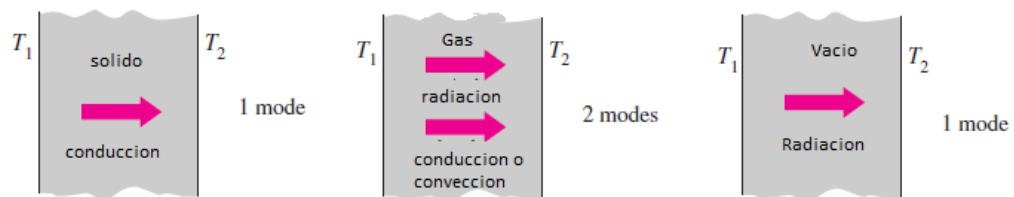
La palabra aislamiento proviene del latín *ínsula* que significa material que reduce o corta el flujo de calor o electricidad, el aislamiento térmico es definido como el material que genera resistencia al flujo de calor (1). El aislamiento térmico es instalado en diferentes aplicaciones como líneas de agua fría y caliente, muros, ductos de refrigeración, calderas y en un gran número de aplicaciones donde se requiera la no pérdida o ganancia de energía térmica.

Para entender como un aislamiento térmico funciona primero se debe tener claro que el flujo de calor que va desde un objeto a otro es llamado transferencia de calor y este ocurre desde una zona de mayor hacia otra de menor temperatura. La transferencia de calor se puede dar por tres métodos: conducción, radiación y convección.

2.1 TRANSFERENCIA DE CALOR EN MATERIALES AISLANTES (POROSOS).

Como ya fue mencionado en el párrafo anterior, la transferencia de calor se puede dar por conducción, radiación o convección según el medio, en donde hay tres medios diferentes que puede ser sólido, gas o vacío en donde si es sólido el calor solo fluye a través de él por conducción, si es un gas el calor puede fluir por radiación y convección o por conducción y si en vacío el calor solo fluye por radiación como se resumen en la Ilustración 1

Ilustración 1 medios por los cuales puede fluir el calor y tipo de transferencia de calor



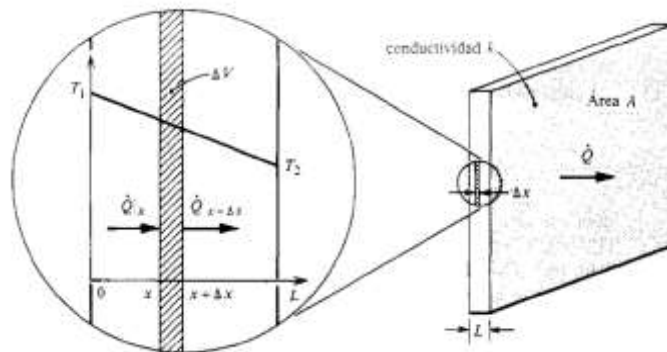
Fuente. Adaptado de Cengel, Heat and mass transfer: a practical approach (2)

La conductividad total o equivalente a través de un material puede ser vista como la sumatoria de las conductividades equivalentes de conducción en el medio sólido, conducción por radiación y conducción térmica en el medio gaseoso del material. Normalmente, la conductividad dominante corresponde al medio sólido, es por ello que los materiales aislantes son altamente porosos con una pequeña fracción de material sólido (3). Lo anterior es evidente en la estructura de los aislantes tales como la lana mineral, fibra de vidrio, Poliestireno expandido o extruido, poliuretano y espumas fenólicas entre otros.

2.1.1 Transferencia de calor por conducción (básica)

La transferencia de calor por conducción es un proceso mediante el cual fluye calor a través de un sólido, aunque este fenómeno también se presenta en líquidos y gases normalmente no es el mecanismo de transferencia de calor predominante; En este tipo de procesos el calor se transfiere por la interacción molecular (choques elásticos e inelásticos) propagando así energía desde una región de mayor temperatura a una de temperatura inferior. En donde puede ser analizada bajo la ley de J.B Fourier propuesta en 1822 (4) y explicada a partir de caso más sencillo que es una superficie plana. Ilustración 2, en donde se muestra una pared plana de área A , espesor L donde la temperatura T_1 es en $x = 0$ y la T_2 es en $x = L$ en donde el flujo de calor va de mayor a menor temperatura.

Ilustración 2 conducción unidimensional estacionaria a través de una superficie plana



Fuente. Mills, transferencia de calor (4)

Por la ley de Fourier de conducción de calor se establece que el flujo de calor por unidad de área es proporcional al gradiente de temperatura como se muestra en la EC. 1 .

$$\frac{Q}{A} = -K \frac{dT}{dx} \quad \text{EC. 1}$$

En donde Q flujo de calor, A área K conductividad térmica $\frac{dT}{dx}$ gradiente de temperatura.

2.1.2 Transferencia de calor por convección natural.

La transferencia de calor por convección es el proceso que ocurre cuando un fluido en movimiento intercambia calor con otro de un diferente estado generando así un flujo de calor directamente proporcional a la velocidad del fluido en donde a mayor velocidad mayor la tasa de pérdida o ganancia de temperatura calor. En donde este comportamiento está descrito por la ley de enfriamiento de Newton ecuación 2.

$$q_s = h_c(T_s - T_e) \quad \text{EC. 2}$$

En donde T_s temperatura superficial, T_e temperatura del fluido, h_c coeficiente conductivo.

Para este caso si la diferencia de temperatura entre T_s y T_e es muy pequeña se puede analizar como conducción debido a que el fluido permanecerá en reposo, pero si la diferencia de temperaturas aumenta hasta un estado térmico en donde el fluido es inestable y aparece un flujo celular en donde las capas con isotermas empiezan a generar un movimiento de arriba a abajo.

Para determina el coeficiente conductivo sobre una superficie para el caso de flujo natural se requieren los siguientes números adimensionales $Nu = (q_s L)/K\Delta T$ como flujo de calor por área adimensional. $Pr = c_p\mu/k$ Como grupo de propiedades del fluido y $Gr = \beta\Delta T g L^3/\nu^2$. En donde el coeficiente conectivo va estar dado por:

$$h_c = \frac{K_f}{Nu.L} \quad \text{EC. 3}$$

En donde K_f conductividad térmica del fluido L espesor del fluido

AISLAMIENTOS TÉRMICOS.

En la actualidad existen diferentes tipos de aislamientos en donde se pueden clasificar mediante el rango de temperatura de operación:

- Aislamientos para alta temperatura: por encima de 315 °C, empleados en aplicaciones como calderas, hornos industriales y cámara de secado de pintura.
- Aislamientos de media temperatura media: Entre 15 - 315 °C, empleados en edificios con oficinas, habitáculos con requerimientos de confort térmico, ductos de ventilación, fachadas de bodegas y naves industriales que operan con sistemas de aire acondicionado.
- Aislamientos de baja temperatura: Por debajo de 15 °C, empleados en aplicaciones de refrigeración, congelación y criogenia. En este último se emplea directamente vacío como aislamiento para reducir las ganancias de energía de los sistemas.

Así pues, los aislamientos industriales para este amplio rango de aplicaciones se encuentran los consolidados en la Tabla 1.

Tabla 1 Clasificación a partir de la temperatura de operación

MATERIAL	ALTA Más de 315 °C	MEDIA Entre 15 – 315 °C	BAJA Hasta 15 °C
Aerogel		X	X
PUR		X	
PS		X	
Fibra de vidrio		X	
Lana de roca	X		
Perlita expandida	X		
Vidrio celular	X		
VIP con núcleo base a fibras			
Vips con núcleo en base a espumas y polvos		X	X

VIP. Siglas en ingles que significan panel de aislamiento en base a vacío, PS Poliestireno, PUR, poliuretano Fuente. Autor.

2.1.3 Espuma de Poliuretano (PUR)

La espuma de poliuretano es un polímero celda cerrada de baja densidad que se fabrica a partir de la reacción entre un isocianato y un poliol una de sus principales características es tener una baja conductividad térmica que puede estar entre $0.020 - 0.040 \frac{W}{m K}$.

Debido a sus cualidades de autoadhesión con otros materiales lo convierte en un material idóneo para generar estructuras tipo sándwich que pueden mejorar sus cualidades estructurales. Dentro de sus principales aplicaciones está el uso en frigoríficos y contenedores de agua caliente, en la industria de la construcción se emplea en una configuración tipo sándwich con cubiertas murales o de tejado. (5).

2.1.4 Espuma de Poliestireno (EPS)

La espuma de Poliestireno es un polímero celda cerrada que varía su densidad según como sea fabricado, la fabricación de este polímero es a partir de la reacción química entre estireno con isobutileno, la conductividad térmica de este material esta entre $0,029 - 0,053 \frac{W}{m^{\circ}C}$ (6).

La capacidad de aislamiento de las EPS se debe a que en los intersticios aloja aire que reduce la conductividad térmica del material, una de las aplicaciones de

este material como material aislante en edificaciones debido a su peso y que no desprende fibras tóxicas o dañinas para la salud a comparación del PUR (7)

2.1.5 Fibra de vidrio y lana de roca

La fibra de vidrio y la lana de roca son aislantes térmicos tipo mineral, en donde la propiedad de aislante térmico es dada por el aire alojado entre las fibras. El proceso de fabricación es la generación de fibras a partir del paso del material en estado líquido por los poros de un tambor o disco generando filamentos delgados. La unión de los filamentos va dar origen a la manta que va a ser usada posteriormente como aislante. La principal característica de estos dos materiales es soportar alta temperatura por lo cual es usado en aislamiento de tuberías de agua caliente. (8)

2.1.6 Paneles de aislamiento al vacío (VIP Vacuum Insulation Panels)

Los aislamientos en base a vacío fueron desarrollados para ser usados en ciclos de refrigeración, refrigeradores, en donde el espacio para aislamiento es limitado. La primera producción de estos fue en los 80s impulsado por la búsqueda de materiales con bajos o carentes de clorofluorocarbonos (CFC gases encargados de destruir la capa de ozono) característicos en los aislamientos basados en PUR/PIR.

Una de las primeras patentes de paneles en base a vacío fue desarrollada en Alemania mediante un caucho poroso encerrado, alrededor de 20 años después se desarrolló en Estados Unidos una patente compuesta por un núcleo de lana de vidrio como núcleo, envuelta por un papel de acero después de esto los estudios se direccionaron hacia el estudio de sobre supremamente delgados con baja permeabilidad y materiales núcleo con nano estructuras celda abierta, seguido de experimentos con argón (9), dando como resultado paneles con una estructura basada de un material de celda abierta y sobre que genera una barrera con bajos niveles de permeabilidad

Ilustración 3 estructura modelo de panel aislado a vacío



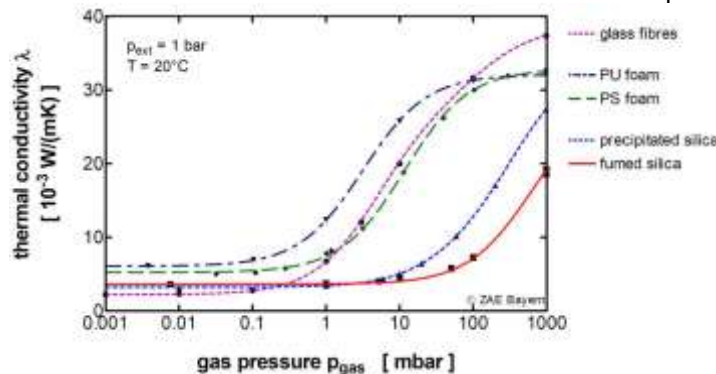
Fuente. Vacuum insulation panels in building (9)

Como se observa en la Ilustración 3 estructura modelo de panel aislado a vacío, la configuración típica de un panel a vacío está dada con un núcleo, recubierto por una sobre que actúa como sellante y barrera de vapor.

2.1.6.1 Núcleo

El núcleo del panel puede estar hecho de materiales tipo espumas de celda abierta, fibras o polvos. La razón del empleo de estos materiales es que se pueda extraer el aire hasta un nivel de vacío y en la medida que este vacío se vaya acercando al vacío absoluto la resistencia térmica se incrementa como se ilustra en la Ilustración 4. Otra propiedad crítica del núcleo, debido a que su interior es vacío es el de soportar la presión atmosférica.

Ilustración 4 conductividad de diferentes materiales núcleo con respecto a presión



Fuente. Vacuum insulation panels in building (9)

2.1.6.1.1 Espumas.

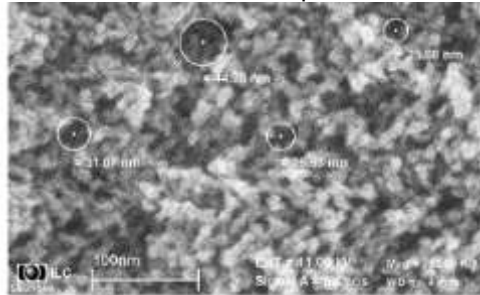
Espumas de celda abierta como PUR y EPS con un tamaño de poro entre $30 - 250 \times 10^{-6} m$ pueden ser usados como núcleo en VIPs. La conductividad térmica de este tipo de espumas puede llegar a ser hasta del $0.0078 W m^{-1} K^{-1}$. Uno de los desafíos de desarrollo es el de mantener el vacío sobre el ciclo de vida del panel que es un estimado de 100 años así como el de reducir los costos de producción que son altos con respecto a las fibras de vidrio como núcleo esto no es un alternativa viable de producción (10).

2.1.6.1.2 POLVOS

Algunos materiales particulados como los son: Fumed de sílice, Aerogeles en base a Sílica y perlita expandida, son usados puros o mixtos como materiales núcleo en los paneles de aislamiento al vacío. Para el caso de fumed de sílica la presión de vacío requerida esta entre $20 - 100 \times 10^{-3} bar$ (11) y tamaño de poro alrededor de $300 \times 10^{-9} m$. En el caso de aerogeles de sílice el material posee tamaño de poro de aproximadamente $20 - 40 nm$ (Ilustración 5) y la

presión de vacío requerida está por debajo de 50 mbar y por último la perlita expandida que requiere un alto nivel de presión de vacío 0.1 mbar

Ilustración 5 foto tamaño del poro fumed de sílice



Fuente. Nano poros en Aerogeles de sílica (12)

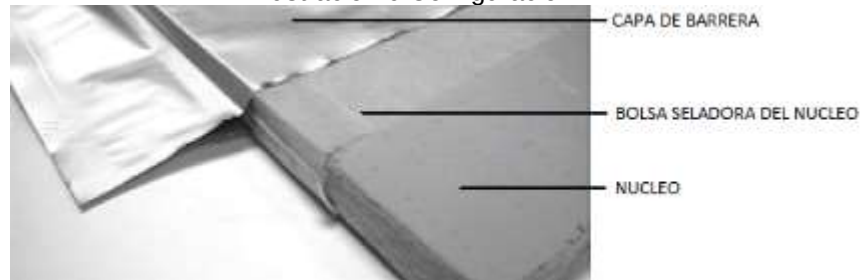
2.1.6.1.3 FIBRAS

Las fibras de vidrio pueden ser utilizadas como núcleo de paneles de vacío en aplicaciones donde el rango de temperaturas sea alto debido a su baja densidad y alta estabilidad con respecto a la temperatura (11)

2.1.6.2 Sobre

El sobre no solo protege al núcleo del aire y del agua sino que también aporta fuerza para resistir la presión atmosférica. El diseño del sobre está basado en la capacidad de actuar como barrera de vapor y de resistir puentes térmicos a través de las caras. Por lo general el número de capas del panel depende de la temperatura de trabajo y el tamaño del mismo.

Ilustración 6 Configuración VIP

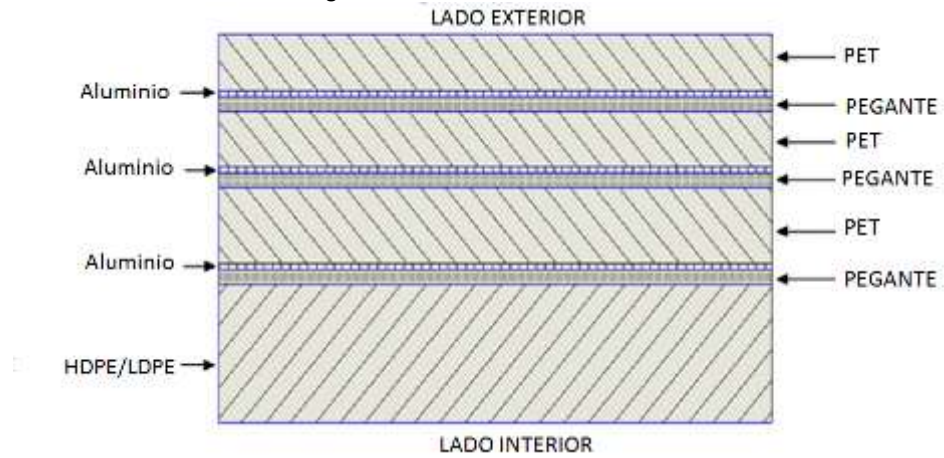


FUENTE, Advances in Thermal Insulation (13)

La configuración de este tipo de sobres es una capa exterior protectora, una capa de barrera y una barrera selladora del núcleo (Ilustración 6). Por lo general la capa selladora del núcleo está fabricada con un paño delgado (que permita colocar el núcleo en una prensa para darle forma de panel), la capa selladora y barrera puede ser una configuración multicapa hecha de Nylon /polipropileno/ polietileno en donde la capa de nylon brinda protección mecánica, la capa de polipropileno brinda una barrera de vapor y la capa de polietileno hace posible sellar el panel mediante calor. Otra configuración puede ser polietileno/ aluminio/

polietileno / aluminio/ polietileno / aluminio / polietileno de alta o baja densidad como se muestra en la Ilustración 7.

Ilustración 7 Configuración sobre VIP con barreras metalizadas



Fuente. Revista energía aplicada (10)

3 MÉTODOS PARA MEDIR CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Existen diferentes métodos para medir la conductividad térmica. El método depende de que rango de temperaturas se valla a manejar, las condiciones de trabajo de cada uno de estos y del tipo de estructura interna. Los métodos validados para determinar la conductividad térmica están basados en normas ASTM. Dichos métodos son: Método alambre caliente ASTM C1113 Caja Caliente Vigilada (Guarded Hot Box) ASTM C236, Medidor De Flujo De Calor (Heat Flow Meter) ASTM C518, Método pulso laser ASTM E1461, Método comparativo ASTM E1225, Placa Caliente Vigilada PCV (Guarded Hot Plate) ASTM C177

Particularmente, este último presenta cualidades de ser un método de caracterización de estado estacionario, la medida de conductividad térmica es absoluta por lo cual solo requiere la calibración de los componentes de medición (Termopares). Añadido a esto, este es un ensayo no destructivo de fácil montaje. Un sumario de los métodos se presenta a continuación.

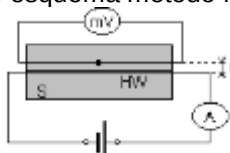
3.1 MÉTODO ALAMBRE CALIENTE.

El método de alambre caliente es el método usado en materiales refractarios este método se basa en la toma de temperatura a lo largo de un alambre o medio lineal que va a través de un material de ensayo en esta técnica se asume que el alambre caliente entrega energía uniforme y constante a lo largo del material muestra, la conductividad térmica se puede obtener a partir del cambio de temperatura en un tiempo dado (14).

El modelo matemático para este método es idealizado como un alambre supremamente delegado, donde q es la cantidad de calor generada por unidad de tiempo y distancia ($W\ m^{-1}$) y tiempo con un tiempo inicial igual a 0, en donde ocurre un flujo de calor radial y un incremento de temperatura en una posición radial x de donde se genera la fórmula EC. 4.

$$\Delta T(r, t) = \frac{q}{4 \pi K} \ln \left(\frac{4at}{r^2 C} \right) \quad \text{EC. 4}$$

Ilustración 8 esquema método hilo caliente



Fuente. Laboratorio de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Constantino el Filósofo de Nitra, (14)

En donde: K es la conductividad térmica, a es Difusividad térmica $a = k/(\rho C_p)$ y $C = \exp(\gamma)$ donde γ es la constante de Euler

Ilustración 9 aparato para medir la conductividad térmica TCT 426



Fuente. NETZSCH (15)

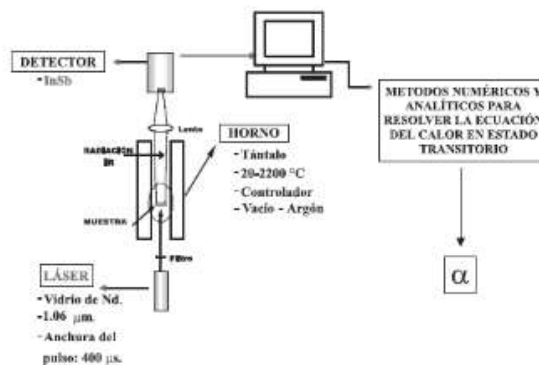
3.2 MÉTODO PULSO LASER

El método de pulso láser es un método usado para la medición de conductividad térmica en materiales cerámicos (16). En la Ilustración 10 se muestra un esquema general del este método en donde una de las caras es calentada uniformemente mediante el pulso laser; este calor es conducido a través de la muestra generando un gradiente de temperatura en donde este incremento de temperatura se toma con respecto al tiempo y es pos-procesado a partir de la siguiente ecuación EC. 5:

$$\frac{dT(x, t)}{dt} = \alpha \frac{d^2T(x, t)}{dx^2} \quad \text{EC. 5}$$

En donde “T” es la temperatura en °C medida en la posición “x” (cm) y un tiempo “t” y α es la Difusividad térmica.

Ilustración 10 Esquema general de la técnica de medida de la Difusividad térmica por pulso laser

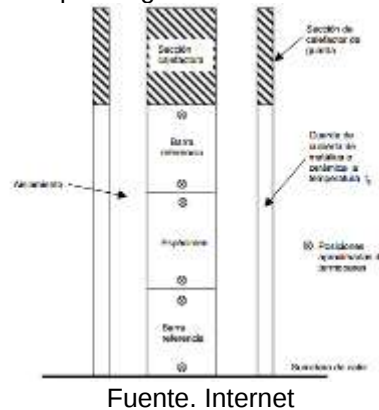


Fuente. Método del “Pulso Láser” para la medida de la difusividad térmica en materiales cerámicos (16).

3.3 MÉTODO COMPARATIVO

El método comparativo es un método usado principalmente para medir la conductividad térmica en materiales cerámicos, es denominado comparativo porque está basado en la comparación de los gradientes térmicos a través de dos probetas patrón y la muestra en donde la muestra que es posicionada en medio de las dos probetas patrón (17).

Ilustración 11 esquema general del método comparativo



La conductividad térmica para este caso va a estar dada por 4:

$$K_m = \frac{dx_m}{2dT_m} \left(K_s \frac{dT_s}{dx_s} + K_i \frac{dT_i}{dx_i} \right) \quad \text{EC. 6}$$

En donde dx es el espesor, dT es el gradiente de temperatura, K la conductividad térmica y los subíndices m, s y i significan muestra, superior e inferior respectivamente.

3.4 CAJA CALIENTE VIGILADA (GUARDED HOT BOX)

El método caja caliente es usado principalmente para medir conductancia térmica de ensambles para edificios, como ventanas y muros tipos sándwich. Este método se realiza bajo condiciones controladas de ambiente, temperatura, flujo de aire y radiación térmica y es un método de estado estacionario este difiere con el método de placa caliente vigilada porque este es aplicado para muestras homogéneas. (18)

El principio básico de este método es que a partir de dos compartimientos uno caliente y uno frío se simulen las condiciones normales de trabajo del panel y así poder estimar las propiedades térmicas de este. (Ilustración 12).

Ilustración 12 Caja caliente vigilada



Fuente Rotatable Guarded Hot Box (19)

3.5 MEDIDOR DE FLUJO DE CALOR (HEAT FLOW METER).

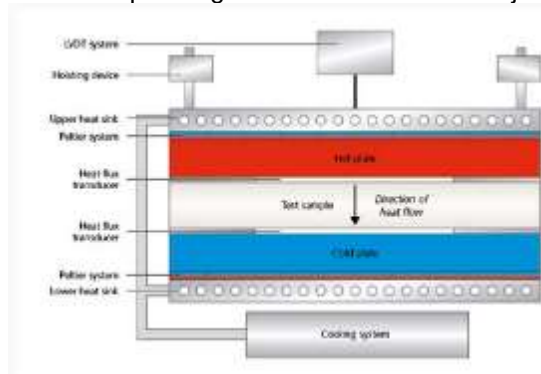
El método medidor de flujo de calor es usado principalmente para medir conductividad térmica en materiales Aislantes es un método de estado estacionario es decir se toma la medición cuando se estabilice el sistema, además de esto es un método que requiere calibración cada vez que se vaya a utilizar ya que es un método relativo.

El principio básico (Ilustración 13) es poner una pieza de material a caracterizar en medio de una superficie caliente y una fría para así generar un gradiente térmico y el valor de la conductividad térmica es tomado a partir de del flujo de calor que va a atreves de la muestra, la ecuación para determinar la conductividad térmica es descrita por la ecuación EC. 7 :

$$K = \frac{SE}{L \Delta T} \quad \text{EC. 7}$$

En donde S es el factor de calibración (Wm^{-2}/V), E salida de flujo de calor de transductor (V), L separación entre la placa caliente y la placa fría, ΔT diferencia de temperatura a través de la muestra.

Ilustración 13 Esquema general de medidor de flujo de calor

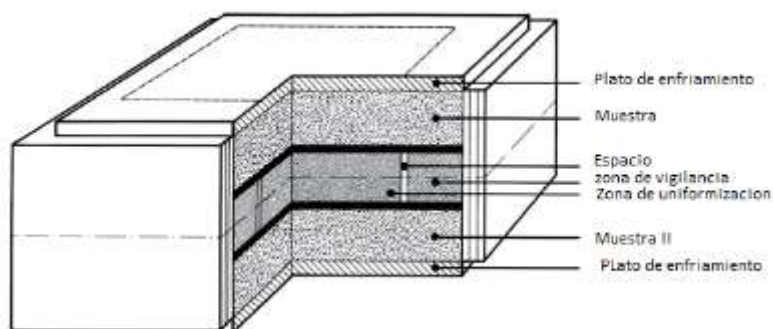


Fuente. NETZSCH (20)

3.6 PLACA CALIENTE VIGILADA PCV (GUARDED HOT PLATE)

El método de placa caliente vigilada es un método de estado estacionario y *absoluto* en donde la placa caliente y el anillo de vigilancia son puestos dentro de 2 muestras de un mismo material con la misma área y espesor generando así un gradiente térmico directamente proporcional a la potencia eléctrica que pasa por las muestras y es disipado por los platos de enfriamiento. Quedando así las principales partes del dispositivo en una configuración como se muestra en la Ilustración 14 .

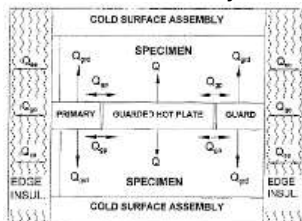
Ilustración 14 DPCV



Fuente. Fraunhofer Institute of Building Physics (21)

Los componentes principales del dispositivo son dos superficies frías isotérmicas ensambladas y la placa caliente vigilada, la placa caliente vigilada está compuesta por una sección de medida aislada por un anillo concéntrico y separados por un espacio intermedio, algunos dispositivos podrán tener más de un anillo de vigilancia (22)(Esto es a disposición del diseñador). La función del anillo concéntrico es evitar las pérdidas laterales y direccionar el flujo de calor en dirección perpendicular a la zona de medida. Quedando así el diagrama de flujos de calor (ideal) como se muestra en la Ilustración 15 en donde de las dimensiones en la zona de medida es de donde se va a obtener las propiedades térmicas requeridas del material. Para garantizar que estas propiedades térmicas tengan un grado de confiabilidad alto se requiere que el anillo de este a la misma temperatura de la zona de medida para que el flujo de calor se unidireccional.

Ilustración 15 idealización del flujo de calor en DPCV



Fuente ASTM C177 (22)

3.6.1 Equipos comerciales/investigación.

Un ejemplo de DPCV es Thermal Conductivity Test Tool λ -Meter EP500. Ilustración 16 es un dispositivo con múltiples anillos de vigilancia para uniformizar el flujo de calor que pasas a través de la muestra como se muestra en la Ilustración 17 esto a criterio de la compañía sirve para reducción de espacio al no requerir de un ambiente controlado.

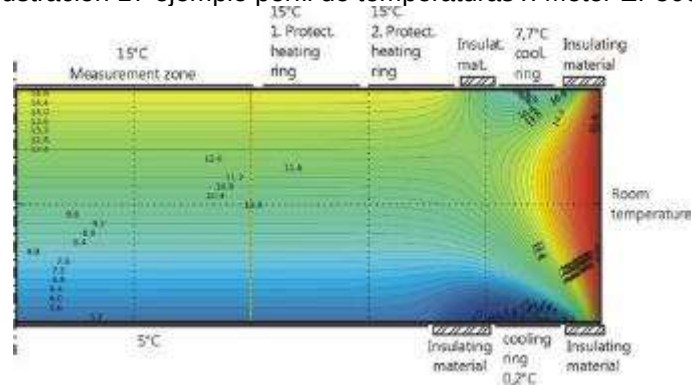
Ilustración 16 λ -Meter EP500e



Fuente. Lambda-Meßtechnik GmbH (23)

La Ilustración 17 muestra el perfil de temperaturas a través de un espécimen de 120 mm de espesor esto tomado con el dispositivo λ -Meter EP500e.

Ilustración 17 ejemplo perfil de temperaturas λ -Meter EP500e



Fuente. Lambda-Meßtechnik GmbH (23)

Otro dispositivo GHP 456 Titán este dispositivo fue creado para cumplir los requerimientos de las normas ASTM C177 y ISO 8302 es un dispositivo con altos niveles de precisión que este dispositivo está dedicado para investigaciones en materiales aislantes y como se puede ver en la

Ilustración 19 el esquema de la maquina es muy similar al propuesto por la norma ASTM C177.

Ilustración 18 GHP 456 Titan



Fuente. NETZSCH (20)

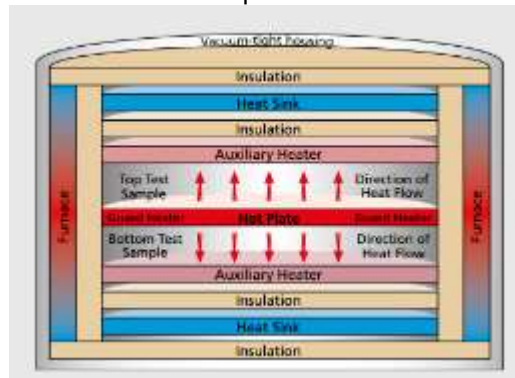
En donde la conductividad térmica se obtiene de la ecuación EC. 8:

$$\dot{Q} = K 2A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad \text{EC. 8}$$

En donde:

K es la conductividad térmica, $\dot{Q}$ el flujo de calor que atraviesa la sección de medida, A es el área de la sección de muestra ΔT es el gradiente de temperatura entre el plato caliente y el calentador auxiliar y Δx es el espesor de la muestra.

Ilustración 19 esquema GHP 456 Titán

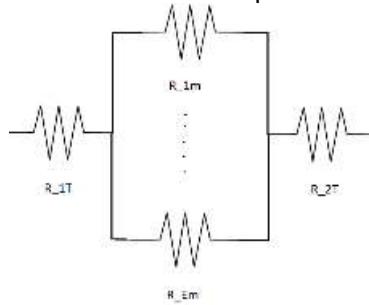


Fuente. NETZSCH (20)

4 MODELO ANALÍTICO PANEL CON CELDAS CUBICAS DE VACIO.

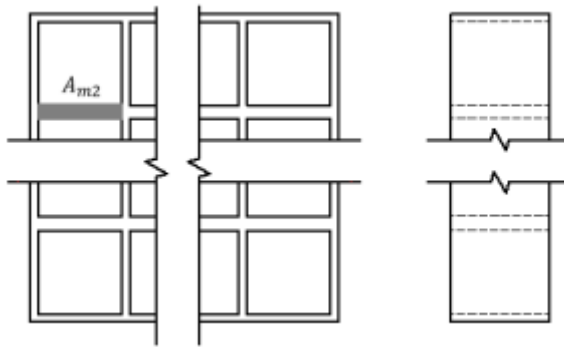
Para el desarrollo del modelo analítico asumió una matriz de cámaras cubicas con vacío en donde se asumió el siguiente esquema de resistencias térmicas:

Ilustración 20 Sistema de resistencias pared con cámaras de vacío



Fuente autor.

Ilustración 21 vista frontal y lateral pared con cámaras de vacío



Fuente. Autor

En donde el flujo de calor va a estar dado por ecuación 7:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{eqt}} \quad \text{EC. 9}$$

Donde:

$$R_{eqt} = R_{1T} + R_{eq} + R_{2T}$$

Y la R_{eq} en paralelo es:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{\frac{\Delta x}{KA_m}} + \frac{1}{\frac{\Delta x}{KA_{m2}}} + \frac{1}{\frac{\Delta x}{KA_m}} + \frac{1}{\frac{\Delta x}{KA_{m2}}} + \dots + \frac{1}{\frac{\Delta x}{KA_m}} + \frac{1}{\frac{\Delta x}{KA_{m2}}}$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{N}{\frac{\Delta x}{KA_m}} + \frac{N(N-1)}{\frac{\Delta x}{KA_{m2}}}$$

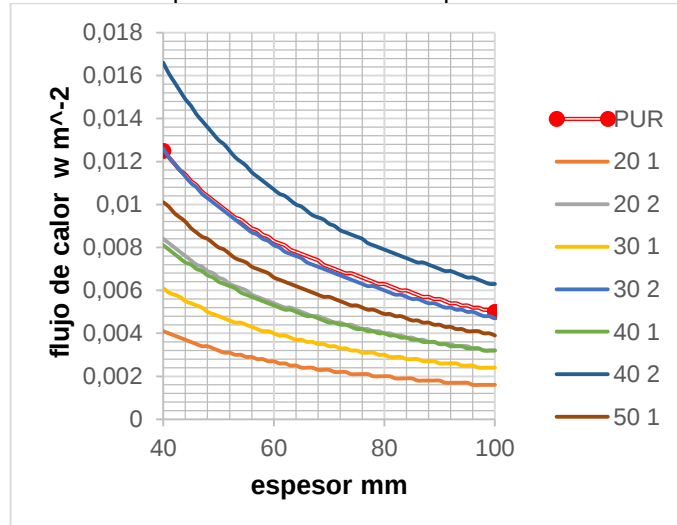
Quedando la ecuación de flujo de calor como ecuación 8:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{\frac{1}{\frac{N}{\frac{\Delta x - x_1}{KA_m}} + \frac{N(N-1)}{\frac{\Delta x - x_1}{KA_{m2}}}} + \left(\frac{x_1}{KA}\right) + \left(\frac{x_1}{KA}\right)} \quad \text{EC. 10}$$

En donde N es el número de divisiones. ΔT Es la diferencia de temperaturas Δx es el espesor de la pared x_1 espesor de las paredes internas A área total de la pared.

La solución del sistema fue programada en una rutina de MATLAB en donde se varió el espesor de las paredes y el número de divisiones desde 20 hasta 50 dando como resultado Ilustración 22 en donde se hace una comparación con el PUR. El código de la rutina se encuentra en el Anexo B

Ilustración 22 comparación de diferentes paneles variando espesor



Primer índice significa el número de separaciones el segundo el espesor de la pared (ejemplo naranja 20 1.20 separaciones 1 milímetro de espesor de pared .Fuente. Autor

En la gráfica se puede apreciar como a medida que se va incrementando el material base en el panel con cámaras de vacío deja de ser más efectivo que el panel de poliuretano aumentando el nivel de pérdidas de energía.

5 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.

La metodología utilizada para el desarrollo experimental fue a partir de la norma ASTM C177 y ASTM 1045 cuyo principio es el método de placa caliente. A partir de las consideraciones dadas en las normas se diseñó el dispositivo de medición de conductividad térmica cuyos pasos de diseño y construcción son los siguientes.

- Parametrización de las variables térmicas a medir.
- Dimensionamiento de componentes térmicos (plato caliente, plato frío),
- Selección y cuantificación del número de sensores
- Definición del volumen de control (aislamiento lateral)
- Montaje experimental, y calibración.

5.1 DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO

Para el diseño esquemático se tomaron como variables de diseño el material a evaluar que es un aislamiento en base a vacío cuyas propiedades y dimensiones están detalladas en la Tabla 2. Con estas variables se esquematizó la placa caliente y la placa fría respectivamente y la zona de medida.

Tabla 2 variables iniciales de diseño

propiedades del producto	
espesor (mm)	30
longitud (mm)	300
ancho (mm)	300
temperaturas de trabajo (°C)	(-40) a 80

Fuente. Autor

5.2 PARAMETRIZACIÓN DE LAS VARIABLES TÉRMICAS

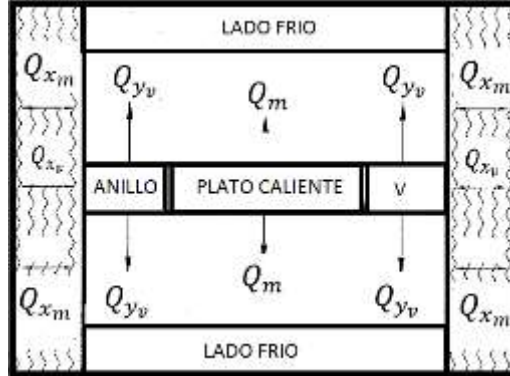
Para el balance global de energía se asumió que hay pérdidas a través de los laterales de la probeta y a través de los laterales del plato caliente como se muestra en la Ilustración 23 en donde estas pérdidas van a ser aportadas por la zona de vigilancia o uniformización quedando ecuación 9:

$$Q_T = 2Q_m + 2Q_v \quad \text{EC. 11}$$

en donde

$$Q_V = Q_{y_v} + Q_{x_m} + Q_{x_v} \quad \text{EC. 12}$$

Ilustración 23 balance global de energías



Q_m Flujo de calor a través de la zona de medida, Q_{y_v} flujo de calor a través de la sección de vigilancia en y, Q_{x_m} flujo de calor producto de las pérdidas laterales de la probeta, Q_{x_v} flujo de calor producto de las pérdidas laterales del anillo caliente. Fuente: Autor

Como el gradiente de temperaturas debe ser igual tanto en la sección de vigilancia como en la sección de medida igualamos los gradientes de temperaturas de la EC. 11 y EC. 12 el flujo de calor requerido ideal en la sección de vigilancia va a estar dado por ecuación 11.

$$\frac{Q_{ym}(R_{Al} + R_m)}{2A_m} = \frac{Q_{yv}(R_{Al} + R_m)}{2A_v}$$

$$Q_{yv} = \frac{Q_{ym}A_v}{A_m} \quad \text{EC. 13}$$

Debido a que las pérdidas van a ser compensadas por la zona de vigilancia el balance térmico en dirección radial ecuación 12

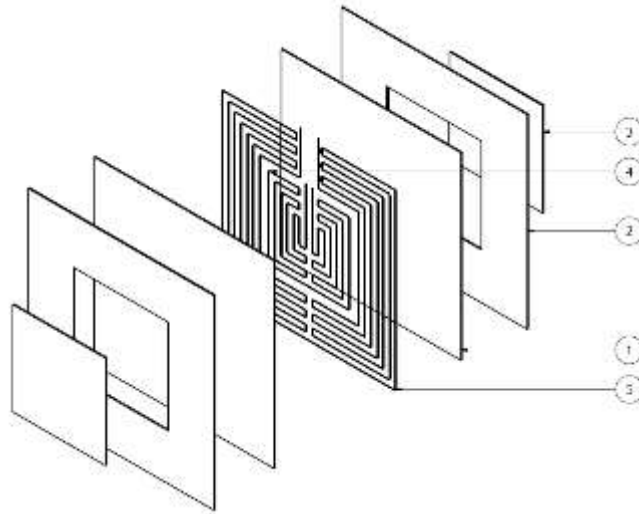
$$Q_p = Q_{x_v} + Q_{x_m} \quad \text{EC. 14}$$

5.3 DIMENSIONAMIENTO DE COMPONENTES.

5.3.1 Placa caliente

La placa caliente es básicamente en una zona de medida y un anillo de vigilancia donde cada una es a su vez un sándwich como se muestra en la Ilustración 24 estructura placa caliente

Ilustración 24 estructura placa caliente



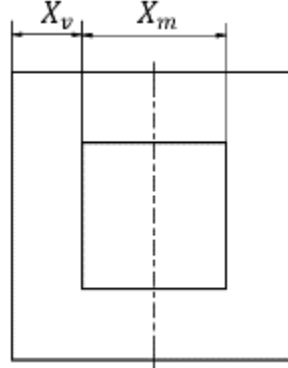
.1 Aislamiento eléctrico, 2. Anillo de vigilancia, 3. Plato zona de medida, 4. Calentador zona de medida, 5. Calentador zona de vigilancia. Fuente Autor

Para la placa caliente se tuvieron las siguientes consideraciones:

1. El ancho de nuestro anillo de vigilancia va a estar dado por al menos la mitad de nuestra sección de medida como se muestra en la siguiente ecuación EC. 15 e Ilustración 25 Diagrama dimensionamiento placa caliente.

$$X_t = X_m + 2X_v \quad \text{EC. 15}$$

Ilustración 25 Diagrama dimensionamiento placa caliente.



Fuente. Autor

$$X_v = \frac{X_m}{2}$$

$$X_t = X_m + 2 \frac{X_m}{2}$$

$$X_m = \frac{X_t}{2}$$

En donde X_m es ancho de nuestra la zona de muestra 300 mm.
Quedando

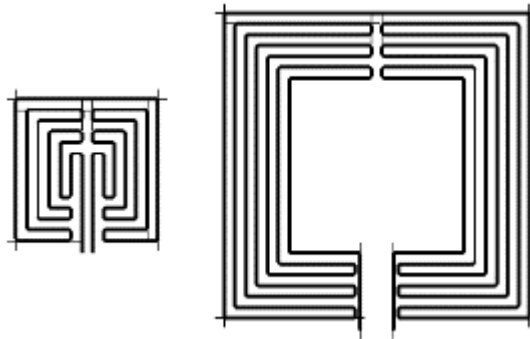
$$X_m = 150 \text{ mm.}$$

2. El material del plato de la zona de medida y el anillo de vigilancia debe ser fabricado en un material conductor térmico para que uniformice la temperatura a lo largo de la sección. Por lo cual se seleccionó una alamina de aluminio calibre 14.
3. Los patos deben garantizar una emisividad de al menos 0.8. por lo tanto las placas de aluminio fueron pintadas de negro mate.

El calentador se fabricó en una aleación de ferroníquel que es un aislante eléctrico que no va al rojo cuando aumenta su temperatura y además es una aleación maleable que nos permite generar el perfil deseado (Ilustración 26) que cubra la mayor parte de la zona de medida y zona de vigilancia. Esta resistencia va a ser cubierta por una capa fina de fibra de vidrio que dentro sus propiedades esta ser un aislante eléctrico y térmico por lo cual ayuda a la uniformización del flujo de calor, y ayuda a generar una superficie segura para hacer la toma de temperaturas.

Todo esto dando como resultado un plato caliente de 300 mm x 300 mm 9 mm (ver anexo planos).

Ilustración 26 Perfil calentador zona de medida y zona de vigilancia



Fuente. Autor

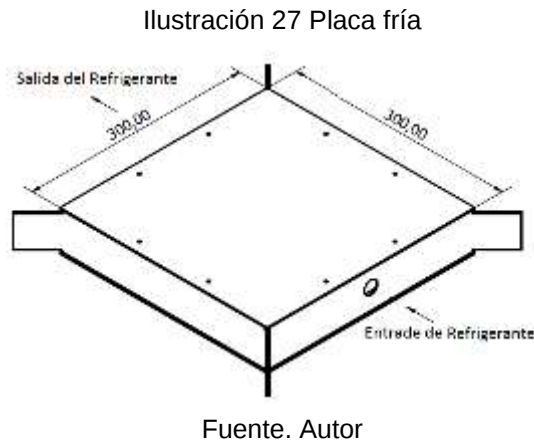
5.3.2 Placa fría

La placa fría es básicamente un intercambiador de calor simple que permite el paso de un líquido refrigerante a través de una caja, extrayendo calor del sistema y generando una temperatura uniforme a lo largo de la placa fría. Para este caso puntual el líquido refrigerante es agua a temperatura ambiente. Los requerimientos para este dispositivo son:

1. Que este hecho del mismo material de la placa caliente, con una alta conductividad térmica.

2. Que el área de contacto sea el mismo tamaño que la placa caliente con la zona de vigilancia.

A partir de estos parámetros se generó el siguiente diseño de placa fría Ilustración 27 en donde el espesor de la lámina que se usó para la fabricación es el mismo que el de los platos calientes (calibre 14). Y en donde las aletas sirven para alinear los dos platos fríos sobre el mismo eje



5.3.3 Riel

El sistema de riel sirve para alinear los platos fríos con respecto a cuatro ejes para este caso la longitud mínima del riel está dada por

$$\begin{aligned} \text{Longitud del riel} \\ = \text{Espesor}_{PC} + 2 \text{ Espesor máximo de la probeta} + 2 \text{ Espesor}_{PF} \end{aligned}$$

En donde el espesor máximo admisible de la probeta no debe superar la tercera parte de la longitud de la zona de medida (ecuación EC. 16) (22 pág. 28).

En donde

$$\begin{aligned} \text{Espesor máximo de la probeta} &= \frac{X_m}{3} \\ \text{Espesor máximo de la probeta} &= \frac{150 \text{ mm.}}{3} = 50 \text{ mm.} \end{aligned} \quad \text{EC. 16}$$

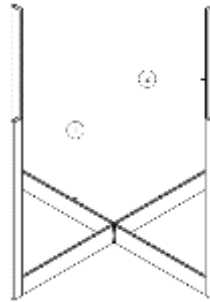
Quedando así una longitud de riel:

$$\begin{aligned} \text{Longitud del riel} &= 9 \text{ mm.} + 2 (50 \text{ mm.}) + 2 (50 \text{ mm.}) \\ \text{Longitud del riel} &= 209 \text{ mm.} \end{aligned}$$

Dando como resultado la Ilustración 28 donde la altura total del sistema va estar dada por la suma del espesor de la base del riel, la longitud mínima del riel y un espacio que nos permita maniobrar las muestras. Se decidió hacer la base a

parir de una platina de 0,03175 m. (1 ¼ in) y dejar un espacio de manejo de 0,15 m dando una longitud total del riel de 0,40 m.

Ilustración 28 Sistema riel



1. Sistema de cuatro barras riel, 2. Bases sistema riel. Fuente. Autor

5.3.4 Contenedor

El propósito del contenedor es brindar una barrera que elimine el movimiento del aire alrededor del DPCV. Por tal motivo se dimensiona para que el espacio entre el dispositivo y las paredes del contenedor generen una barrera aislante de aire, debido a que la velocidad del aire va a ser 0.

El espacio entre el dispositivo y las paredes se puede asimilar como una un sistema de resistencias por conducción. En donde la geometría característica va a ser un tubo cuadrado. Por lo cual se requiere que la resistencia térmica del tubo de aire sea mayor a la de la resistencia térmica de la muestra para que el calor fluya a través de la muestra.

$$R_m = \frac{X}{K}$$

Donde R_{air} está dado por:

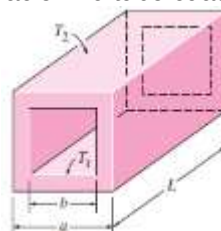
Para $\frac{a}{b} > 1,4$.

$$R_{air} = \frac{0,93 \ln 0,948 \frac{a}{b}}{2\pi L K_{air}}$$

Para $\frac{a}{b} < 1,41$

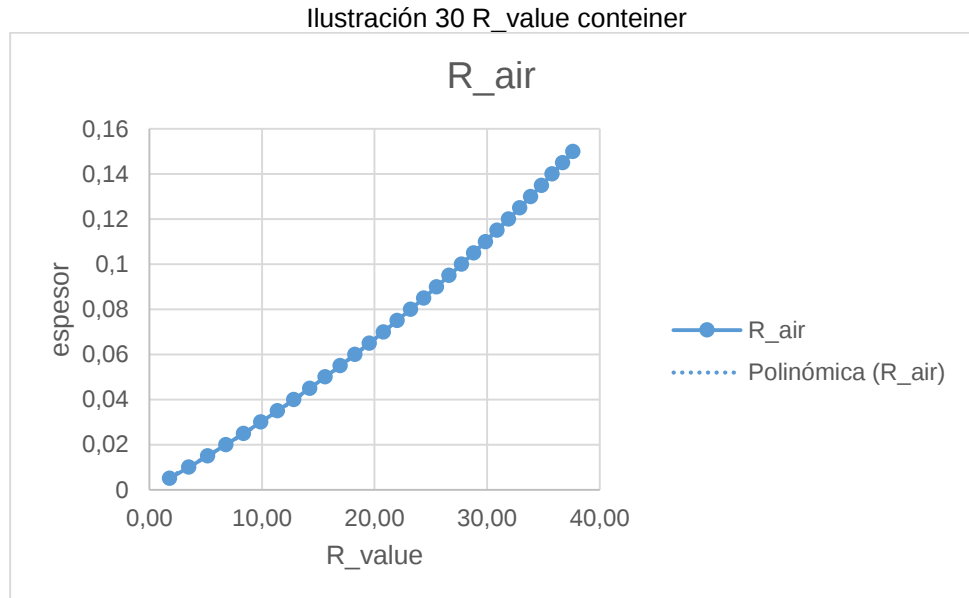
$$R_{air} = \frac{0,985 \ln \frac{a}{b}}{2\pi L K_{air}}$$

Ilustración 29 tubo cuadrado



Fuente: Cengel heat transfer

Como el R_{air} es proporcional al espesor del aislamiento se obtuvo la siguiente gráfica



Fuente. Autor

En donde se escogió un espesor de 0,15m para que fuera fácil manejar el DPCV y además de esto por que cumple que la resistencia térmica de borde es mayor que la resistencia térmica de la muestra asumiendo una conductividad térmica de vacío.

Todo esto dando como resultado una caja de dimensiones internas de 0,60 x 0,60 x 0,40 m (para mayor información ver anexo planos hoja 6) esta caja se le agrego un espacio inferior por donde van a pasar el cableado del sistema (cable termopares)

5.3.5 Numero de sensores requeridos

El número de termopares en la zona de medida se seleccionó acorde a la siguiente ecuación y no puede ser menor de 2 (22 pág. 27).

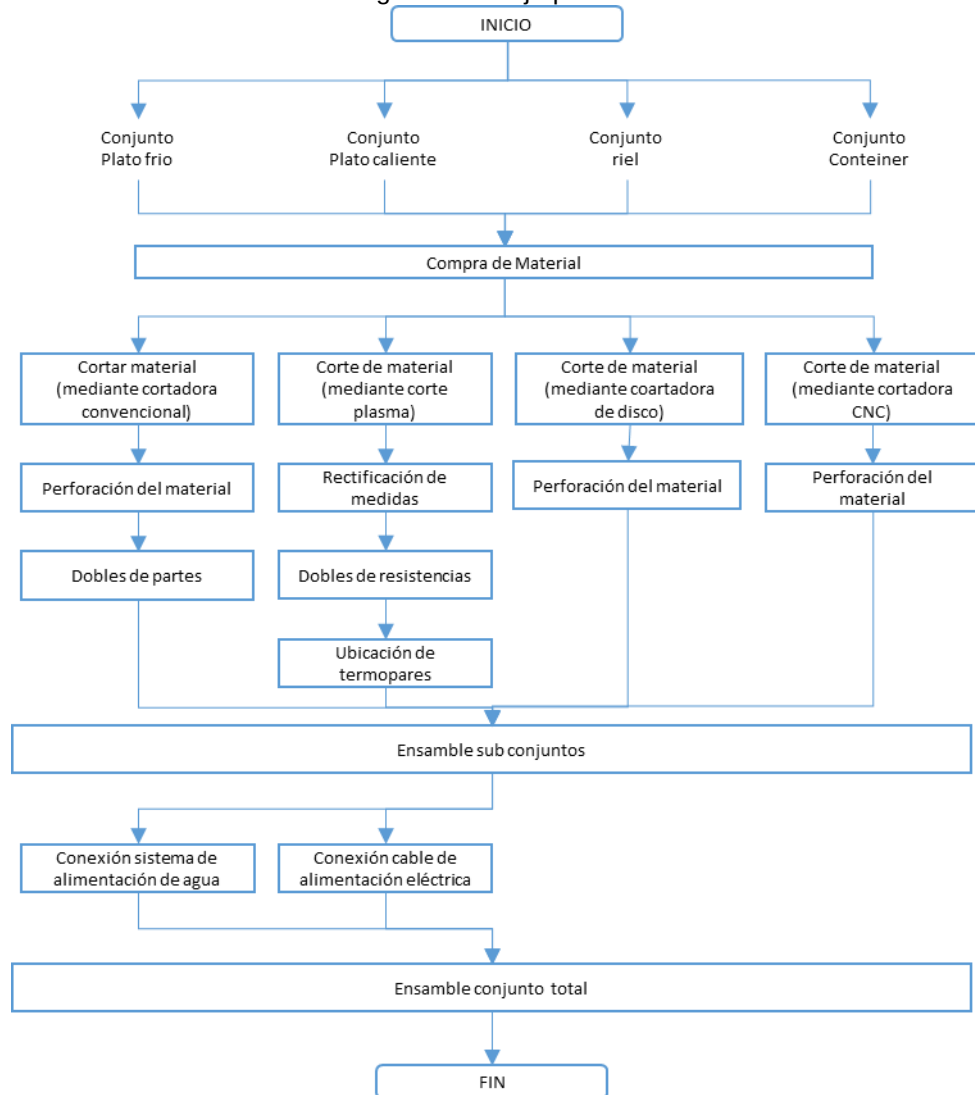
$$N_s = 10\sqrt{A_m} \quad \text{EC. 17}$$

$$N_s = 10\sqrt{0,15 \text{ m}} = 3,872$$

Como se va a realizar la toma de temperaturas en 4 caras el número de termopares mínimo requerido va a ser igual a 16.

5.4 PROCESOS DE FABRICACIÓN

Ilustración 31 Diagrama de flujo proceso de fabricación



Fuente. Autor

5.5 SELECCIÓN DE LA FORMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

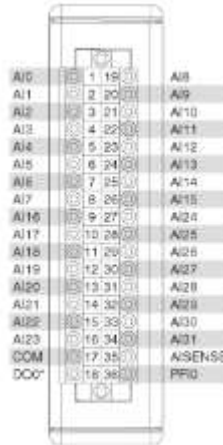
El requerimiento para la adquisición de datos están dados por el número de sensores como lo único que se va a ser censado es la temperatura, el número de entradas análogas y va está dado por el número de sensores en la zona de medida por las 4 caras en donde se va a hacer la medición.

$$N_e = 4 N_s$$

Como la toma de temperaturas va a ser mediante termopares, se seleccionó una tarjeta de adquisición con entradas diferenciales para que haya una mayor precisión en la toma de datos.

La tarjeta de adquisición de datos que se utilizó para el proyecto fue NI 9205 con 32 entradas analógicas de una sola terminal o 16 diferenciales (24), en donde cumple el requerimiento del número mínimo entradas diferenciales que es 16.

Ilustración 32 Módulo de Entrada Analógica de 32 Canales NI 9205



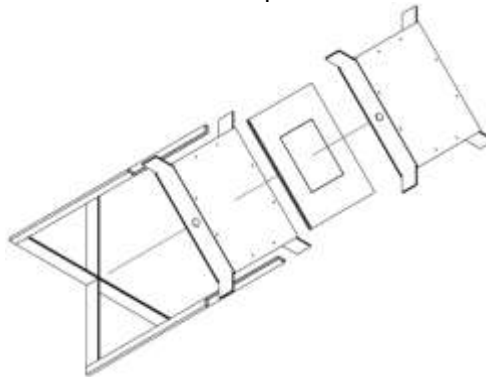
Fuente National instruments (24)

5.6 ENSAMBLE

5.6.1 DISPOSITIVOS TÉRMICOS Y MECÁNICOS.

El DPCV se divide en dos componentes principales el contenedor y nuestro dispositivo en donde el dispositivo a su vez tiene tres subcomponentes que son un plato caliente, dos platos fríos, y el sistema riel (Ilustración 33).

Ilustración 33 componentes DPCV



Fuente. Autor

5.6.1.1 Sensores de temperatura

Para el diagrama de conexión se toma la referencia de colores y en adición a esto la conexión se realizó de una forma diferencia para mayor precisión en la adquisición de datos.

Tabla 3 Código de colores termopares por grupos

termopar	Color
1	Amarrillo
2	Verde
3	Azul
4	café

Fuente autor

En donde para referencia gráfica y de conexión los cables que su asilamiento eléctrico esta combinado blanco + otro color van a pin in positivo

Tabla 4 Conexión de termopares a tarjeta de adquisición

	Termopar	pin in +	Pin in-
grupo 1 plato caliente 1	1	AI 0	AI 8
	2	AI 1	AI 9
	3	AI 2	AI 10
	4	AI 3	AI 11
grupo 2 plato frio 1	1	AI 4	AI 12
	2	AI 5	AI 13
	3	AI 6	AI 14
	4	AI 7	AI 15
grupo 3 plato caliente 2	1	AI 16	AI 24
	2	AI 17	AI 25
	3	AI 18	AI 26
	4	AI 19	AI 27
grupo 4 plato frio 2	1	AI 20	AI 28
	2	AI 21	AI 29
	3	AI 22	AI 30
	4	AI 23	AI 31

Fuente. Autor

Se hace una conexión a la tarjeta de adquisición de datos de una forma diferencia para tener un mayor grado de precisión

6 DESARROLLO EXPERIMENTAL

6.1 MEDICIÓN EXPERIMENTAL DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE AISLAMIENTOS

6.1.1 Equipos requeridos

Tabla 5 lista equipos requeridos

Nombre	Figura.
DPCV	Ilustración 34 DPCV  Fuente. Autor
Peak tech 6010d	Ilustración 35 fuente salida dúplex  Fuente. Autor
Tarjeta de adquisición de datos Módulo de Entrada Analógica de 32 Canales NI 9205	Ilustración 36 tarjeta NI9205  Fuente autor
Conexión de Terminal de Resorte	Ilustración 37 conector tarjeta adquisición  Fuente autor

Chasis NI Compact DAQ USB de 8 Ranuras NI cDAQ-9178	Ilustración 38 NI cDAQ 9178  Fuente National instruments
banco hidráulico H1D	Ilustración 39 banco hidráulico  Fuente autor
PC con controladores	Ilustración 40 PC  Fuente Autor
Software adquisición de datos e interfaz grafica	Ilustración 41 Logo LabView  Fuente National instruments

6.1.2 Montaje

Ilustración 42 montaje esquemático



Fuente Autor

Ilustración 43 montaje experimental



Fuente autor

Para el montaje experimental:

Conectar la manguera de entrada al banco como muestra la Ilustración 44 y la manguera de salida como se muestra en Ilustración 45

Ilustración 44 conexión entrada



Fuente. autor

Ilustración 45 conexión salida



Fuente. autor

Abrir la caja del contenedor subir la caja fría superior tomar el plato caliente y posicionar una muestra a cada lado del plato caliente posicionar los termopares (4 a cada lado formando un cuadrado de 10 x 10 centrado), y volver a insertar el sándwich de muestras con plato asegurarse que las muestras quedaron centradas en el mismo eje con los platos fríos Ilustración 46

Ilustración 46 montaje muestras



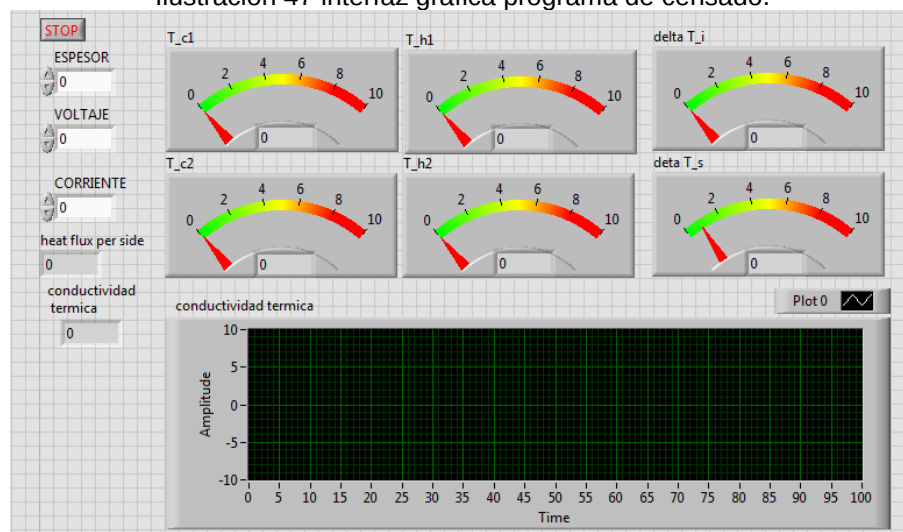
Fuente autor

Cerrar el contenedor conectar los cables de alimentación eléctrica a la fuente Peak tech 6010d encender la fuente, fijar la potencia en la sección de muestra (cable sin cinta), fijar la potencia en la sección de vigilancia 3 veces la potencia de la sección de muestra. Debido a lo explicado en la ecuación EC. 13 :

$$Q_v = \frac{Q_m A_v}{A_m} = Q_m \frac{30^2 - 15^2}{15^2} = 3Q_m$$

Conectar nuestro dispositivo de adquisición de datos al computador y abrir el programa LabView con el programa GHPA2 adjunto a este documento .cuya interfaz gráfica se muestra en la Ilustración 47.en (donde T_c temperatura cold (fría), T_h temperatura hot (caliente), ΔT_i gradiente de temperatura sección inferior, ΔT_s gradiente de temperatura superior.

Ilustración 47 interfaz gráfica programa de censado.



Fuente Autor.

6.1.3 Especificaciones de las muestras

Tabla 6 Propiedades muestra 1

Material	Fibrocemento
Largo	300 mm
Ancho	300 mm
Espesor	13 mm
Conductividad térmica	$0,35 \frac{W}{m^{\circ}C}$

Fuente autor.

Tabla 7 Propiedades muestra 2

Material	Poliestireno PS
Largo	300 mm
Ancho	300 mm
Espesor	30 mm
Conductividad térmica	$0,029 - 0,053 \frac{W}{m^{\circ}C} (6)$

Fuente autor.

Tabla 8 Propiedades muestra 3

Material	Poliuretano PUR
Largo	300 mm
Ancho	300 mm
Espesor	35 mm
Conductividad térmica	$0.019-0.040 \frac{W}{m^{\circ}C} (6)$

Fuente autor.

Tabla 9 Propiedades muestra 4

Material	VIP Optim R
Largo	300 mm
Ancho	300 mm
Espesor	30
Conductividad térmica	$0.007 \frac{W}{m^{\circ}C} (25)$

Fuente Autor

6.1.4 Toma de datos

La conductividad térmica del material probado va a estar dado por

$$V.I = \frac{2AK(T_c - T_f)}{L}$$

$$K = \frac{QL}{2A(T_c - T_f)}$$

En donde A área sección de muestra, Q flujo de calor, T_c temperatura lado caliente, T_f temperatura lado frío. L Espesor de la muestra.

6.1.5 Posprocesamiento

Tabla 10 reporte fibrocemento

Reportaje de ensayos fibrocemento				
variable	unidades	ensayo 1	ensayo 2	ensayo 3
Q	W	26,048	30,544	39,104
T_c	°C	52,2	57,5	67,5
T_f	°C	31,9	31,5	37,5
T_m	°C	84,1	89	105
ΔT	°C	20,3	26	30
A	m^2	0,0225	0,0225	0,022
L	m	0,013	0,013	0,013
K	$W\ ^\circ C^{-1}m^{-1}$	0,370	0,339	0,376

Tabla 11 reporte icopor

Reportaje de ensayos icopor				
variable	unidades	ensayo 1	ensayo 2	ensayo 3
Q	W	1,078	1,078	4,429
T_h	°C	30,2	30,1	75
T_l	°C	16,9	14,6	17,4
T_m	°C	23,55	22,35	46,2
ΔT	°C	13,3	15,5	57,6
A	m^2	0,0225	0,0225	0,0225
L	m	0,03	0,03	0,03
K	$W\ ^\circ K^{-1} m^{-1}$	0,054	0,046	0,051

Tabla 12 reporte PUR

Reportaje de ensayos PUR				
variable	unidades	ensayo 1	ensayo 2	ensayo 3
Q	W	3,132	3,5	3,5
T_h	°C	53,3	54	65
T_l	°C	15,2	15,8	17
T_m	°C	34,25	34,9	41
ΔT	°C	38,1	38,2	48
A	m^2	0,0225	0,0225	0,0225
L	m	0,035	0,035	0,035
K	$W\ ^\circ K^{-1} m^{-1}$	0,063	0,071	0,056

Tabla 13 Reporte VIP

Reportaje de ensayos VIP				
variable	unidades	ensayo 1	ensayo 2	ensayo 3
Q	W	1,464	2,25	1,16
T _h	°C	72,2	76	51
T _l	°C	17,5	17	17
T _m	°C	44,85	46,5	34
\inc T	°C	54,7	59	34
A	m ²	0,0225	0,0225	0,0225
L	M	0,03	0,03	1,03
K	W °K ⁻¹ m ⁻¹	0,017	0,025	0,022

6.2 MODELADO COMPUTACIONAL DE TRASFERENCIA DE CALOR A TRAVÉS DE LA MUESTRA.

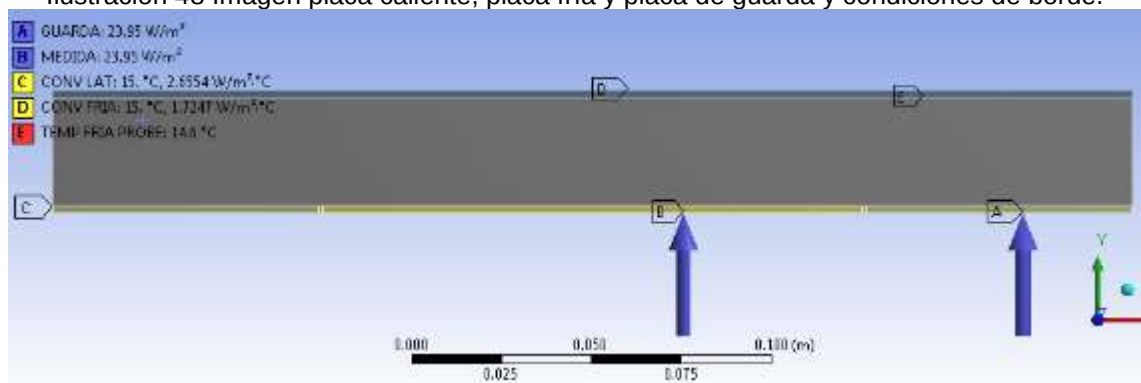
6.2.1 Objetivo:

A partir del modelado computacional, con los valores de conductividad térmica dados experimentalmente, las temperaturas experimentales de la placa fría y coeficiente de película conectivo vertical .validar los datos experimentales

Fuente Autor

6.2.2 Dominio a simular

Ilustración 48 Imagen placa caliente, placa fría y placa de guarda y condiciones de borde.



El número de nodos y elementos empelados para la simulación fue 11557y 1761. Fuente Autor

Tabla 14 consideraciones generales para la simulación

Condición de borde	Ubicación	Observaciones
Temperatura placa fría	Lado interino Placa fría	Temperatura experimental de la placa fría
Generación de calor	Placa caliente	Generación de calor den la placa caliente para prueba
Generación de calor	Placa guarda	Generación de calor den la placa caliente para prueba
Condición de contorno de convección lateral	Laterales guarda y laterales probeta	Dad por la convección natural en placa vertical ecuación EC. 3
Condición de contorno de convección horizontal	Lado exterior placa fría	Dada por la convección natural en placa horizontal ecuación EC. 3

Fuente. Autor

Tabla de comparación resultados experimentales vs computacionales

Ilustración 49 Simulación PUR

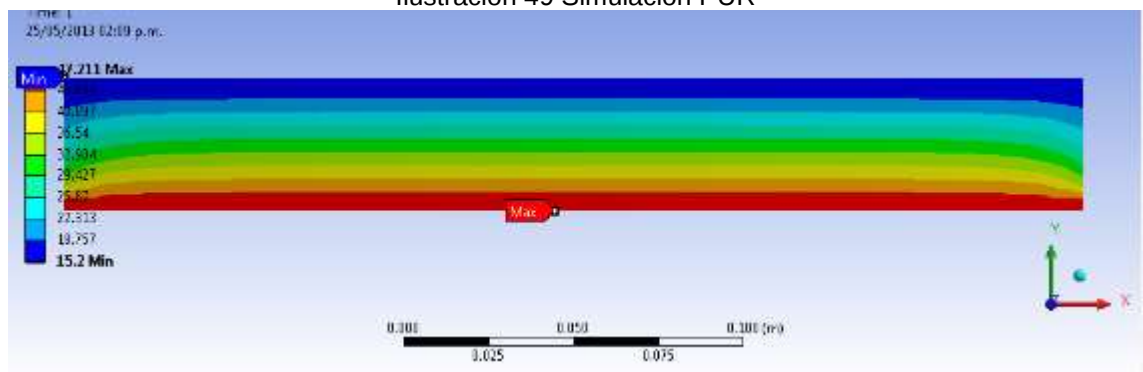


Ilustración 50 Simulación ICOPOR

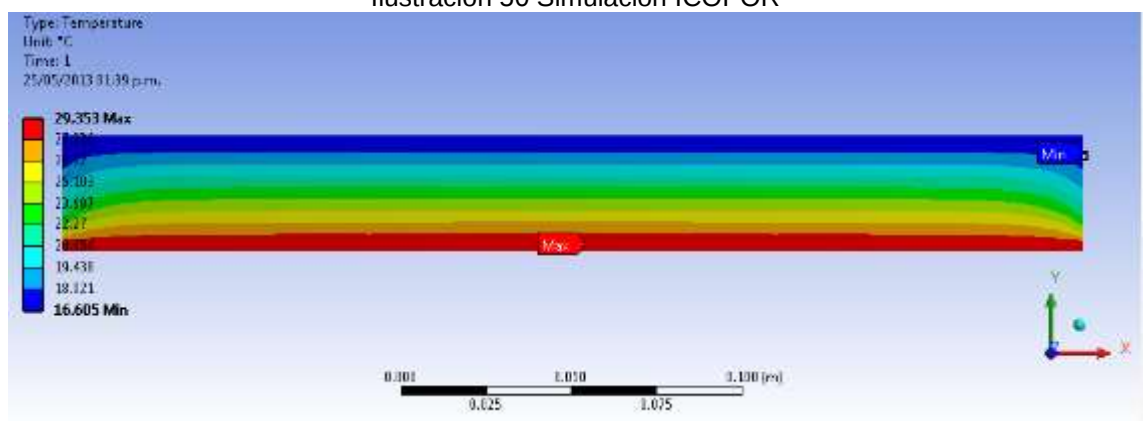


Ilustración 51 Simulación Fibrocemento

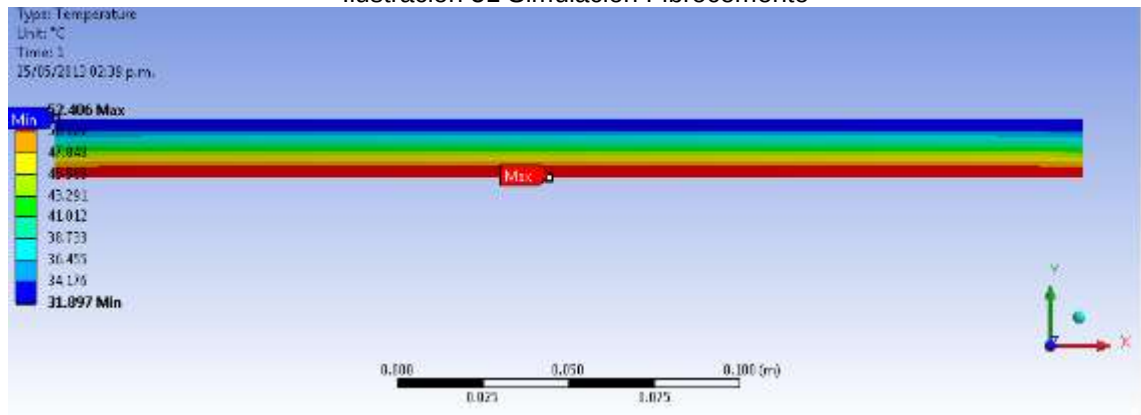
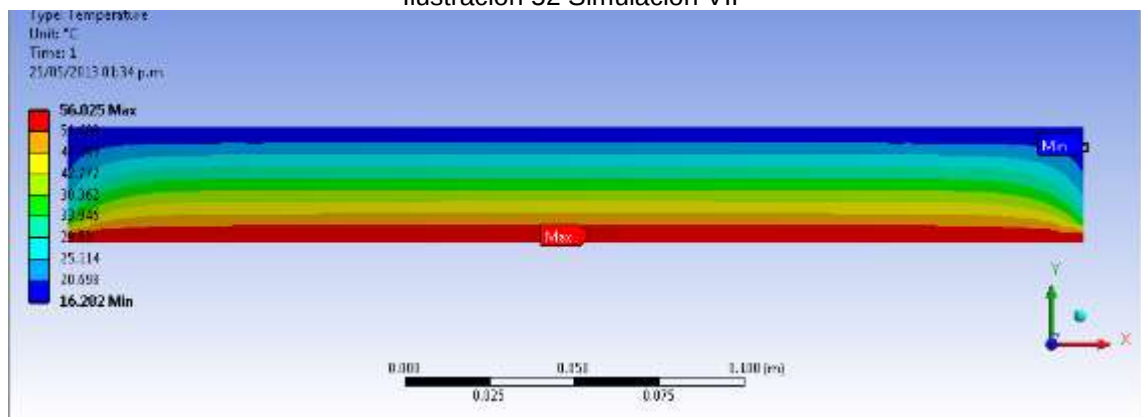


Ilustración 52 Simulación VIP



Material	T_f °C	T_{Cexp} °C	T_{Csimu} °C	Q W	K_{exp} $W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$	$\frac{error}{T_{Cexp}}$ $\frac{T_{Cexp} - T_{Csimu}}{T_{Cexp}}$
PUR Ilustración 49 Simulación PUR	15,8	54	52,341	3,5	0,071	0,048
ICOPOR Ilustración 50	16,9	30,2	29,351	1,078	0,054	0,028
Fibrocemento Ilustración 51	31,9	52,2	52,406	26,048	0,370	0,003
VIP Ilustración 52	17	76	77,217	2,25	0,025	0,016

La placa de guarda actúa como un sello térmico que fuerza a que las isoterma en la zona de medida sean paralelas a la placa caliente generando así un flujo unidireccional en sentido normal a la placa caliente

6.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

6.3.1 Procesos experimental vs teórico

A partir de la bibliografía se estimó un porcentaje de error teórico para los ensayos Tabla 15 Real vs teórico ensayos

	PROMEDIO $W^{\circ}K^{-1}m^{-1}$	VALOR TEÓRICO $W^{\circ}K^{-1}m^{-1}$	ERROR	DESVIACION
FIBROCEMENTO	0,362	0,35	3%	0,019
VIP	0,022	0,01	120% ¹	0,003
ICOPOR	0,050	0,041	23%	0,003
PUR	0,063	0,044	45%	0,007

Tabla 15 Real vs teórico ensayos

En donde se puede apreciar que la desviación entre los está dentro del orden permisible dando como resultados reales en donde los posibles márgenes de error se pueden dar por la No consideración de variables que afecten el sistema.

Con respecto al error se puede decir que debido a inconsistencias en la homogeneidad de los materiales probados se producen estos tipos de errores.

Caso puntual el poliuretano que pudo alojar en su interior burbujas de un tamaño considerable con respecto al tamaño de la probeta y generar el aumento de la conductividad térmica debido a la generación de puentes térmicos, para solucionar este tipo de problemas se sugiere un mayor control sobre los especímenes y hacer un análisis desde el proceso de fabricación.

Para el caso VIP este error del 120 por ciento se debe a la despresurización de una de las probetas dando como resultado la evaluación de las condiciones térmicas de del material con un porcentaje de vacío dando como resultado una probeta con una baja conductividad térmica.

¹ Debido a las despresurización de una de las probetas este error se considera como permisible debido a que se evaluó como una probeta con cierto porcentaje de vacío en sus interior

6.3.2 Transmisión térmica resultados obtenidos

La comparación de efectividad de los aislamientos se realizó a partir de la tasa de transmisión térmica en donde se graficó el espesor de los materiales vs transmisión térmica

En donde 18

$$Q = \frac{KA\Delta T}{L}$$

EC. 18

$$\frac{Q}{A\Delta T} = U$$

EC. 19

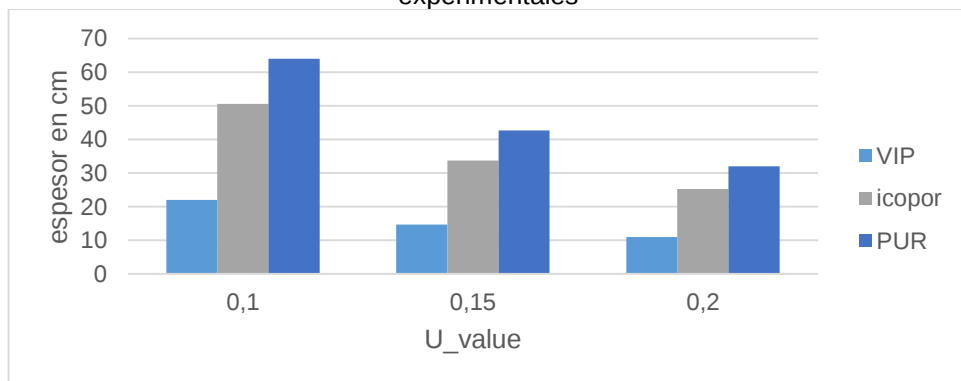
Se tiene que:

$$U = \frac{K}{L}$$

$$L = \frac{K}{U}$$

Siendo K la conductividad expresada en $Wm^{-1}K^{-1}$ y U la transmisión térmica expresado en Wm^2K^{-1} y el L expresado en m.

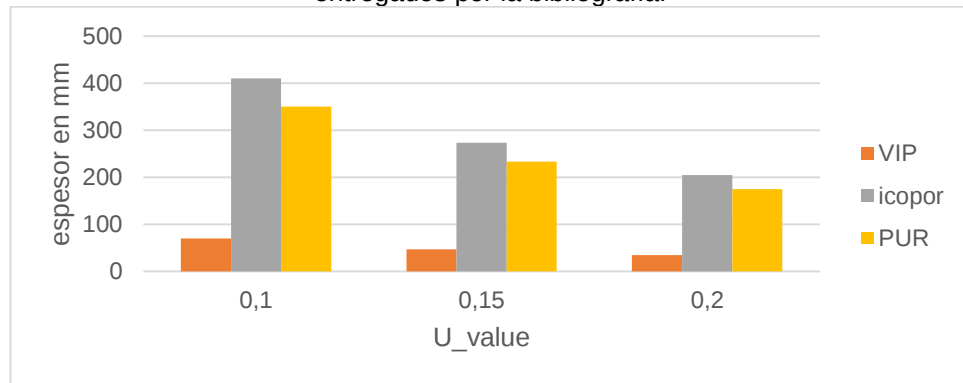
Ilustración 53 U_{value} vs espesor en diferentes materiales aislantes a partir de los coeficientes experimentales



Fuente. Autor

La Ilustración 53 U_{value} vs espesor en diferentes materiales aislantes muestra como la conductividad térmica afecta el espesor del aislamiento y como en nuestro ensayo experimental la conductividad térmica de un aislamiento en base a vacío genera una reducción de espesor de más del 50% sobre los aislantes convencionales endone si se tomara en cuenta los valores entregados por la bibliografía se tendría que el aislamiento equivalente en panel en base a vacío seria de por debajo de una cuarta parte de los aislamientos convencionales dando como resultado una reducción de espacio de aproximadamente el 75%.

Ilustración 54 U_{value} vs espesor en diferentes materiales aislantes a partir de los coeficientes entregados por la bibliografía.



Fuente. Autor.

7 CONCLUSIONES

Del modelo analítico se puede analizar y concluir que el vacío como fuente de aislamiento es una alternativa altamente viable desde el punto de vista de la transferencia de calor debido a que como podemos observar en la Ilustración 22 a medida que vamos aumentando el vacío y reduciendo el número de cámaras el panel se vuelve más eficiente debido a que el vacío se va posicionando como la resistencia dominante.

Por otra parte, el modelo analítico ayuda a entender cómo funcionan los paneles en base a vacío en donde la eficiencia del panel es proporcional a la presión de vacío es decir al nivel de vacío que tiene el espécimen.

Al momento en que no se alcanza un vacío absoluto queda parásitos térmicos en forma de globos de aire o un gas cuya conductividad es mucho mayor que la conductividad por vacío generando pérdidas ganancias en la conductividad térmica.

Los valores de conductividad térmica obtenidos mediante el método experimental dieron por encima de los valores dados en la bibliografía. Esto puede ser por que la humedad de las probetas era elevada aumentando el coeficiente de conductividad térmica. Otra posibilidad es que la potencia entregada al sistema fue medida en la fuente y no en la entrada del sistema placa caliente generando un porcentaje de ganancia o pérdida reflejada en la apreciación del instrumento de medición que es en voltaje de 0.1 y en corriente de 0.01. Sin embargo los errores relativos a la teoría no son muy altos debido a que el porcentaje de desviación que ellos manejas esta entre el 30% debido a que dan un rango de conductividad térmica

Se puede decir que el montaje experimental fue exitoso debido que las conductividades térmicas dieron de mayor a menor en el mismo orden es decir la mayor conductividad térmica de los ensayos fue la del fibrocemento con un valor conductividad térmica promedio de tres pruebas de $0,362 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ y la menor conductividad térmica fue la del panel en base a vacío con una conductividad térmica en promedio de tres pruebas de $0,022 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Los paneles de aislamiento al vacío representa a futuro una alternativa altamente viable como aislante térmico, esto debido a que el espacio requerido por los mismos puede llegar a ser de hasta 5 veces menos que los paneles convencionales, una de las limitaciones que tienen estos paneles en la actualidad es que comparado con el panel de tipo sándwich su ciclo de vida es corto debido a la perdida de presión en su interior incrementando los costos de mantenimiento.

8 RECOMENDACIONES

Para futuras pruebas se recomienda tener más control sobre el proceso de fabricación de los especímenes y así poder garantizar una mayor precisión en los resultados de ensayo

Para futuras pruebas se recomienda secar los especímenes de tal forma estos tengan el mínimo porcentaje de humedad. Ya que la humedad interfiere en el análisis de conductividad térmica aumentando esta propiedad.

Para futuras pruebas se recomienda comprar el rack de conexión a la tarjeta de adquisición de datos debido que los cables pueden verse deteriorados por el constante uso. Viéndose reflejado en la inexactitud y des calibración del dispositivo placa caliente vigilada.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Bhatia, A.** *Overview of Insulation Materials*. NUEVA YORK : s.n., 2004.
2. **Çengel, Yunus A.** *Heat and mass transfer: a practical approach*. Pennsylvania State University : McGraw-Hill, 2007. ISBN 007325035X.
3. **Axel Berge, Pär Johansson.** *Literature Review of High Performance Thermal*. Gothenburg, Sweden 2012 : CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2012.
4. **Mills, Anthony F.** *Transferencia de calor*. Bogota : McGRAW-HILL/IRWIN, 1997. ISBN 84-8086-194-0.
5. **Kapps, Manfred and Buschkamp, Siegfried.** Fabricación de espuma rígida de poliuretano. [Online] 13 09 2004. [Cited: 25 Febrero 2013.] [http://www.pu-systems.bayermaterialsscience.com/BMS/BMS_Resource_Center.nsf/id/WebsiteIndependent_Herstellung_von_Polyurethan-Hartschaumsto/\\$file/sp_PU21012_es.pdf](http://www.pu-systems.bayermaterialsscience.com/BMS/BMS_Resource_Center.nsf/id/WebsiteIndependent_Herstellung_von_Polyurethan-Hartschaumsto/$file/sp_PU21012_es.pdf). PU21012-0409.
6. **Instituto Valenciano de la edificación.** Cuadernos de rehabilitacion. [Online] [Cited: 24 Abril 2013.] http://www.five.es/descargas/archivos/P1_portada.pdf.
7. **Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.** *Soluciones de Aislamiento con Poliestireno Expandido (EPS)*. madrid : s.n., 2008. ISBN: 978-84-96680-36-4.
8. **ISOVER.** Manual de aislamiento industrial. [Online] <http://www.isover.com/>.
9. **Johansson, Pär.** *Vacuum Insulation Panels in Buildings*. Göteborg, Sweden 2012 : CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2012. REPORT 2012:1.
10. *Vacuum Insulation Panels (VIPs) for building construction industry – A review of the contemporary developments and future directions.* **Limbachiya, M.C., Singh, H. and Alam, M.** 11, london : s.n., 11 2011, Applied Energy, Vol. 88, pp. 3592-3602.
11. *VIP and their applications in.* **Wang X, Walliman N, Ogden R, Kendrick C.** Constr Mater : s.n., 2007, pp. 145-63.
12. *Nanopores in Silica Aerogels.* **5,** Bratislava, Slovakia : s.n., 2008, ACTA PHYSICA POLONICA A, Vol. 113.
13. **Thorsell, Thomas .** *Advances in Thermal Insulation-Vacuum Insulation Panels and Thermal Efficiency to Reduce Energy Usage in Buildings.*

Stockholm : KTH Royal Institute of Technology, 2012. ISBN 978-91-7501-261-2.

14. Univerzita Konštantína Filozofa v Nitre. Hot Wire Methods for the Thermal Conductivity Measurement. [Online] [Cited: 25 Febrero 2013.] http://www.tpl.fpv.ukf.sk/engl_vers/hot_wire.htm#_4._References.

15. NETZSCH. Instruments for testing refractories. *Testing refractories*. [Online] NETZSCH. [Cited: 25 febrero 2013.] http://www.netzsch-thermal-analysis.com/uploads/tx_nxnetzschmedia/files/Refractories_E_0203_04.pdf.

16. *Método del “Pulso Láser” para la medida de la difusividad termica en materiales ceramicos*. E. GARCÍA, R. MARTÍNEZ, M. I. OSENDI, P. MIRANZO. Madrid : Instituto de Cerámica y Vidrio, 2001, Vol. 40, pp. 289-294.

17. *R. barea, R. marín, M.I. osendi, R. martinez P. miranzo*.

18. ASTM. ASTM C236-89(1993)e1 *Standard Test Method for Steady-State Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Guarded Hot Box* . washinton dc : ASTM, 1993.

19. Desjarlais, Andre O. *Rotatable Guarded Hot Box (RGHB). Experimental Facilities*. [Online] *Building Envelope Research Oak Ridge National Laboratory*, 12 mayo 1998. [Cited: 20 marzo 2013.] <http://www.ornl.gov/sci/roofs+walls/tour/tour02.html>.

20. NETZSCH-Gerätebau GmbH. *Guarded Hot Plate - GHP*. Germany : s.n., 2013.

21. Fraunhofer-Institute for Buidling Physics. *TFraunhofer Institute for Building Physic. Determination of thermal conductivity and thermal resistance of primarily homgeneous building materials and building components by means of the guarded hot plate method*. [Online] 2011. [Cited: 15 Febrero 2013.] http://www.ibp.fraunhofer.de/en/Test_Laboratories/thermal-characteristics--neu-/Insulating_Materials.html.

22. ASTM. *Standard test method for stady-state heat flux measuremnets and thermal transmition properties by means Guarded Hot-Plate Apparatus*. United states : American society for testing and materials, 1997.

23. Lambda-Meßtechnik GmbH. *Thermal Conductivity Test Tool λ -Meter EP500e*. [Online] Lambda-Meßtechnik GmbH. [Cited: 25 Febrero 2013.] <http://www.lambda-messtechnik.de/en/thermal-conductivity-test-tool->

ep500e/guarded-hot-plate-apparatus-lambda-meter-ep500e-design-and-function.html.

24. National Instruments. NI 9205. Módulo de Entrada Analógica de 32 Canales ± 200 mV a ± 10 V, 16 Bits, 250 kS/s. [Online] National Instruments, 2012. [Cited: 15 marzo 2013.] <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/208800>.

25. Kingspan Insulation Ltd. Kingspan Insulation Ltd. Kingspan OPTIM-R. [Online] Enero 2013. [Cited: 30 febrero 2013.] www.kingspaninsulation.co.uk/optim-r.

26. ASTM. ASTM C518: Standard Test Method for steady-state transmission properties by means of heat flow meter apparatus. WASHINGTON, D.C. : ASTM, 2004.

ANEXOS

Anexo A Memorias de cálculo método analítico.

Tabla 16 memorias de cálculo método analítico

espesor de pared	conducción sándwich	conducción matriz							
		numero de separaciones		numero de separaciones		numero de separaciones		numero de separaciones	
		20		30		40		50	
		espesores de separadores		espesores de separadores		espesores de separadores		espesores de separadores	
		1	2	1	2	1	2	1	2
40	0,0125	0,0041	0,0084	0,0061	0,0126	0,0081	0,0166	0,0101	0,0205
41	0,0122	0,004	0,0082	0,0059	0,0122	0,0079	0,0161	0,0099	0,0199
42	0,0119	0,0039	0,008	0,0058	0,0119	0,0077	0,0157	0,0096	0,0194
43	0,0116	0,0038	0,0078	0,0057	0,0116	0,0075	0,0153	0,0094	0,0189
44	0,0114	0,0037	0,0076	0,0055	0,0113	0,0073	0,0149	0,0092	0,0185
45	0,0111	0,0036	0,0074	0,0054	0,011	0,0072	0,0146	0,0089	0,018
46	0,0109	0,0035	0,0072	0,0053	0,0108	0,007	0,0142	0,0087	0,0176
47	0,0106	0,0034	0,0071	0,0052	0,0105	0,0069	0,0139	0,0085	0,0172
48	0,0104	0,0034	0,0069	0,005	0,0103	0,0067	0,0136	0,0084	0,0168
49	0,0102	0,0033	0,0068	0,0049	0,0101	0,0066	0,0133	0,0082	0,0165
50	0,01	0,0032	0,0066	0,0048	0,0099	0,0064	0,013	0,008	0,0161
51	0,0098	0,0031	0,0065	0,0047	0,0097	0,0063	0,0128	0,0079	0,0158
52	0,0096	0,0031	0,0063	0,0046	0,0095	0,0062	0,0125	0,0077	0,0154
53	0,0094	0,003	0,0062	0,0045	0,0093	0,0061	0,0122	0,0075	0,0151
54	0,0093	0,003	0,0061	0,0045	0,0091	0,0059	0,012	0,0074	0,0148
55	0,0091	0,0029	0,006	0,0044	0,0089	0,0058	0,0118	0,0073	0,0145
56	0,0089	0,0029	0,0058	0,0043	0,0087	0,0057	0,0115	0,0071	0,0143
57	0,0088	0,0028	0,0057	0,0042	0,0086	0,0056	0,0113	0,007	0,014

58	0,0086	0,0028	0,0056	0,0041	0,0084	0,0055	0,0111	0,0069	0,0137
59	0,0085	0,0027	0,0055	0,0041	0,0083	0,0054	0,0109	0,0068	0,0135
60	0,0083	0,0027	0,0054	0,004	0,0081	0,0053	0,0107	0,0066	0,0133
61	0,0082	0,0026	0,0053	0,0039	0,008	0,0052	0,0105	0,0065	0,013
62	0,0081	0,0026	0,0052	0,0039	0,0078	0,0051	0,0104	0,0064	0,0128
63	0,0079	0,0025	0,0052	0,0038	0,0077	0,0051	0,0102	0,0063	0,0126
64	0,0078	0,0025	0,0051	0,0037	0,0076	0,005	0,01	0,0062	0,0124
65	0,0077	0,0024	0,005	0,0037	0,0075	0,0049	0,0099	0,0061	0,0122
66	0,0076	0,0024	0,0049	0,0036	0,0073	0,0048	0,0097	0,006	0,012
67	0,0075	0,0024	0,0048	0,0036	0,0072	0,0048	0,0095	0,0059	0,0118
68	0,0074	0,0023	0,0048	0,0035	0,0071	0,0047	0,0094	0,0058	0,0116
69	0,0072	0,0023	0,0047	0,0035	0,007	0,0046	0,0093	0,0057	0,0114
70	0,0071	0,0023	0,0046	0,0034	0,0069	0,0045	0,0091	0,0057	0,0113
71	0,007	0,0022	0,0045	0,0034	0,0068	0,0045	0,009	0,0056	0,0111
72	0,0069	0,0022	0,0045	0,0033	0,0067	0,0044	0,0088	0,0055	0,0109
73	0,0068	0,0022	0,0044	0,0033	0,0066	0,0044	0,0087	0,0054	0,0108
74	0,0068	0,0021	0,0044	0,0032	0,0065	0,0043	0,0086	0,0053	0,0106
75	0,0067	0,0021	0,0043	0,0032	0,0064	0,0042	0,0085	0,0053	0,0105
76	0,0066	0,0021	0,0042	0,0031	0,0063	0,0042	0,0084	0,0052	0,0103
77	0,0065	0,0021	0,0042	0,0031	0,0062	0,0041	0,0082	0,0051	0,0102
78	0,0064	0,002	0,0041	0,0031	0,0062	0,0041	0,0081	0,0051	0,0101
79	0,0063	0,002	0,0041	0,003	0,0061	0,004	0,008	0,005	0,0099
80	0,0063	0,002	0,004	0,003	0,006	0,004	0,0079	0,0049	0,0098
81	0,0062	0,002	0,004	0,0029	0,0059	0,0039	0,0078	0,0049	0,0097
82	0,0061	0,0019	0,0039	0,0029	0,0058	0,0039	0,0077	0,0048	0,0096
83	0,006	0,0019	0,0039	0,0029	0,0058	0,0038	0,0076	0,0048	0,0094
84	0,006	0,0019	0,0038	0,0028	0,0057	0,0038	0,0075	0,0047	0,0093

85	0,0059	0,0019	0,0038	0,0028	0,0056	0,0037	0,0074	0,0046	0,0092
86	0,0058	0,0018	0,0037	0,0028	0,0056	0,0037	0,0073	0,0046	0,0091
87	0,0057	0,0018	0,0037	0,0027	0,0055	0,0036	0,0073	0,0045	0,009
88	0,0057	0,0018	0,0036	0,0027	0,0054	0,0036	0,0072	0,0045	0,0089
89	0,0056	0,0018	0,0036	0,0027	0,0054	0,0036	0,0071	0,0044	0,0088
90	0,0056	0,0018	0,0035	0,0026	0,0053	0,0035	0,007	0,0044	0,0087
91	0,0055	0,0017	0,0035	0,0026	0,0052	0,0035	0,0069	0,0043	0,0086
92	0,0054	0,0017	0,0035	0,0026	0,0052	0,0034	0,0069	0,0043	0,0085
93	0,0054	0,0017	0,0034	0,0026	0,0051	0,0034	0,0068	0,0042	0,0084
94	0,0053	0,0017	0,0034	0,0025	0,0051	0,0034	0,0067	0,0042	0,0083
95	0,0053	0,0017	0,0034	0,0025	0,005	0,0033	0,0066	0,0041	0,0082
96	0,0052	0,0016	0,0033	0,0025	0,005	0,0033	0,0066	0,0041	0,0081
97	0,0052	0,0016	0,0033	0,0024	0,0049	0,0033	0,0065	0,0041	0,008
98	0,0051	0,0016	0,0032	0,0024	0,0048	0,0032	0,0064	0,004	0,0079
99	0,0051	0,0016	0,0032	0,0024	0,0048	0,0032	0,0063	0,004	0,0079
100	0,005	0,0016	0,0032	0,0024	0,0047	0,0032	0,0063	0,0039	0,0078

Fuente Autor

Anexo B Rutina empleada para el modelo analítico.

```
function paredes(t_01,t_02)
t_01=25
t_02=0
K=[2.04 0.02];%aluminio poliuretano
k_ai=0.16 ;% Polipropileno
%lamina de aluminio calibre 28 equivalente a .356 mm
l_al=.356e-3;
mx=1;
for e_p=40:1:100
    my=1;
    m(mx,my)=e_p;
    my=my+1;
    m(mx,my)=((t_01-t_02)/((l_al/K(1,1))+((e_p-(2*l_al))/(K(1,2)))+(l_al/K(1,1))));

    for n_a=20:10:50
        for e_a=1:1:3
            my=my+1;
            l_a1=e_p-2*e_a;
            A=1;
            A_1=e_a*1e-3;
            A_2=(e_a*1e-3)*((1-n_a*e_a*1e-3)/n_a);
            m(mx,my)=((t_01-t_02)/(1/(n_a/((l_a1/(k_ai*A_1)))+(n_a*(n_a-
1)/(l_a1/(k_ai*A_2)))+(e_a/k_ai*A)+(e_a/k_ai*A))));
        end
    end
    mx=mx+1;
end
disp(m)
```

Anexo C Lista de materiales.

Tabla 17 Lista de materiales

UNIDADES	DESCRIPCIÓN	1	2	3	4	5	6
1	Aluminio calibre 18						
1	Manta de vidrio						
1	Ferroníquel 1mm						
4	Codos 1/2 con esparrago						
2	Y con esparrago						
6	Manguera de 1/2						
4	Empaques 3/8						
4	Tuercas 4/3						
32	Tornillos 3/16 x 1/4						
1	Perfil U liviana aluminio						
1	Platina acero 1,5 x 1/32						
8	Remaches 5/8 x 1/2						
2	Triplex 9mm						
1	Viga 10 x 20						
3	Velcro						
10	Foil aluminio						
18	Termopares tipo K						
8	Cable coaxial 4 pares						
2	Juegos de bananas						
1	Fuente de alimentación duplex dc - ac						
1	Tarjeta NI 9202						
1	Base						
1	Sellante						
1	Silicona negra						
1	Silicona transparente						
1	Cinta aislante 3m+						
1	Super bonder						
1	Pintura negra mate						
1	Base para aluminio						
22	Puntillas						
1	Colbon madera						
1	Cauchola						
1	Acople reduccion 1 in to 1/2 in						

1. hot plate, 2. Cold box, 3. Sistema riel, 4. Caja, 5. Control alimentación, 6. Consumibles. Fuente autor

Anexo D Calibración termopares.

La calibración de los termopares se realizó a partir de método de unión fría en donde a partir de una temperatura de referencia se determinó la unión fría

Tabla 18 calibración termopares

numero	T _t	T _{ref}	\inc T	T _t	T _{ref}	\inc T
1	17,56	17,5	-0,06			
2	17,4	17,5	0,1			
3	16,6	17,5	0,9			
4	15,8	17,5	1,7			
5	17,12	14,2	2,92	14	14,2	0,2
6	17,02	14,2	2,82	13,8	14,2	0,4
7	17,13	14,2	2,93	14,35	14,2	-0,15
8	18,2	14,2	4	13,4	14,2	0,8
9	22,8	19,1	3,7	16,41	16,9	0,49
10	22,8	19,2	3,6	16,48	16,9	0,42
11	22,4	19,2	3,2	16,9	16,9	0
12	22,4	19	3,4	16,65	16,9	0,25
13	23	19,3	3,7	13,3	14,45	1,15
14	22,9	20,2	2,7	14,5	14,45	-0,05
15	23,8	18,8	5	14,3	14,45	0,15
16	22,1	19,8	2,3	14,35	14,45	0,1

Fuente Autor.

Anexo E Costos de fabricación.

suministros hídricos				
8	m	manguera 1/2 in transparente	\$ 1.200,00	\$ 9.600
2	u	acoples 1/2 in tipo y esparrago	\$ 6.500,00	\$ 13.000
4	u	acoples 1/2 in codo rosca esparrago	\$ 6.500,00	\$ 26.000
4	u	tuercas para acople 1/2 in	\$ 6.500,00	\$ 26.000
4	u	empaque para tubo 1/2 in	\$ 1.000,00	\$ 4.000
1	u	expansión 1/2in a 1in	\$ 8.500,00	\$ 8.500
suministros eléctricos				
8	m	cable 4 pares encauchado	\$ 800,00	\$ 6.400
16	u	termopar tipo K	\$ 4.200,00	\$ 67.200
11	m	ferróníquel 1mm	\$ 863,00	\$ 9.493
4	m	cable calibre 14 dúplex	\$ 600,00	\$ 2.400
4	u	bananas conector fuente	\$ 450,00	\$ 1.800
estructura y componentes				
1	U	lamina de aluminio 2mmx2m x 1m	\$ 105.908,00	\$ 105.908
3	m	U liviana mate	\$ 2.978,88	\$ 8.937
2	u	laca negra mate	\$ 17.600,00	\$ 35.200
1	U	fibra de vidrio 10 m ²	\$ 16.900,00	\$ 16.900
1	U	triplex pino 9mm	\$ 42.000,00	\$ 42.000
32	u	tornillos avellanados 3/16	\$ 110,00	\$ 3.520
1	u	juego macho 3/16	\$ 5.500,00	\$ 5.500
1	u	broca lamina 5/32	\$ 1.500,00	\$ 1.500
1	u	Henkel sellante	\$ 18.000,00	\$ 18.000

1	u	silicona transparente	\$ 10.900,00	\$ 10.900
1	u	silicona negra	\$ 11.900,00	\$ 11.900
1	u	3 Cintas Super 33+	\$ 10.000,00	\$ 10.000
1	u	foil aluminio 20m	\$ 3.500,00	\$ 3.500
1	u	cemento de contacto Topex	\$ 10.000,00	\$ 10.000
1	u	clavo sin cabeza	\$ 900,00	\$ 900
1	u	carpincol	\$ 4.500,00	\$ 4.500
1	u	Base	\$ 15.000,00	\$ 15.000
8	u	remaches 3/8	\$ 250,00	\$ 2.000
servicios				
1		corte y dobles de lamina	\$ 92.800,00	\$ 92.800
1		corte madera	\$ 10.000,00	\$ 10.000
1		corte cnc	\$ 30.000,00	\$ 30.000
				\$ 613.358
costo total dispositivo				
control e instrumentación				
1		NI 9205 conexión terminal resorte 7795191	\$ 1.992.000,00	\$ 1.992.000
1		cDAQ-9178, CompactDAQ chassis (8 slot USB)	\$ 2.654.000,00	\$ 2.654.000
1		Power Cord, AC, U.S., 120 VAC, 2.3 meters	\$ 21.000,00	\$ 21.000
1		USB cable with locking screw, 1 M	\$ 49.000,00	\$ 49.000
1		NI 9940 Backshell for 36-pos connector block (qty 1)	\$ 73.000,00	\$ 73.000
costo tala sistema de adquisición				\$ 4.789.000

Anexo F Costos del proyecto.

RECURSOS FUNGIBLES		
RECURSOS	DINERO	ESPECIE
Internet	\$150.000,00	
Tiempo computador		\$100.000,00
Viáticos	\$200.000,00	
Papelería e impresiones	\$80.000,00	
Transporte	\$340.000,00	
Imprevistos	\$200.000,00	
Material bibliográfico	\$100.000,00	\$200.000,00
TOTAL	\$1.070.000,00	\$300.000,00
RECURSOS INSTITUCIONALES		
RECURSOS	DINERO	ESPECIE
Microsoft office		\$429.900,00
Matlab		\$900.000,00
Elementos finitos - ANSYS		\$1.000.000,00
Tutorías		\$156.250,00
Laboratorios		\$300.000,00
Consumos e insumos		\$200.000,00
TOTAL		\$2.986.150,00
CONSTRUCCION		
RECURSOS	DINERO	ESPECIE
Materiales	\$613.357,64	
instrumentación		\$4.789.000,00
Consumos e insumos	\$200.000,00	
TOTAL	\$813.357,64	\$4.789.000,00
COSTOS TOTALES		
TOTAL	\$1.883.357,64	\$8.075.150,00
Costo total del proyecto	\$9.958.507,64	

Anexo G practica de laboratorio.

Análisis del de la conductividad térmica en materiales aislantes.

INTRODUCCION.

La transferencia de calor se presenta cuando existe una diferencia de temperatura entre dos cuerpos, esta transferencia ocurre del cuerpo más caliente al más frío hasta alcanzar un equilibrio térmico. En muchas aplicaciones de ingeniería es necesario emplear materiales que debido a su baja conductividad térmica funcionan como aislantes, reduciendo la tasa de pérdida o ganancia de calor significativamente y generando un ahorro en el consumo de energía en los equipamientos e instalaciones industriales y residenciales.

OBJETIVO DE LA PRÁCTICA.

Determinar la conductividad térmica en materiales aislantes mediante el método placa caliente vigilada según normas ASTM c177.

REQUERIMIENTOS CONCEPTUALES

- Transferencia de calor estado estacionario.
- conductividad térmica a través de superficie plana.

EQUIPOS REQUERIDOS

Nombre	Figura.
DPCV	
Peak tech 6010d	

Tarjeta de adquisición de datos Módulo de Entrada Analógica de 32 Canales NI 9205	
Conexión de Terminal de Resorte	
Chasis NI Compact DAQ USB de 8 Ranuras NI cDAQ-9178	
banco hidráulico H1D	
PC con controladores+ programa labview	

DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO PLACA CALIENTE VIGILADA

El método de placa caliente vigilada es un método de estado estacionario y absoluto en donde se hace un sándwich entre las 2 placas frías, los dos especímenes y la placa caliente, Generando así un gradiente

térmico directamente proporcional a la potencia eléctrica que es transformada en calor y es direccionada a través de las muestras debido al diferencial de temperatura generado por los platos fríos. Quedando así las principales partes del dispositivo en una configuración como se muestra en la figura 1

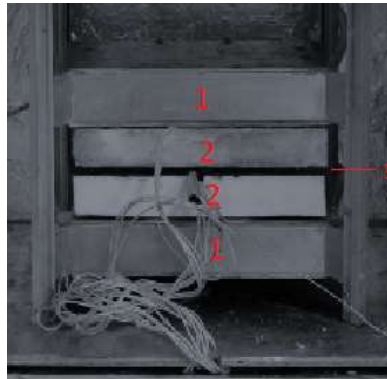


Fig. 1 dispositivo placa Caliente vigilada .1 plato frío, 2 muestra 3 plato caliente

La conductividad térmica de la material va a esta dada por.

$$Q = V \cdot I$$

$$Q = \frac{2A \cdot K \cdot \Delta T}{x}$$

MONTAJE EXPERIMENTAL.

Conectar la manguera de entrada al banco como muestra la fig 2. y la manguera de salida como se muestra en fig 3.

Fig2. Conexión entrada



Fig3. Conexión salida



Abrir la caja del contenedor subir la caja fría superior tomar el plato caliente y posicionar una muestra a cada lado del plato caliente posicionar los termopares (4 a cada lado formando un cuadrado de 10 x 10 centrado), y volver a insertar el sándwich de muestras con plato caliente asegurarse que las muestras quedaron centradas en el mismo eje con los platos fríos fig. 4

Fig. 4 Montaje muestra

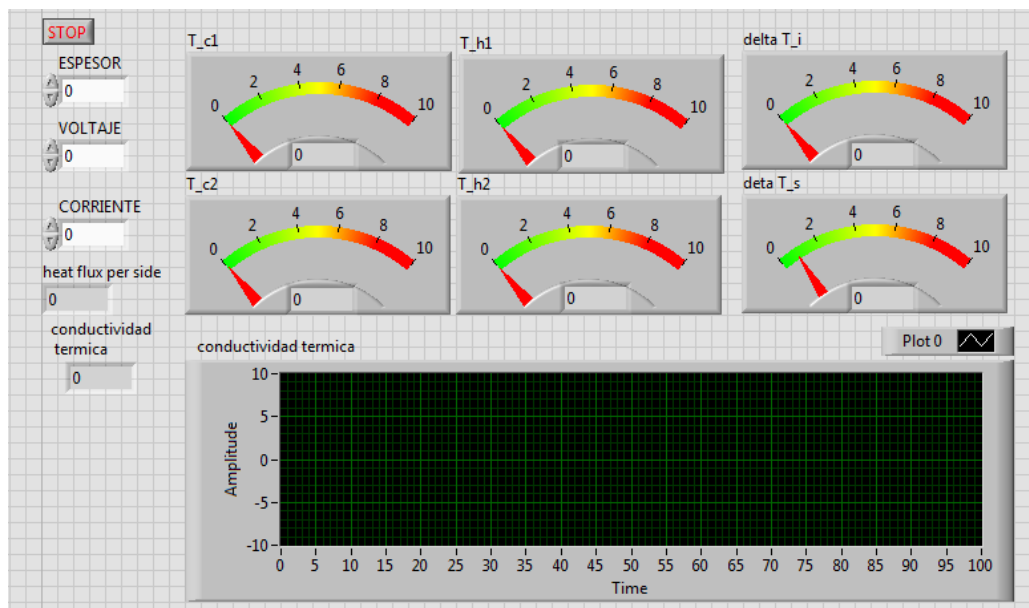


Cerrar el contenedor conectar los cables de alimentación eléctrica a la fuente Peak tech 6010d encender la fuente, fijar la potencia en la sección de muestra (cable sin cinta), fijar la potencia en la sección de vigilancia 3 veces la potencia de la sección de muestra. Debido a que:

$$Q_v = \frac{Q_m A_v}{A_m} = Q_m \frac{30^2 - 15^2}{15^2} = 3Q_m$$

Conectar nuestro dispositivo de adquisición de datos al computador y abrir el programa LabView con el programa GHPA2 adjunto a este documento .cuya interfaz gráfica se muestra en la Fig.5 .en (donde T_c temperatura cold (fría), T_h temperatura hot (caliente), delta T_i gradiente de temperatura sección inferior, delta T_s gradiente de temperatura superior.

Fig. 5



Fuente Autor.

TOMA DE DATOS EXPERIMENTALES Y POSPROCESAMIENTO

Para la toma de datos esperar a que el sistema se estabilice es decir la gráfica no posea ninguna pendiente y hacer registro en una tabla de Excel(tabla 1). La conductividad térmica teórica va a estar dada por la bibliografía o la ficha técnica del material. Los estimativos de estabilización están dados por la tabla 2

Tabla 1

Reportaje de ensayos VIP				
variable	Unidades	ensayo 1	ensayo 2	ensayo 3
Q	W			
T _h	°C			
T _l	°C			
T _m	°C			
\inc T	°C			
A	m ²			
L	m			
K _{exp}	W °C ⁻¹ m ⁻¹			
K _{Teo}	W °C ⁻¹ m ⁻²			
error	%			

Tabla 2

	K > .1	K<0.1 y K>.03	K<0.03
tiempo	1 - 2 horas	De 6 a 8 horas	De 6 horas en adelante

Anexo H Ficha técnica del dispositivo.

Nombre: DISPOSITIVO PARA MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA mediante el método de placa caliente vigilada (GHP)

Fabricante: Andres Martinez

Descripción.

El método de placa caliente vigilada es un método de estado estacionario y *absoluto* en donde la placa caliente y el anillo de vigilancia son puestos dentro de 2 muestras de un mismo material con la misma área y espesor generando así un gradiente térmico directamente proporcional a la potencia eléctrica que pasa por las muestras y es disipado por los platos de enfriamiento. Quedando así las principales partes del dispositivo en una configuración como se muestra en la fig. 1.

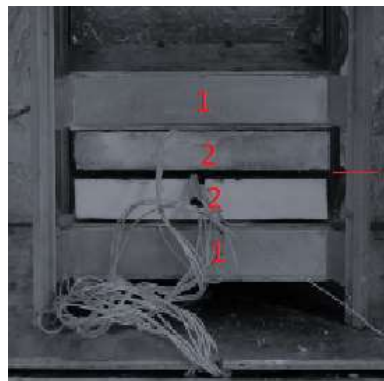


Fig. 1 dispositivo placa Caliente vigilada .1 plato frio, 2 muestra 3 plato caliente

Especificaciones del dispositivo:

Aislamiento	Aire	
Orientación	Horizontal	
	Mínimo	máximo
Alimentación corriente	N.A	30 V 4A
Máximo espesor del espécimen	1cm	5 cm
Lado del espécimen	15 cm	30 cm

Anexo I Planos.

HOT GUARD PLATE APPARATUS DRAWINGS



anexo I.pdf

Anexo J Memorias de cálculo coeficiente conectivo.

Tabla memorias de cálculo coeficiente conectivo vertical

vertical		
L	0,069	m
Beta	0,0025	
Tamb	15	C
Tsup	34,25	C
Delta T	19,25	C
g	9,81	m/S2
Visc Cin	2,55E-05	m2/s
k air	0,0331	W/(m K)
Pr	0,69	
Psi	0,10594855	
GraL	2,39E+05	
RaL	1,65E+05	
NuL	8,29905624	
hc	3,98114147	W/(m2 K)

Tabla memorias de cálculo coeficiente conectivo horizontal.

horizontal			horizontal		
L	0,3	m	L	0,3	m
Beta	0,0025		Beta	0,0025	
Tamb	15	C	Tamb	15	C
Tsup	46,2	C	Tsup	17,4	C
Delta T	31,2	C	Delta T	2,4	C
g	9,81	m/S2	g	9,81	m/S2
Visc Cin	2,55E-05	m2/s	Visc Cin	2,55E-05	m2/s
k air	0,0331	W/(m K)	k air	0,0331	W/(m K)
Pr	0,69		Pr	0,69	
GraL	3,18E+07		GraL	2,44E+06	
RaL	2,19E+07		RaL	1,69E+06	
NuL	2,41E+01		NuL	1,56E+01	
hc	2,65888658	W/(m2 K)	hc	1,72475886	W/(m2 K)
			W	0,3	
			X	1,36E+00	

Anexo K Tabla de Excel con formulas

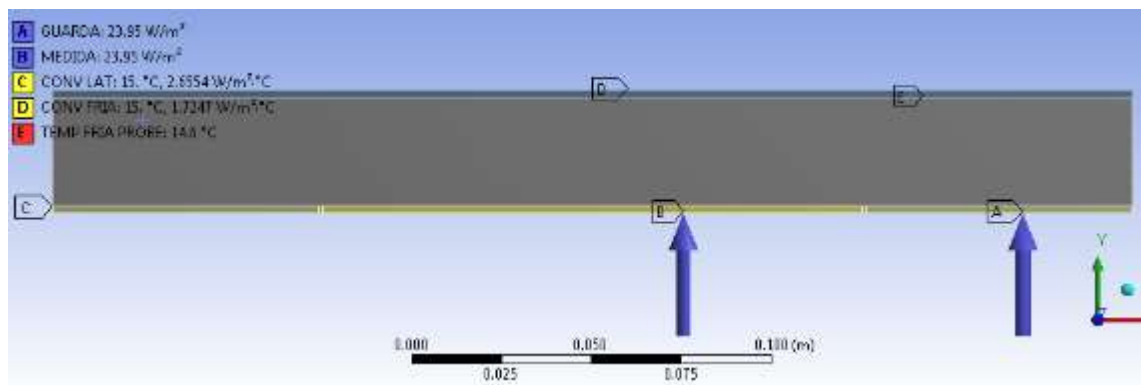
[illegible]

Anexo L Validación e datos mediante simulación térmica

Se realizó una simulación mediante elementos finitos donde los datos de entrada para la simulación fueron:

- ♦ Coeficiente conectivo de película horizontal
- ♦ Coeficiente conectivo sobre la superficie fría
- ♦ temperatura sobre el lado frio

Modelo inicial



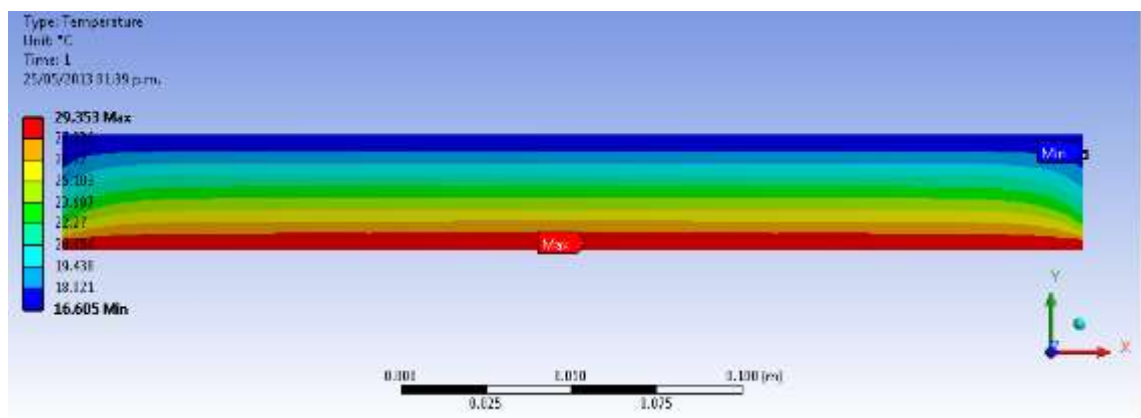
Para este modelo se generó una malla Con:

Nodos 11557

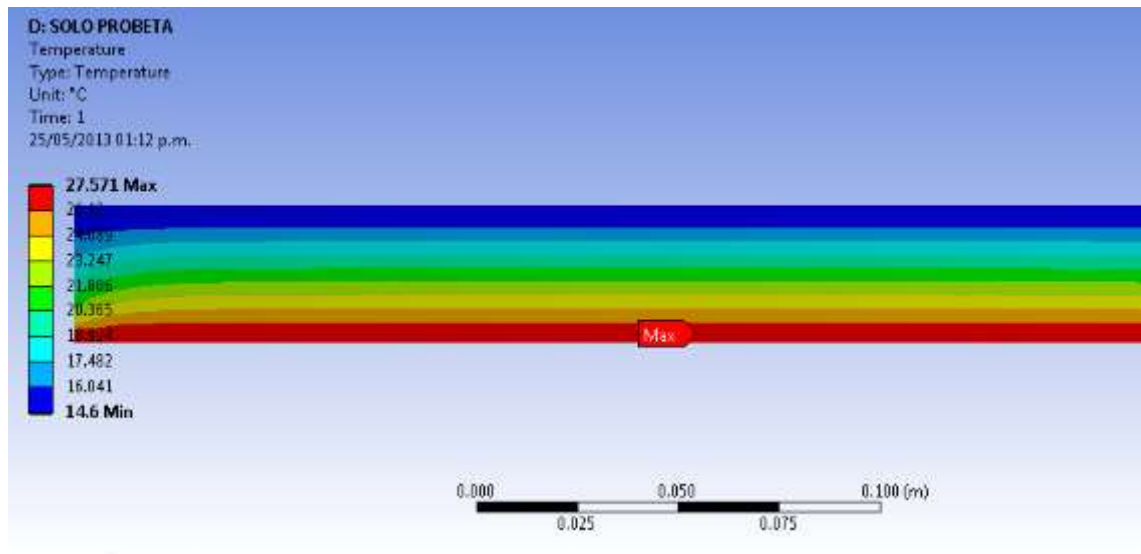
Elementos 1761

Y a partir de ahí se realizó una simulación de convalidación para cada una de las pruebas.

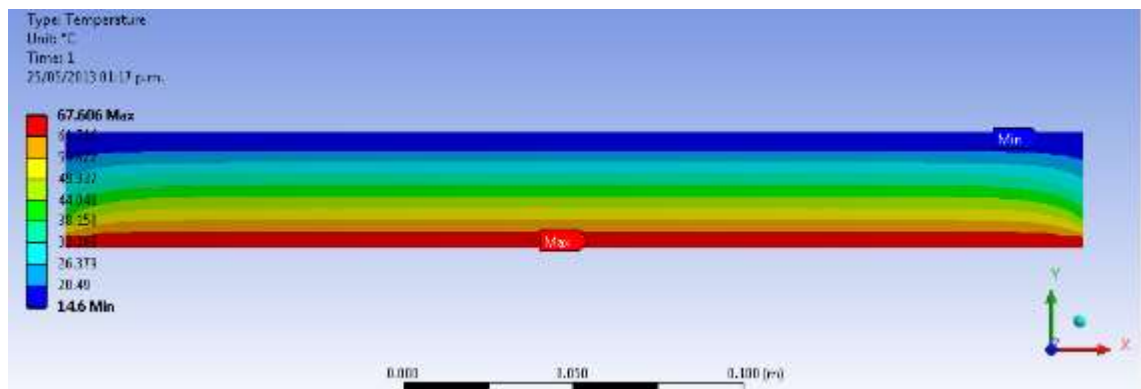
Eps 1



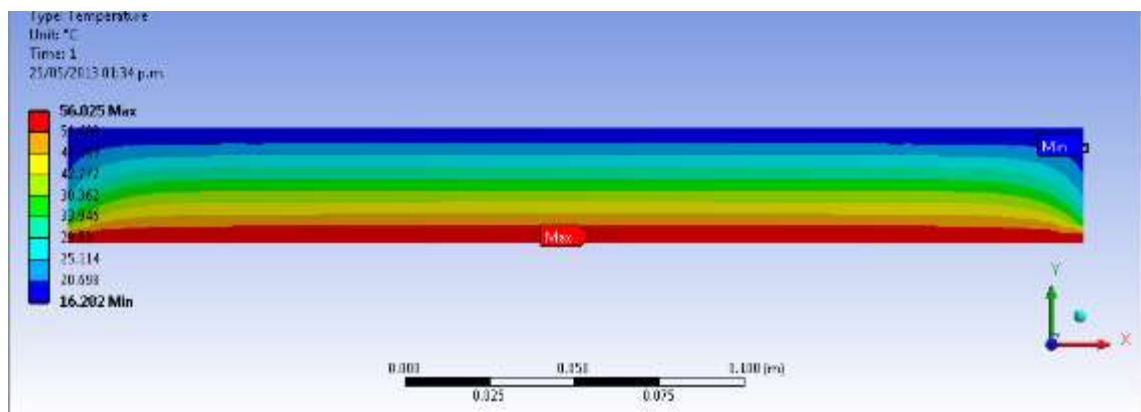
Eps 2



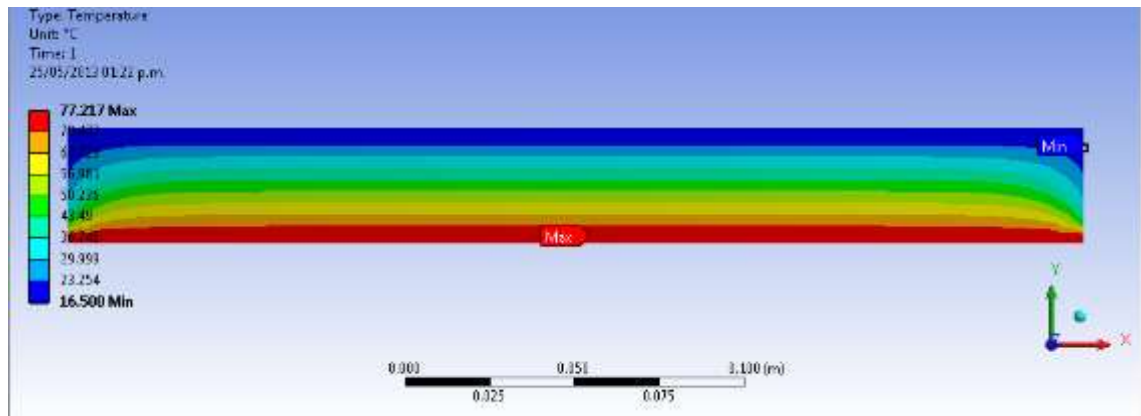
Eps 3



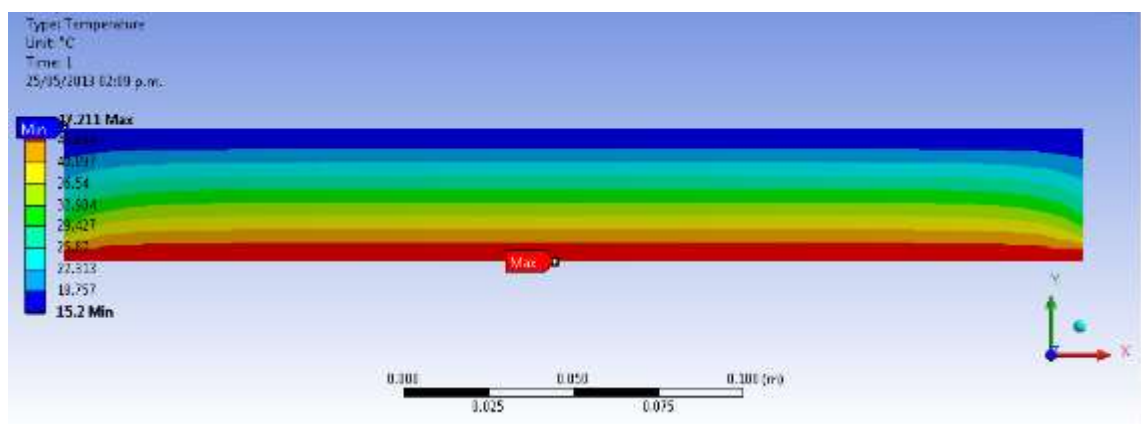
Vip 1



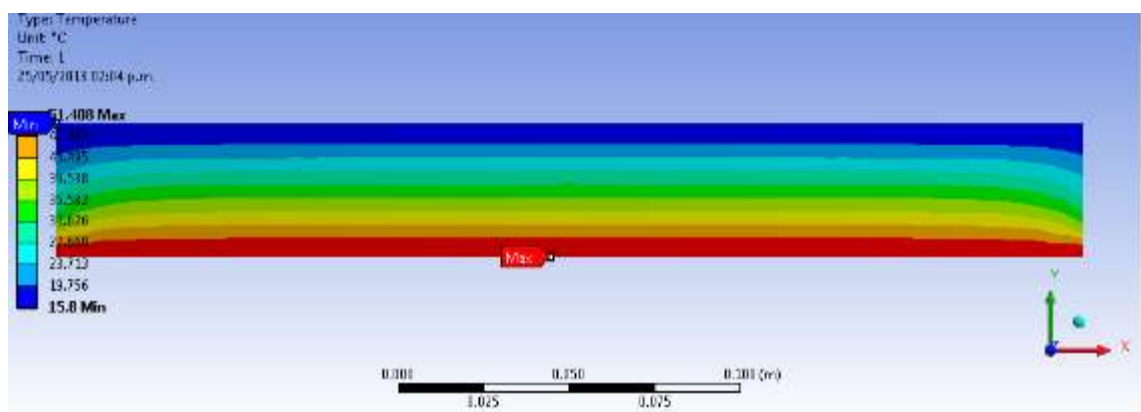
Vip 2



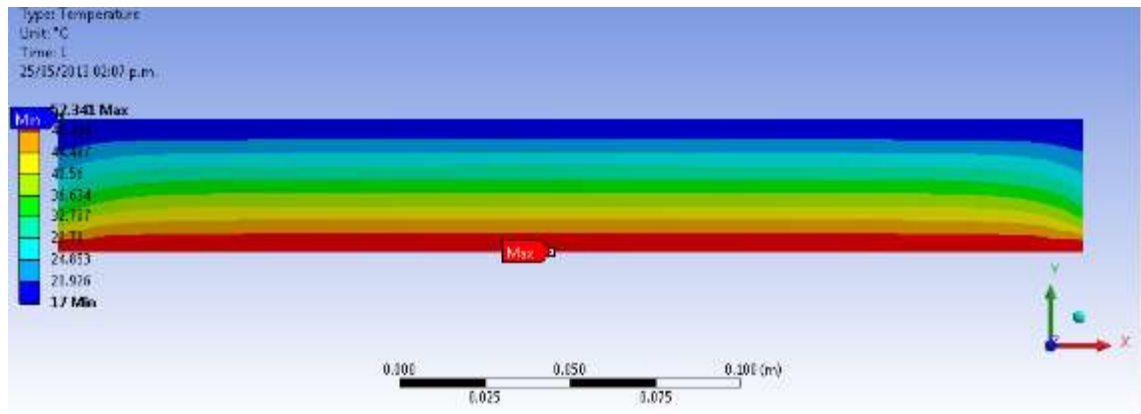
Pur 1



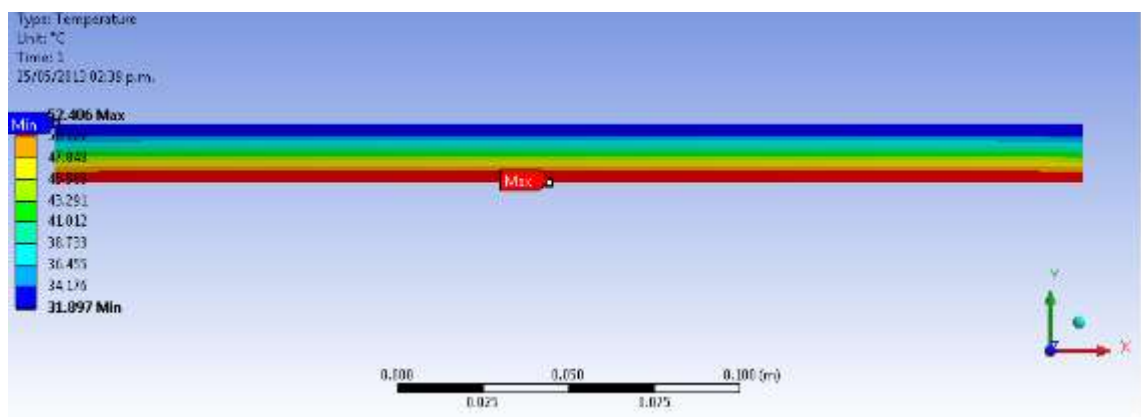
Pur 2



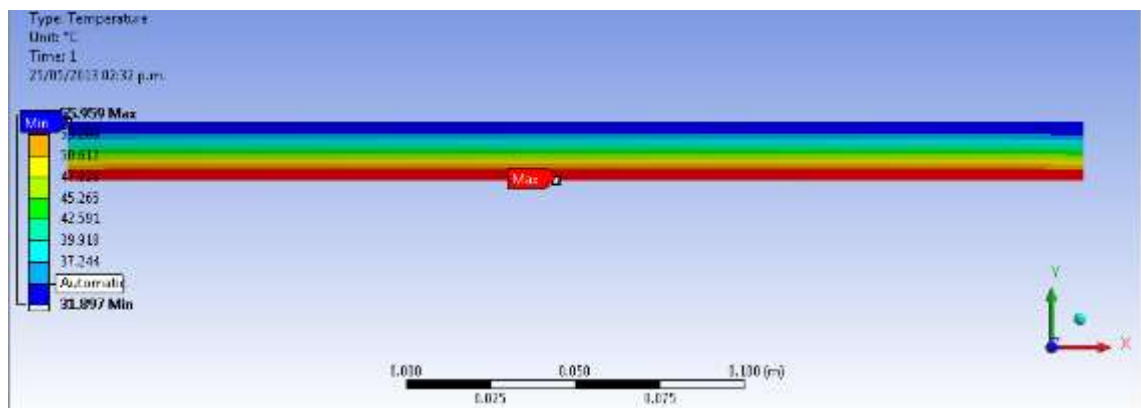
Pur 3



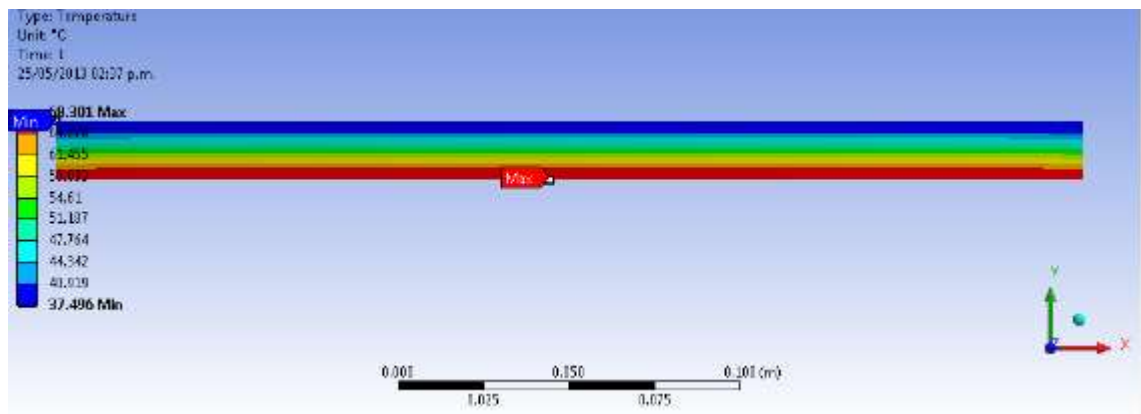
FIBRO 1



Fibro 2



Fibro 3



Anexo M Memorias de cálculo comparación de resultados

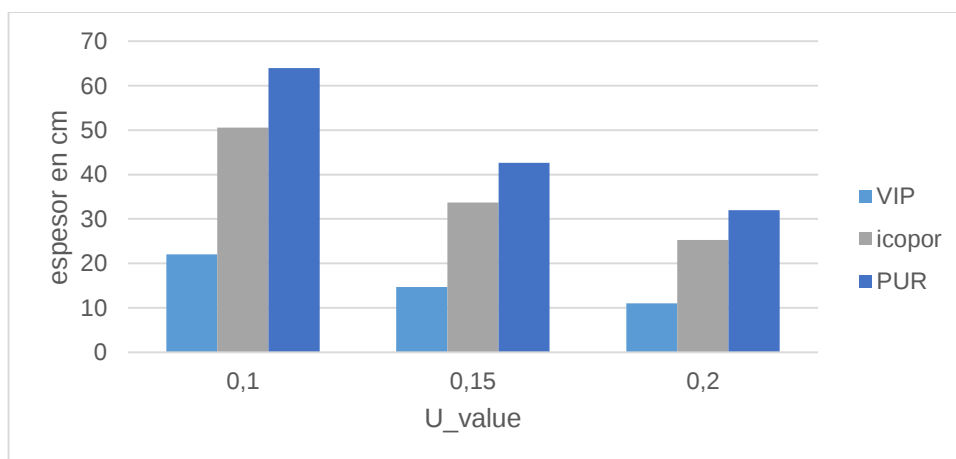
$$U_{value} \ 0,1 \ Wm^2K^{-1}$$

$$U_{value} \ 0,15 \ Wm^2K^{-1}$$

$$U_{value} \ 0,2 \ Wm^2K^{-1}$$

Comparación a partir de los datos experimentales.

material	conductividad térmica	espesor 1 (cm)	espesor 2 (cm)	espesor 2 (cm)
VIP	0,022	22,00386855	14,6692457	11,0019343
icopor	0,051	50,5540844	33,7027229	25,2770422
PUR	0,064	63,97077756	42,647185	31,9853888



Comparación a partir de los datos escritos en la bibliografía

material	Conductividad térmica	espesor 1 (mm)	espesor 2 (mm)	espesor 2 (mm)
VIP	0,007	70	46,6	35
icopor	0,041	410	273,3	205
PUR	0,035	350	233,3	175

