



Desarrollo y validación de un aparato para determinar conductividad térmica de materiales

Luis Fernando Zavala Noriega^{1,*}, Francisco Javier Martínez López¹,
Zaira Pineda Rico¹, Pedro Cruz Alcántar¹

¹Coordinación Académica Región Altiplano1, Matehuala, San Luis Potosí, México.

*luis_ferz.n.1@live.com.mx

Resumen

En este trabajo se describe el diseño de un dispositivo para medir la conductividad térmica de materiales. El diseño conceptual se realiza con el análisis del despliegue de función de calidad o QFD, estableciendo las características, materiales, geometría del dispositivo y la energía suministrada para generar calor. El dispositivo permite adquirir datos en tiempo real de la temperatura en la superficie inferior y superior de la probeta, para determinar de forma precisa la conductividad y la resistencia térmica del espécimen. La validación se realiza a través de pruebas experimentales sobre un material con conductividad térmica conocida y otro desconocido, y comparando los resultados con la simulación del fenómeno en análisis de elemento finito bajo condiciones similares.

Palabras claves: Diseño, Materiales, Conductividad Térmica, Flujo de Calor.

Abstract

This work describes the design of a device to measure the thermal conductivity of materials. The conceptual design is performed with the analysis of the quality function deployment or QFD, establishing the characteristics, materials, geometry of the device and the energy supplied to generate heat. The device allows to acquire real-time temperature data on the upper and lower surface of the specimen, to accurately determine the conductivity and thermal resistance of the specimen. Validation is performed through experimental tests on a known thermal conductivity material and another unknown, and comparing the results with the simulation of the phenomenon in finite element analysis under similar conditions.

Keywords: Materials, Thermal Conductivity, Unidirectional Heat Flow.

Recibido: 05 de junio de 2023. Aceptado: 18 de agosto de 2023. Publicado: 04 de septiembre de 2023.

1. Introducción

La energía existe y se representa en diversas formas, como son: térmica, mecánica, eléctrica, química, magnética, entre otras; y se puede transferir mediante la interacción de un sistema con su alrededor. Toda vez que exista una diferencia de temperatura entre uno o varios cuerpos, existirá transferencia de energía en forma de calor. Por lo tanto, la transferencia de calor es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas [1]. En nuestra vida cotidiana vivimos rodeados



de sustancias y materiales que transfieren calor entre sí, a consecuencia de tres procesos: conducción, convección y radiación térmica.

En la actualidad, es de gran importancia para la comunidad científica y tecnológica determinar la conductividad térmica en los materiales con el fin de determinar la capacidad de transferir calor a través de un cuerpo. La conductividad térmica es una propiedad de gran utilidad en aplicaciones tales como: construcción, invernaderos para controlar la temperatura ambiental, aplicaciones de disipación térmica y/o aislantes térmicos, calentamiento de componentes electrónicos o simplemente para analizar la transferencia de calor de un cuerpo a otro [1-2]. Sin embargo, según lo descrito en un documento de L. Lira (2009), los equipos encargados de medir propiedades térmicas de los materiales rondan precios de entre 750,000 hasta 10,000,000 pesos mexicanos. Al ser máquinas especializadas y con alta precisión, es justificado su alto valor en el mercado, aunque, por otro lado, resulta inaccesible para la mayoría de los usuarios que requieran determinar la conductividad térmica de algún espécimen, por lo que existe la necesidad de la creación de un equipo de bajo costo para determinar esta propiedad [3].

En investigaciones previas, se encuentran diversos métodos utilizados para medir la conductividad térmica de los materiales, así como una gran variedad de aparatos encargados de medir esta propiedad. La universidad de Qatar (2021) utilizó un método que consiste en colocar un primer conjunto de intercambiador de calor dentro de un primer extremo de un aislante cilíndrico y un segundo conjunto de intercambiador de calor con una temperatura inicial mayor que la primera temperatura, dentro del segundo extremo del aislante cilíndrico [4]. Castán Fernández C. (2018) construyó un aparato para medir la conductividad térmica de los materiales de lechada geotérmica utilizando el método de cable caliente transitorio; su sistema consta principalmente de un cable caliente, una fuente de alimentación, un sensor de temperatura y un registrador de datos, además de tener un diseño compacto [5]. Por otro lado, C. M. Daza-Mafioli (2019) desarrolló un aparato para la medición de esta propiedad física con una finalidad didáctica; el sistema de Daza Mafioli está constituido por un calentador y un bloque de cobre entre los que se coloca la muestra a medir utilizando termopares diferenciales tipo T con los que registra la diferencia de temperatura entre las caras del espécimen de prueba [6]. En adición, Luis Acuña-Alegria (2018) empleó un método en el que manejó variaciones de humedad y temperatura en especímenes de madera de pinus que colocó en una cámara, con lo cual determinó la conductividad térmica del material a través de la medición de temperaturas y sus curvas de secado [7]. La mayoría de los dispositivos trabajan con materiales aislantes como los materiales de construcción caracterizados por contar con baja conductividad térmica.

En este trabajo se plantea desarrollar un dispositivo para la medición de la conductividad térmica de los materiales, tomando en cuenta las características de los prototipos encontrados en literatura, y planteando un diseño con bajo costo, facilidad de construcción, funcionamiento sencillo, entre otras. La construcción del dispositivo se plantea con una finalidad didáctica y de uso académico, basado en la normativa de ASTM C177 [8]. La validación del dispositivo se realiza determinando de forma experimental el coeficiente de la conductividad de un material de características

conocidas y otro desconocido, y comparando los resultados con la simulación a través de análisis de elemento finito.

2. Teoría

La termodinámica es la ciencia en la que se estudian las transiciones y reacomodos de energía en forma de calor a través de los cuerpos de materia [9]. En tanto que, la transferencia de calor trata acerca de la rapidez a la que se transfiere la energía térmica. En este fenómeno, existen tres métodos de transferencia de calor: la conducción, que consiste en transferir energía de partículas más energéticas de una sustancia hacia partículas adyacentes de menor energía al haber interacción física entre ellas. En la convección se transfiere energía entre la superficie sólida y el fluido que está en movimiento, en el cual están implícitos los efectos combinados de la conducción y el movimiento de dicho fluido. Y la radiación es el proceso en el que un cuerpo emite energía en forma de onda electromagnéticas o fotones.

2.1. Conductividad térmica

La conductividad térmica k es una medida de la capacidad de un material para conducir calor, por ejemplo, $k = 0.607 \text{ W/m K}$, para el agua, y $k = 186.8 \text{ W/m K}$, para el acero inoxidable. Lo anterior indica que el acero inoxidable conduce el calor 300 veces más rápido que el agua, lo que significa que el agua es un mal conductor de calor en relación con el acero. La conducción en un medio es estacionaria o estable cuando la temperatura no varía con el tiempo, y no estacionaria o transitoria, cuando lo hace. Además, es unidimensional cuando la transferencia de calor por conducción es significativa sólo en una dimensión y despreciable en las otras dos direcciones. En la Imagen 1 se muestra el flujo de calor unidireccional a través de una pared, la diferencia de temperaturas en las superficies y las propiedades geométricas que influyen en el flujo de calor [2].

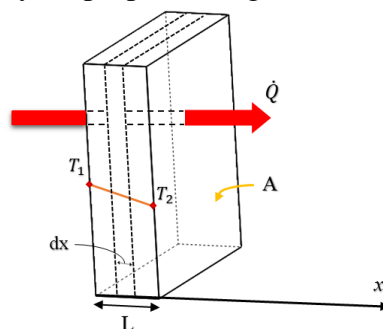


Imagen 1. Propiedades implícitas en el flujo de calor de una pared.

La conductividad térmica se relaciona con el flujo de calor a través de la siguiente expresión:

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx} = -kA \frac{\Delta T}{L} \quad (1)$$

donde: A es el área de la sección transversal por la cual existe un flujo de calor unidireccional, ΔT es la diferencia de temperaturas entre la superficie caliente y la superficie fría del espécimen a medir y L representa el espesor de dicho espécimen. En tanto que la resistencia térmica a través de una pared plana se puede expresar como:

$$R_{\text{pared}} = \frac{L}{k A} \quad (2)$$

donde R_{pared} es la resistencia térmica de la pared que se opone a la conducción de calor o simplemente la resistencia de conducción. La resistencia térmica de un medio depende de la configuración geométrica y de las propiedades térmicas del medio. Por otro lado, es posible calentar una capa de material de espesor y área conocidos, desde uno de sus lados, por medio de un calentador de resistencia eléctrica de potencia conocida. Por lo que, en un sistema ideal el flujo de calor es igual a la potencia disipada por el calentador, es decir la potencia \dot{Q} es proporcional al voltaje de alimentación E , y a la corriente I consumida:

$$\dot{Q} = I \cdot E \quad (3)$$

2.2 Despliegue de la Función de Calidad (QFD)

El despliegue de función de calidad o QFD, es una herramienta de planificación y análisis que permite realizar los objetivos del diseño conceptual en términos de calidad, tiempo y costos. Nació con el fin de resolver necesidades específicas. El QFD otorga los medios necesarios para evaluar de manera concreta y objetiva un producto respecto a la competencia. Para ello, se debe recoger información acerca de las expectativas el cliente y explicarlas a detalle [10].

Para la realización del despliegue de función de calidad donde se hará una comparación entre las características y funciones de nuestro aparato de medición de la conductividad térmica con los aparatos creados por otros autores, es necesario seguir el formato para la creación de QFDs que se muestra en la Imagen 2.



Imagen 2. Distribución de contenidos de formato de Despliegue de Función de Calidad. Tomada de YEPES, V. (2013).

3. Metodología experimental

3.1. Diseño conceptual (QFD)

Se realizó un análisis de las características de dispositivos con objetivos similares a las que se ha planteado en este trabajo, para ello, se hizo una comparación de los trabajos de varios autores utilizando la herramienta de Despliegue de Función de Calidad (Imagen 3). En este análisis,

nuestro dispositivo resalta en cualidades como el peso, tamaño y costo de realización, pero, por otro lado, con menos precisión que otros modelos desarrollados [12-15].

Casa de calidad Quality Function Deployment(Q.F.D.)

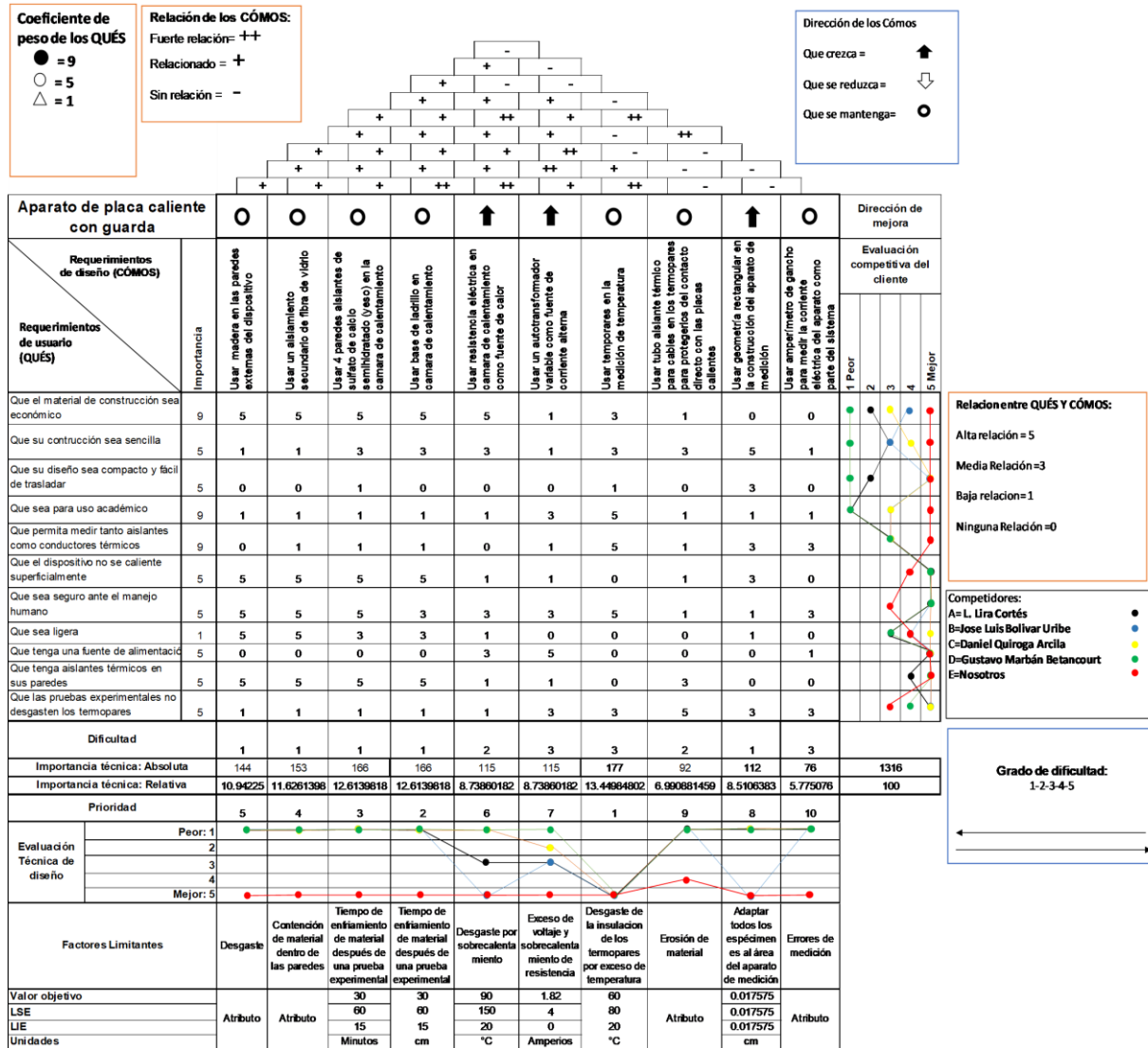


Imagen 3. Comparación de propiedades de dispositivos de medición de conductividad térmica de materiales, utilizando Despliegue de Función de Calidad (QFD).

3.2. Diseño y especificaciones del prototipo

Los resultados obtenidos en la sección anterior permiten la selección de los elementos y la toma de decisiones en el diseño del prototipo. A continuación, se describen las dimensiones, materiales y componentes del prototipo desarrollado, así como las características del producto terminado.

El dispositivo propuesto está compuesto por la cámara de calentamiento que consiste en 4 paredes aislantes de sulfato de calcio semihidratado o yeso con una base de ladrillo, y un aislamiento secundario de fibra de vidrio. La cámara de calentamiento funciona con una resistencia eléctrica que genera calor y de esta manera es controlado con un autotransformador variable o variac. La resistencia emite calor por radiación y convección a una placa de cobre, que distribuye el calor de manera uniforme y lo transfiere por medio de conducción hacia la placa del espécimen a evaluar. En la Imagen 4 se encuentra la clasificación de componentes del dispositivo y las medidas de las áreas del dispositivo en una vista superior, en la Imagen 5:

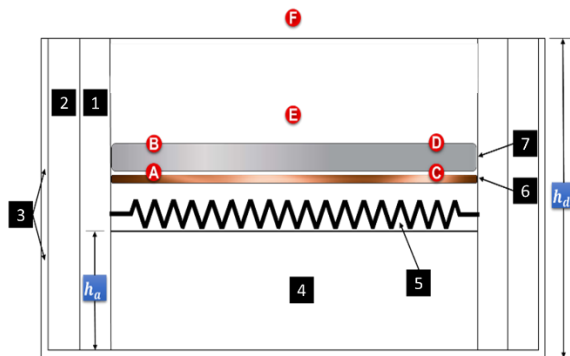


Imagen 4. Clasificación de componentes de dispositivo de medición de conductividad térmica.

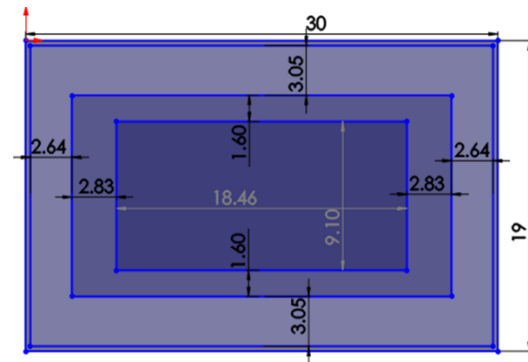


Imagen 5. Dimensiones de caras del dispositivo, vista superior.

En la Imagen 4 se encuentra una vista lateral del dispositivo, los componentes de la cámara de calentamiento, así como su altura y los puntos donde fueron colocados los sensores de temperatura, donde, (1) es el aislamiento primario de la cámara de calentamiento hecho de yeso; (2) es el aislamiento secundario compuesto por fibra de vidrio, (3) son las fronteras de madera de la caja; (4) es la base de la cámara con material de ladrillo, (5) es la resistencia a la cual se le suministra energía eléctrica para que emita calor a los especímenes, (6) es la placa de cobre que se debe utilizar en cada prueba para la distribución uniforme de calor y (7) es el espécimen del material del cual se obtiene el coeficiente de conductividad térmica. $h_a = 10\text{cm}$, es la altura desde la base de madera de la caja hasta la cara superior de la base de ladrillo y $h_d = 21\text{cm}$, es la altura que tiene el dispositivo. En cuanto a los sensores de temperatura, se denotan en el diagrama con las letras de A-F, donde 4 sensores (A-D) están en contacto directo con el espécimen de prueba para las mediciones respectivas de ΔT , (E) mide la temperatura interior de la cámara y (F) la temperatura ambiente. Para la protección de la insulación de los termopares y para su adhesión a las placas, se utilizó cinta adhesiva laminar de alta temperatura.

La Imagen 6 muestra una vista isométrica explosionada del diseño del aparato de medición, el cuál es desarrollado en el software SolidWorks.

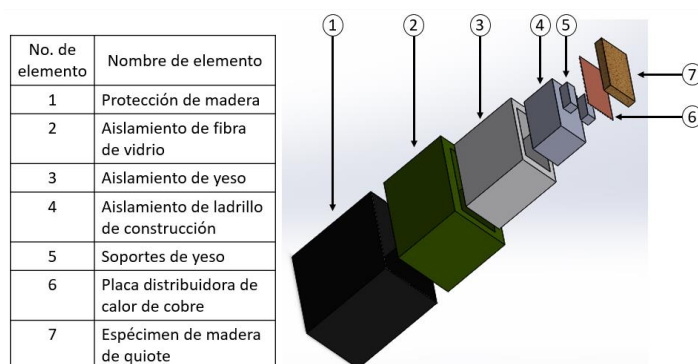


Imagen 6. Diseño de aparato de medición de conductividad térmica en software SolidWorks.

Para determinar el comportamiento de la conductividad térmica, se propone una fuente de alimentación regulable, proporcionada a través de un autotransformador variable que proporciona la potencia de alimentación necesaria para las pruebas experimentales. Además, se utiliza el módulo de adquisición de datos Omega TC-08 para los registros de temperatura en tiempo real. En la Tabla 1, se muestran los materiales y herramientas seleccionadas que conforman el dispositivo de obtención de conductividad térmica:

Material	Especificaciones	Material	Especificaciones
Madera (protección de dispositivo)	- 3 mm de espesor - $k = 0.16 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	Espécimen de acrílico	- 0.933 cm de espesor - $k = 0.23 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Sulfato de calcio semihidratado	- 2.8 cm de espesor - $k = 0.1695 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	Espécimen de madera de quiote	- 2.413 cm de espesor
Ladrillo de construcción	- Barro rojo - $k = 0.69 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	Amperímetro de gancho	- Sanelec, digital
Autotransformador variable	-Variac, model 3PN1010B	Fibra de vidrio	-Aislante MBI
Thermocouple data logger	- Omega TC-08		

Tabla 1. Componentes y materiales de dispositivo.

Por último, se comprueba que la distribución térmica a través de la placa de cobre sea uniforme, para lo cual se realizaron pruebas a baja temperatura y se observó la distribución térmica con una cámara térmica de infrarrojos Flir E5-xt.

3.3. Validación del prototipo

En cuanto a la cantidad de especímenes observados, se realizaron pruebas experimentales con dos probetas de origen distinto, una con un material comercial (acrílico), y una prueba con un material con coeficiente desconocido (especimen de madera de quiote). En la Tabla 2 se tienen las características necesarias para la medición de la conductividad térmica en el espécimen de acrílico y el espécimen de propiedades desconocidas (madera de quiote).

Tipo de espécimen	Corriente (A)	Resistencia eléctrica (Ohm)	Calor (W)	Duración de prueba (minutos)	Dimensiones de especímenes			Área (m ²)
					Grosor (cm)	Ancho (cm)	Largo (cm)	
Acrílico	1.82	8.2	27.16168	90	0.933	8.7	18.2	0.017575
Madera de quiote	1.82	8.2	27.16168	210	2.413	8.7	18.2	0.017575

Tabla 2. Especificaciones técnicas para pruebas de conductividad térmica en especímenes.

El primer material utilizado fue un espécimen de acrílico con una conductividad térmica de 0.23 W/mK indicada por el proveedor. En adición, fue elegido un material de propiedades desconocidas, utilizado por A. G. Escobar-Villanueva (2021), quien utilizó madera de quiote de agave, el cual pasó por un tratamiento térmico donde se congeló, se deshidrató usando el método de liofilización y finalizando el tratamiento con un calentamiento hasta los 400 °C en horno. En la Imagen 7 se observa una fotografía tomada con microscopio electrónico de barrido (Scanning electron microscope: SEM) con una vista axial de las fibras del espécimen de quiote [16], mientras que en la Imagen 8 la figura muestra también una vista axial, pero de las fibras de una especie de árbol de abeto obtenida por Youhua Fan (2016).

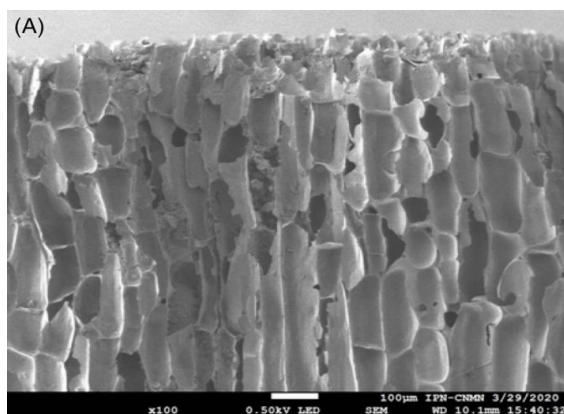


Imagen 7. Fotografía con vista axial en SEM de espécimen de madera de quiote. Tomada de A. G. Escobar-Villanueva (2021).

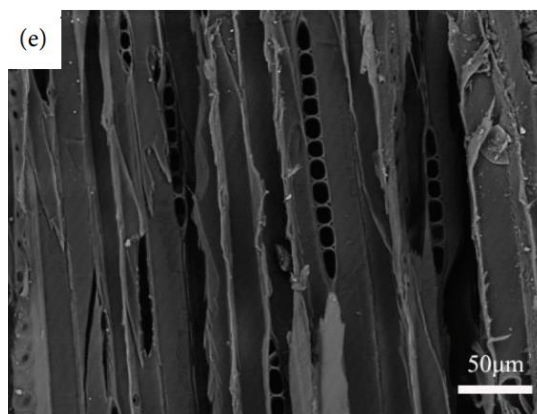


Imagen 8. Fotografía con vista axial en SEM de espécimen de madera de abeto. Tomada de Youhua Fan (2016).

Se aprecia una morfología similar en las fibras de ambos especímenes a niveles microscópicos. Por lo tanto, se usa el valor de la conductividad térmica de la madera de abeto encontrada en literatura como referencia [17].

4. Resultados experimentales

4.1 Conductividad térmica de espécimen conocido

La Imagen 9 se muestran los resultados experimentales con el espécimen de acrílico, donde, la conductividad térmica se estabiliza en 0.24645237 W/mK . La diferencia de temperatura sigue aumentando lentamente, haciendo que la conductividad térmica disminuyera de igual forma, sin embargo, la prueba experimental fue terminada para evitar alcanzar una temperatura en la cual este espécimen pueda dañarse por el tratamiento térmico, datos expresados por el distribuidor Stabilitt [18].

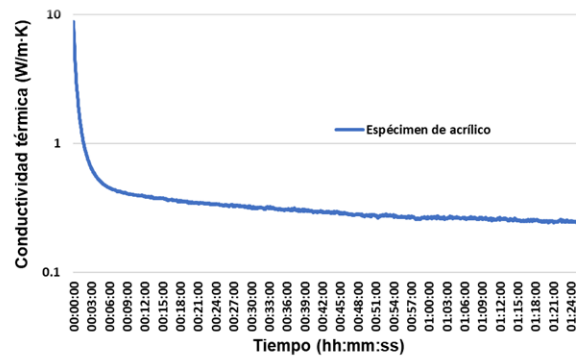


Imagen 9. Conductividad térmica de espécimen de acrílico.

Este espécimen alcanzó un valor de resistencia térmica final de 0.657985809 k/W en los 90 minutos de prueba con los resultados obtenidos de la conductividad térmica.

En la Imagen 10 se muestra la comparación de los resultados obtenidos de conductividad térmica por los métodos experimental y simulación.

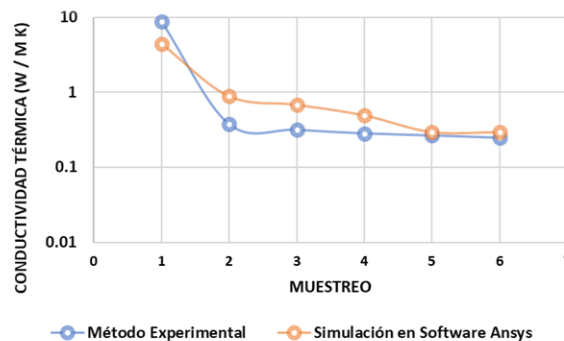


Imagen 10. Comparación de conductividades térmicas entre ambos métodos de prueba para espécimen de acrílico.

Los resultados de conductividad térmica son similares con ambos métodos para el espécimen, estabilizándose en un valor de 0.293639784 W/mK en la simulación.

4.2 Material desconocido

La Imagen 11, corresponde a los valores de conductividad térmica del espécimen desconocido, el cual se

estabilizó hasta llegar a un valor final de 0.984406001 W/mK. La prueba fue detenida para evitar la incineración del material.

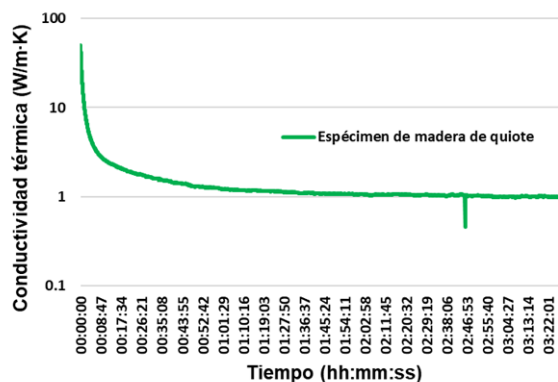


Imagen 11. Conductividad térmica de espécimen de madera de quiote.

En el caso de este material, la relación entre ambos métodos tuvo una variación de unas 0.15 décimas de diferencia en los valores de conductividad térmica, mostrando una notable similitud en los datos. Imagen 12.

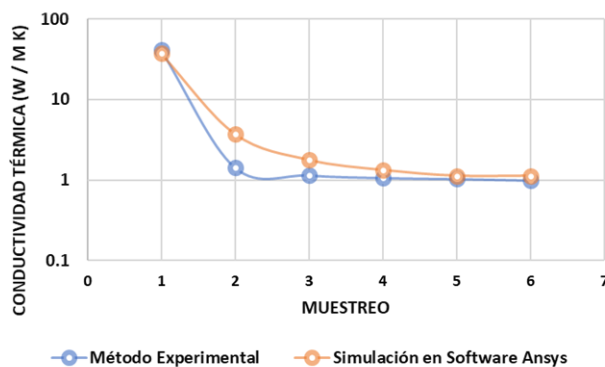


Imagen 12. Comparación de conductividades térmicas entre ambos métodos de prueba para espécimen de madera de quiote.

5. Conclusiones

El trabajo presentado muestra el prototipo de un dispositivo de bajo costo para determinar de forma sencilla la conductividad térmica de materiales. El diseño conceptual obtenido del análisis del Despliegue de Función de Calidad determina los objetivos del diseño a partir de los requerimientos del cliente y de diseño. Por lo que, el diseño conceptual permitió establecer las características, materiales, componentes y geometría del dispositivo. El dispositivo se complementa con la instrumentación necesaria para regular el calor, así como para la adquisición de datos en tiempo real. Las propiedades del dispositivo de medición y los parámetros de experimentación se basaron en las descritas en la norma ASTM C-177. Los materiales que fueron utilizados para validar el dispositivo son especímenes de baja conductividad térmica con propiedades de aislantes térmicos. Las pruebas experimentales se realizan en tiempos cortos y con mínima variación. La comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos en simulación muestra que la precisión del



dispositivo es aceptable y confiable. Los resultados obtenidos de forma experimental muestran bajo rango de error a pesar de no ser un equipo sofisticado.

6. Referencias

- [1] P. Incropera, F., & P. de Witt, D., “Fundamentos de transferencia de calor 4a edición”, Prentice Hall, Edo. de México, 1999.
- [2] Cengel, Y. A., “Transferencia de calor y masa (3rd ed.)”, McGraw-Hill / Interamericana., México, D.F. 2007.
- [3] L. Lira Cortés, “Necesidades de medición de conductividad térmica para el cumplimiento de normas de eficiencia energética en edificaciones”, Centro Nacional de Metrología, 2009, 22p.
- [4] QATAR UNIVERSITY (DOHA), “Apparatus for measuring the effective thermal conductivity of packed bed of aggregates”, USPTO Patent Grants, no. 10921,273, 2021.
- [5] Castán Fernández, C., “Design, Construction and Commissioning of an Apparatus for Measuring the Thermal Conductivity of Geothermal Grouting Materials Based on the Transient Hot Wire Method”, MDPI, Vol. 2, no. 23, 2018, 5p.
- [6] Daza Mafioli C. M., “Medición de la conductividad térmica en materiales aislantes bajo régimen de flujo de calor no estacionario”, Ingeniería y Ciencia, Vol. 15 Issue 30, 2019, 16p.
- [7] Acuña Alegria, L., “Determinación inversa de la conductividad térmica en madera de pinus radiata.”, Maderas: Ciencia y Tecnología, Vol. 20 Issue 4, p595-610, 2018, 16p.
- [8] American Society of Testing Materials, “ASTM C177: Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded Hot-Plate Apparatus” 552(1), 203. <https://doi.org/10.3390/e16105416>, 1997, 23p.
- [9] Kern, D.Q., “Procesos de transferencia de calor”, Editorial Continental S.A. de C.V., México, 2008.
- [10] Gonzalez Sara, A., “Quality Function Deployment: Una herramienta para establecer los requerimientos técnicos de un edificio en México”, Universidad Politécnica de Valencia, 2014.
- [11] YEPES, V., “Despliegue de la función de calidad y metodología seis sigma en la gestión de la construcción”, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2013.
- [12] Lira-Cortés, L., “Medición de la Conductividad Térmica de Algunos Materiales Utilizados en Edificaciones”, Centro Nacional de Metrología, 2008, 5p.
- [13] Bolivar Uribe, J.L., “Diseño y construcción de un banco de prueba para la medición de conductividad térmica en materiales aislantes”, Universidad Pontificia Bolivariana, 2018, 86p.
- [14] QUIROGA ARCILA, D., “EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD EN AISLANTES”, Fundación Universidad de América, 2018, 166p.
- [15] Marbán Betancourt, G., “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”, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, 2002, 156p.



- [16] Escobar-Villanueva, A. G., “Efficient photothermal supports from carbonized agave flower stalk for solar water evaporation”, *International Journal of Energy Research*, vol 202, DOI: 10.1002/er.7051, 2021, 14 p.
- [17] Youhua Fan, “Study on the Retention and Distributions of the Copper-Based Preservative in Standing Tree Chinese Fir (*Cunninghamia lanceolata*)”, Hindawi Publishing Corporation, Volume 2016, Article ID 6163179, 2016, 9 p.
- [18] Stabilit, “Ficha Técnica Acrylit ST (Acrylit Estándar)”, 2015, Retrieved from: <http://techos.com/CyF/L%C3%A1mina-de-acrilico-acrylit-Ficha-t%C3%A9cnica.pdf>