



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN MATERIAL COMPUESTO
POR RESIDUOS DE CAÑA DE CASTILLA (*Arundo Donax*) Y ALCOHOL POLIVINÍLICO**

Brian Derek Alexander Pérez Sotoj

Asesorado por el Ing. Mauricio Valentino Rivera Tello

Guatemala, septiembre de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN MATERIAL COMPUESTO
POR RESIDUOS DE CAÑA DE CASTILLA (*Arundo Donax*) Y ALCOHOL POLIVINÍLICO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

BRIAN DEREK ALEXANDER PÉREZ SOTOJ

ASESORADO POR EL ING. MAURICIO VALENTINO RIVERA TELLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Ing. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
EXAMINADOR	Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
EXAMINADOR	Ing. Pablo Enrique Morales Paniagua
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN MATERIAL COMPUESTO POR RESIDUOS DE CAÑA DE CASTILLA (*Arundo Donax*) Y ALCOHOL POLIVINÍLICO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 14 de noviembre de 2018.

Brian Derek Alexander Pérez Sotoj

Guatemala 06 de Noviembre de 2019

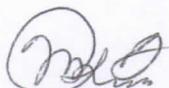
Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ingeniero Williams Guillermo Álvarez Mejía:

Le saludo cordialmente, deseándole éxitos en sus actividades. Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado el Informe Final del trabajo de graduación titulado: "CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN MATERIAL COMPUESTO POR RESIDUOS DE CAÑA DE CASTILLA (Arundo Donax) Y ALCOHOL POLIVINÍLICO", elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Química, Brian Derek Alexander Pérez Sotoj, quien se identifica con el registro académico 2013-13766 y con el CUI 2532 69261 01 01.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted,

Atentamente,



Mauricio Valentino Rivera Tello
ASESOR
Ingeniero Químico
Colegiado activo no. 2089





Guatemala, 27 de enero de 2020.
Ref. EIQ.TG-IF.003.2020.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **020-2018**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **Brian Derek Alexander Pérez Sotoj**.
Identificado con número de carné: **2532692610101**.
Identificado con registro académico: **201313766**.
Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química**.
En la modalidad: **Informe Final, Seminario de Investigación**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN MATERIAL
COMPUESTO POR RESIDUOS DE CAÑA DE CASTILLA (Arundo donax) Y ALCOHOL
POLIVINÍLICO**

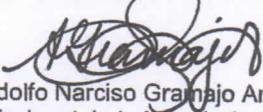
El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

Mauricio Valentino Rivera Tello, profesional de la Ingeniería Química

Habiendo encontrado el referido trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.



"ID Y ENSEÑAR A TODOS"


Adolfo Narciso Granajo Antonio
Profesional de la Ingeniería Química
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



ACAAI

Agencia Certificadora de Acreditación y
Evaluación de Instituciones Educativas





Ref.EIQ.TG.012.2020

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación, de la carrera de Ingeniería Química, del estudiante, **BRIAN DEREK ALEXANDER PÉREZ SOTOJ** titulado: **"CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN MATERIAL COMPUESTO POR RESIDUOS DE CAÑA DE CASTILLA (*Arundo Donax*) Y ALCOHOL POLIVINÍLICO"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Williams G. Álvarez Mejía; M.I.Q., M.U.I.E
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, marzo de 2020

Cc: Archivo
WGAM/ale



DTG. 119-2020

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **CARATERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN MATERIAL COMPUESTO POR RESIDUOS DE CAÑA DE CASTILLA (Arundo Donax) Y ALCOHOL POLIVINÍLICO**, presentado por el estudiante universitario: **Brian Derek Alexander Pérez Sotoj**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, marzo de 2020

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por ser un factor muy importante durante mi carrera universitaria y ser motivación todo el tiempo y por llenar mi vida de logros.

Mis padres

Ángel Pérez y Mirtala Sotoj de Pérez, por apoyarme todo el tiempo y darme la oportunidad de formarme profesionalmente.

Mis hermanos

Mildred, Ángel y Henly Pérez Sotoj, por estar siempre apoyándome y hacer mi vida feliz.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por guiarme en el buen camino y darme la sabiduría necesaria para hacer las cosas bien.
Mi madre	Francisca Mirtala Sotoj Lopéz, por todo el apoyo incondicional brindado durante mi formación profesional, sin ella y Dios nada hubiera sido posible.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por darme el privilegio de estudiar en tan hermosa universidad.
Facultad de Ingeniería	Por darme una buena formación académica y profesional.
Miguel Ángel De León	Por ser un gran amigo durante mi carrera universitaria y compañero de montañismo, así mismo por ser de gran apoyo durante el desarrollo de mi trabajo de graduación.
Edgar Ramírez	Por compartir sus conocimientos, los cuales fueron de gran ayuda durante la realización de mi trabajo de graduación y por ser una excelente persona y amigo.

Mis amigos

Óscar Carrillo Ruiz, Verenice Alfaro Chocón, Edvin López Medina y Kevin Gálvez Matzul. Gracias por su increíble amistad durante todos estos años y hacer que el tiempo dentro y fuera de la universidad tomara sentido.

Ingeniero Mauricio Tello

Por su apoyo como asesor de trabajo de graduación y por todo los conocimientos compartidos durante la fase experimental del trabajo de graduación.

2.5.3.	Materiales compuestos reforzados con partículas ..	15
2.5.3.1.	Los materiales compuestos reforzados con partículas	16
2.5.3.2.	Los materiales compuestos consolidados por dispersión	17
2.5.4.	Materiales compuestos estructurales	18
2.5.5.	Materiales compuestos reforzados con fibras	18
2.5.6.	Características de los materiales compuestos	19
2.6.	Aglomerados	20
2.6.1.	Tipos de aglomerados	21
2.6.1.1.	Tableros contrachapados	21
2.6.1.2.	Tableros de partículas	22
2.6.1.3.	Tableros de fibras	22
2.7.	Aglutinantes	23
2.8.	Caña de castilla (<i>Arundo donax</i>)	24
2.9.	Alcohol polivinílico	26
3.	METODOLOGÍA	29
3.1.	Variables	29
3.1.1.	Descripción de variables a manipular	29
3.2.	Delimitación de campo de estudio	30
3.3.	Recursos humanos disponibles	31
3.4.	Recursos materiales disponibles	31
3.4.1.	Equipo	31
3.4.2.	Reactivos y materia prima	32
3.5.	Técnica cualitativa	32
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	33
3.6.1.	Proceso para la obtención de materia	33

3.6.2.	Procedimiento para fabricación de las fibras de caña de castilla (<i>Arundo Donax</i>) con alcohol polivinílico	34
3.6.3.	Procedimiento para determinación de conductividad térmica	35
3.6.4.	Equipo	35
3.6.4.1.	Equipo de medición de conductividad.....	35
3.6.4.2.	Equipo para la elaboración de las fibras.....	38
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	40
3.8.	Análisis estadístico	44
3.9.	Plan de análisis de los resultados	46
3.9.1.	Cálculo de la razón de flujo de calor por cada muestra.....	46
3.9.2.	Evaluación de la ley de Fourier.....	46
3.9.3.	Programas por utilizar para análisis de datos	47
4.	RESULTADOS	49
4.1.	Transferencia de calor – formulación	49
4.2.	Transferencia de calor – espesor	52
4.3.	Transferencia de calor – conductividad térmica	54
4.4.	Conductividad térmica	56
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	57

CONCLUSIONES.....65
RECOMENDACIONES67
BIBLIOGRAFÍA.....69
APÉNDICES.....71

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Especificaciones de las direcciones de transferencia de calor y energía entre un sistema y sus alrededores	8
2.	Conducción unidimensional de calor a través de un elemento de volumen en una pared plana.....	10
3.	Convenio de signos para la transmisión de calor producido por conducción	11
4.	Conducción de calor a través de una pared plana de espesor Δx y área A.....	12
5.	Rango de la conductividad térmica de diversos materiales a la temperatura ambiente	13
6.	Variación de la conductividad térmica de diversos sólidos, líquidos y gases con la temperatura	14
7.	Estructura de un material compuesto reforzado con partículas	16
8.	Estructura de un material compuesto consolidado por dispersión	17
9.	Material compuesto estructural (a) Laminar (b) Sándwich	18
10.	Materiales compuestos con fibras (a) continuas (b) Continua y alineadas (c) discontinuas y orientadas al azar.....	19
11.	Estructura de un tablero contrachapado	21
12.	Estructura de un tablero de partículas.....	22
13.	Estructura de un tablero de fibras	23
14.	Mecanismos de aglomeración utilizando un aglutinante	24
15.	<i>Arundo donax</i> (a) Partes de la caña, (b) <i>Arundo donax</i>	25
16.	Alcohol polivinílico	26

17.	Análisis cuantitativo	32
18.	Equipo M.C.T. (a) parte inferior (b) parte superior	36
19.	Medidores de temperatura de superficie (a) Termocupla 80PK-27 (b) Módulo inalámbrico de temperatura tipo K	37
20.	Bombillo de calor	37
21.	Molino de martillos	38
22.	Molde para elaboración de una fibra.....	39
23.	Prensa hidráulica	39
24.	Transferencia de calor en función de la formulación a potencia de 125 W	50
25.	Transferencia de calor en función de la formulación a potencia de 175 W	51
26.	Transferencia de calor en función de la formulación a potencia de 250 W	52
27.	Transferencia de calor en función del espesor a formulación de 50-50 %	53
28.	Transferencia de calor en función del espesor a formulación de 40-60 %	54
29.	Transferencia de calor en función de su conductividad térmica a formulación 50-50 %	55
30.	Transferencia de calor en función de su conductividad térmica a formulación 40-60 %	55
31.	Conductividad térmica de materiales aislantes	56

TABLAS

I.	Variables de operación	29
II.	Experimentos realizados en grupos para su comparación	33

III.	Parámetros para la creación de las muestras del material compuesto.....	40
IV.	Conductividad térmica de la caña de castilla (<i>Arundo Donax</i>) con alcohol polivinílico a formulación 50-50 % y grosor de 0,0104 m.....	41
V.	Conductividad térmica de la caña de castilla (<i>Arundo Donax</i>) con alcohol polivinílico a formulación 50-50 % y grosor de 0,0198 m.....	41
VI.	Conductividad térmica de la caña de castilla (<i>Arundo Donax</i>) con alcohol polivinílico a formulación 50-50 % y grosor de 0,0295 m.....	42
VII.	Conductividad térmica de la caña de castilla (<i>Arundo Donax</i>) con alcohol polivinílico a formulación 40-60 % y grosor de 0,0121 m.....	42
VIII.	Conductividad térmica de la caña de castilla (<i>Arundo Donax</i>) con alcohol polivinílico a formulación 40-60 % y grosor de 0,0205 m.....	43
IX.	Conductividad térmica de la caña de castilla (<i>Arundo Donax</i>) con alcohol polivinílico a formulación 40-60 % y grosor de 0,0287 m.....	43
X.	Incertidumbre de instrumentos de medición.....	44
XI.	Formulaciones realizadas en porcentaje masa viruta-aglutinante.....	58

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Área transversal de flujo de calor
Q	Cantidad de flujo de calor
k	Coefficiente de conductividad térmica
ρ	Densidad
Δx	Espesor
dT/dx	Gradiente de temperatura
°C	Grados Celsius
kg	Kilogramos
M.C.T	Medición de conductividad térmica
m^2	Metros cuadrados
m^3	Metros cúbicos
min	Minutos
P	Presión
%P	Porcentaje de formulación
%h	Porcentaje de humedad
T	Temperatura
t	Tiempo
TON	Toneladas
V	Voltaje
W	Watts

GLOSARIO

Aglomerado	Es un material constituido por la unión de varias partículas de distintos tamaños las cuales son unidas entre sí por un aglutinante y posteriormente prensadas a temperatura y presión controlada para formar un material con nuevas características.
Aglutinante	Es una sustancia que se usa para dar soporte en general a una mezcla, una cumple la función de medio y vehículo, pasado un tiempo y tras secar la mezcla se mantienen ambas sustancias estables y adheridas al soporte.
Conductividad térmica	Es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas.
Conducción	Es un proceso de transmisión de calor, basado en el contacto directo entre los cuerpos, sin intercambio de materia, por el que el calor fluye desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura que está en contacto con el primero.
Coefficiente de conductividad térmica	Es la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura.

Termocupla

Es un dispositivo el cual está constituido por dos alambres de distintos materiales unidos en un extremo la cual su función es transmitir una señal eléctrica proporcional a la temperatura en la que se encuentra en el medio.

RESUMEN

Este trabajo de graduación muestra los resultados del comportamiento térmico de un material compuesto por residuos de caña de castilla (*Arundo Donax*) y alcohol polivinílico, por lo que se evaluó el comportamiento de la transferencia de calor en función de la formulación, espesor y conductividad térmica.

El procedimiento consistió en elaborar tableros aglomerados de un pie cuadrado a formulaciones 50-50 % y 40-60 % a distintos espesores. Por consiguiente, se introdujeron dichos tableros a un equipo medidor de conductividad térmica proporcionado por el laboratorio multipropósito de sección de tecnología de la madera del centro de investigaciones de la Universidad de San Carlos de Guatemala, el cual proporcionó mediciones de temperatura de superficie de la muestra mediante termocuplas al momento de suministrar calor al equipo.

Para el análisis de la transferencia de calor en función de la formulación se determinó que hay mayor transferencia de calor en los tableros aglomerados con formulación 40-60 % con relación a la formulación 50-50 %, por lo que se concluyó que la transferencia de calor se vio afectada por la cantidad de aglutinante en cada una de las formulaciones.

Por otra parte, para el análisis de transferencia de calor en función del espesor se determinó que la transferencia de calor disminuye al aumentar el espesor, por lo que se pudo observar en ambas formulaciones, y así mismo

mediante un análisis estadístico de una variable se determinó que la transferencia de calor si se ve afectada significativamente al variar el espesor.

Así mismo, se determinaron los valores de conductividad térmica de 0,52 W/m°C para la formulación 50-50 % y 0,58 W/m°C para la formulación 40-60 %, y a partir de un análisis estadístico de una variable se determinó que la conductividad térmica de los tableros aglomerados no se ven afectados significativamente al variar la transferencia de calor.

Las pruebas y mediciones se realizaron en el Laboratorio multipropósito de sección de tecnología de la madera del Centro de investigaciones de la Universidad de San Carlos de Guatemala y así mismo se trabajó en un rango de temperatura de 23-25 °C a una presión de 0,84 atmosferas.

OBJETIVOS

General

Caracterizar el comportamiento térmico de un material compuesto por residuos de caña de castilla (*Arundo Donax*) y alcohol polivinílico como aglutinante.

Específicos

1. Analizar el comportamiento de la transferencia de calor a través de un material compuesto por residuos de caña de castilla y alcohol polivinílico al variar su formulación.
2. Analizar el comportamiento de la transferencia de calor a través de un material compuesto por residuos de caña de castilla y alcohol polivinílico al variar su espesor.
3. Caracterizar el comportamiento de la transferencia de calor de un material compuesto por residuos de caña de castilla y alcohol polivinílico en función de su conductividad térmica.

HIPÓTESIS

Es posible evaluar el comportamiento de la transferencia de calor de un material compuesto por caña de castilla (*Arundo Donax*) y alcohol polivinílico al variar la formulación y el espesor de las muestras.

Hipótesis nula

H_0 : La transferencia de calor en un material compuesto por caña de castilla (*Arundo Donax*) y alcohol polivinílico no se ve afectada significativamente al variar su espesor.

$$F < F_c$$

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 = \dot{Q}_3 = \dots \dot{Q}_n$$

H_0 : La transferencia de calor en un material compuesto por caña de castilla (*Arundo Donax*) y alcohol polivinílico, no afecta significativamente la conductividad térmica.

$$F < F_c$$

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 = \dot{Q}_3 = \dots \dot{Q}_n$$

Hipótesis alternativa

H_1 : La transferencia de calor en un material compuesto por caña de castilla (*Arundo Donax*) y alcohol polivinílico, si se ve afectada significativamente al variar el espesor.

$$F \geq F_c$$

$$\dot{Q}_1 \neq \dot{Q}_2 \neq \dot{Q}_3 \neq \dots \dot{Q}_n$$

H_1 : La transferencia de calor en un material compuesto por caña de castilla (*Arundo Donax*) y alcohol polivinílico, si afecta de manera significativamente la conductividad térmica.

$$F \geq F_c$$

$$\dot{Q}_1 \neq \dot{Q}_2 \neq \dot{Q}_3 \neq \dots \dot{Q}_n$$

INTRODUCCIÓN

La conductividad térmica indica la capacidad de conducir calor de un material. Es un parámetro importante en el desarrollo y producción de nuevos materiales compuestos los cuales presentan características con alta conductividad térmica y ejercen el papel de conductores de calor y los de baja conductividad térmica como aislantes.

Por lo consiguiente, el estudio de la conductividad térmica de materiales es relevante en los procesos donde ocurren intercambios de energía. En la ingeniería, se aplica como parámetro de decisión en la selección de equipos y accesorios, así mismo como alternativas para mejorar características de productos.

Por lo tanto, para lograr un estudio objetivo de la conductividad térmica de un tablero aglomerado se aplicará la ecuación de Fourier para una placa plana. Dicha ecuación relaciona la razón de la conducción de calor a través de un medio, dependiendo de la configuración geométrica, su espesor y del material del cual está hecho, así como la diferencia de temperatura de este.

Así mismo, son importantes los materiales compuestos, como los aglomerados, que son importantes para elaborar nuevos materiales con mejores propiedades físico-mecánicas y físico-térmicas.

Por eso, en el laboratorio multipropósito de la sección de tecnología de la madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala se evaluará el comportamiento térmico de tableros

aglomerados elaborados con caña de castilla (*Arundo Donax*) y alcohol polivinílico al variar el espesor y formulación.

1. ANTECEDENTES

La conductividad térmica indica la capacidad de conducir calor de un material. Indica que la transferencia de calor se puede interpretar en escala atómica como un intercambio de energía entre las partículas las cuales las más energéticas entregan energía a las menos energéticas a través de colisiones.

Por lo tanto, la conductividad térmica dependerá de las propiedades de cada material. Existen materiales muy conductores, como el diamante, la plata y el cobre. Hay materiales con baja conductividad, como la madera, fibra de vidrio y aire.

En 2012 Julio Roberto Fernández Castellanos de la Universidad de San Carlos de Guatemala investigó acerca del mejoramiento de la eficiencia térmica de un sistema de cocción por medio del aislamiento térmico de un bombo rotatorio, en el cual evaluó la capacidad de aprovechamiento de la energía o eficiencia térmica de los equipos que forman parte del sistema de cocción a través del análisis de flujos durante el proceso de cocción y parámetros de operación necesario para realizar balances de masa y balances de energía.

En 2013, Claudia María Ruiz Muralles de la Universidad de San Carlos de Guatemala evaluó el proceso térmico para elaboración de frijol enlatado con alto contenido nutricional con la finalidad de garantizar la ausencia de *Clostridium botulinum* y preservar las propiedades nutricionales.

En 2014, María Elizabeth Méndez Girón de la Universidad de San Carlos de Guatemala cuantificó y caracterizó el contenido de sólidos y estabilidad

térmica de diferentes tipos de oleínas de palma africana (*Elaeisguineensis*) y mezclas con aceite de soya (*Glycinemax*) con el fin de asegurar la calidad de oleínas de palma y otro tipo de aceites a partir de la estabilidad térmica

En 2003, João F. Mano de la Universidad Autónoma del estado de México determinó las propiedades térmicas de distintos polímeros para la enseñanza de la ciencia de materiales e ingeniería, principalmente los estudios DSC sobre el poli (tereftalato de etileno) como alternativa.

En 2009, Mauricio Daniel García Espinosa de la escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica del Instituto Politécnico Nacional en México, realizó un estudio acerca del comportamiento de la conductividad térmica a distintas aleaciones con cobre, por lo que determino el valor de la conductividad térmica de las aleaciones de Cu-Si, Cu-Ni y Cu-Zn.

En 2016, Manuel Robles Solís, Set Vejar Ruiz, David Lozano Mandujano y Carlos Gutiérrez Villegas en la revista de energía Química y Física ECORFAN en Bolivia, realizaron un estudio acerca de la aplicación del método de hilo caliente en la determinación de la resistencia térmica de bloques de concreto con material reciclado, dichos materiales con muy altas propiedades térmicas, como PET y papel reciclado, dicho método se calibró y validó utilizando materiales de control, como el ladrillo y block común de hormigón, por lo que determinaron que la conductividad térmica disminuyó al aumentar la proporción de formulación de material reciclado en cada bloque.

En 2017, Mena-Novelo, W.D.; Un-Aragón R.A.; Corona J.E.; Romero M. y Oliva A.I en la Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán en México determinaron la conductividad térmica de materiales en polvo de la península de Yucatán. Consistió en la

construcción y caracterización de un sistema experimental adiabático con geometría de paralelepípedo con paredes de poliestireno de 10 cm de espesor y un foco incandescente como fuente de calentamiento y potencia controlada con un autotransformador variable basado en las normas ASTM C-177 y C-508, por lo que determinaron la conductividad térmica de algunos materiales, como arena de mar, tierra negra, yeso comercial, polvo de piedra y cerámica comercial.

Así mismo en el estudio de la conductividad térmica en materiales compuestos se hará énfasis en la elaboración de aglomerados con baja conductividad térmica, por lo que varios investigadores han realizado estudios los cuales se presentan a continuación.

En 2013, Silda Verónica González Gudiel de la Universidad de San Carlos de Guatemala realizó una investigación como trabajo de graduación titulado *Evaluación de la elaboración de tableros de partículas del aserrío de la madera de palo blanco (Cybistax donnell-smithii (rose) Seibert) de los primeros raleos utilizado diferentes tipos de aglomerantes.*

En 2013, Brenda María Monterroso Waight de la Universidad de San Carlos de Guatemala realizó una investigación como trabajo de graduación de la evaluación de las propiedades físico-mecánicas de los tableros aglomerados elaborados con cascarilla de café (*Foffea arabiva*) y colofonia, por el efecto de la carga de compactación y tiempo de prensado.

1.1. Justificación

El estudio de las propiedades térmica de los materiales es importante en todos los procesos donde ocurren intercambios de energía en forma de calor,

por lo que en la ingeniería es común aplicar dicho estudio en distintas áreas, como intercambiadores de calor, hornos, refrigeradores entre otros.

Por esta razón, se realizará un estudio de la razón de transferencia de calor de un material compuesto por caña de castilla y alcohol polivinílico para evaluar la conductividad térmica y determinar la viabilidad del material en comparación a otros materiales aislantes. Se determinará la formulación adecuada donde su conductividad térmica sea mínima y pueda utilizarse como un buen material aislante. Esto se debe a que se cuenta con la información característica de los materiales compuestos de madera los cuales tienden a tener baja conductividad térmica.

Se utilizará la caña de castilla como material principal de la formulación porque tiene la propiedad de crecer rápidamente en diferentes tipos de suelos y de climas, además, su producción media es de 9 kg de biomasa por metro cuadrado y 30 toneladas/ha-año. Es un material sostenible y de fácil obtención si se le compara con otros materiales.

El material compuesto se podrá aplicar en diferentes áreas como un aislante. Por ejemplo, en los techos de las bodegas industriales porque el clima en Guatemala, en los meses de febrero a septiembre es caluroso, según el Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH). El uso de dicho material compuesto será la alternativa para mantener dichas áreas con una temperatura controlada.

Así mismo, se podrá aplicar como madera contralaminada. Para ello, se creará un material multicapa con características resistentes y estables con baja conductividad térmica. Esta será una nueva alternativa en la construcción.

1.2. Determinación del problema

Se implementará un método adecuado para medir la razón de transferencia de calor en un material compuesto en el laboratorio de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería USAC.

1.2.1. Definición

La producción de caña de castilla (*Arundo Donax*) es masiva en los climas en Guatemala. Su producción es de 9 kg de biomasa por metro cuadrado y 30 toneladas/ha-año. Este material no se aprovecha de manera adecuada como materia prima ni como productor de energía, por lo que se desea fabricar un material compuesto cuya materia prima sea la caña de castilla. También se determinará la formulación adecuada con un aglutinante para crear un producto con baja conductividad térmica que pueda ser sustituto de otros aislantes, pero a menor costo.

1.2.2. Delimitación

El estudio se limitará a determinar la conductividad térmica de un material compuesto por caña de castilla (*Arundo Donax*) y alcohol polivinílico al variar la formulación y el espesor con un área de transferencia de calor constante, en el laboratorio de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Termodinámica y transferencia de calor

La termodinámica, como ciencia, estudia la naturaleza y transformación de la energía en sus diferentes formas: energía interna, entalpía, trabajo y calor. Por lo que se puede considerar como la capacidad para causar cambios, principalmente en los aspectos de energía y sus transformaciones.

El principio de la energía explica los fundamentos de la conservación de energía y expresa que durante una interacción, la energía puede cambiar de una forma a otra pero su cantidad total permanece constante. Es decir, la energía no se crea ni se destruye.

Así mismo, la transferencia de calor se define como la forma de energía que se transfiere entre dos sistemas, entre un sistema en específico y el exterior debido a una diferencia de temperatura, debido a lo cual, la interacción de energía será el calor que ocurre a una diferencia de temperatura, por lo que, la transferencia de calor se podrá llevar únicamente si existe un gradiente de temperatura.

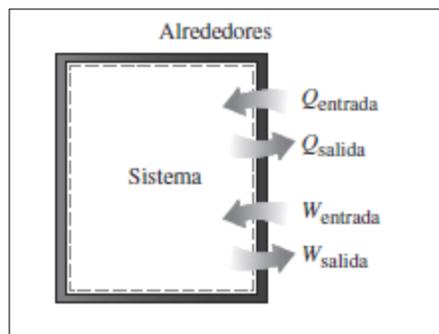
2.2. Transferencia de energía

La transferencia de energía se define como el trabajo que ocurre debido a una interacción de energía entre un sistema en específico y el exterior, por lo que la energía puede cruzar fronteras en un sistema cerrado como trabajo. Se

puede decir que el trabajo es la transferencia de energía relacionada con una fuerza que actúa lo largo de una distancia.

El trabajo es también una forma de energía transferida como calor realizado durante un proceso entre dos estados y se expresa por unidad de masa de un sistema.

Figura 1. **Especificaciones de las direcciones de transferencia de calor y energía entre un sistema y sus alrededores**



Fuente: CENGEL, Yunes A.; BOLES, Michael A. *Transferencia de calor y masa*. p. 63.

2.3. Mecanismos de transferencia de calor

Son formas mediante las cuales se produce la transmisión de calor y se clasifican como conducción, convección y radiación. Sin embargo, solo la conducción y la radiación deben tomarse como tales formas, ya que tienen una diferencia de temperatura como única causa. La convección no cumple con este requisito pues en ella está implicado un proceso de transferencia de materia, de tal forma que, la transmisión de calor es diferente en cuanto a su naturaleza, en muchas ocasiones se presentan simultáneamente, siendo necesario analizar el

proceso en orden a determinar cuantitativamente la participación de cada una de ellas.

2.3.1. Conducción

Es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas, la conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases.

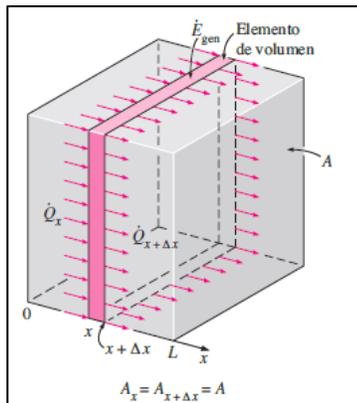
En los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En los materiales sólidos la conducción se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas en una retícula y al transporte de energía por parte de los electrones libres, si bien en los metales la elevada conductividad calorífica se debe a la difusión de electrones libres de la zona caliente a la fría.

Así mismo, la rapidez o razón de la conducción de calor a través de un medio depende de la configuración geométrica de éste, su espesor y el material de que esté hecho, así como de la diferencia de temperatura a través de él.

2.4. Transferencia de calor unidimensional

La conducción de calor a través de una pared plana se considera como configuración geométrica unidimensional, ya que la conducción a través de ellas será dominante en una dirección y despreciable en las demás.

Figura 2. **Conducción unidimensional de calor a través de un elemento de volumen en una pared plana**



Fuente: CENGEL, Yunes A.; BOLES, Michael A. *Transferencia de calor y masa*. p. 70.

2.5. Ley de Fourier

Esta ley establece que la cantidad de calor conducido en la dirección x , a través de un material sólido homogéneo en un intervalo de tiempo, es el producto entre el área expuesta y la transmisión de calor normal al eje x , el gradiente de temperatura y una propiedad del material conocida como conductividad térmica.

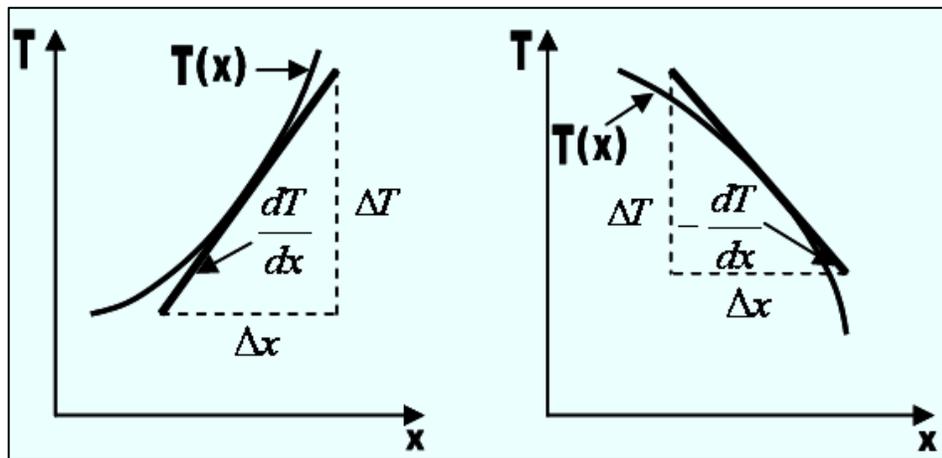
$$\text{Razon de conducción} \propto \frac{(\text{Área})(\text{Diferencia de temperatura})}{\text{Espesor}}$$

$$Q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx}$$

El signo menos (-) en la ecuación de Fourier es consecuencia del segundo principio de la termodinámica, según el cual, el calor debe fluir hacia la zona de

temperatura más baja, por ello, el gradiente de temperaturas es negativo si la temperatura disminuye para valores crecientes de x , por tanto, si el calor transferido en la dirección positiva debe ser una magnitud positiva.

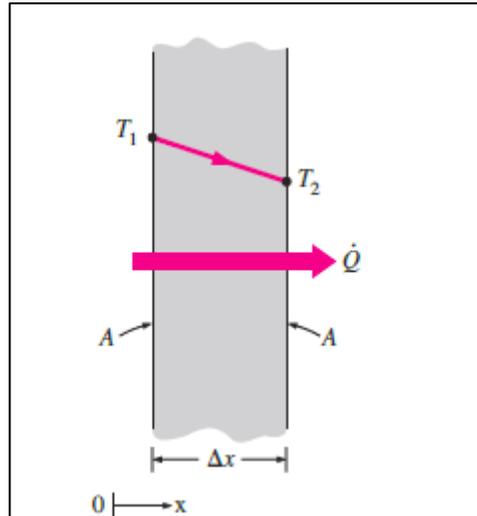
Figura 3. **Convenio de signos para la transmisión de calor producido por conducción**



Fuente: Transferencia de calor. http://www.unet.edu.ve/~fenomeno/F_DE_T-165.htm. Consulta: 26 de abril de 2018.

Una aplicación inmediata de la ley de Fourier corresponde al caso de la transmisión del calor a través de una pared plana. Cuando las superficies de la pared se encuentran a temperaturas diferentes, el calor fluye sólo en dirección perpendicular a las superficies. Si la conductividad térmica es uniforme.

Figura 4. **Conducción de calor a través de una pared plana de espesor Δx y área A**



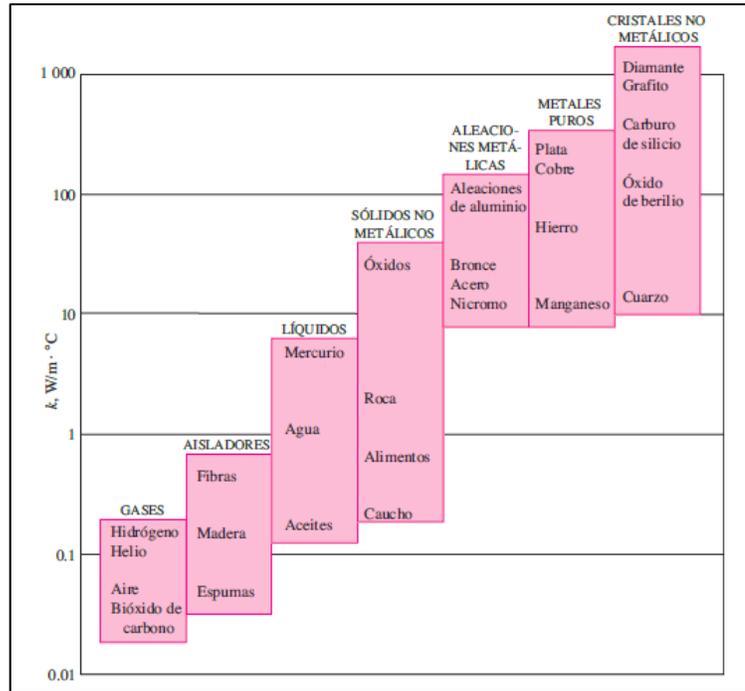
Fuente: CENGEL, Yunes A.; BOLES, Michael A. *Transferencia de calor y masa*. p. 18.

2.5.1. Conductividad térmica

La conductividad térmica es la cantidad de calor que fluye a través de un área unitaria, en la unidad de tiempo, si el gradiente de temperatura entre las dos superficies, entre las cuales fluye el calor, es unitario.

La conductividad térmica es una propiedad física que determina la facilidad con la cual un material conduce el calor. Esta propiedad depende de la composición química de la sustancia o sustancias que componen el material, de la fase en que se encuentra el material, de la estructura del material, de la temperatura y de la presión en el caso de que el material se encuentre en estado gaseoso.

Figura 5. **Rango de la conductividad térmica de diversos materiales a la temperatura ambiente**

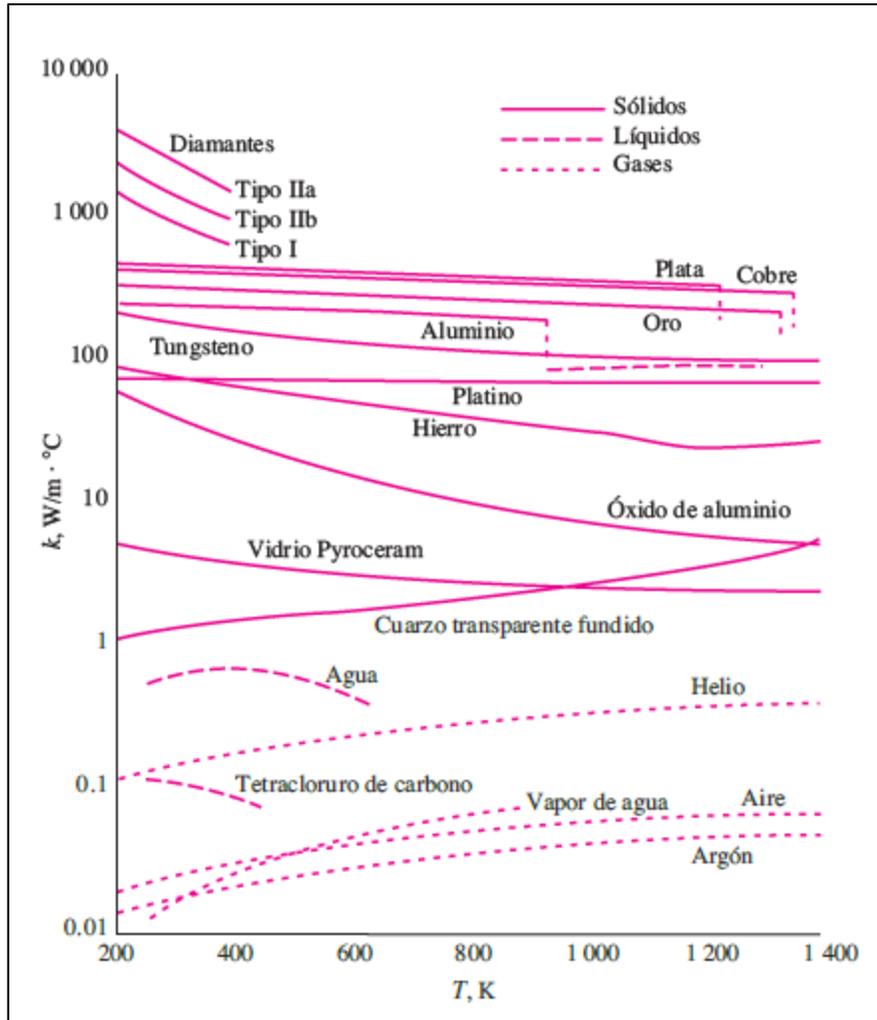


Fuente: CENGEL, Yunes A.; BOLES, Michael A. *Transferencia de calor y masa*. p. 21.

2.5.1.1. Conductividad térmica al aumento de temperatura

El comportamiento de la conductividad térmica varía respecto a la temperatura en líquidos, gases y sólidos, por lo que logra ver un comportamiento variable en intervalos específicos de temperatura, donde el gradiente de temperatura determina la variación.

Figura 6. Variación de la conductividad térmica de diversos sólidos, líquidos y gases con la temperatura



Fuente: CENGEL, Yunes A.; BOLES, Michael A. *Transferencia de calor y masa*. p. 23.

2.5.2. Materiales compuestos

Son combinaciones macroscópicas de dos o más materiales diferentes que poseen una interface discreta y reconocible que los separa. Debido a ello,

son heterogéneos por lo que sus propiedades no son las mismas en todo su volumen.

La importancia ingenieril de los materiales compuestos es muy grande ya que se combinan las propiedades y prestaciones de los materiales constituyentes cuando se diseña y se fabrica el material compuesto correctamente. La mayor parte de los materiales compuestos están formados por dos o más fases, una matriz continua que rodea a las demás fases que se denominan fases dispersas y que se clasifican en función de su microestructura o geometría.

La microestructura de la fase dispersa incluye la forma, tamaño, distribución y orientación de las partículas. Cuando se dan las proporciones de material matriz y material disperso hay que distinguir claramente entre relaciones en peso o en volumen ya que las densidades de estas fases pueden ser muy diferentes. Por esto, concentraciones de material fibroso dispersado en una matriz del 50 % en volumen puede equivaler a una concentración muy diferente en % en peso.

2.5.3. Materiales compuestos reforzados con partículas

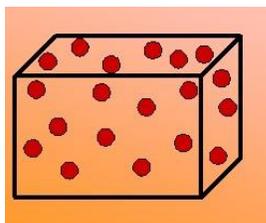
Los materiales compuestos reforzados con partículas se subdividen en reforzados con partículas grandes y consolidadas por dispersión. Esta distinción se fundamenta en el mecanismo de consolidación o de reforzamiento.

2.5.3.1. Los materiales compuestos reforzados con partículas

Los materiales compuestos reforzados con partículas grandes indican que las interacciones entre la matriz y la partícula no pueden describir a nivel atómico molecular, sino mediante la mecánica continua. En la mayoría de los materiales compuestos, la fase dispersa es más dura y resistente que la matriz y las partículas de refuerzo tienden a restringir el movimiento de la matriz en las proximidades de cada partícula. Por esta razón, la matriz transfiere parte del esfuerzo aplicado a las partículas, las cuales soportan una parte de la carga. Así mismo el grado de reforzamiento o de mejora del comportamiento mecánico depende de la fuerza de cohesión en la interfaz matriz-partícula.

El reforzamiento es tanto más efectivo cuantas más pequeñas sean las partículas y cuanto mejor distribuidas estén en la matriz. Además, la fracción de volumen de las dos fases influye en el comportamiento de las propiedades mecánicas con el aumentan al incrementarse el contenido de partículas.

Figura 7. Estructura de un material compuesto reforzado con partículas



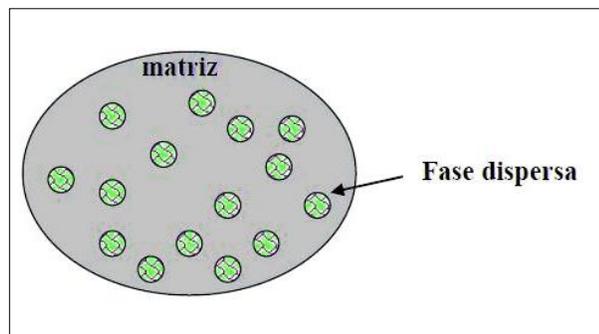
Fuente: *Materiales poliméricos y compuestos.*

https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15_9.html. Consulta: 26 de abril de 2018.

2.5.3.2. Los materiales compuestos consolidados por dispersión

Los materiales compuestos consolidados por dispersión son partículas con diámetros que oscilan entre 10 a 100 nm, por lo que la interacción matriz y partícula que conducen a la consolidación que ocurren a nivel atómico o molecular. Mientras la matriz soporta la mayor parte de la carga aplicada, las pequeñas partículas dispersas dificultan o impiden el desplazamiento de dislocaciones. De este modo, se restringe la deformación plástica de tal manera que aumenta el límite elástico, la resistencia a la tracción y la dureza.

Figura 8. **Estructura de un material compuesto consolidado por dispersión**



Fuente: Blogspot. *Tecnología de los plásticos*.

<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/materiales-compuestos.html>.

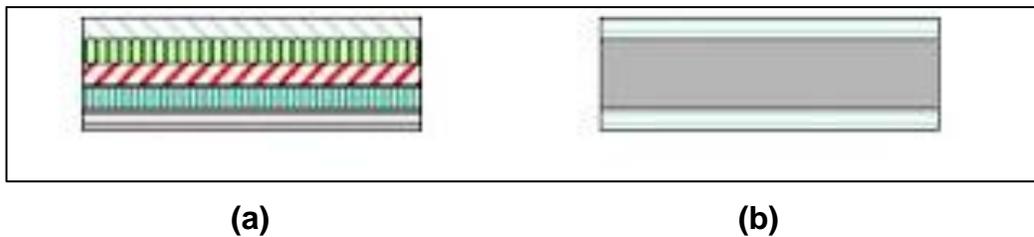
Consulta: 26 de abril de 2018.

2.5.4. Materiales compuestos estructurales

Un material compuesto estructural incluye materiales compuestos y materiales homogéneos. Sus propiedades dependen de los materiales constituyentes y de la geometría del diseño de los elementos estructurales.

Los compuestos laminares se caracterizan por poseer una dirección preferente con elevada resistencia y los paneles sándwich que se caracterizan por poseer caras externas fuertes separadas por una capa de material menos denso o núcleo.

Figura 9. **Material compuesto estructural (a) Laminar (b) Sándwich**



Fuente: Blogspot. *Tecnología de los plásticos.*

<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/materiales-compuestos.html>.

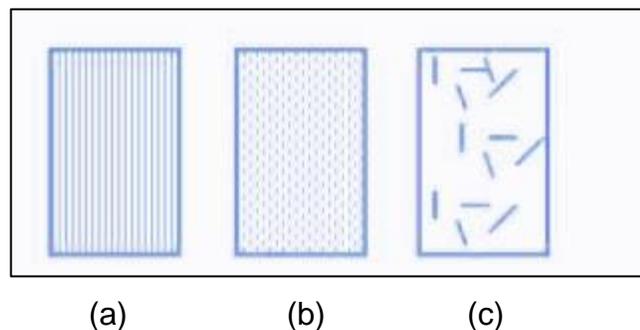
Consulta: 26 de abril de 2018.

2.5.5. Materiales compuestos reforzados con fibras

Los materiales compuestos reforzados con fibras son los materiales con fases dispersas en forma de fibras, diseñados con la finalidad de conseguir elevada resistencia y rigidez a baja densidad.

Estas características se expresan mediante los parámetros de resistencia específica y módulo específico, que corresponden respectivamente a las relaciones entre la resistencia a la tracción y el peso específico y entre el módulo de elasticidad y el peso específico. Utilizando materiales de baja densidad, tanto para la matriz como para las fibras, se fabrican compuestos reforzados con fibras que tienen resistencias y módulos específicos excepcionalmente elevados. Los materiales compuestos reforzados con fibras se clasifican por la longitud de la fibra.

Figura 10. **Materiales compuestos con fibras (a) continuas (b) continua y alineadas (c) discontinuas y orientadas al azar**



Fuente: Blogspot. *Tecnología de los plásticos*.

<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/materiales-compuestos.html>.

Consulta: 26 de abril de 2016.

2.5.6. Características de los materiales compuestos

- Alta resistencia: los materiales compuestos tienen una alta resistencia en relación a su peso.
- Baja densidad: los materiales compuestos proporcionan una buena resistencia por unidad de peso, no como en el caso de los metales, ya que su densidad es mayor.

- Flexibilidad de formas: debido a que las fibras de refuerzo se pueden trabajar con mayor facilidad que otros materiales antes del proceso de curado de la matriz, se pueden realizar una gran variedad de formas y acabados.
- Alta resistencia dieléctrica: los materiales compuestos son aislantes eléctricos.
- Gran capacidad de consolidación de partes: los materiales compuestos permiten el ensamblaje de componentes, reduciendo así el número de elementos y, por lo tanto, necesitando menor número de uniones.
- Resistencia a la corrosión: esta propiedad viene determinada por el tipo de matriz que se utiliza. De esta manera, se puede seleccionar matrices con resistencia a cualquier medio corrosivo.
- Comportamiento a fatiga: el comportamiento a la fatiga de los compuestos es bueno. Al ser materiales amorfos, es decir, no tienen una estructura ordenada, no sufren los mismos efectos de fatiga que los metales y su resistencia es mayor.
- Reducción de costes de mantenimiento: al tener una buena resistencia a la fatiga y presentar muy buena resistencia a la corrosión se reducen las tareas de mantenimiento y costes de reparación.

2.6. Aglomerados

Los aglomerados son materiales compuestos por partículas de madera de diferentes tamaños, unidas por una resina y presadas en forma plana regular a temperatura y presión controlada formando un tablero.

El aglomerado se encuentra en tipo normal, media y alta densidad, dependiendo de la cantidad de presión usada para formar la tabla. La de

densidad normal es relativamente blanda y fácil de trabajar, mientras que la de alta densidad es muy dura y pesada.

2.6.1. Tipos de aglomerados

A continuación se describen diferentes tipos de aglomerados.

2.6.1.1. Tableros contrachapados

Los tableros contrachapados se fabrican con varias láminas o chapas orientadas alternativamente. El aglomerado está conformado por un número de capas impar, generalmente posee tres capas. Para su fabricación las fibras se pegan y alternan entre sí, lo que influye en una mayor resistencia mecánica que otro tipo de tablero. Las colas utilizadas pueden ser gomas naturales o sintéticas con alta capacidad de adherencia y resistentes a la humedad.

Figura 11. **Estructura de un tablero contrachapado**



Fuente: Modulor. Pappel Sperrholz. <https://www.modulor.de/pappel-sperrholz-im-zuschnitt.html>.

Consulta: 26 de abril de 2018.

2.6.1.2. Tableros de partículas

Comúnmente se conocen como aglomerados. Surgieron de la necesidad de disponer de las grandes cantidades de aserrín, virutas y otros materiales de desecho. Estos tableros están fabricados por la unión de partículas y resinas.

Figura 12. **Estructura de un tablero de partículas**



Fuente: Maderas Medina. *Tableros*. <https://www.maderasmedina.com/tableros/Tableros.html>.
Consulta 26 de abril del 2018.

2.6.1.3. Tableros de fibras

Difieren de los tableros de partículas en la configuración física del material. Los tableros de fibras están conformados por fibras completamente separadas entre sí. Según la FAO un tablero de fibras es un tablero fabricado con fibras de madera u otros elementos lignocelulósicos utilizando como ligazón primaria las fibras afieltradas y sus propiedades de cohesión inherentes.

Este procedimiento se lleva a cabo por tratamiento químico, térmico o únicamente por tratamiento mecánico a través de un molino de discos. Para la unión de las fibras en forma de panel, las fibras se adhieren por sus inherentes

propiedades adhesivas, debido a la lignina, que es el componente que une las fibras entre sí a determinadas condiciones. Sin embargo agentes encolantes u otros aditivos son agregados para la fabricación de los tableros.

Figura 13. **Estructura de un tablero de fibras**

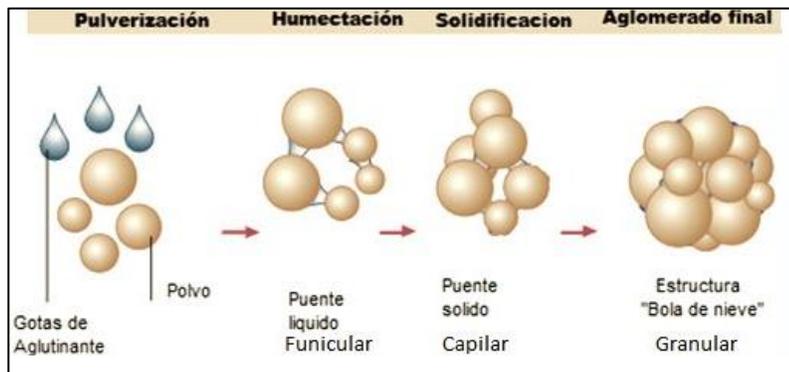


Fuente: Todo en Tableros. *Tableros de virutas*. <http://todoentableros.es/osb-3/40-tablero-de-virutas-orientadas-osb-3.html>. Consultado: 26 de abril de 2018.

2.7. Aglutinantes

Son materiales capaces de unir fragmentos de uno o más materiales para formar un conjunto compacto. Según la forma en que llevan a cabo a la unión, se denominan aglomerantes o conglomerantes. En los aglomerantes la unión tiene lugar por procesos físicos y en conglomerantes la unión ocurre mediante transformaciones químicas.

Figura 14. **Mecanismos de aglomeración utilizando un aglutinante**



Fuente: Moodle. *Aprende en línea.*

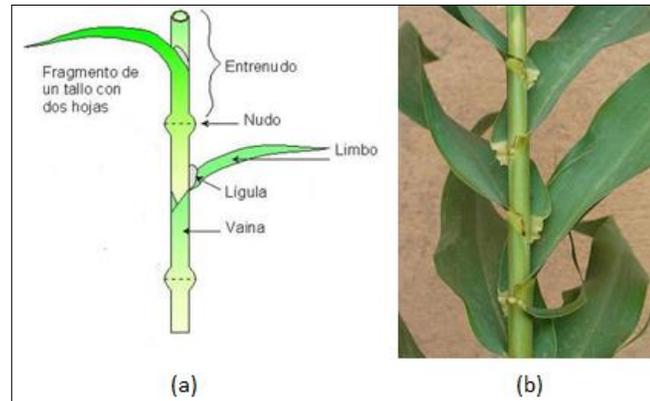
<http://aprendeenlinea.udea.edu.co/lms/moodle/mod/page/view.php?id=130002>. Consulta: 26 de abril de 2018.

2.8. **Caña de castilla (*Arundo donax*)**

La caña de castilla (*Arundo donax*) es una planta perenne geófito rizomatosa perteneciente a la familia de las Gramíneas. Presenta hojas anchas, largas y lineales, de borde áspero y de color verde. Posee rizomas largos, bien desarrollados y leñosos. Es la especie de mayor tamaño en su género y una de las gramíneas más grandes del mundo.

Presenta un crecimiento rápido y vigoroso, siendo sus tallos de 3,5 cm de diámetro y entre 3 a 10 metros de altura. Es de origen asiático y, actualmente, es una especie cosmopolita que crece en climas templados, tropicales e intertropicales.

Figura 15. **Arundo donax (a) Partes de la caña, (b) Arundo donax**



Fuente: *Arundo donax*. http://www.florademurcia.es/poaceae/arundo_donax_hoja.htm. Consulta: 26 de abril de 2018.

La caña de castilla (*Arundo donax*) tolera temperaturas en el rango de 5 °C y 35 °C, aunque es preferible mantenerlas a temperaturas entre los 9 °C y 28,5 °C. Para obtener buenas cosechas, las temperaturas medias deben situarse entre los 7 °C y 29 °C durante el período de crecimiento. Los rizomas brotan fácilmente con temperaturas del aire de 13 °C a 15 °C hasta 25 °C. Vive con 300 a 4000 mm anuales de precipitación. La producción de biomasa depende en gran parte de la disponibilidad de agua durante el periodo de crecimiento activo.

Es resistente al fuego y como planta de cultivo posee un bajo costo de mantenimiento anual y una fácil mecanización de cosecha. Su crecimiento es continuo a lo largo del año, aunque presenta un pico en primavera. Una vez instalado el cultivo puede dar producciones durante más de 15 años, con una elevada capacidad de reproducción vegetativa.

Desde el punto de vista energético, el uso principal de la caña es la producción de calor o electricidad mediante su combustión, aunque podría llegar a emplearse para la producción de biocombustibles de segunda generación.

2.9. Alcohol polivinílico

El alcohol polivinílico o también conocido como polialcohol de vinilo es un polímero sintético, soluble en agua, excelente formador de película, emulsionante, modificador de la viscosidad y adhesivo. Se encuentra en forma de gránulos y al mezclarse con agua ésta actúa como un plastificante. Forma un coloide reversible en agua caliente y es insoluble en agua fría.

Figura 16. **Alcohol polivinílico**



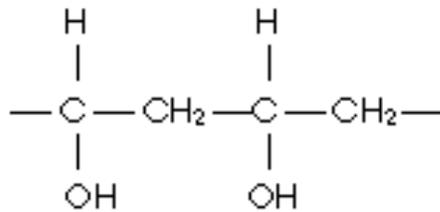
Fuente: Alcohol polivinílico. https://es.made-in-china.com/co_reamark/product_Polyvinyl-Alcohol-PVA-_hehshrueu.html . Consulta: 26 de abril de 2018.

El alcohol polivinílico es inodoro y no tóxico. Tiene alta resistencia y flexibilidad, así como alta propiedades de barrera para el oxígeno y los aroma. Sin embargo, estas propiedades dependen de la humedad, es decir, con mayor humedad más agua es absorbida. El agua, que actúa como un plastificante, a

su vez reducirá su resistencia a la tracción, pero aumentan su elongación y resistencia al desgarro.

El alcohol polivinílico es totalmente degradable y se disuelve rápidamente, tiene un punto de fusión de 230 °C y 180-190 °C para los grados totalmente hidrolizado y parcialmente hidrolizado respectivamente. Se descompone rápidamente por encima de 200 °C. Así mismo, no funde como un termoplástico, sino que se descompone por pérdida de agua de dos grupos hidroxilos adyacentes a temperaturas superiores a 150 °C.

Estructura química:



Alcohol Polivinílico (PVA)

3. METODOLOGÍA

3.1. Variables

A continuación, se muestran las variables de medición y de control.

Tabla I. Variables de operación

Núm.	Variable	Dimensional	Control	Medición	Constante	No Constante
1	Área superficial	m^2	X		X	
2	Transferencia de calor	W		X		X
3	Conductividad térmica	W/m*K		X		X
4	Espesor	m	X			X
5	Humedad	%	X			X
6	Potencia	W	X			X
7	Presión	ton	X		X	
8	Temperatura	°C		X		X
9	Tiempo	min	X		X	
10	Voltaje	V	X		X	

Fuente: elaboración propia.

3.1.1. Descripción de variables a manipular

- Tiempo: se establecerá un tiempo constante para todas las mediciones realizadas durante el proceso de transferencia de calor.
- Espesor: variará para cada fibra elaborada.

- Temperatura: se medirá la temperatura de superficie de ambas caras la fibra.
- Área superficial: permanecerá constante para cada fibra.
- Voltaje: el voltaje se mantendrá constante.
- Potencia: variará para aumentar o disminuir la transferencia de calor.
- Humedad: se mantendrá la humedad por debajo del 10 % por cada fibra.
- Presión: se mantendrá constante la presión durante todo el proceso.

3.2. Delimitación de campo de estudio

La elaboración de las fibras y evaluación de la conductividad térmica se llevará a cabo mediante equipos proporcionados por la Sección de tecnología de la madera del Centro de investigaciones de ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, por lo tanto este estudio se limitará a evaluar el comportamiento de la conductividad térmica en distintas fibras al variar la razón de transferencia de calor.

Para la elaboración de las fibras se utilizará como materia prima la caña de castilla (*Arundo donax*) y como aglutinante alcohol polivinílico a formulaciones de 50 y 60 por ciento de aglutinante, así mismo pasarán por un proceso de compresión de 10 toneladas mediante una prensa hidráulica durante 10 minutos.

El equipo de medición de conductividad térmica está elaborado con paredes adiabáticas y diseñado para poder evaluar muestras de un pie cuadrado.

Se trabajará con un diseño experimental multifactorial de dos niveles, por lo cual se realizarán dos formulaciones a tres diferentes espesores y consigo tres repeticiones con un resultado final de dieciocho muestras en total.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Brian Derek Alexander Pérez Sotoj
- Asesor: Ing. Mauricio Valentino Rivera Tello

3.4. Recursos materiales disponibles

La parte experimental de la investigación se realizará en el laboratorio de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

3.4.1. Equipo

- Balanza analítica para medición de humedad
- Bombillos refractores
- Cronómetro
- Equipo M.C.T.
- Molde de 1 pie cuadrado
- Molino de martillos
- Prensa hidráulica
- Sargentos tipo C
- Termocuplas
- Termómetro láser infrarrojo

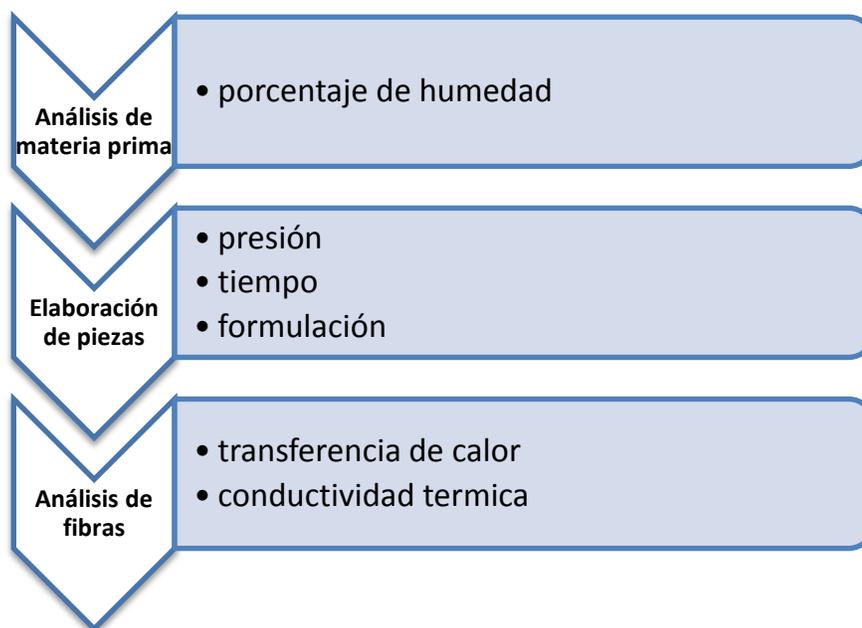
3.4.2. Reactivos y materia prima

- Alcohol polivinílico
- Caña de castilla

3.5. Técnica cualitativa

Se realizará el estudio a la elaboración y análisis térmico de las fibras.

Figura 17. **Análisis cuantitativo**



Fuente: elaboración propia.

Tabla II. Experimentos realizados en grupos para su comparación

Experimento	Formulación	Descripción
$E_{1,1}$	50-50 %	113,5 g de aglutinante y 227 g de caña de castilla a 10 toneladas de presión durante 10 minutos.
$E_{1,2}$	50-50 %	227 g de aglutinante y 454 g de caña de castilla a 10 toneladas de presión durante 10 minutos.
$E_{1,3}$	50-50 %	340,5 g de aglutinante y 681 g de caña de castilla a 10 toneladas de presión durante 10 minutos.
$E_{2,1}$	40-60 %	136,2 g de aglutinante y 227 g de caña de castilla a 10 toneladas de presión durante 10 minutos.
$E_{2,2}$	40-60 %	317,8 g de aglutinante y 454 g de caña de castilla a 10 toneladas de presión durante 10 minutos.
$E_{2,3}$	40-60 %	408,6 g de aglutinante y 681 g de caña de castilla a 10 toneladas de presión durante 10 minutos.

Fuente: elaboración propia.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Se realizará la recolección y ordenamiento de los datos experimentales, mediante distintas etapas las cuales fueron necesarias para evaluar las propiedades térmicas.

Se presenta la metodología experimental realizada.

3.6.1. Proceso para la obtención de materia

La caña de castilla (*Arundo Donax*) se obtendrá del lote con dirección de 2 calle 6 - 51 zona 2 del municipio de Villa Nueva, Guatemala y se transportará al laboratorio de Tecnología de la Madera del Centro de Investigaciones de

Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala donde se realizará el siguiente procedimiento.

- Limpiar las cañas de castilla (*Arundo Donax*) extrayendo las hojas, limbo, lígula y vaina, para poder trabajar únicamente con la caña.
- Cortar la caña en trozos para, posteriormente, introducir las en un molino de martillos, para obtener partículas de caña de menor tamaño.
- Utilizar una balanza de humedad y verificar que las partículas de caña estén por debajo del diez por ciento de humedad.

3.6.2. Procedimiento para fabricación de las fibras de caña de castilla (*Arundo Donax*) con alcohol polivinílico

- Utilizar pesos de ½ lb, 1 lb y 1 ½ lb de caña de castilla (*Arundo Donax*) y convertirlos a porcentajes de aglomerado-aglutinante de 40 y 50 % en relación al aglomerado y determinar el peso complemento de aglutinante.
- Mezclar ambas materias primas hasta obtener una apariencia pastosa lo cual indicará que mezcla aglomerado-aglutinante esta homogénea.
- Colocar mezcla aglomerado-aglutinante en un molde de un pie cuadrado.
- Colocar el molde con la mezcla en una presa hidráulica y aplicar presión constante de 10 toneladas durante 10 minutos.
- Desmoldar la fibra de aglomerado y colocar en un lugar con superficie firme.
- Dejar secar la fibra durante un mes para eliminar cualquier rastro de humedad.

3.6.3. Procedimiento para determinación de conductividad térmica

- Preparar equipo de medición conductividad térmica y colocarlo en una superficie firme e instalar bombillo reflector infrarrojo en el mismo.
- Tomar una fibra de un pie cuadrado y colocar dentro del equipo de conductividad térmica.
- Colocar en cada una de las superficies de la fibra una termocupla de superficie y así mismo conectarlas a un módulo inalámbrico de temperatura tipo K.
- Suministrar calor a la fibra dentro del equipo de medición de conductividad térmica a partir del bombillo reflector.
- Utilizar un termómetro laser y medir la temperatura cada 10 minutos en la salida de temperatura dentro del equipo de medición de conductividad térmica hasta lograr una temperatura constante.
- Con la temperatura constante en la salida del equipo de medición de conductividad térmica medir el diferencial de temperatura de superficie de la fibra mediante las lecturas de del módulo inalámbrico de temperatura.

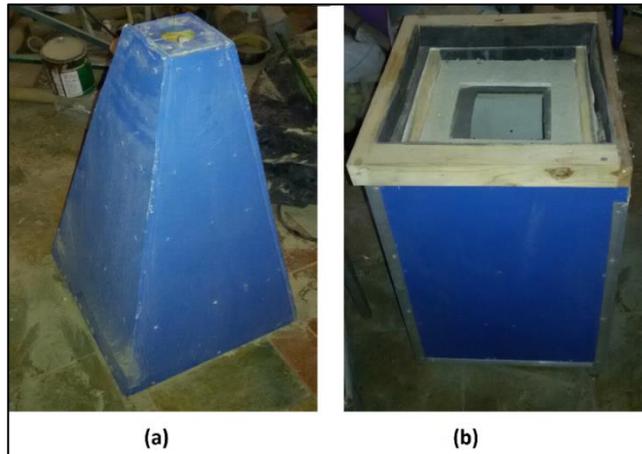
3.6.4. Equipo

A continuación, se describe el equipo a utilizarse.

3.6.4.1. Equipo de medición de conductividad

El equipo de medición de conductividad térmica fue proporcionado por el laboratorio multipropósitos de sección de tecnología de la madera del centro de investigaciones de ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 18. **Equipo M.C.T. (a) parte inferior (b) parte superior**



Fuente: elaboración propia.

El equipo de medición de temperatura consta de dos termocupas y su registrador de temperatura respectivo. Ambos instrumentos de medición fueron proporcionados por el laboratorio de tecnología de la madera del centro de investigaciones de ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 19. **Medidores de temperatura de superficie (a) Termocupla 80PK-27 (b) Módulo inalámbrico de temperatura tipo K**



Fuente: elaboración propia.

Se utilizaron bombillos de 125 W, 175W y 250W para generar un flujo de calor al equipo M.C.T.

Figura 20. **Bombillo de calor**



Fuente: elaboración propia.

3.6.4.2. Equipo para la elaboración de las fibras.

Se utilizará el molino de martillos instalado en el laboratorio de tecnología de la madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 21. **Molino de martillos**



Fuente: elaboración propia.

El laboratorio de tecnología de la madera del centro de investigaciones de ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala proporcionó los moldes.

Figura 22. **Molde para elaboración de una fibra**



Fuente: elaboración propia.

La prensa hidráulica instalada en el laboratorio de tecnología de la madera del Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 23. **Prensa hidráulica**



Fuente: elaboración propia.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Se presentan las tablas que se utilizarán para la recolección y ordenamiento de los datos experimentales.

Tabla III. **Parámetros para la creación de las muestras del material compuesto**

Núm.	%F	Peso (g) Aglutinante	Peso (g) Aglomerado	Presión (ton)	Tiempo (min)	Espesor (cm)
1						
2						
3						
4						
5						
6						

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Conductividad térmica de la caña de castilla (*Arundo Donax*) con alcohol polivinílico a formulación 50-50 % y grosor de 0,0104 m**

Propiedad	Corrida núm. 1			Corrida núm. 2			Corrida núm. 3		
P [kW]									
Q [kW]									
T1 [°C]									
T2 [°C]									
k [W/m°C]									
t [min]									

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Conductividad térmica de la caña de castilla (*Arundo Donax*) con alcohol polivinílico a formulación 50-50 % y grosor de 0,0198 m**

Propiedad	Corrida núm. 1			Corrida núm. 2			Corrida núm. 3		
P [kW]									
Q [kW]									
T1 [°C]									
T2 [°C]									
k [W/m°C]									
t [min]									

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Conductividad térmica de la caña de castilla (*Arundo Donax*) con alcohol polivinílico a formulación 50-50 % y grosor de 0,0295 m**

Propiedad	Corrida núm. 1			Corrida núm. 2			Corrida núm. 3		
P [kW]									
Q [kW]									
T1 [°C]									
T2 [°C]									
k [W/m°C]									
t [min]									

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Conductividad térmica de la caña de castilla (*Arundo Donax*) con alcohol polivinílico a formulación 40-60 % y grosor de 0,0121 m**

Propiedad	Corrida núm. 1			Corrida núm. 2			Corrida núm. 3		
P [kW]									
Q [kW]									
T1 [°C]									
T2 [°C]									
k [W/m°C]									
t [min]									

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Conductividad térmica de la caña de castilla (*Arundo Donax*) con alcohol polivinílico a formulación 40-60 % y grosor de 0,0205 m**

Propiedad	Corrida núm. 1			Corrida núm. 2			Corrida núm. 3		
P [kW]									
Q [kW]									
T1 [°C]									
T2 [°C]									
k [W/m°C]									
t [min]									

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Conductividad térmica de la caña de castilla (*Arundo Donax*) con alcohol polivinílico a formulación 40-60 % y grosor de 0,0287 m**

Propiedad	Corrida núm. 1			Corrida núm. 2			Corrida núm. 3		
P [kW]									
Q [kW]									
T1 [°C]									
T2 [°C]									
k [W/m°C]									
t [min]									

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Incertidumbre de instrumentos de medición**

Instrumento de medición	Incertidumbre
Balanza de humedad	
Prensa hidráulica	
Timer	
Termocupla	
Voltaje	

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

Se utilizará el análisis de varianza con un factor (ANOVA) como análisis estadístico ya que se realizarán 3 corridas por cada grosor y tres grosores por cada formulación.

- Media aritmética

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

- Desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}$$

- Cálculo de suma de cuadrados entre los grupos

$$SSE = \sum \left(\frac{T_c^2}{n_c} \right) - \frac{(\sum x)^2}{N}$$

- Cálculo de cuadrados en los grupos

$$SSE = \sum x^2 - \sum \left(\frac{T_c^2}{n_c} \right)$$

- Cálculo de cuadrados medios entre los grupos

$$MSTR = \frac{SST}{k - 1}$$

- Cálculo de cuadrados medios en los grupos

$$MSE = \frac{SSE}{N - k}$$

- Cálculo de función de prueba F

$$F_c = \frac{MSTR}{MSE}$$

Con base en el grado de confianza deseado para el experimento se utilizará el 95 % de confianza con $\alpha = 0,05$ por lo que se presenta el número de grados de libertad deseados para determinar mediante tablas el valor crítico de la distribución:

$$\text{Numerador} = (k - 1) \quad \text{Denominador} = (N - k)$$

Se compara el valor obtenido de F de la función de prueba con el valor encontrado en tablas estadísticas y, dependiendo de la comparación de ambos, se aceptará o rechazará la hipótesis nula.

3.9. Plan de análisis de los resultados

Métodos y modelos de los datos según el tipo de variables.

3.9.1. Cálculo de la razón de flujo de calor por cada muestra

$$\dot{Q} = h * A * (T - T_m)$$

3.9.2. Evaluación de la ley de Fourier

Para la determinación de la conductividad térmica, se realizará el análisis de conducción de calor a través de una placa plana como la conducción de calor unidimensional.

$$\frac{dQ}{dt} = -k * A * \frac{\partial T}{\partial x}$$

3.9.3. Programas por utilizar para análisis de datos

- Microsoft Excel 2013
- Microsoft Word 2013
- MiniTab
- QtiPlot

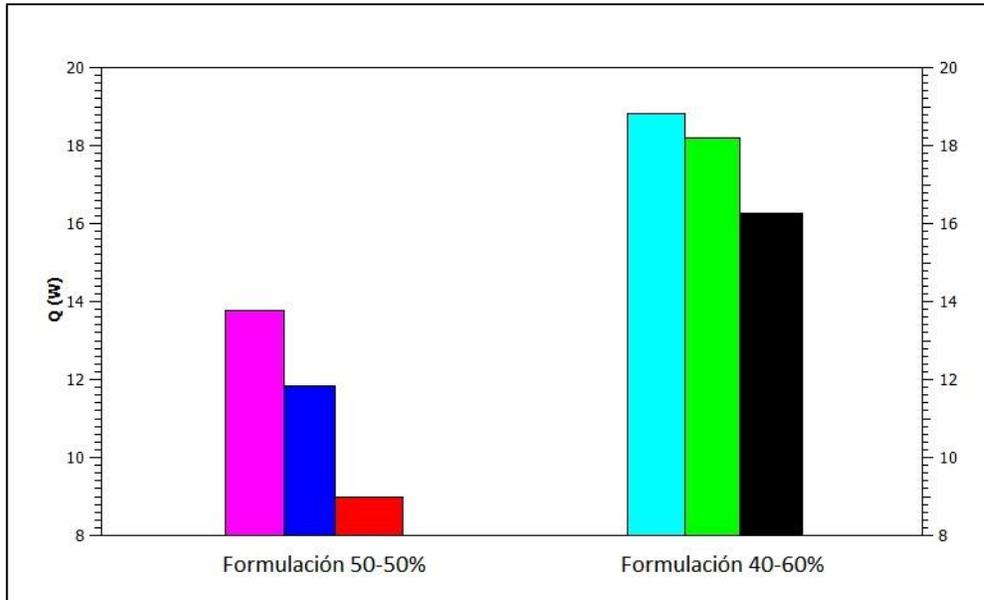
4. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados al evaluar las propiedades térmicas en los tableros aglomerados compuesto por residuos de caña de castilla y alcohol polivinílico a formulación de 50-50 % y 40-60 %.

4.1. Transferencia de calor – formulación

A cada formulación le corresponden tres espesores, por lo que se evaluó la transferencia de calor para cada formulación al variar la potencia eléctrica de la fuente de calor.

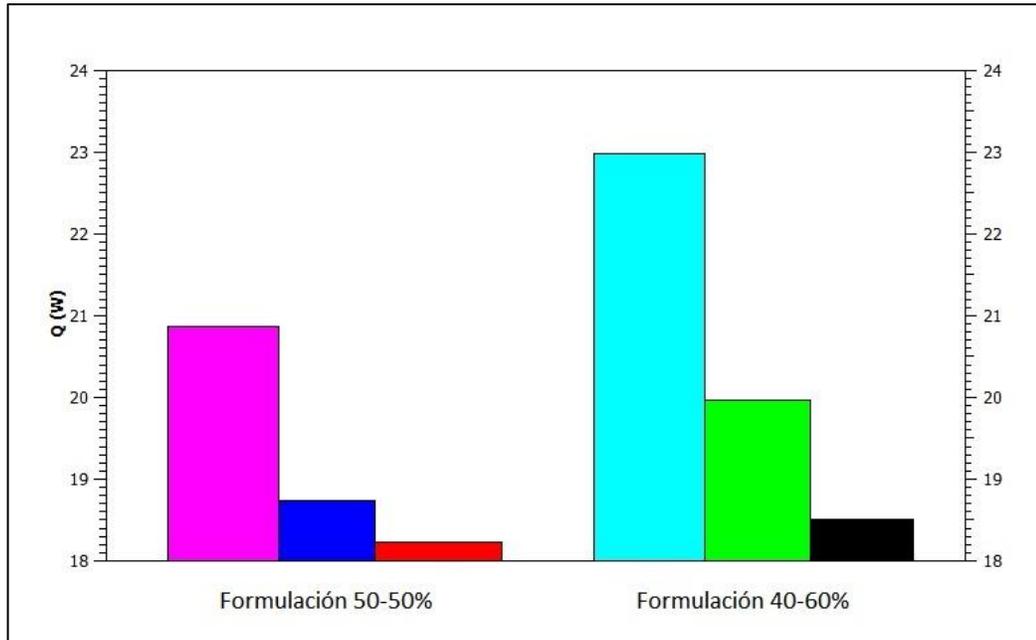
Figura 24. **Transferencia de calor en función de la formulación a potencia de 125 W**

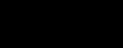


Formulación	50-50 %			40-60 %		
Color						
Espesor (m)	0,0104	0,0198	0,0295	0,0121	0,0205	0,0287

Fuente: elaboración propia.

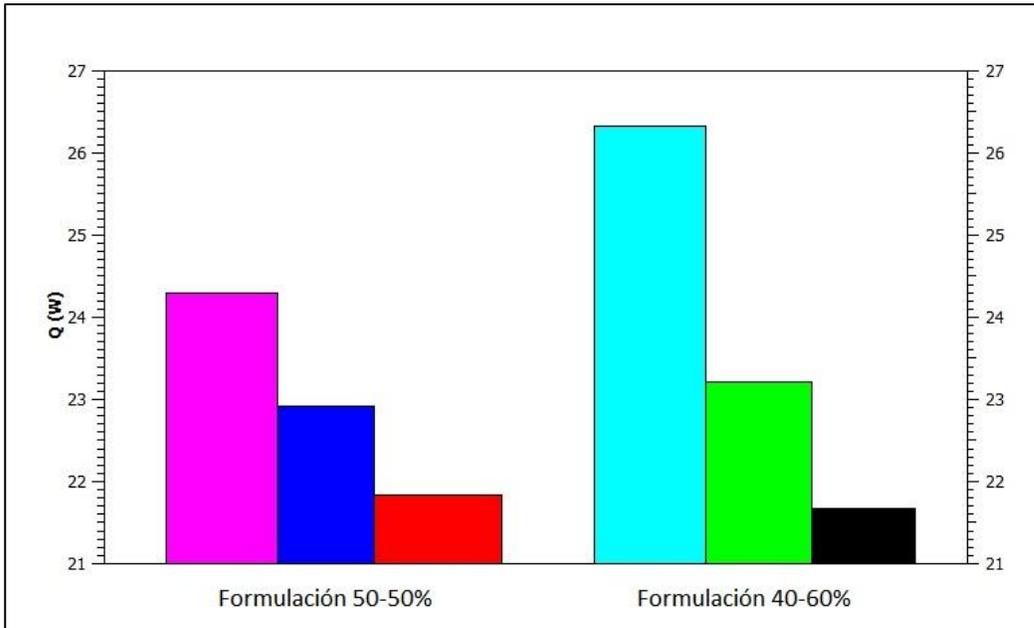
Figura 25. **Transferencia de calor en función de la formulación a potencia de 175 W**



Formulación	50-50 %			40-60 %		
Color						
Espesor (m)	0,0104	0,0198	0,0295	0,0121	0,0205	0,0287

Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Transferencia de calor en función de la formulación a potencia de 250 W**



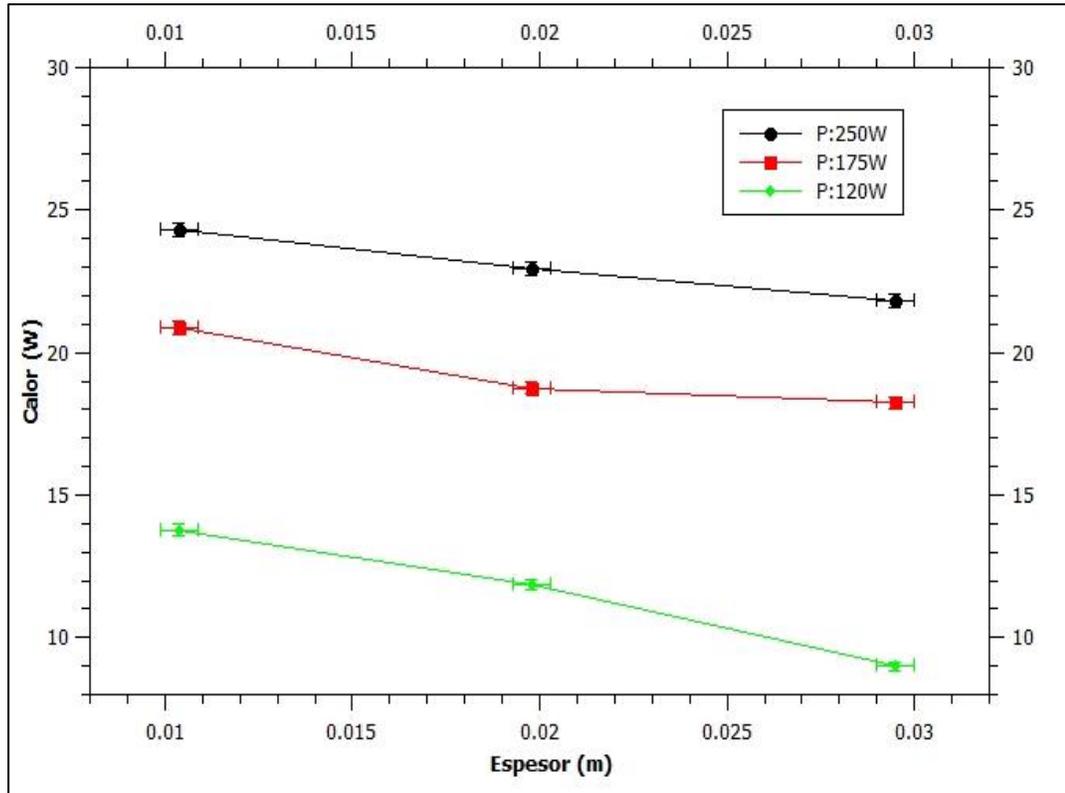
Formulación	50-50 %			40-60 %		
Color						
Esesor (m)	0,0104	0,0198	0,0295	0,0121	0,0205	0,0287

Fuente: elaboración propia.

4.2. Transferencia de calor – esesor

Se varió tres veces el esesor para cada formulación y se evaluó la transferencia de calor a cada uno de los esesores variando la potencia eléctrica de la fuente de calor.

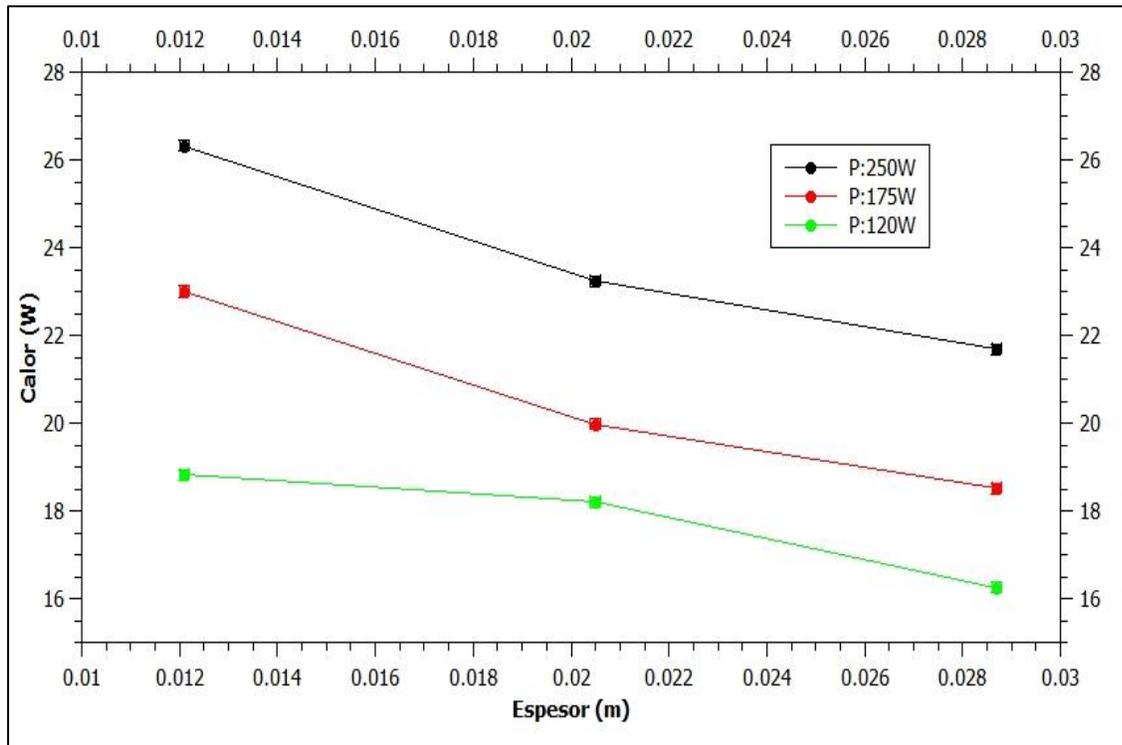
Figura 27. **Transferencia de calor en función del espesor a formulación de 50-50 %**



Color	Modelo matemático	R^2	VD	VI
	$\dot{Q} = 253x + 16,5$	0,9904	$\pm 0,1800$	$\pm 0,0005$
	$\dot{Q} = 253x + 16,5$	0,8743	$\pm 0,2141$	$\pm 0,0005$
	$\dot{Q} = -129x + 25,58$	0,9934	$\pm 0,2365$	$\pm 0,0005$

Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Transferencia de calor en función del espesor a formulación de 40-60 %**



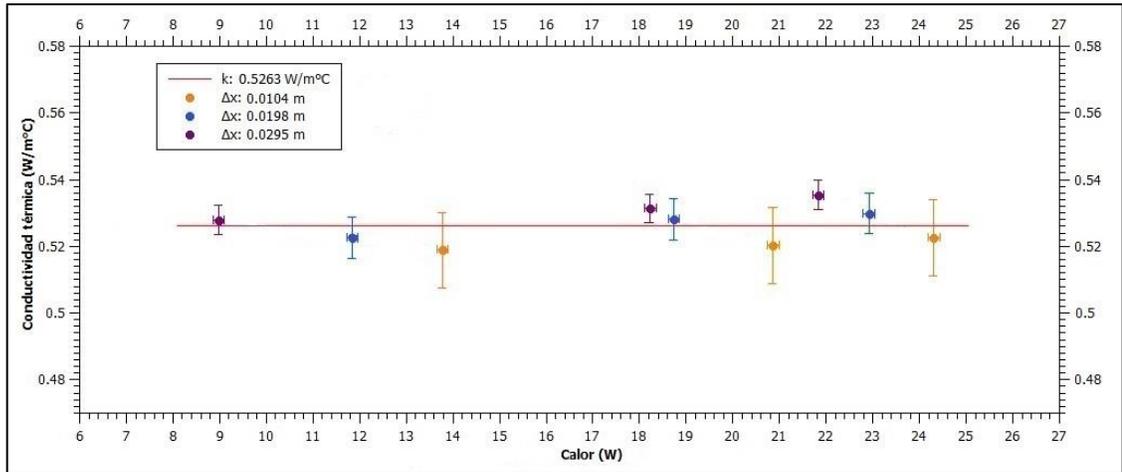
Color	Modelo matemático	R^2	VD	VI
	$\dot{Q} = -153x + 20,8$	0,9157	$\pm 0,1274$	$\pm 0,0005$
	$\dot{Q} = 26x - 270$	0,9641	$\pm 0,1265$	$\pm 0,0005$
	$\dot{Q} = 29,4 - 279$	0,9665	$\pm 0,1281$	$\pm 0,0005$

Fuente: elaboración propia.

4.3. Transferencia de calor – conductividad térmica

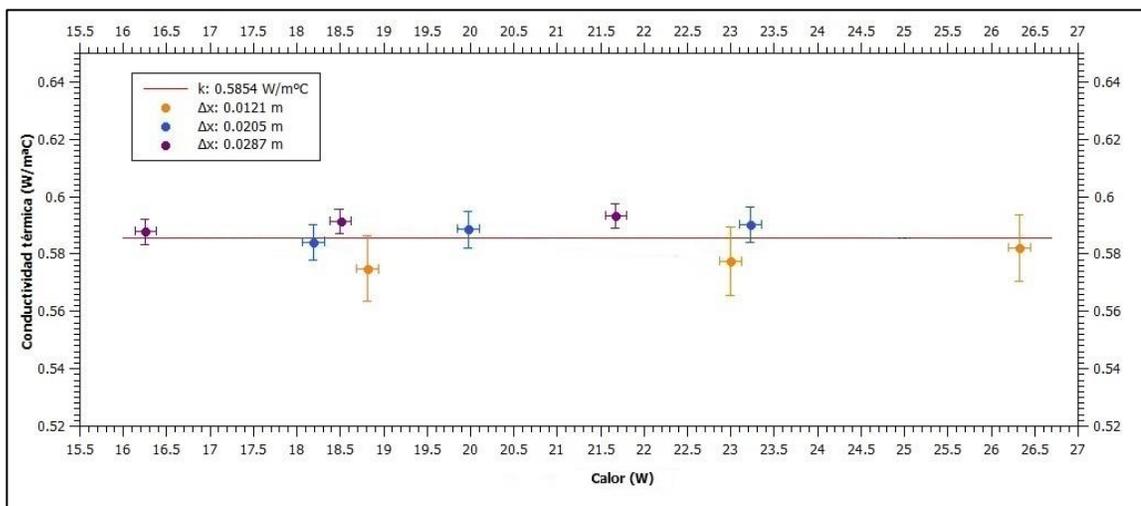
Se muestra el comportamiento de la conductividad térmica para cada formulación al variar la potencia eléctrica de la fuente de calor.

Figura 29. **Transferencia de calor en función de su conductividad térmica a formulación 50-50 %**



Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Transferencia de calor en función de su conductividad térmica a formulación 40-60 %**

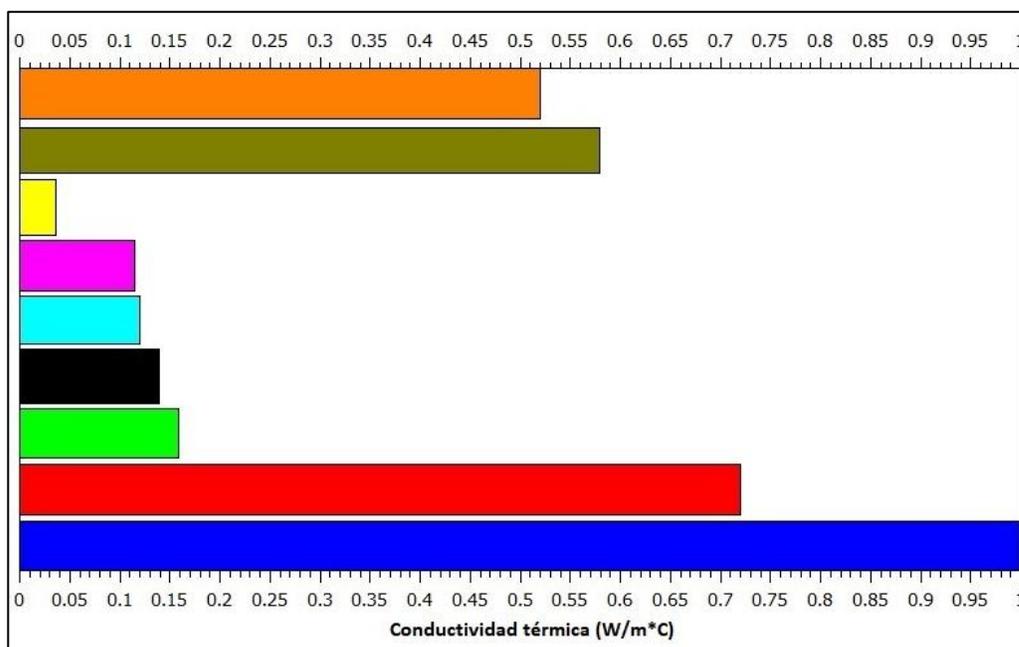


Fuente: elaboración propia.

4.4. Conductividad térmica

A continuación, se compara la conductividad de térmica obtenida a formulaciones de 50-50 % y 40-60 % en relación a otros materiales aislantes.

Figura 31. Conductividad térmica de materiales aislantes



Color	Descripción	Conductividad térmica (W/m°C)
Orange	Tablero aglomerado de caña de castilla y alcohol polivinílico a formulación 50-50 %	0,52
Olive Green	Tablero aglomerado de caña de castilla y alcohol polivinílico a formulación 40-60 %	0,58
Yellow	Fibra de vidrio	0,036
Magenta	Maderas suaves	0,115
Cyan	Madera contrachapada	0,12
Black	Tablero aglutinado	0,14
Green	Maderas duras	0,159
Red	Ladrillo común	0,72
Blue	Vidrio arquitectónico	1

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Este trabajo de graduación muestra los resultados obtenidos del comportamiento térmico de un tablero aglomerado compuesto por residuos de caña de castilla (*Arundo Donax*) y alcohol polivinílico. Se determinó el comportamiento de la transferencia de calor en función de la formulación, espesor y conductividad térmica.

Así mismo, parte de la investigación consistió en la elaboración de los tableros lo cual se llevó acabo de la siguiente manera: recolección de caña de castilla; limpieza de la caña de castilla; trituración de la caña de castilla; secado de la caña de castilla; mezcla de las virutas de caña de castilla con alcohol polivinílico; colocación de mezcla en el molde; prensado y secado.

Se utilizó un molde de un pie cuadrado para la elaboración de cada tablero y el espesor dependió de la relación de porcentaje masa de viruta y de aglutinante para cada tablero aglomerado. En el proceso de compresión de los tableros se aplicó una presión constante de 10 toneladas durante 10 minutos.

Se realizaron formulaciones de 50-50 % y 40-60 % y, para cada formulación, se elaboraron tableros a tres distintos espesores y para cada espesor se elaboraron 3 tableros, dando como resultado un total de 9 tableros fabricados por cada formulación.

La metodología de la formulación para la elaboración de cada fibra consistió en especificar el peso de viruta de caña de castilla por utilizar y el

peso de aglutinante en relación con el peso en porcentaje de la viruta de caña de castilla.

Tabla XI. **Formulaciones realizadas en porcentaje masa viruta-aglutinante**

Espesor	Formulación 50-50 %		Espesor	Formulación 40-60 %	
	Peso (lb)	Descripción		Peso (lb)	Descripción
$E_{1,F1}$	1/2	Caña de castilla	$E_{1,F2}$	1/2	Caña de castilla
	1/25	Alcohol polivinílico		3/10	Alcohol polivinílico
$E_{2,F1}$	1	Caña de castilla	$E_{2,F2}$	1	Caña de castilla
	1/2	Alcohol polivinílico		3/5	Alcohol polivinílico
$E_{3,F1}$	1 ½	Caña de castilla	$E_{3,F3}$	1 ½	Caña de castilla
	3/4	Alcohol polivinílico		9/10	Alcohol polivinílico

Fuente: elaboración propia.

El procedimiento para la recolección de datos para determinar la transferencia de calor consistió en colocar una fibra dentro de un medidor de conductividad térmica el cual fue fabricado por la sección de tecnología de la madera de la Universidad de San Carlos de Guatemala (ver figura 18). Luego, se le colocó una termocupla de superficie en cada una de sus caras de los tableros aglomerados y se les aplicó calor durante una hora o hasta obtener mediciones constantes de temperatura en alguna de sus superficies. Este procedimiento se realizó para cada una de las fibras.

En la sección 4.1 se muestra el comportamiento de la transferencia de calor en los distintos tableros aglomerados compuestos de caña de castilla con alcohol polivinílico en función de su formulación, el análisis de datos consistió

en agrupar los espesores con su respectiva formulación mientras se varió la potencia eléctrica de la fuente de calor.

En la figura 24 se muestra la gráfica de barras la cual muestra los valores correspondientes de espesores de 0,0104, 0,0198 y 0,0295 metros a una formulación a 50-50 % para el primer grupo y espesores de 0,0121, 0,0205 y 0,0287 metros a formulación 40-60 % para el segundo grupo, ambos grupos evaluados con relación a la transferencia de calor proporcionada por una fuente de calor de 125 Watts.

Se observó que el segundo grupo con formulación 40-60 % se vio afectado por la transferencia de calor en comparación con los tableros de 50-50 %. Por ello, se determinó que la cantidad de flujo de calor transferido se vio afectado por la cantidad de aglutinante agregado, ya que en la formulación 40-60 % la cantidad de viruta fue la misma que la formulación 50-50 %, pero el aglutinante aumentó en un 10 % para cada tablero, dicho incremento de aglutinante hizo una variación considerable en las propiedades físicas de la fibra, esto debido a que el aglutinante utilizado fue alcohol polivinílico.

El alcohol polivinílico es un polímero de vinilo que resulta de la polimerización por adición de compuestos orgánicos monocelulares y con excelentes propiedades de adhesión con materiales ortótropos. Se prepara por dispersión acuosa, por lo que tiene como ventaja uso del agua como medio y consigo una mayor relación de estructura molecular. Entonces, en la formulación 40-60 % se vio mayormente reflejado en la relación viruta-aglutinante, por lo que su efecto de adhesión incrementó la contracción entre las partículas de caña de castilla y disminuyó los espacios microscópicos de aire entre partículas y facilitó la interacción entre partículas al momento de

aplicar un flujo de calor, dando como resultado un aumento de energía interna y con eso un aumentando en la razón de transferencia de calor.

En la figura 25 y 26 se muestran los mismo espesores y formulaciones pero evaluados a una potencia eléctrica de 175 Watts y 250 Watts, por lo que se observó que la transferencia de calor aumentó conforme aumentó la potencia eléctrica, por lo que se ganó representatividad en el estudio de la formulación en función de la transferencia de calor.

La figura 27 muestra el comportamiento de la razón de transferencia de calor en función del espesor a una formulación de 50-50 %. Se puede observar que la razón de transferencia de calor disminuyó de 13,78 W a 8,98 W en un rango de espesor de 0,01 m a 0,03 m a una potencia de 120 W. Esta tendencia se debió a que la razón de transferencia de calor es inversamente proporcional al aumento de espesor para placas planas, por lo que experimentalmente se confirmó que al crear fibras de distintos espesores teniendo el área de transferencia de calor constante la razón de calor disminuirá al aumentar el espesor.

Así mismo, se observa cómo la razón de transferencia de calor fue aumentado en los 3 distintos espesores: 13,70 W a 24,30 W a un espesor de 0,0104 m; 11,84 W a 22,91 W a un espesor de 0,0198 m y de 9,98 W a 21,83 W a un espesor de 0,0295 m, por lo que su aumento se debió al incremento de potencia a la fuente de calor, la cual fue de 120 W a 250 W, este aumento de potencia incremento el diferencial de temperatura en las fibras y consigo aumentado en la razón de transferencia de calor.

En la figura 28 se realizó el mismo análisis de la razón de transferencia de calor en función del espesor a las mismas condiciones con excepción a la

formulación debido a que los valores corresponden a la formación 40-60 %, por lo que se observó el mismo comportamiento pero con mayor facilidad de transferir calor por lo que se obtuvieron valores de transferencia de calor de: 18,81 W a 26,32 W a un espesor de 0,0121 m: 18,19 W a 23,22 W a un espesor de 0,0205 m y de 16,25 W a 21,67 W a un espesor de 0,028 m.

En los apéndices del 14 al 15 y 18 al 20 están representados los valores obtenidos del análisis de varianza con una variable realizados al comportamiento de la transferencia de calor en función del espesor correspondientes a los tableros aglomerados con formulación 50-50 % y 40-60 %, por lo que se concluyó que la transferencia de calor si se vio afectado al variar espesor, por lo que se aceptó la hipótesis alternativa en todos los casos.

La sección 5,3 se determinaron los valores de conductividad térmica para cada espesor y formulación utilizando la ecuación conductividad térmica de la ley de Fourier para placas planas los cuales se evaluaron en función de la transferencia de calor al variar la potencia eléctrica de la fuente que suministro calor.

En la figura 29 muestra los valores de conductividad térmica para la formulación 50-50 %, experimentalmente se estableció un rango de interés de 125 a 250 Watts para determinar su comportamiento en función de la transferencia de calor.

Para la evaluación por potencias se determinaron los valores de conductividad térmica de 0,5231 W/m°C; 125 W, 0,5265 W/m°C; 175 W y 0,5292 W/m°C; 250 W por lo tanto se determinó que la conductividad no se vio afectada dentro de ese rango de interés establecido por lo que se determinó

como una conductividad constante de $0,5263 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, el cual corresponde al promedio de las conductividades térmicas.

En la figura 28 se realizó el mismo análisis a formulación 40-60 % y se ordenaron los valores de conductividad térmica de $0,5822 \text{ W/m}^\circ\text{C}$; 125 W, $0,5857 \text{ W/m}^\circ\text{C}$; 175 W y $0,5885 \text{ W/m}^\circ\text{C}$; 250 W y se establece un valor constante de $0,5854 \text{ W/m}^\circ\text{C}$.

El apéndice 17 muestra los valores de F de 0,7520 y F crítica de 3,4028 correspondientes al análisis de varianza de una variable para los tableros aglomerados con formulación 50-50 %. En el apéndice 21, los valores de F de 0,6279 y F crítica de 3,4028 correspondientes a los tableros aglomerados con formulación 40-60 %, ambos son resultados estadísticos del análisis de varianza de una variable, por lo que se concluyó que la conductividad térmica no se ve afectada significativamente al variar la transferencia de calor en ambas formulaciones en un rango de 125 W a 250 W, por lo que se acepta la hipótesis nula en ambos casos.

Así mismo, se observó que en la formulación 50-50 % la transferencia de calor se dio en menor cantidad, haciéndolo más aislante en comparación con la formulación 40-60 % en donde se observa que la transferencia de calor se dio de manera más fácil y continúa haciéndolo un material más conductor, pero aún en el rango de material aislante.

En la figura 29 se muestra un diagrama de barras comparativo en relación a conductividades térmicas de distintos materiales por lo que se observa que el tablero aglomerado elaborado está por encima de los valores de un tablero aglutinado y una madera contrachapada que están en valores de conductividad térmica de 0,12 y $0,14 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, esto debido a que la conductividad térmica

variará en un aglomerado dependiendo de las propiedades del aglutinante por lo que su efecto puede dar grandes aumentos de conductividad térmica pero mejores propiedades de adhesión, por lo que se vio reflejado en la formulación 40-60 % el cual aumentó su conductividad térmica al aumentar la cantidad de aglutinante.

CONCLUSIONES

1. El coeficiente de transferencia de calor incrementó al aumentar la cantidad de aglutinante en las formulaciones, por lo tanto los tableros aglomerados con formulación 40-60 % obtuvieron valores mayores de transferencia de calor en relación a la formulación 50-50 %.
2. La razón de transferencia de calor si se vio afectada al variar el espesor de 0,0104 a 0,0295 metros a formulación de 50-50 %, por lo que su obtuvieron comportamientos matemáticos: $\dot{Q} = 253x + 16,5$ a una potencia eléctrica de 125 W; $\dot{Q} = 253x + 16,5$ a una potencia eléctrica de 175 W y $\dot{Q} = -129x + 25,58$ a una potencia eléctrica de 250 W.
3. La razón de transferencia de calor si se vio afectada al variar el espesor de 0,0121 a 0,0287 metros a formulación de 40-60 %, por lo que su obtuvieron comportamientos matemáticos: $\dot{Q} = -153x + 20,8$ a una potencia eléctrica de 125 W; $\dot{Q} = 26x - 270$ a una potencia eléctrica de 175 W y $\dot{Q} = 29,4 - 279$ a una potencia eléctrica de 250 W.
4. Se obtuvo un valor constante de conductividad térmica de 0,5263 W/m°C para los tableros a formulación 50-50 % en un rango de potencia eléctrica de 125 a 250 W, por lo que se determinó estadísticamente por un análisis de varianza de una variable que la conductividad térmica no se ve afectada significativamente al variar la razón de transferencia de calor.

5. Se obtuvo un valor constante de conductividad térmica de $0,5854 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ para los tableros a formulación 40-60 % en un rango de potencia eléctrica de 125 a 250 W, por lo que se determinó estadísticamente por un análisis de varianza de una variable que la conductividad térmica no se ve afectada significativamente al variar la razón de transferencia de calor.

RECOMENDACIONES

1. Elaborar las fibras en prensado en frío y luego una aplicación calor mediante prensado en caliente para obtener una fibra compacta y de buena calidad.
2. Si las fibras se elaboran en prensado en frío mantenerlas en un lugar con baja humedad durante el proceso de secado, debido a que las partículas de los tableros son higroscópicas, por lo que provocaría crecimiento de moho.
3. Realizar de manera cuidadosa la mezcla entre viruta y aglutinante, para poder garantizar la homogeneidad de la mezcla y evitar la segregación de partículas.

BIBLIOGRAFÍA

1. CENGEL, Yunus. *Transferencia de calor y masa*. 4a ed. México: McGraw-Hill, 2012. 1025 p.
2. KERN. Donal. *Procesos de transferencia de calor*. 3a ed. México: Continental, 1999. 641 p.
3. PERRY. Robert. *Manual del ingeniero químico*. 6a ed. México: McGraw-Hill, 1978. 2735 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Incertidumbres en el cálculo de la conductividad térmica

Descripción	Error
Área	0,0001 m ²
Espesor	0,000001 m
Temperatura	0,05 °C

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Transferencia de calor en los tableros aglomerados a formulación 50-50 % a potencia eléctrica de 125 Watts

Δx (m)	A (m ²)	T1 (°C)	Ta (°C)	$\Delta \dot{Q}$ (W)	$\pm \Delta \dot{Q}$ (W)
0,0097	0,0929	30,7	24,3	14,86	0,12
0,0109	0,0929	30,2	24,3	13,70	0,12
0,0106	0,0929	29,8	24,3	12,77	0,12
0,0202	0,0929	28,9	24,6	9,98	0,12
0,0200	0,0929	30,3	24,6	13,23	0,12
0,0193	0,0929	29,9	24,6	12,30	0,12
0,0292	0,0929	30,5	25,5	11,61	0,12
0,0298	0,0929	29	25,5	8,12	0,12
0,0295	0,0929	28,6	25,5	7,19	0,12

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Transferencia de calor en los tableros aglomerados a formulación 50-50 % a potencia eléctrica de 175 Watts**

Δx (m)	A (m^2)	T1 (°C)	Ta (°C)	$\Delta \dot{Q}$ (W)	$\pm \Delta \dot{Q}$ (W)
0,0097	0,0929	32,7	24,6	20,20	0,1262
0,0109	0,0929	33,4	24,6	21,83	0,1271
0,0106	0,0929	32,8	24,6	20,55	0,1264
0,0202	0,0929	33,1	24,6	21,13	0,1267
0,0200	0,0929	31,1	24,7	16,48	0,1241
0,0193	0,0929	32,0	24,7	18,58	0,1252
0,0292	0,0929	32,4	24,1	19,50	0,1265
0,0298	0,0929	31,5	24,1	17,41	0,1253
0,0295	0,0929	31,6	24,1	17,76	0,1255

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Transferencia de calor en los tableros aglomerados a formulación 50-50 % a potencia eléctrica de 250 Watts**

Δx (m)	A (m^2)	T1 (°C)	Ta (°C)	$\Delta \dot{Q}$ (W)	$\pm \Delta \dot{Q}$ (W)
0,0097	0,0929	34,8	24,1	25,08	0,1295
0,0109	0,0929	34,0	24,1	23,22	0,1285
0,0106	0,0929	34,6	24,1	24,61	0,1292
0,0202	0,0929	34,5	24,1	24,38	0,1291
0,0200	0,0929	33,2	24,1	21,36	0,1275
0,0193	0,0929	33,9	24,5	22,99	0,1278
0,0292	0,0929	33,8	24,5	22,76	0,1277
0,0298	0,0929	32,1	24,5	18,81	0,1256
0,0295	0,0929	34,3	24,5	23,92	0,1283

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Conductividad térmica de los tableros a formulación
50-50 % a potencia eléctrica de 125 Watts**

Δx (m)	A (m^2)	T1 (°C)	T2 (°C)	k (W/m°C)	Δk (W/m°C)
0,0097	0,0929	30,7	33,7	0,5168	0,012
0,0109	0,0929	30,2	33,3	0,5185	0,011
0,0106	0,0929	29,8	32,6	0,5211	0,011
0,0202	0,0929	28,9	33,0	0,5288	0,006
0,0200	0,0929	30,3	35,8	0,5178	0,006
0,0193	0,0929	29,9	34,8	0,5211	0,006
0,0292	0,0929	30,5	37,5	0,5213	0,004
0,0298	0,0929	29,0	33,9	0,5314	0,004
0,0295	0,0929	28,6	32,9	0,5312	0,004

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Conductividad térmica de los tableros a formulación
50-50 % a potencia eléctrica de 175 Watts**

Δx (m)	A (m^2)	T1 (°C)	T2 (°C)	k (W/m°C)	Δk (W/m°C)
0,0097	0,0929	32,7	36,7	0,5269	0,013
0,0109	0,0929	33,4	38,4	0,5121	0,011
0,0106	0,0929	32,9	37,4	0,5217	0,012
0,0202	0,0929	33,1	41,8	0,5274	0,006
0,0200	0,0929	31,1	37,9	0,5216	0,006
0,0193	0,0929	32,0	39,2	0,5353	0,007
0,0292	0,0929	32,4	44,0	0,5285	0,004
0,0298	0,0929	31,5	42,0	0,5314	0,004
0,0295	0,0929	31,7	42,2	0,5343	0,004

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Conductividad térmica de los tableros a formulación 50-50 % a potencia eléctrica de 250 Watts**

Δx (m)	A (m^2)	T1 (°C)	T2 (°C)	k (W/m°C)	Δk (W/m°C)
0,0097	0,0929	34,8	39,8	0,5233	0,012
0,0109	0,0929	34,0	39,2	0,5239	0,011
0,0106	0,0929	34,6	40,0	0,5207	0,011
0,0202	0,0929	34,5	44,7	0,5190	0,006
0,0200	0,0929	33,2	42,0	0,5223	0,006
0,0193	0,0929	33,9	42,6	0,5483	0,006
0,0292	0,0929	33,8	47,8	0,5108	0,004
0,0298	0,0929	32,1	43,4	0,5332	0,004
0,0295	0,0929	34,3	47,8	0,5622	0,004

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Transferencia de calor en los tableros aglomerados a formulación 40-60 % a potencia eléctrica de 125 Watts**

Δx (m)	A (m^2)	T1 (°C)	Ta (°C)	$\Delta \dot{Q}$ (W)	$\pm \Delta \dot{Q}$ (W)
0,0129	0,0929	31,3	24,7	16,95	0,12438
0,0119	0,0929	31,8	24,7	18,12	0,12500
0,0114	0,0929	33,2	24,7	21,37	0,12675
0,0202	0,0929	32,7	24,7	20,21	0,12613
0,0209	0,0929	32,8	24,7	20,44	0,12625
0,0205	0,0929	30,0	24,7	13,94	0,12275
0,0314	0,0929	29,8	25	13,47	0,12213
0,0274	0,0929	30,9	25	16,03	0,12350
0,0271	0,0929	32,3	25	19,28	0,12525

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Transferencia de calor en los tableros aglomerados a formulación 40-60 % a potencia eléctrica de 175 Watts**

Δx (m)	A (m^2)	T1 (°C)	Ta (°C)	$\Delta \dot{Q}$ (W)	$\pm \Delta \dot{Q}$ (W)
0,0129	0,0929	33,6	24,3	22,30	0,1278
0,0119	0,0929	33,9	24,3	22,99	0,1281
0,0114	0,0929	34,2	24,3	23,69	0,1285
0,0202	0,0929	32,5	24,3	19,74	0,1264
0,0209	0,0929	32,1	24,7	18,81	0,1254
0,0205	0,0929	33,2	24,7	21,37	0,1268
0,0314	0,0929	31,6	24,7	17,65	0,1248
0,0274	0,0929	32,3	24,7	19,28	0,1256
0,0271	0,0929	32,0	24,7	18,58	0,1253

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Transferencia de calor en los tableros aglomerados a formulación 40-60 % a potencia eléctrica de 250 Watts**

Δx (m)	A (m^2)	T1 (°C)	Ta (°C)	$\Delta \dot{Q}$ (W)	$\pm \Delta \dot{Q}$ (W)
0,0129	0,0929	34,8	24,6	25,08	0,1289
0,0119	0,0929	35,8	24,6	27,41	0,1301
0,0114	0,0929	35,4	24,6	26,48	0,1296
0,0202	0,0929	34,4	24,6	24,15	0,1284
0,0209	0,0929	33,8	24,6	22,76	0,1276
0,0205	0,0929	33,8	24,6	22,76	0,1276
0,0314	0,0929	33,6	24,8	22,30	0,1271
0,0274	0,0929	33,3	24,8	21,60	0,1268
0,0271	0,0929	33,1	24,8	21,13	0,1265

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Conductividad térmica en los tableros aglomerados a formulación 40-60 % a potencia eléctrica de 125 Watts**

Δx (m)	A (m^2)	T1 (°C)	T2 (°C)	k (W/m°C)	Δk (W/m°C)
0,0129	0,0929	31,3	35,4	0,5746	0,010
0,0119	0,0929	31,8	35,8	0,5786	0,011
0,0114	0,0929	33,2	37,8	0,5715	0,011
0,0202	0,0929	32,7	40,2	0,5861	0,006
0,0209	0,0929	32,8	40,8	0,5742	0,006
0,0205	0,0929	30,0	35,2	0,5918	0,006
0,0314	0,0929	29,8	37,9	0,5625	0,003
0,0274	0,0929	30,9	38,6	0,6148	0,004
0,0271	0,0929	32,3	41,9	0,5859	0,005

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. **Conductividad térmica en los tableros aglomerados a formulación 40-60 % a potencia eléctrica de 175 Watts**

Δx (m)	A (m^2)	T1 (°C)	T2 (°C)	k (W/m°C)	Δk (W/m°C)
0,0129	0,0929	33,6	38,9	0,5846	0,009
0,0119	0,0929	33,9	39,1	0,5649	0,010
0,0114	0,0929	34,2	39,2	0,5829	0,011
0,0202	0,0929	32,5	40,0	0,5727	0,006
0,0209	0,0929	32,1	39,2	0,5955	0,006
0,0205	0,0929	33,2	41,1	0,5973	0,006
0,0314	0,0929	31,6	41,6	0,5970	0,004
0,0274	0,0929	32,3	42,1	0,5811	0,005
0,0271	0,0929	32,0	41,1	0,5958	0,005

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Conductividad térmica en los tableros aglomerados a formulación 40-60 % a potencia eléctrica de 250 Watts**

Δx (m)	A (m ²)	T1 (°C)	T2 (°C)	k (W/m°C)	Δk (W/m°C)
0,0129	0,0929	34,8	40,8	0,5809	0,010
0,0119	0,0929	35,8	41,8	0,5835	0,010
0,0114	0,0929	35,4	41,0	0,5817	0,011
0,0202	0,0929	34,4	43,4	0,5839	0,006
0,0209	0,0929	33,8	42,5	0,5880	0,006
0,0205	0,0929	33,8	42,2	0,5984	0,006
0,0314	0,0929	33,6	46,5	0,5846	0,004
0,0274	0,0929	33,3	44,0	0,5963	0,005
0,0271	0,0929	33,1	43,4	0,5987	0,005

Fuente: elaboración propia.

- Análisis de varianza

Apéndice 14. **Razón de transferencia de calor al variar el espesor de los tableros aglomerados a formulación 50-50 % a potencia de 125 Watts**

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Fila 1	3	41,34	13,78	1,0967
Fila 2	3	62,59	20,86	0,7326
Fila 3	3	72,92	24,30	0,9349

Continuación del apéndice 14.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	172,89	2	86,44	93,8102	2,9752E-05	5,1432
Dentro de los grupos	5,52	6	0,92			
Total	178,42	8				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. **Razón de transferencia de calor al variar el espesor de los tableros aglomerados a formulación 50-50 % a potencia de 175 Watts**

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Fila 1	3	35,53	11,84	2,80
Fila 2	3	56,20	18,73	5,41
Fila 3	3	68,75	22,92	2,28

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	187,51	2	93,75	26,7860	1,00E-03	5,1433
Dentro de los grupos	21,00	6	3,50			
Total	208,51	8				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. **Razón de transferencia de calor al variar el espesor de los tableros aglomerados a formulación 50-50 % a potencia de 250 W**

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Fila 1	3	72,93	24,31	0,93
Fila 2	3	68,75	22,92	2,28
Fila 3	3	65,49	21,83	7,17

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	9,25	2	4,63	7,3356	0,0313	5,1433
Dentro de los grupos	20,78	6	3,46			
Total	30,04	8				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 17. **Razón de transferencia de calor en función de la conductividad térmica de los tableros aglomerados a formulación 50-50 %**

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Fila 1	9	4,71	0,52	0,000033
Fila 2	9	4,74	0,53	0,000053
Fila 3	9	4,76	0,53	0,000261

Continuación del apéndice 17.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,000174	2	8,706E-05	0,7520	0,4822	3,4028
Dentro de los grupos	0,002779	24	1,158E-04			
Total	0,002953	26				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 18. **Razón de transferencia de calor al variar el espesor de los tableros aglomerados a formulación 40-60 % a potencia de 125 Watts**

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	3	56,44	18,81	5,23
Columna 2	3	68,98	22,99	0,49
Columna 3	3	78,97	26,32	1,37

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	84,95	2	42,47	17,9989	2,90E-03	5,1433
Dentro de los grupos	14,17	6	2,36			
Total	99,12	8				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 19. **Razón de transferencia de calor al variar el espesor de los tableros aglomerados a formulación 40-60 % a potencia de 175 Watts**

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Fila 1	3	54,58	18,19	13,61
Fila 2	3	59,92	19,97	1,67
Fila 3	3	69,68	23,23	0,65

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	39,06	2	19,53	8,6805	9,00E-02	5,1433
Dentro de los grupos	31,86	6	5,31			
Total	70,93	8				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 20. **Razón de transferencia de calor al variar el espesor de los tableros aglomerados a formulación 40-60 % a potencia de 250 Watts**

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Fila 1	3	48,77	16,26	8,47
Fila 2	3	55,51	18,50	0,67
Fila 3	3	65,03	21,68	0,34

Continuación del apéndice 20.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	44,48	2	22,24	7,0486	2,60E-02	5,1433
Dentro de los grupos	18,95	6	3,16			
Total	63,43	8				

Fuente: elaboración propia.

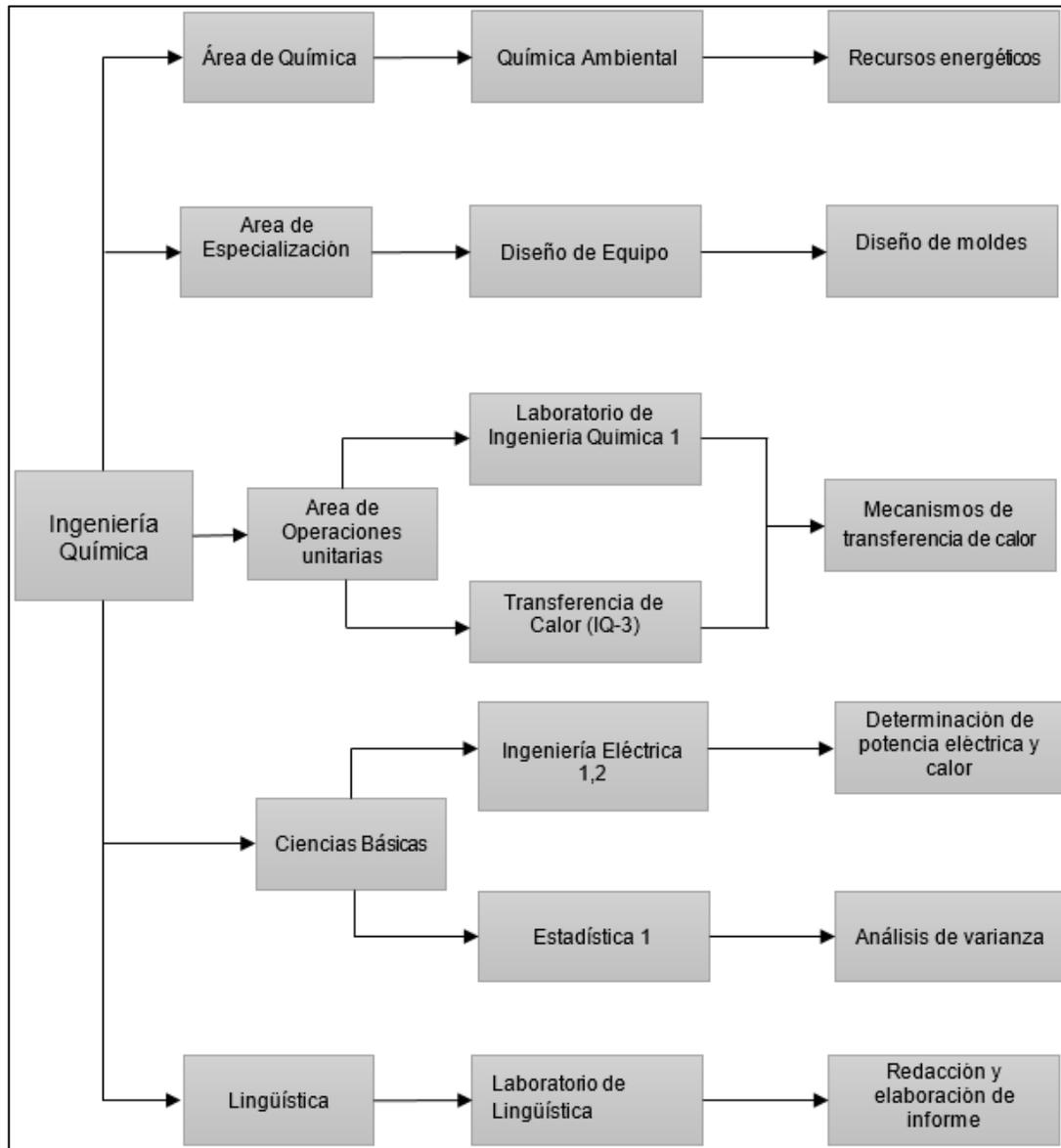
Apéndice 21. **Razón de transferencia de calor en función de la conductividad térmica de los tableros aglomerados a formulación 40-60 %**

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	9	5,24	0,5822	0,000228
Columna 2	9	5,27	0,5857	0,000137
Columna 3	9	5,30	0,5885	0,000054

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,000175	2	8,763E-05	0,6279	0,5423	3,4028
Dentro de los grupos	0,003350	24	1,396E-04			
Total	0,003525	26				

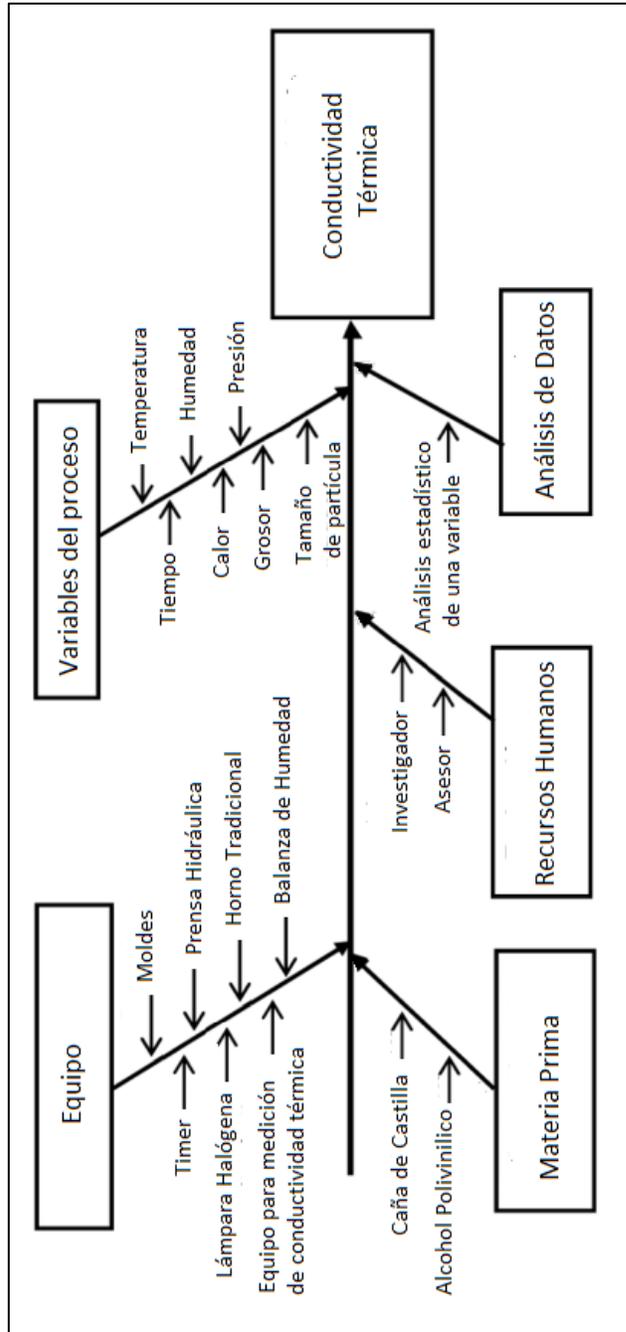
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 22. **Tabla de requisitos académicos**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 23. Diagrama Ishikawa

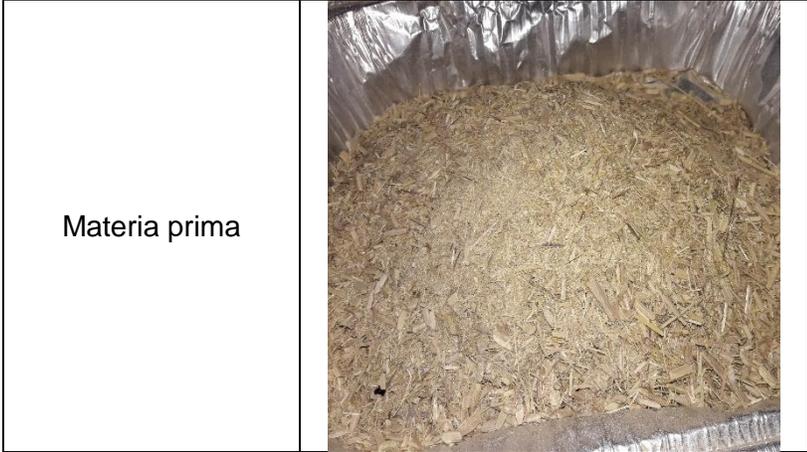


Fuente: elaboración propia.

Apéndice 24. **Procesamiento de materia prima**

<p>Caña de castilla (materia prima sin ser procesada)</p>	
<p>Limpieza y secado de caña de castilla</p>	
<p>Molienda de caña de castilla</p>	

Continuación del apéndice 24.



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 25. **Elaboración de tableros**



Continuación del apéndice 25.

<p>Mezcla pastosa</p>	
<p>Colocación de mezcla en molde</p>	
<p>Proceso de compresión</p>	

Continuación del apéndice 25.

<p>Obtención de fibra humedad</p>	
<p>Fibra seca</p>	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 26. **Análisis térmico en las fibras**

<p>Colocación de tablero</p>	
<p>Medición de temperatura</p>	

Fuente: elaboración propia.

