



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



TESIS

**ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN ESTADO TRANSITORIO
DE UNA PARED COMPUESTA CON LA TÉCNICA DE VOLUMEN FINITO**

**TRABAJO RECEPCIONAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**PRESENTA:
ISAIAS LEYVA PALMA**

**BAJO LA DIRECCIÓN DE:
DRA. KARLA MARÍA AGUILAR CASTRO**

**CODIRECCIÓN DE:
DR. EDGAR VICENTE MACIAS MELO**

CUNDUACÁN, TABASCO, MÉXICO

FEBRERO 2025

ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN ESTADO TRANSITORIO DE UNA PARED COMPUESTA CON LA TÉCNICA DE VOLUMEN FINITO

INFORME DE ORIGINALIDAD

20%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	itscv.edu.ec Internet	265 palabras — 3%
2	datospdf.com Internet	221 palabras — 3%
3	www.slideshare.net Internet	113 palabras — 1%
4	www.coursehero.com Internet	112 palabras — 1%
5	idus.us.es Internet	76 palabras — 1%
6	www.scielo.cl Internet	65 palabras — 1%
7	core.ac.uk Internet	64 palabras — 1%
8	eprints.uanl.mx Internet	56 palabras — 1%
9	idoc.pub Internet	46 palabras — 1%



COORDINACIÓN
DE ESTUDIOS
TERMINALES

Declaración de Autoría y Originalidad

En la ciudad de Cunduacán, el 01 de enero del 2025, el que suscribe **ISAIAS LEYVA PALMA** alumno del Programa de Ingeniería Mecánica Eléctrica con número de matrícula 191D23001, adscrito a la División Académica de Ingeniería y Arquitectura, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor de la Tesis presentada para la obtención del título y titulada **ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN ESTADO TRANSITORIO DE UNA PARED COMPUESTA CON LA TÉCNICA DE VOLUMEN FINITO**

DECLARO QUE:

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

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

Villahermosa, Tabasco a 01 de enero de 2025

Nombre y firma

ISAIAS LEYVA PALMA





**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura**



**2024
Felipe Carrillo
PUERTO**
CONSTITUCIÓN DEL PRESENTE
GOBIERNO DE TABASCO
1917
GOBIERNO DE MÉXICO

DIRECCIÓN

OFICIO: DAIA/DIR/CD/1222/2024
FECHA: 06 de diciembre de 2024.
ASUNTO: Autorización de Impresión Definitiva.

C. ISAIAS LEYVA PALMA

PASANTE DE LA LICENCIATURA EN
INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA
P R E S E N T E.

En virtud de haber elaborado el trabajo recepcional para obtener el Título de Licenciatura en INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, bajo la modalidad de "Tesis", el cual ha sido dirigido por la DRA. KARLA MARÍA AGUILAR CASTRO y el DR. EDGAR VICENTE MACÍAS MELO, titulada:

"ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN ESTADO TRANSITORIO DE UNA PARED COMPUESTA CON LA TÉCNICA DE VOLUMEN FINITO".

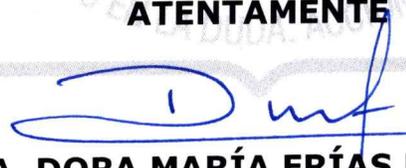
Tengo a bien autorizarle la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los trámites correspondientes para su examen profesional.

Asimismo, le informo que en el artículo 113, del Capítulo IV, de nuestro Reglamento de Titulación vigente, a la letra dice:

"Una vez emitido el oficio de autorización de impresión del Trabajo Recepcional por la Dirección de la División Académica correspondiente, el egresado tendrá un plazo máximo de seis meses para efectos de presentar el Examen Profesional. En caso contrario, podrá optar por la misma u otra modalidad que señale el presente Reglamento, llevando a cabo los trámites correspondientes".

Sin otro particular por el momento, me despido deseándole éxito en su carrera profesional.

ATENTAMENTE


DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ
DIRECTORA



DIRECCIÓN

C.c.p. Archivo-INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA-347
DRA' DMFM/M' LHC

Miembro CUMEX desde 2008
**Consortio de
Universidades
Mexicanas**
UNA ALIANZA DE CALIDAD POR LA EDUCACIÓN SUPERIOR

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



DIRECCIÓN

MEMORANDO

PARA: DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ
DIRECTORA DE LA DAIA.
DE: COMISIÓN REVISORA DE TRABAJO RECEPCIONAL
FECHA: 02 DE DICIEMBRE DE 2024
ASUNTO: ACEPTACIÓN DE IMPRESIÓN DEFINITIVA DE TRABAJO RECEPCIONAL
CCP: ARCHIVO.
MEM/CET/347/ID347/2024

PRESENTE.

En cumplimiento a lo estipulado en el Art. 112 del Reglamento de Titulación aplicable, y después de revisar el Trabajo Recepcional denominado:

"ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN ESTADO TRANSITORIO DE UNA PARED COMPUESTA CON LA TÉCNICA DE VOLUMEN FINITO"

Desarrollado por el C. ISAIAS LEYVA PALMA de la Licenciatura en INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA bajo la modalidad de "Tesis", le comunicamos que aceptamos la impresión final de dicho trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.

COMISIÓN REVISORA

**DR. LUIS MANUEL LÓPEZ
MANRIQUE**
Revisor

DR. CARLOS LAZARO NARANJO
Revisor

**DR. IVAN ALEJANDRO
HERNÁNDEZ PÉREZ**
Revisor

DR. CARLOS ENRIQUE TORRES AGUILAR
Revisor

M.C. IVÁN OLÁN BRITO
Revisor

DRA. KARLA MARÍA AGUILAR CASTRO
Director de Trabajo Recepcional

DR. EDGAR VICENTE MACÍAS MELO
Co-Director de Trabajo Recepcional

Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 01 de enero de 2025.

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como AUTOR en la producción, creación y/o realización de la obra denominada ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN ESTADO TRANSITORIO DE UNA PARED COMPUESTA CON LA TÉCNICA DE VOLUMEN FINITO.

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

COLABORADORES

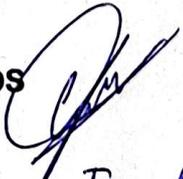
NOMBRE Y FIRMA DEL ESTUDIANTE


ISAIAS LEYVA PALMA

NOMBRE Y FIRMA DEL DIRECTOR DE
TESIS


DRA. KARLA MARÍA AGUILAR CASTRO

TESTIGOS


NOMBRE Y FIRMA DEL TESTIGO 1


NOMBRE Y FIRMA DEL TESTIGO 2

Dedicatorias

Isaías Leyva Palma

Este trabajo de tesis es dedicado a mi Padre Melquiades Leyva Hernández, quien sin duda alguna ha sido mi más grande ejemplo de lucha, entrega y dedicación, pues a pesar de su condición sigue sorprendiéndome a diario y de quien sin duda alguna nunca dejaré de aprender.

A mi madre Marta Palma Alcocer por ser ese apoyo incondicional y la mayor muestra de amor que Dios puso en mi vida, mujer trabajadora y amorosa, que hasta hoy día cuida de mi como solo una madre podría hacerlo.

A mis abuelitas María Esther y Celita que, si bien no están físicamente conmigo, las llevo en mi corazón y estoy muy seguro de que estarían muy felices al verme concluir esta etapa de mi formación.

Y finalmente a mis hermanas Isabel Cristina y Edilett que al igual que mis padres son parte fundamental de mi vida y ejemplo de que con trabajo duro y confianza en Dios, puedes ver realizadas tus metas.

Agradecimientos

Agradezco a Dios Todo Poderoso pues él nos dice *“Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente; no temas ni desmayes, porque Jehová tu Dios estará contigo en donde quiera que vayas.”* (Josué 1:9). Sin duda alguna durante este trayecto su mano fue mi guía y sustento. Desde el inicio encomendé este proyecto en sus manos, él al conocerme aún antes de nacer, sabía cuánto lo anhelaba y su gracia fue tanta que aún sin merecerlo concedió los deseos de mi corazón.

Agradezco también el poder haber realizado mis estudios en mi alma mater, la máxima casa de estudios del estado de Tabasco la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco y a mi amada división, la DAIA, a cada uno de mis profesores que en su mayoría pude aprenderles muchas cosas buenas, en especial a mis asesores de Tesis la Dra. Karla María Aguilar Castro y el Dr. Edgar Vicente Macías Melo, sé que Dios los puso en mi camino, pues considero que son un gran ejemplo no solo para mí sino para muchos de los que tuvimos la oportunidad de ser sus alumnos y convivir un poco con ellos, vimos no solo grandes docente, sino también grandes seres humanos, gracias por compartir su conocimiento y por la pasión, empeño y dedicación con la que desarrollan su profesión la cual es tal que nos contagian e impulsan a hacer las cosas bien, de igual manera gracias por su apoyo incondicional, por cada risa y momento de alegría, por sus consejos y lecciones de vida.

Gracias a mis amigos de vida y compañeros de carrera, siempre fuimos tres y siempre lo seremos.

Y como no agradecerle a la familia que Dios me regaló, mi gran tesoro.

¡Gracias a todos!

Resumen

En este estudio se realizó un análisis comparativo entre 12 tipos distintos de muros compuestos que se pueden fabricar con materiales disponibles en el estado, esto con el fin de determinar sus coeficientes de difusión de calor mediante la técnica de volumen finito. Este análisis se hizo en estado transitorio, considerando condiciones de temperatura del estado de Tabasco, para luego analizarlas de manera comparativa e identificar el de mejor desempeño térmicamente para condiciones de temperatura de otros estados. Para poder realizar lo antes mencionado primeramente se hizo un sondeo haciendo visitas a distintos distribuidores de materiales de construcción, esto, con la finalidad de saber que materiales son los más usados en la construcción de viviendas, a lo cual, se encontró que los más usuales son el block macizo de mortero, ladrillo de barro recocido y repellos de mortero y yeso, una vez obtenida esa información se buscaron las propiedades termo físicas y geometrías de dichos materiales. Con base en lo anterior, se propuso el uso de materiales aislantes en los muros como variación al sistema tradicional de construcción, de estos se tomaron en cuenta para la experimentación el poliestireno extruido (foamular) y el poliestireno expandido (EPS) con la intención de buscar mejoras en el desempeño térmico. El estudio térmico de los muros se hizo mediante simulación, desarrollando un programa en un software de programación de licencia libre llamado Octave, dicho programa se basó en la aplicación del método de volumen finito a la ecuación gobernante de difusión de calor bidimensional. El programa desarrollado tomó en cuenta la geometría de los elementos que se usaron en la construcción del muro, con el fin de construir una malla que permitiera conocer el cambio de propiedades de los materiales debido a que los muros son multicapa, y con el fin de conocer los cambios de temperatura a través del muro respecto al tiempo para finalmente obtener los coeficientes de difusividad térmica y conocer la cantidad de calor que es capaz de absorber el muro durante un lapso de dos días.

Una vez que se realizaron las simulaciones se encontró que los muros construidos en ladrillo ofrecían buen comportamiento térmico, lo cual era de esperarse, algo muy notable fue encontrar que el uso de aislantes mejora en gran manera el desempeño térmico y que incluso la posición en la que estos se encuentra también es algo a considerar pues el colocar aislante en la parte exterior mostró un mejor desempeño térmico. Los resultados mostraron que la mejor configuración térmicamente fue el muro construido de ladrillo y con aislante térmico al exterior dando una diferencia de 400% en ahorro de consumo respecto al método tradicional de construcción. Por lo anterior, se concluyó que el usar ladrillo y el aislante (foamular) en la parte exterior fue la mejor configuración. Cabe destacar que al tomar condiciones climáticas de otros estados estos muros no mostraron un desempeño notable. Dado que sus características termo físicas los hacen buenos térmicamente para estados con condiciones como las de Tabasco y que también se podría optar por hacer simulaciones con condiciones no promedios como fue este caso sino con condiciones de temperatura extremosas.

ÍNDICE

Dedicatorias.....	2
Agradecimientos.....	3
Resumen.....	4
Capítulo 1.....	13
Introducción	13
1.1 Generalidades	14
1.2 Antecedentes	16
1.2.1 Modelos para transferencia de calor	16
1.2.2 Comportamiento térmico de materiales	19
1.2.3 Software para análisis térmico	21
1.3 Objetivo general	24
1.3.1 Objetivos específicos	24
1.4 Estructura de la tesis	25
Capítulo 2.....	26
Fundamentos teóricos	26
2.1 Confort térmico	26
2.1.1 Variables de medición para el confort térmico	27
2.2 Flujos de calor	27
2.3 Mecanismos de transferencia de calor	32
2.3.1 Transferencia de calor por conducción	32
2.3.2 Transferencia de calor por convección.....	32
2.3.3 Transferencia de calor por radiación	33
2.4 Condiciones de frontera e iniciales	34
2.4.1 Condición de temperatura específica.....	34
2.4.2 Condición de flujo específico de calor.....	35
2.4.3 Condición de convección de frontera.....	36
2.4.4 Condición de radiación de frontera.....	36
2.4.5 Condiciones de frontera de interfase.....	37
2.5 Condiciones climáticas	38
2.6 Materiales de construcción	40
2.6.1 Normas de construcción	43

2.7 Software para simulación	47
Capítulo 3	50
Metodología	50
3.1 Modelo físico	51
3.2 Modelo matemático	54
3.2.1 Método de volumen finito	54
Capítulo 4	62
Resultados y Discusión	62
4.1 Comportamiento de la temperatura-sección transversal de una pared	62
4.2 Comportamiento transitorio de la temperatura	66
4.2.1 Factor de amortiguamiento y tiempo de retraso	71
4.2 Comparativo de los casos de estudio	72
4.3 Comportamiento de los muros con diferentes condiciones climáticas	74
Capítulo 5	77
Conclusiones	77
5.1 Conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros	77
Referencias bibliográficas	79

Lista de figuras

Figura 2.1 Método de medición de variables para establecer confort térmico.....	27
Figura 2. 2 Representación de la transferencia de calor en estado estacionario. .	29
Figura 2. 3 Representación de la transferencia de calor en estado transitorio.....	30
Figura 2. 4 Transferencia de calor en un elemento tridimensional.....	30
Figura 2. 5 Condiciones de frontera.	34
Figura 2. 6 Ejemplo de condiciones de frontera de temperatura específica.....	35
Figura 2. 7 Ejemplo de condición de frontera de flujo de calor específico.	35
Figura 2. 8 Ejemplo de condición de convección de frontera.	36
Figura 2. 9 Ejemplo de radiación de frontera.....	37
Figura 2. 10 Ejemplo de condición de fronteras de interfase.....	38
Figura 2. 11 Clasificación de los climas de la república mexicana, Fuente: SEMARNAT (2024).....	39
Figura 2. 12 Porcentaje de territorio del estado de Tabasco con clima Cálido húmedo y Cálido subhúmedo.....	40
Figura 2. 13 Interfaz de Octave.....	48
Figura 3. 1 Materiales y condiciones de frontera.	51
Figura 3. 2 Muros de paredes compuestas.	53
Figura 3. 3 Ejemplo de pared por la que pasa un flujo de calor unidimensional....	55
Figura 3. 4 Mallado de la superficie de análisis.	56
Figura 3. 5 Análisis del nodal respecto al punto P.....	57
Figura 3. 6 Diagrama de flujo del algoritmo computacional para hacer las simulaciones de transferencia de calor en estado transitorio.....	61

Figura 4. 1 Comportamiento del perfil transversal de temperaturas para el muro de block.....	64
Figura 4. 2 Comportamiento del perfil transversal de temperaturas para el muro de ladrillo.....	65
Figura 4. 3 Comportamiento del perfil transversal de temperaturas para el muro block y ladrillo con yeso.....	66
Figura 4. 4 Comportamiento transitorio de las temperaturas para las superficies del muro de block y el ambiente exterior, a) Caso 1, b) Caso 2, c) Caso 3, d) Caso 4 y e) Caso 5.	68
Figura 4. 5 . Comportamiento de la temperatura para el muro de ladrillo, a) Caso 6, b) Caso 7, c) Caso 8, d) Caso 9 y e) Caso 10.....	69
Figura 4. 6 . Comportamiento de la temperatura para el muro mortero-block-yeso (Caso 11) y Mortero-Ladrillo-Yeso Caso 12.....	70
Figura 4. 7 Factor de amortiguamiento y tiempo de retraso.....	71

Lista de Tablas

Tabla 2. 1 Materiales de construcción ventajas y desventajas	40
Tabla 2. 2 Propiedades térmicas de los materiales de construcción más comunes para viviendas en Tabasco.	43
Tabla 2. 3 Diámetro de varilla CONAVI (2020).....	45
Tabla 2. 4 Dosificación de mezcla de mortero y su uso CONAVI (2020).....	46
Tabla 2. 5 Dosificación del concreto CONAVI (2020).	47
Tabla 4. 1 Comparativo de las variables y parámetros de los casos de estudio....	73
Tabla 4. 2 Condiciones ambientales de los estados para analizar.....	74
Tabla 4. 3 Comportamiento térmico del Caso 1 y Caso 6 para diferentes condiciones climáticas.....	75

NOMENCLATURA

Abreviaturas	Descripción
ANSYS	Software de simulación encaminado mayormente al análisis de elementos finitos en aplicaciones de mecánica de fluidos, de materiales y transferencia de calor por mencionar algunos.
OSB	Oriented Strand Board por sus siglas en inglés, es un panel estructural derivado de la madera, el cual se fabrica a partir de virutas o astillas de madera.
LFS	Light Steel Framing por sus siglas en inglés, es un sistema industrial de construcción en el que se utilizan perfiles de acero galvanizado ligeros para construir estructuras de menor peso.
ISO	Es la abreviación de las palabras en inglés International Organization for Standarditation que en español significa Organización internacional para la estandarización.
MVF	Método de volumen finito
VC	Volumen de control

Símbolos	Descripción	Unidad
k	Coefficiente de conductividad térmica	W/mK
ρ	Densidad	Kg/m^3
\dot{Q}	Razón de transferencia de calor	W
Q	Cantidad de calor transferido	J
Δt	Incremento de tiempo	s
q	flujo de calor	W/m^2
cp	Calor específico	J/kg^*K ó $J/kg^*^{\circ}C$

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

h	Coeficiente convectivo del material	$W/m^2 \cdot K$
T_{elem}	Temperatura en la superficie del elemento	$^{\circ}C$
T_{∞}	Temperatura en los alrededores	$^{\circ}C$
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$W/m^2 \cdot K$

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se abordan los antecedentes y la revisión bibliográfica relacionada con la transferencia de calor en paredes compuestas, un aspecto crucial para mejorar la eficiencia térmica en edificaciones. Se realiza un análisis detallado de estudios previos y teorías que explican cómo se produce el intercambio de calor en este tipo de estructuras, considerando factores como la conductividad térmica de los materiales y las condiciones ambientales. Junto con esto, se presentan los objetivos específicos que guían la investigación, los cuales buscan proporcionar soluciones prácticas para mejorar el aislamiento térmico y reducir la demanda energética. Finalmente, se describe la estructura del trabajo, explicando cómo se organizan los capítulos y se desarrollan los temas para alcanzar los objetivos planteados en la tesis.

1.1 Generalidades

Datos de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) dicen que la población mundial es tres veces mayor a la de siglo pasado con un total de 8000 millones de habitantes a finales del 2022, y se espera que, en los próximos 30 años, se llegue a una población de 9700 millones 2050 (Nations, 2022). El incremento de la población a nivel mundial ha ocasionado la necesidad de suplir con viviendas a la población.

En esa búsqueda de viviendas, se considera la optimización de espacios y costos. Por lo que, se han incrementado construcciones de interés social. En México, según el INEGI, existen un total de 35.3 millones de casas particulares habitadas de ese total: el 57.1 % son casa propia; el 16.4% son de renta; el 14.2% son de préstamo de familiares, amistades o por el trabajo; el 10.7% son casas propias, sin embargo, están pagándose; y el 1.7% está en otras situaciones. En estos casos los tipos de viviendas se construyen sin tomar en cuenta muchos aspectos importantes, tales como, las condiciones de confort térmico al interior para que sus ocupantes realicen sus actividades cotidianas. El confort térmico se define por la ASHRAE como el *"estado en que la mente percibe satisfacción con el ambiente térmico del entorno"* (S&P, 2022), y señala que este es alcanzado cuando el cuerpo está en balance térmico, es decir, cuando se está realizando cierta actividad y no se sufre un estrés térmico para corregir la energía que produce el cuerpo internamente. Otro de los temas importantes se entrelaza con la concentración de vapor de agua a la temperatura existente, conocida como humedad relativa, esto hace que la percepción que la persona tiene del ambiente térmico cambie, ya sea mejorándola o empeorándola.

Para contribuir al confort térmico se pueden utilizar sistemas activos (Sistemas Activos En Arquitectura, 2019) y sistemas pasivos, los primeros son aquellos que requieren de una fuente de alimentación de energía convencional, mientras que, los sistemas pasivos son aquellos que aprovechan el calor del ambiente para contribuir a la ventilación y confort térmico. La envolvente de una edificación está compuesta por techo, paredes y piso, donde las paredes representan un gran porcentaje de la

superficie de la edificación. Por lo que, se han hecho estudios con el fin de estudiar el comportamiento de edificaciones echas de distintos materiales, con el fin de estudiar que variables inciden en el aprovechamiento de la energía. Estos estudios toman como base los distintos materiales con los que ya se construyeron las edificaciones, sin embargo, no hacen propuestas de distintas configuraciones o capas de la envolvente de paredes. Por lo que, sería de gran utilidad analizar el comportamiento térmico de las edificaciones al contar con distintas combinaciones de material de construcción y así encontrar la mejor configuración con base en las condiciones climatológicas del ambiente donde se hace el estudio.

El estudio de los materiales que se implementan en construcción pueden contribuir al logro del confort térmico reduciendo las cargas térmicas en las viviendas, este se puede lograr de distintas maneras, la más común es mediante el uso de equipos los cuales para crear un ambiente confortable consumen energía (sistemas activos), por otro lado están los sistemas constructivos los cuales permiten la distribución del calor dependiendo de las necesidades del usuario (sistemas pasivos). Las estrategias anteriores tienen la finalidad de buscar la eficiencia energética, la cual se puede definir como la búsqueda de maximizar los servicios de energía haciendo el menor gasto de la energía convencional que regularmente se compra en los hogares (Secretaría de energía, 2020).

La idea de conseguir confort térmico a través de sistemas pasivos ha sido enfoque de múltiples estudios con resultados prometedores, los cuales dicen que pueden utilizarse diferentes materiales en capas, y con base a su diseño, se puede favorecer no solo el aislamiento térmico, sino también el aislamiento acústico, pues se logra mantener un ambiente agradable dentro del hogar en sensación térmica y auditiva. Al haber estudios sobre esta temática, se encuentran varias propuestas de solución, las cuales se centran a distintos objetivos, dependiendo del caso de estudio y la zona dónde se realiza este. Muchas de las soluciones que se dan proponen el uso de materiales aislantes que en cuestión de costos y accesibilidad a ellos hacen muy difícil el acceso a la mayoría de la población, por lo que, una muy buena forma de conseguir un espacio térmicamente confortable sería considerar los distintos materiales de construcción que se tienen en las zonas de estudio, estos

pueden ser materiales de construcción que se encuentran en la naturaleza o que son producto de la actividad humana al cultivar la tierra, de igual manera se pueden usar los métodos de construcción tradicionales, lo que facilitaría la construcción de los espacios pues dichos métodos ya están normalizados, para cualquiera de los casos anteriores se puede experimentar con ellos, con el fin de, analizar que variables se pudieran mejorar al estudiar distintas configuraciones de construcción. En lo anterior, como todo proyecto el ámbito económico es un factor importante y este se puede ver reflejado en que al reducir la carga térmica dentro de un habitad se reduce el consumo energético que se destinaba a conservar la habitación en un estado agradable, lo que a su vez se ve reflejado en los costos por servicios de energía eléctrica, y en esto también, entra la comparativa de estudio entre que materiales me ofrecen mayor rendimiento térmico y a su vez permiten menor inversión como método constructivo pues se busca también hacer más eficiente la inversión de la construcción y aprovechar los recursos de mejor manera, que a la par de usar los recursos constructivos de manera eficiente también se utilizan los recursos naturales de la misma forma, lo que reduce la producción de emisiones de dióxido de carbono al medio ambiente.

1.2 Antecedentes

Para el estudio de la transferencia de calor en estado transitorio de una pared compuesta con la técnica de volumen finito, se realizó una revisión de la literatura con el fin de identificar los antecedentes de la temática reportada por otros autores. La información obtenida fue clasificada en tres subtemas importantes que son: Modelos para transferencia de calor, comportamiento térmico de materiales y software para análisis térmico. A continuación, se abordarán cada uno de ellos.

1.2.1 Modelos para transferencia de calor

Todos los autores que seguidamente se presentan hicieron estudios de la transferencia de calor a través la envolvente de edificios basándose en los distintos mecanismos de transferencia de calor adaptados a las regiones específicas de la

zona en la que se realizaban los estudios, todo ello, con el fin de conocer de manera teórica el comportamiento térmico de las paredes de los edificios estudiados.

Borbón et al., (2010) presentan un estudio de la transferencia de calor en un muro de bloques con cavidades para conocer su resistencia térmica. El desarrollo del estudio se llevó a cabo mediante un modelo teórico unidimensional en estado estacionario donde se presentan los mecanismos de conducción, radiación y convección. El modelo se realizó a través del método de Gauss Seidel considerando simulaciones para dos días en condiciones de clima extremo, en el cual se tiene un valor de 0.18 W/cm^2 con variaciones de 2.3% a 23%. El muro presentó valores de resistencia térmica que tendían a decrecer con el aumento de las variaciones en la temperatura, lo cual, presenta una desventaja para su desempeño en climas del tipo cálido ya que la radiación es el mecanismo que da más lugar a la transferencia de calor. Los autores mencionan que la construcción casi nunca se hace considerando las condiciones climáticas del lugar donde se construye, lo cual, afecta en gran manera el confort térmico dentro de la edificación pues al no tener condiciones cómodas se opta por el uso artificial de climatización, por lo que, el consumo de energía eléctrica se hace mayor. Lo anterior, afecta no solo la habitabilidad en millones de viviendas ya construidas, sino también en las que se harán en el futuro, de no tomar en cuenta las condiciones climáticas para la zona en donde se desea construir. Los autores concluyen que calculando la resistencia térmica usando un modelo simplificado unidimensional, que incluye los tres mecanismos de transferencia de calor, se puede obtenerla resistencia térmica de bloques de concreto hueco con el modelo de placa caliente.

Kontoleon & Eumorfopoulou, (2008) en este artículo los autores realizaron un análisis comparativo de transferencia de calor a través de muros de mampostería particularmente en muros de Block Macizo y Ladrillo de arcilla. El modelo matemático de este tipo de muros se obtuvo al aplicar el método de volumen finito (MVF) en el cual se consideró un flujo de calor bidimensional y condiciones de frontera en estado transitorio. Los autores se enfocan en las propiedades térmicas de los materiales en donde se define la conductividad térmica como el coeficiente

de almacenamiento térmico. El modelo se resolvió a través de un código de Octave para muros de Block Macizo y Ladrillo de arcilla con un flujo de calor bidimensional en estado transitorio en donde se compara la carga térmica obtenida para cada muro. Los resultados arrojan que se obtiene una mayor ganancia de calor en el muro de Block Macizo, por lo que, se concluye que la configuración más adecuada es el muro de ladrillo.

Sergio Saldes Báez et al., (2017) presentaron un estudio basado en el análisis de la transferencia de calor en estado transitorio unidimensional para dos tipos de paredes compuestas con condiciones de frontera de tercera clase mediante el software comercial de simulación (ANSYS). La metodología que se siguió para el análisis fue, primeramente proponer dos modelos físicos para el muro de un edificio: un muro con una capa de poliestireno expandido al centro y al exterior e interior placas de OSB, y un muro de poliestireno al centro con placas interiores y exteriores de Yeso. Siguiendo con el proceso de experimentación se propuso el modelo matemático a través de la ecuación de conducción de calor en estado transitorio planteando las condiciones iniciales y de frontera. La discretización de dichas ecuaciones se hizo usando ANSYS. Al realizar las simulaciones para ambos casos se encontró que el perfil de temperatura para el muro de Yeso es prácticamente constante durante los primeros 300 s de enfriamiento, por el contrario, el del muro de OSB es mucho más pronunciado. Esto se atribuye a la menor capacidad térmica del panel de Yeso ($843 \text{ kJ/m}^3 \text{ K}$) contra OSB ($1105 \text{ kJ/m}^3 \text{ K}$). Se continuaron comparando perfiles de temperatura considerando un tiempo de 900 s, donde se pudo observar que hubo una caída de temperatura mayor en del panel de Yeso, del cual también se notó que su velocidad de enfriamiento fue mayor. Después de las simulaciones y el estudio de los resultados los autores concluyeron que la mejor configuración para muros de construcción sería usar capas de panel de OSB al interior y placas de Yeso al exterior usando un alma de poliestireno. Lo anterior, considerando la durabilidad y su capacidad de mantener una temperatura constante.

Al finalizar sus estudios los autores pudieron obtener las variables que son de vital importancia a la hora de estudiar cómo se distribuye el calor en las paredes de un edificio, para así poder proponer ideas que mejoren las condiciones de confort dentro de estos mismos a partir de un modelo teórico basado en las condiciones de temperatura del caso de estudio.

1.2.2 Comportamiento térmico de materiales

Los estudios de variables térmicas que a continuación se presentan están basados en la obtención de datos experimentales a partir de modelos físicos de edificaciones, para estudiar si las mejoras que se propusieron para dichas edificaciones han impactado en el favorecimiento del confort térmico de dichas viviendas o edificios.

Suasaca Pelinco et al (2020) Hicieron estudios acerca del desempeño térmico de una vivienda rural en una zona de bajas temperaturas en Perú con la finalidad de buscar el confort térmico al interior de la vivienda, para ello, propusieron el uso de materiales de fácil acceso en la región y, dado que, las pacas de avena son un material abundante en la región por su alto cultivo, esta fue propuesta por los investigadores como material aislante. Una vez que se platearon las medidas y planos de la casa se prosiguió con el proceso constructivo, en el cual se realizó una estructura de madera y láminas galvanizadas como techo y como envolvente de la casa estructura de barrotes de madera, la cual a su vez fue recubierta alrededor con las pacas de avena y como capa exterior, a esta se le recubrió con barro. Después de haber construido el modelo de vivienda se hicieron mediciones tanto de temperatura con de humedad, esto, durante un periodo de 21 días, encontrando como resultado que en el lapso de 5 de la mañana se encuentra un punto crítico de temperatura, pues al exterior de la vivienda hubo una temperatura de $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y al interior de esta una temperatura de $9.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ por lo que, al comparar resultados con estudios térmicos del método tradicional y de otras experimentaciones, los resultados de este estudio dan como conclusión que el construir con pacas de avena como envolvente es una opción a considerar, puesto que, es un material fácil de conseguir en la zona, además que, es un material económico.

Cassandro-Cajiao, (2018) presenta un estudio donde comenta razones para el estudio de técnicas para el aprovechamiento de la energía y la construcción con materiales sustentables de viviendas considerando el crecimiento exponencial de la población a nivel mundial. Por estas razones se da a la tarea de construir paneles compuestos de materiales renovables. Para ello, propuso como material estructural paneles de OSB huecos de cartón y paneles de OBS de guadua (es una especie forestal), dicho proyecto se realizó de manera experimental realizando pruebas de laboratorio, de igual manera se analizaron paneles que ya existían previamente en el mercado. Como resultados de la experimentación para un clima cálido húmedo, el modelo de OSB de cartón dio una mejor homogeneidad en el confort térmico y el de panel de OSB de guadua, de igual manera se encontró como mejor opción de OSB de cartón como aislante acústico.

En este artículo los autores evaluaron el desempeño térmico de una vivienda incorporando materiales reciclables, esto, con el fin de mejorar las condiciones de confort térmico. Para este caso se busca elevar la temperatura del interior del habitad pues la experimentación se llevó a cabo en un barrio de Bogotá Colombia en donde las condiciones climáticas son muy frías. Para llevar a cabo este experimento se realizó la medición de las variaciones de la temperatura en el entorno de la casa, así como, en su interior. Como resultado de esto se encontró que los materiales del sistema que comúnmente se utiliza para la construcción, para la zona, no son capaces de mantener un ambiente agradable dentro de la vivienda. Por lo anterior, los investigadores se dieron a la tarea de buscar estrategias para conseguir dar al usuario de la vivienda una mejor sensación térmica. Para ello, se cambió el tipo de techo con el que contaba la vivienda, el cual era de láminas de zinc y se sustituyó por láminas de material Tetrapak, un material reciclado. Además, se implementó un falso plafón con material Tetrapak, y como estrategia para reforzar el aislamiento en el espacio entre el techo y el falso techo se agregó paja de eno. También, otra de las estrategias usadas tuvo que ver con el tipo de ropa que usaban los habitantes de la vivienda, por lo que, se hicieron estudios probando distintos tipos de prendas para buscar la que los mantuviera más confortables. Como resultados de la experimentación, el objetivo principal del estudio se cumplió

parcialmente, debido a las limitaciones económicas del mismo. Sin embargo, se mejoró el confort térmico del hábitat usando materiales reciclables y duraderos, lo que también muestra que es posible construir con materiales económicos y sustentables.

Kontoleon & Eumorfopoulou, (2008) en este artículo los autores realizaron un análisis comparativo de transferencia de calor a través de muros de mampostería particularmente en muros de Block Macizo y Ladrillo de arcilla. El modelo matemático de este tipo de muros se obtuvo al aplicar el método de volumen finito (MVF) en el cual se consideró un flujo de calor bidimensional y condiciones de frontera en estado transitorio. Los autores se enfocan en las propiedades térmicas de los materiales en donde se define la conductividad térmica como el coeficiente de almacenamiento térmico. El modelo se resolvió a través de un código de Octave para muros de Block Macizo y Ladrillo de arcilla con un flujo de calor bidimensional en estado transitorio en donde se compara la carga térmica obtenida para cada muro. Los resultados arrojan que se obtiene una mayor ganancia de calor en el muro de Block Macizo, por lo que, se concluye que la configuración más adecuada es el muro de ladrillo. Sin embargo, estos resultados muestran que la conductividad térmica sola no puede definir el comportamiento del muro bajo condiciones transitorias periódica. El tiempo de retraso y el factor de amortiguamiento son importantes para este tipo de modelados, ya que se toman mucho en cuenta al momento del diseño térmico de las paredes de una vivienda para lograr niveles de confort favorables.

1.2.3 Software para análisis térmico

Respecto a estudios sobre el uso de software para análisis térmico en edificaciones, a continuación, se presentan algunos de los estudios analizados:

Huelsz et al., (2022) comentan que una tercera parte de toda la energía mundial que se consume está encaminada al sustento de edificaciones, lo cual muestra una problemática a nivel mundial, por esto se están haciendo esfuerzos para reducir los consumos energéticos en dichas edificaciones. Una de las estrategias de diseño que se están implementando en la actualidad es la simulación de la envolvente y

techos de los edificios buscando optimizar el consumo de energía y de igual manera obtener el confort térmico. Por todo lo anterior, en este estudio se hace la comparación mediante simulación en el software Energy plus de un mismo edificio tomando en cuenta la masa térmica. Estas pruebas se hacen para una edificación en el estado de Monterrey en los meses más fríos y calurosos del año para ese estado. A partir del estudio, se encontró que para condiciones del edificio sin la carga térmica que dan los aparatos dentro del edificio y con la carga térmica de estos sin aire acondicionado, las diferencias promedio de las temperaturas altas y bajas por mes oscilaron entre 8.3°C y 6.4°C; y se encontró una diferencia de 124% en grados hora de inconfort térmico. Para los mismos casos, pero con aire acondicionado se reportaron diferencias de hasta un 30% en la carga térmica y un 38% en la demanda de potencia. Estos resultados muestran que el uso de aire acondicionado favorece el confort térmico, pero Analizando los resultados de las simulaciones se encontró que el uso de aire acondicionado favorece supo que hay una diferencia mayor para edificios sin aire acondicionado que para casas que si cuentan con este.

Cordero et al., (2015) hacen una comparación entre sistemas de marcos de cortina convencionales para edificios y un nuevo sistema de estos, el cual es propuesto por los autores. La realización de este estudio se da mediante un estudio de desempeño térmico con la ayuda de un análisis numérico y térmico en distintos softwares. Los autores mencionan que el sistema convencional de estos muros cortina invaden significativamente la parte interior del edificio y que los marcos de aluminio con los que se fabrican son causa del aumento de la carga térmica del mismo, puesto que su conductividad térmica es alta. Por ello, el sistema que proponen los autores reemplazar los marcos de aluminio por marcos de polímeros de fibra de vidrio, reduciendo el espesor del sistema. Además, para que este sistema no pierda rigidez se recomienda adherir los vidrios con un adhesivo de proporcione mayor resistencia. El diseño del sistema se hizo en AutoCAD y los cálculos térmicos, de condensación y de acristalamiento se hicieron con ANSYS y con un software informático de última generación desarrollado en el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley. Una vez hechas las simulaciones y comparaciones se puede decir que el sistema propuesto reduce en un 10% los valores de U en comparación con el sistema tradicional.

Además, los autores concluyen que el flujo de calor en el sistema propuesto distribuye de manera más uniforme y que este presenta temperaturas menores, por lo cual, tiene un mejor desempeño y todavía podría mejorarse más.

Brito-Peña et al., (2022) realizaron una comparación del confort térmico obtenido entre el método tradicional de construcción de viviendas en Ecuador y un nuevo método de construcción llamado LSF (Light Steel Framing), dicha comparación se hizo mediante el uso de un software de simulación. Para llevar a cabo el estudio se tomó como base un modelo de vivienda convencional para una ciudad en dicho país, y se analizaron cuatro configuraciones distintas de construcción para la envolvente: Sistema convencional, Sistema convencional reforzado con perfiles de acero, Sistema LSF sin perfiles de acero, y Sistema LSF con perfiles de acero. También, se tomaron en cuenta distintas orientaciones respecto a la incidencia del sol, así como, otras consideraciones en las viviendas. Dentro de estas consideraciones están los tipos de ventanas, de vidrios, tipo de aislamientos en paredes y losas, e incluso la hermeticidad de dicha vivienda. La medición de los parámetros de interés se hizo simulando un año de comportamiento de la edificación para las condiciones de clima de Ecuador. Como resultado del análisis comparativo se encontró que las viviendas con el método de construcción de tipo LSF ofrecen 11% más de porcentaje de horas de confort térmico en comparación con las viviendas tradicionales. Se encontró también que variando las configuraciones de tipos de vidrios en las ventanas y los distintos aislamientos de las paredes y techos, se puede obtener hasta un 60% más de horas de confort térmico.

A partir de la revisión bibliográfica realizada, se pudo encontrar que los modelos de transferencia de calor permiten entender el comportamiento del fenómeno de transferencia de energía en las muestras de estudio. Existen estudios realizados en estado permanente y en estado transitorio, estos últimos son los que han sido reportados como los que mejor representan el comportamiento de las muestras de estudio, considerando el comportamiento real. Por otra parte, respecto al comportamiento térmico de los materiales se pudo observar que en los estudios reportados se ha hecho uso de materiales reciclables para reducir las ganancias de

calor, y también se han probado otros materiales de construcción como block, ladrillo, cemento, entre otros. Sin embargo, la selección de los materiales depende de las técnicas de construcción de la región, y como parámetros de interés se han determinado el tiempo de retraso y el factor de amortiguamiento. Finalmente, respecto al uso de software para el análisis térmico, se han reportado software de paga y software libre, en donde con ambos tipos se han obtenido resultados satisfactorios, con la ventaja de que el software de paga tiene una interfaz más amigable, sin embargo, su costo lo hace poco accesible.

1.3 Objetivo general

Determinar los coeficientes de difusión de calor de muros compuestos mediante la técnica de volumen finito en estado transitorio para su uso en edificaciones.

1.3.1 Objetivos específicos

- Identificar los principales materiales de construcción de muros para viviendas en Tabasco mediante una revisión de la literatura y proveedores.
- Seleccionar los materiales de construcción de muros más utilizados en Tabasco para proponer configuraciones de muros compuestos a fines a la región.
- Desarrollar un código computacional para analizar la distribución de temperaturas y el flujo de calor en las configuraciones de muros compuestos bajo condiciones de clima cálido húmedo.
- Realizar un análisis comparativo del funcionamiento térmico de los muros compuestos considerando tres climas representativos de la República Mexicana Realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos de las diferentes configuraciones, con el fin de establecer la ubicación más adecuada de los sistemas aislantes en función de su comportamiento térmico.

1.4 Estructura de la tesis

La estructura del trabajo de investigación estará comprendida en cuatro Capítulos, distribuidos de la siguiente manera: en el Capítulo 1 se presentarán los antecedentes y la revisión bibliográfica del marco referencial relacionada con la transferencia de calor en paredes compuestas para su uso en edificaciones, así como los objetivos y alcances del trabajo. En el Capítulo 2 se presentarán los fundamentos teóricos de los conceptos fundamentales de la transferencia calor, propiedades de materiales de construcción, condiciones climáticas, entre otros. En el Capítulo 3 se presentará la metodología para la evaluación de la transferencia de calor en paredes compuestas. En el Capítulo 4 se presentarán los resultados obtenidos. Finalmente, se presentarán las conclusiones y recomendaciones para los trabajos futuros.

Universidad Autónoma de Tabasco.
México.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos para la comprensión del comportamiento de la transferencia de calor en muros utilizados para viviendas. También, se presentan las bases teóricas y ecuaciones gobernantes en materia de flujo de calor. Lo anterior, para una mejor comprensión del comportamiento energético de estos sistemas y su impacto en el comportamiento energético de una vivienda.

2.1 Confort térmico

Los parámetros de comodidad han variado desde el principio de la civilización pues el ser humano empezó, primeramente, según los historiadores buscando refugios en cuevas primordialmente para protegerse de la lluvia y los animales salvajes, luego se dio la llegada del fuego que proporcionaba a los antiguos seres humanos un ambiente más agradable en noches de frío y, con el pasar de las civilizaciones, la búsqueda de un habitat más cómodo se hizo una de las prioridades en la vida cotidiana del ser humano. En la actualidad se tiene en cuenta el aprovechamiento de los recursos energéticos en la búsqueda del confort dentro del lugar donde este reside. Un punto importante para poder estar a gusto en el lugar donde se vive es el llamado confort térmico el cual es definido por la norma ISO 7730 como “El estado en el que se percibe satisfacción con el ambiente térmico de nuestro alrededor”. Esta definición si bien nos da una explicación corta y clara de lo que se entiende como confort térmico, no da parámetros o técnicas que ayuden a conseguir el antes mencionado.

2.1.1 Variables de medición para el confort térmico

Existen muchos factores que elevan la temperatura corporal, con el uso de la simple observación de nuestro cuerpo se puede saber que no se está en condiciones óptimas, pues algo que claramente advierte esta situación es el comenzar a sudar cuando se está en un lugar que no tiene condiciones para ofrecer tranquilidad en el ambiente. Diego-Mas (2015) menciona que deben cumplirse como condición primordial el que los mecanismos fisiológicos del cuerpo humano que están encargados de la termorregulación puedan lograr su tarea de alcanzar un equilibrio térmico en el cuerpo humano lo cual se da al equilibrar el calor ganado en el cuerpo con el eliminado mediante distintos procesos propios de este. También, aclara que el llegar a este punto no siempre garantiza el alcanzar el confort térmico, pues, como seres humanos somos capaces de regular nuestra temperatura estando en inconfort y menciona un método de medición de variables a tomar en cuenta para poder afirmar que se logrará un ambiente agradable, las cuales se presentan en la Figura 2.1.

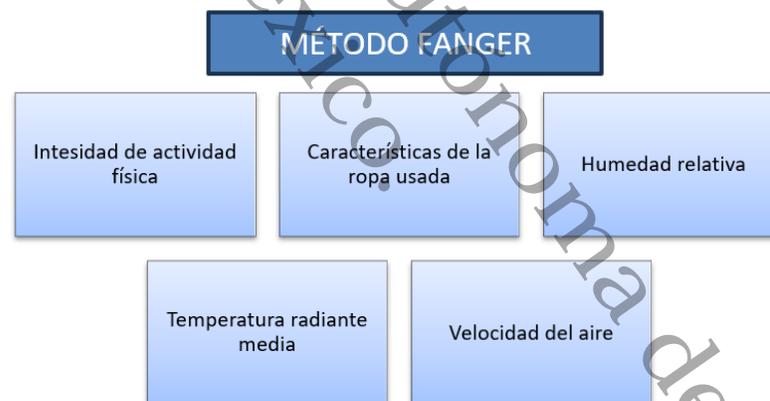


Figura 2.1 Método de medición de variables para establecer confort térmico.

2.2 Flujos de calor

Día a día a nuestro alrededor experimentamos un sin número de fenómenos físicos, tanto así que ya se ha hecho costumbre el observarlos y dar por hecho que suceden como algo tan cotidiano, sin embargo, detrás de ellos hay un complejo

comportamiento que no pudiéramos imaginar. Todos en algún momento hemos sentido calor o “frío”, de igual manera, hemos observado como un cubo de hielo se derrite cuando lo sacamos del refrigerador, y acaso alguna vez nos hemos preguntado por qué pasan estas cosas, pues pasan claramente por formar parte de un entorno físico, por lo que, estos fenómenos que tantas veces se ha podido observar tiene una explicación basada en la física y sus distintas ramas. Una de las ramas que se encamina a explicar lo antes mencionado es la ciencia de la **Transferencia de calor**. El calor se puede definir según Çengel & Ghajar (2011) *como la manifestación de la energía transferida de un sistema A a un sistema B, lo cual se da por la diferencia de temperaturas entre ambos fluyendo el calor desde un punto de mayor temperatura al de menor temperatura, la transferencia de calor como tal es la ciencia que explica dicho suceso.*

Como todo en lo que nos rodea las matemáticas están presentes en su descripción y en este caso no es la excepción, la Ecuación (2.1) describe la cantidad de calor que se transfiere para un determinado tiempo.

$$Q = \int_0^{\Delta t} \dot{Q} dt \quad (2.1)$$

Donde: Q es la cantidad de calor transferido, Δt es el intervalo de tiempo en el que sucedió el fenómeno, y \dot{Q} es la razón de transferencia de calor.

Siempre que se conozca la variación de \dot{Q} respecto al tiempo y que este sea contante se puede reducir la Ecuación (2.2).

$$Q = \dot{Q} \Delta t \quad (2.2)$$

Si se pretende conocer el flux de calor en una superficie, se puede expresar con la Ecuación (2.3).

$$q'' = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (2.3)$$

Donde: q'' es el flujo de calor medido en W/m^2 , y A es el área de la superficie.

Ahora bien, en el análisis del fenómeno de calor se analiza en dos tipos, los cuales se clasifican en transferencia de calor en estado estacionario y transferencia de

calor en estado transitorio, por esa razón seguidamente se dan definiciones de autores especializados en la ciencia del calor. La *transferencia de calor en estado estacionario* es definida por según Çengel & Ghajar (2011), como aquel fenómeno de flujo de calor en el que en el medio que se estudia no hay cambio respecto al tiempo o dependencia de este mismo, por esta razón, la temperatura o el flujo de calor en el sistema analizado no sufren cambios en cualquier punto de este. Esto se puede observar fácilmente en la Figura 2.2, ya que se presenta un flujo de calor que se dispersa en un muro en donde las temperaturas tanto exterior como interior se mantienen constantes en un lapso de una hora, por ende, la transferencia de calor para ambos casos es la misma.

Ahora se entrará a dar definición al estado transitorio el cual es definido por Çengel & Ghajar (2011), como la variación de la temperatura respecto al tiempo y la posición que se encuentre el punto de interés en el sistema, menciona también el caso especial en el que la temperatura varía respecto al tiempo más no respecto a la posición, estos tipos de sistemas los nombra sistemas de parámetros concentrados o de resistencia despreciable. En la Figura 2.3 se muestra de manera gráfica como se da el comportamiento de la temperatura sobre una pared en estado transitorio, se puede observar que en un tiempo de dos horas la temperatura exterior e interior del sistema cambió, dado esto, el flujo de calor inicial es distinto para cada uno de los estados.

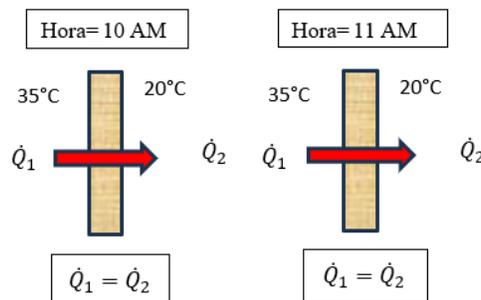


Figura 2. 2 Representación de la transferencia de calor en estado estacionario.

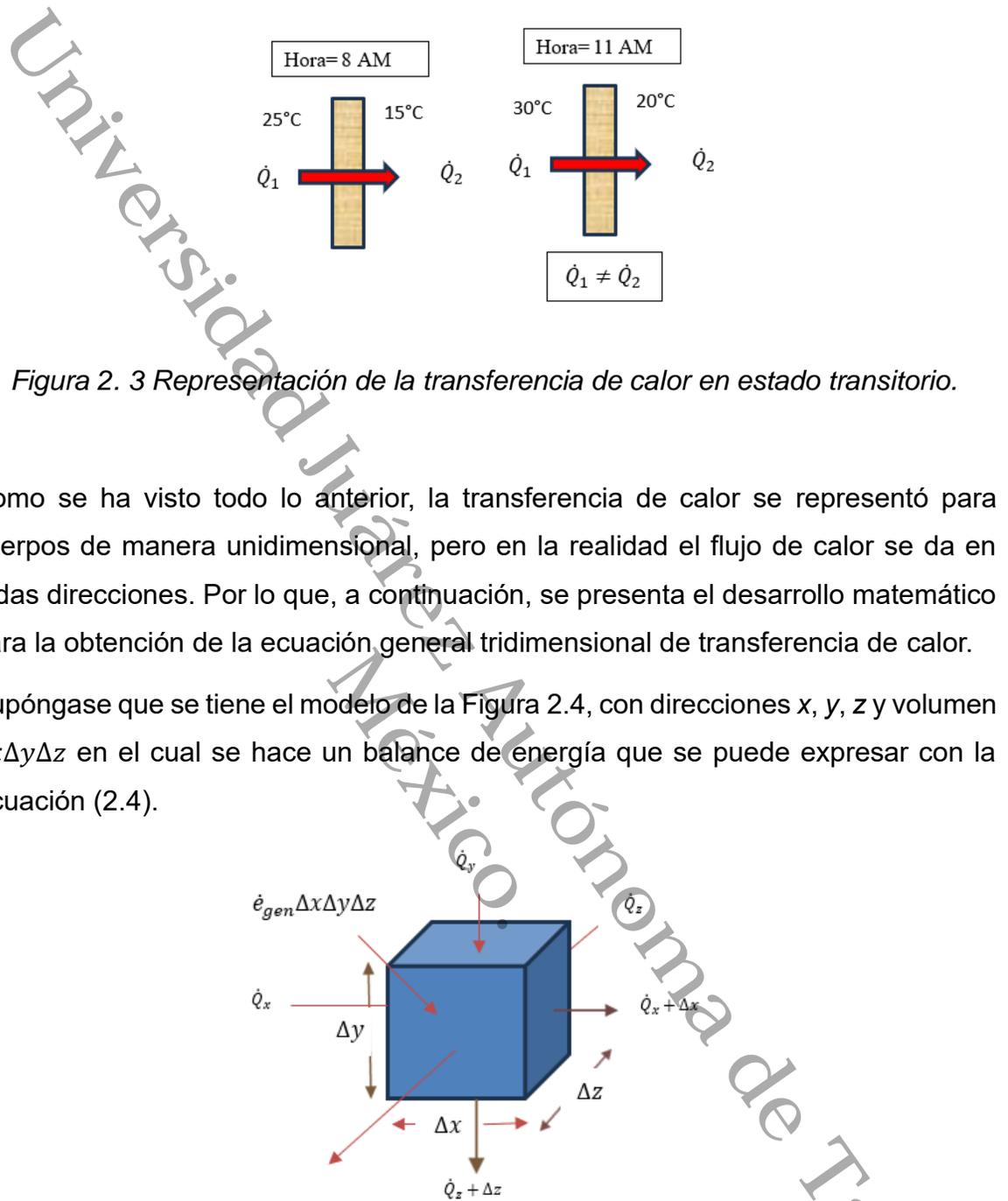


Figura 2. 3 Representación de la transferencia de calor en estado transitorio.

Como se ha visto todo lo anterior, la transferencia de calor se representó para cuerpos de manera unidimensional, pero en la realidad el flujo de calor se da en todas direcciones. Por lo que, a continuación, se presenta el desarrollo matemático para la obtención de la ecuación general tridimensional de transferencia de calor.

Supóngase que se tiene el modelo de la Figura 2.4, con direcciones x, y, z y volumen $\Delta x \Delta y \Delta z$ en el cual se hace un balance de energía que se puede expresar con la Ecuación (2.4).

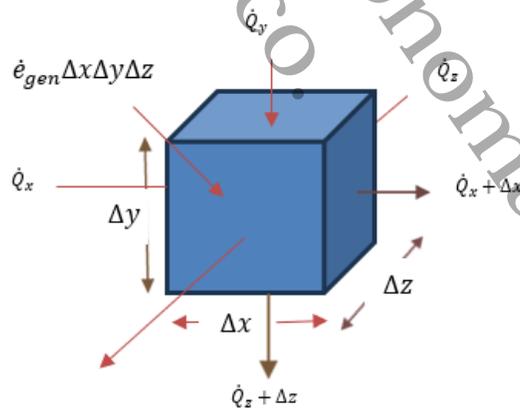


Figura 2. 4 Transferencia de calor en un elemento tridimensional.

$$\dot{Q}_x + \dot{Q}_y + \dot{Q}_z - \dot{Q}_{x+\Delta x} - \dot{Q}_{y+\Delta y} - \dot{Q}_{z+\Delta z} + \dot{E}_{gen,elem} = \frac{\Delta E_{elem}}{\Delta t} \tag{2.4}$$

Sabiendo que el volumen del elemento es $\Delta x \Delta y \Delta z$, el cual es el cambio de energía dentro del elemento, la razón de generación de calor dentro del mismo se puede expresar como:

$$\Delta E_{elem} = E_{t+\Delta t} - E_t = mc_p(T_{t+\Delta t} - T_t) = \rho c_p \Delta x \Delta y \Delta z (T_{t+\Delta t} - T_t) \quad (2.5)$$

$$\dot{E}_{gen,elem} = \dot{e}_{gen} V_{elem} = \dot{e}_{gen} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.6)$$

Donde ρ es la densidad del material y c_p es el calor específico.

Sustituyendo el balance de energía hecho anteriormente, dividiendo entre $\Delta x \Delta y \Delta z$ y sabiendo que las áreas de transferencia de calor del elemento para la conducción en direcciones x , y , z son para $A_x = \Delta y \Delta z$, para $A_y = \Delta x \Delta z$ y para $A_z = \Delta x \Delta y$ respectivamente y aplicando el límite cuando Δx , Δy , Δz y $\Delta t \rightarrow 0$ se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{e}_{gen} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.7)$$

La ecuación anterior es como tal la ecuación en condiciones generales de transferencia de calor multidimensional, a continuación, se presentan versiones más simplificadas de la misma para cuando se tiene una conductividad térmica λ constante:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{e}_{gen}}{\lambda} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.8)$$

A la ecuación anterior se le da el nombre de ecuación de Fourier-Biot. Un término nuevo que se aprecia es α el cual representa la difusividad térmica que se obtiene dividiendo la conductividad térmica entre la densidad y el calor específico.

2.3 Mecanismos de transferencia de calor

Como se ha visto en las secciones anteriores, la transferencia de calor se puede percibir como aquella ciencia que explica el flujo de calor entre los distintos sistemas, para ello, esta ciencia divide las manifestaciones de este fenómeno en tres mecanismos diferentes, los cuales se exponen a continuación.

2.3.1 Transferencia de calor por conducción

La experiencia demuestra que cuando existe una variación de temperatura en un cuerpo, hay una transferencia de energía desde la zona de mayor temperatura hacia la zona de menor temperatura. Se dice que la conducción transfiere energía y que el flujo de calor por unidad de área es proporcional al gradiente de temperatura (Holman et al., 2000).

Se entiende pues que la conducción es el mecanismo de transferencia de calor en el que por medio de la actividad de las moléculas que componen los sólidos o sustancias al ser excitadas mediante un aumento de temperatura en sus fronteras las moléculas con mayor carga de energía térmica, entregarán energía a las moléculas de menor temperatura produciendo así un flujo de calor.

La transferencia de calor por conducción se puede expresar mediante la Ecuación (2.9)

$$q'' = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.9)$$

donde q'' es el flux de calor transferido, λ es la conductividad térmica del material y $\frac{\partial T}{\partial x}$ es la variación de temperatura respecto a la posición.

2.3.2 Transferencia de calor por convección

Este mecanismo de transferencia de calor se puede explicar de manera sencilla (Holman et al., 2000) de la siguiente manera:

Tomando como ejemplo una placa de metal la cual ha sido calentada para luego ser colocada frente a un ventilador se sabe por experiencia que el ventilador acelerará el enfriamiento de la placa. El término "transferencia de calor por convección" se utiliza para describir cómo el calor se ha transferido de la placa. Aquí, el flujo de calor transferido está relacionado con las diferencias de temperatura globales entre la pared, el fluido y la superficie.

Este mecanismo es parecido al mecanismo anterior, el de convección pues la placa de la que habla el autor es enfriada en parte por la temperatura del fluido que corre en el ambiente alrededor de la placa, por lo que, el calor fluye de la placa al medio, sin embargo, la rapidez de enfriamiento de la placa también depende de la rapidez con la que el fluido enfría a la placa, por ello, menciona el ejemplo del ventilador.

La transferencia de calor por convección se puede expresar mediante la ley de enfriamiento de Newton, Ecuación (2.10).

$$q = hA(T_{elem} - T_{\infty}) \quad (2.10)$$

donde h es el coeficiente convectivo del material, A es el área de la superficie en donde se da el fenómeno de transferencia de calor, T_{elem} es la temperatura del elemento y T_{∞} es la temperatura de los alrededores.

2.3.3 Transferencia de calor por radiación

Ahora se tratará del mecanismo de transferencia de calor por radiación, el cual es muy distinto a los dos antes mencionados, dado que los anteriores se dan de manera parecida y ocurren mediante la interacción de medios materiales y este lo hace en contraparte, en un medio de vacío perfecto, a esto se le conoce como radiación electromagnética que en un radiador térmico ideal emitirá energía de manera proporcional a la Temperatura absoluta del cuerpo elevada a la cuarta potencia. Este mecanismo de transferencia de calor puede expresarse mediante la Ecuación (2.11).

$$q = \sigma AT^4 \quad (2.11)$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann con un valor de $5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

2.4 Condiciones de frontera e iniciales

Al inicio de esta sección se presentaron los modelos matemáticos que representan el comportamiento del calor sobre superficies planas, que es lo que para esta tesis compete argumentar como base teórica, sin embargo, en dichas ecuaciones diferenciales no se toma en cuenta las condiciones térmicas de la superficie que se estudia, tampoco se habla sobre las condiciones del área que limita el cuerpo que se estudia, por ello, en este apartado se tratará el tema de condiciones iniciales y de frontera de las cuales existen 6 casos, como se muestra en la Figura 2.5.

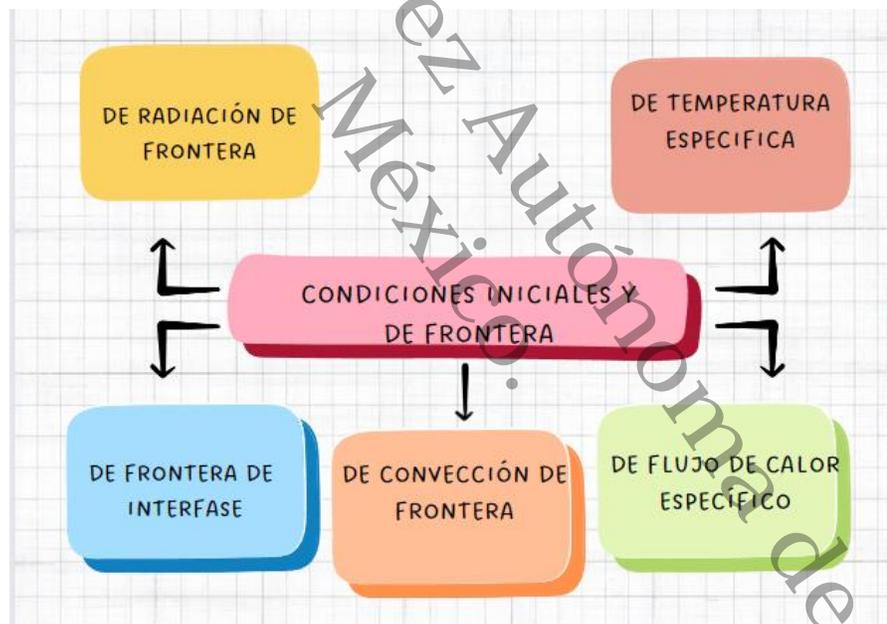


Figura 2. 5 Condiciones de frontera.

2.4.1 Condición de temperatura específica

La temperatura de una superficie puede ser determinada fácilmente con distintos instrumentos de medición, tales como sensores de calor e incluso un termómetro. Por lo tanto, la manera más fácil de poder especificar las condiciones térmicas de

esa superficie es medir su temperatura. Por ejemplo, de acuerdo con la Figura 6, para una transferencia unidimensional de calor que se da en una superficie de una pared plana y longitud L , las condiciones en la frontera de temperatura específica se pueden expresar como $T(0, t) = T_1$ y $T(L, t) = T_2$. Para este ejemplo T_1 y T_2 son las condiciones de temperatura específica en las fronteras, las cuales pueden ser las mismas al transcurrir el tiempo o variar respecto a este.

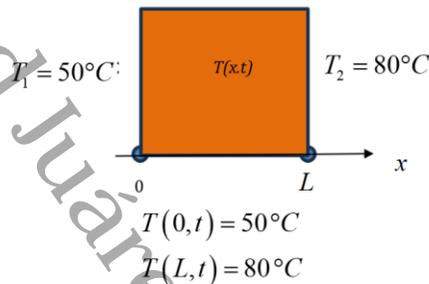


Figura 2. 6 Ejemplo de condiciones de frontera de temperatura específica.

2.4.2 Condición de flujo específico de calor

Se puede encontrar la velocidad de transferencia de calor, q'' (velocidad de transferencia de calor por unidad de área superficial, W/m^2), y esta información se puede utilizar como una de las condiciones de frontera cuando hay suficiente información sobre los intercambios de energía en una superficie. El flujo de calor en la dirección positiva x en un medio, incluidas las fronteras, es un indicativo de la ley de Fourier de la conducción de calor (Figura 2.7).

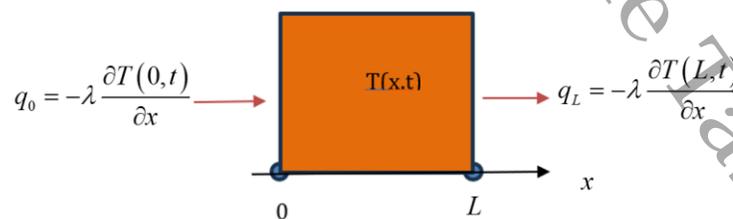


Figura 2. 7 Ejemplo de condición de frontera de flujo de calor específico.

Donde λ es la conductividad térmica y $\frac{\partial T}{\partial x}$ es el flujo de calor en dirección positiva de x .

2.4.3 Condición de convección de frontera

La condición de convección de frontera probablemente es el tipo de condición de frontera más común, pues esta se da en superficies rodeadas de un medio físico y una temperatura constante. Cuando se analizan caso con este tipo de condición de frontera se hace un balance de energía sobre la superficie, en donde la conducción de calor de la superficie en una dirección escogida debe ser igual a la convección de calor en esa misma dirección, lo anterior, se explica de manera gráfica en la Figura 2.8.

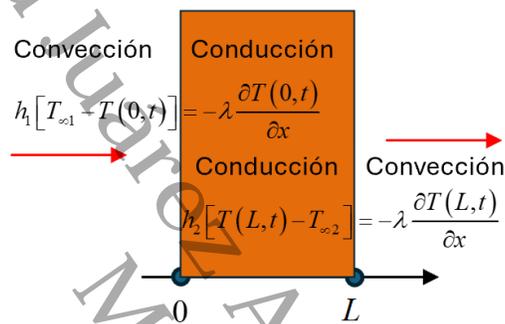


Figura 2. 8 Ejemplo de condición de convección de frontera.

Los términos h son los coeficientes de transferencia de calor por convección 1 y 2 respectivamente y los términos T_{∞} son las temperaturas 1 y 2 de los medios circundantes al sistema analizado.

2.4.4 Condición de radiación de frontera

De acuerdo con Çengel & Ghajar, (2011) algunas aplicaciones de la transferencia de calor en ingeniería, como en las aplicaciones espaciales y criogénicas, una superficie en la cual hay interacciones de energía está rodeada por un espacio vacío, por lo que, no hay transferencia por convección entre la superficie y los alrededores. En tales situaciones, la radiación es la única forma de transferir calor entre la superficie y el entorno.

Para este caso se hace un balance parecido al del mecanismo de transferencia de calor por convección, pero este análisis energético se hace tomando en cuenta la

conducción de calor y las condiciones de radiación como se muestra en la Figura 2.9.

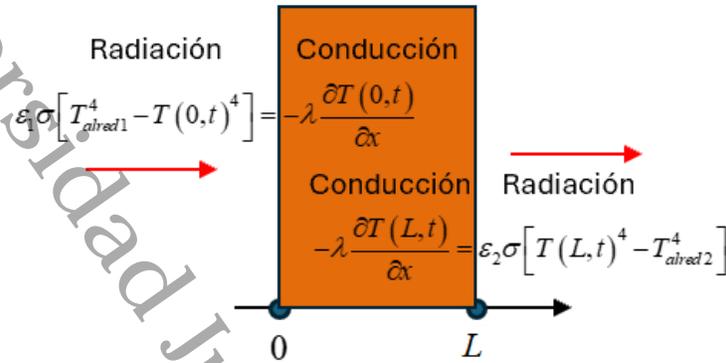


Figura 2. 9 Ejemplo de radiación de frontera.

Los coeficientes ε_1 y ε_2 son los coeficientes de emisividad de las fronteras en los extremos, σ es una constante con valor de $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$, y finalmente, T_{alred} es la temperatura en los alrededores de las fronteras.

2.4.5 Condiciones de frontera de interfase

Existen medios físicos que están constituidos por capas de materiales distintos, y para resolver un problema de transferencia de calor en un cuerpo de ese tipo, es necesario determinar la transferencia por cada capa, lo que a su vez requiere especificar las condiciones de frontera en cada frontera de interfase. Las condiciones de frontera en una interfase deben cumplir los siguientes requisitos:

- 1) Los dos cuerpos en contacto deben tener temperaturas idénticas en el área de contacto.
- 2) Una interfase (superficie) no tiene por qué almacenar energía, y como consecuencia de ello, el flujo de calor en ambos lados debe ser el mismo. (Çengel & Ghajar, 2011). El modelado en una pared uniforme con sus condiciones de frontera se presenta la Figura 10.

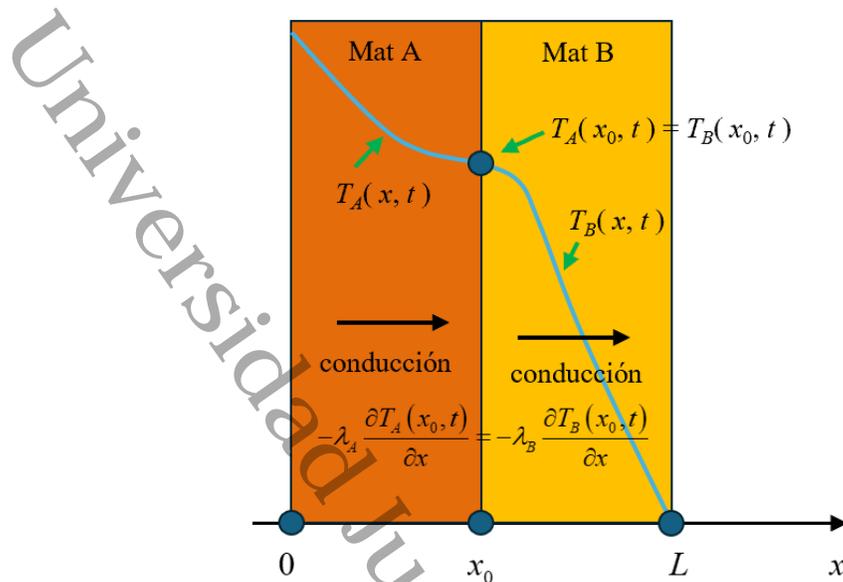


Figura 2. 10 Ejemplo de condición de fronteras de interfase.

2.5 Condiciones climáticas

Las condiciones climáticas de una región se dan por medio de distintos parámetros que tienen que ver con sus condiciones geográficas, como su ubicación y la forma de su superficie, los autores Bautista et al., (2019) dicen que fuerzas astronómicas como el movimiento de translación, la rotación y la radiación solar determinan el clima. La latitud, que define las zonas de vida, también afecta los patrones globales del comportamiento climático. El efecto de la continentalidad, los efectos marítimos, la altitud y el relieve son otros factores que influyen a nivel de mesoescala. Los vientos locales, las islas de calor, las inversiones térmicas y la contaminación tienen un impacto local significativo.

Según datos de la SEMARNAT (2024) los tipos de clima del territorio mexicano se pueden dividir en siete grandes grupos (Figura 11), en los cuales tienen mayor presencia los climas cálidos, cálido subhúmedo, seco y semiseco, muy seco o seco desértico y con menor presencia en superficie: cálido húmedo, templado subhúmedo, templado húmedo, y frío con muy poca presencia.

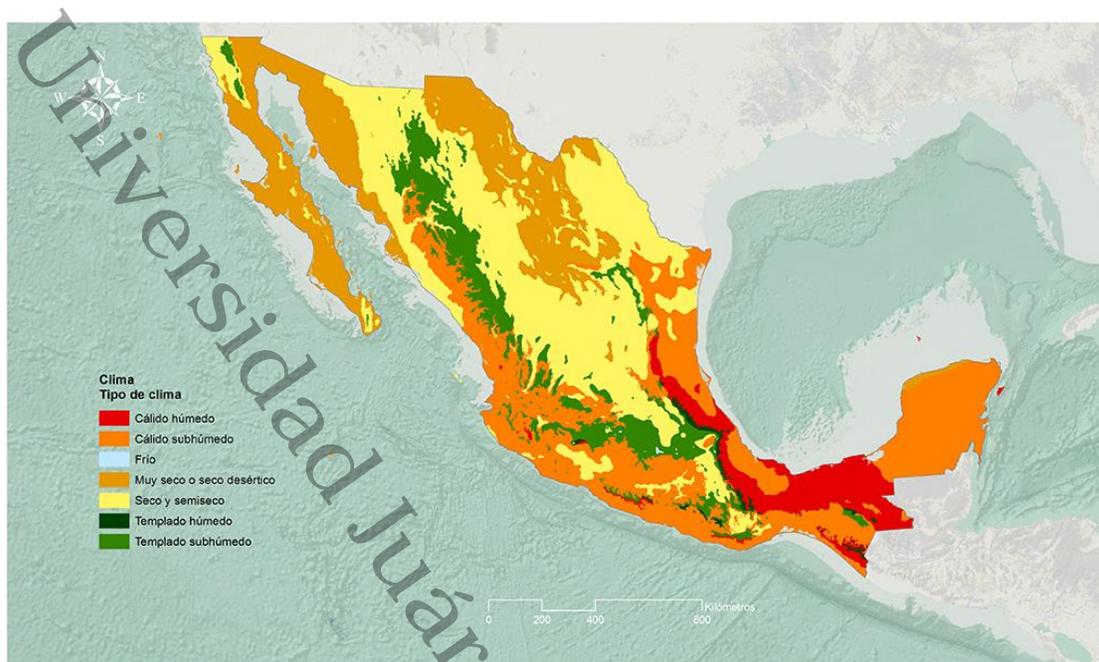


Figura 2. 11 Clasificación de los climas de la república mexicana, Fuente: SEMARNAT (2024).

Ahora enfocándose en el estado de Tabasco que es dónde se centra el estudio, según datos del INEGI el 95.5% del territorio del estado presenta clima cálido húmedo, el 4.5% es clima cálido subhúmedo hacia la parte este del estado. La temperatura promedio anual es de 27°C, con una máxima promedio de 36°C en mayo y una mínima promedio de 18.5°C en enero. La precipitación promedio del estado es de 2550 mm anuales, con las lluvias más intensas entre junio y octubre (INEGI, 2020). La Figura 12 muestra la clasificación de climas en el estado de Tabasco.



Figura 2. 12 Porcentaje de territorio del estado de Tabasco con clima Cálido húmedo y Cálido subhúmedo.

2.6 Materiales de construcción

En México de acuerdo con el INEGI (2020) el método de construcción más utilizado para casas comunes es el método de construcción por mampostería. El 91.6% de viviendas en Tabasco son construidas en materiales de block, ladrillo, piedra, cantera, cemento o concreto. Dentro de los materiales más utilizados se encuentra los que se describen en la Tabla 2.1. Por su parte, en la Tabla 2.2 se presentan las principales propiedades térmicas de los materiales de construcción más comunes.

Tabla 2. 1 Materiales de construcción ventajas y desventajas

Material	Ventajas / Desventajas
Block	<ul style="list-style-type: none"> • Hay distintas variantes en sus presentaciones. • Se pueden fabricar con materiales que estén disponibles en la región en donde se construirá. <p>TIPOS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Block hueco de cemento y/o concreto: <ol style="list-style-type: none"> 1.- Liviano: Son elementos livianos utilizados para la elaboración de muros divisorios. 2.- Pesado: Son usados en muros para exterior, para la elaboración de muros perimetrales y de carga liviana.

	<ul style="list-style-type: none"> • Block hueco de barro: La característica más destacable de este block es su buen desempeño como aislante térmico y también acústico. • Vitrolita: Este es un block de barro del tipo esmaltado. • Adobe: Este se elabora a base de materiales naturales como paja, arcilla, y zacate.
<p>Tabique o ladrillo</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia: Estos tabiques son mucho más resistentes que los ladrillos convencionales lo que permite mayor maniobrabilidad del material y mejor aprovechamiento de este, por lo cual hacer reparaciones en este tipo de muros es más sencillo. • Este tipo de tabiques tiene un bajo desempeño a la hora de aislar térmica y acústicamente. <p>TIPOS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tabique de tepetate <p>El desplante de este tabique se hace en rodapié de piedra, lo cual ayuda a la contención del salitre.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tabique de barro cocido <ol style="list-style-type: none"> 1.- Tabique tierno: En su elaboración se usa más arena y se le da menos cocción, este tipo de tabique ofrece menos resistencia a las afectaciones del exterior. 2.- Tabique recocado: Para la elaboración de este tabique se ocupa que su cocción sea lenta y uniforme pues en esto está la resistencia que este adquiere. 3.- Tabique recorcho: Este tipo de tabique es muy quebradizo, esto, debido al cocimiento excesivo al que se somete, su uso es recomendable solamente para desplantar muros por la poca absorción de humedad que este tiene. <ul style="list-style-type: none"> • Tabique de barro comprimido: Este tabique de todos los mencionados anteriormente es el que mejor cualidad presenta, esto debido a que su secado se hace en dos etapas. Secado natural evitando corrientes de aire y secado artificial mediante un horno a 850°C.
<p>Concreto</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Material del cual se tiene una alta aceptabilidad a nivel mundial por la facilidad con la que se consiguen los materiales con los que se fabrica.

	<ul style="list-style-type: none"> • Vertibilidad arquitectónica. • Alto grado de resistencia. • Resistente a la exposición al fuego (de 1 a 3 horas) • Material capaz de resistir grandes esfuerzos, sobre todo si este es sometido a esfuerzos de compresión o cortante. • Poco mantenimiento • Una construcción hecha de concreto es mucho más costosa. • Las construcciones de concreto son pesadas en exceso lo que limita su uso
<p>Piedra</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Al tener una inercia térmica buena esta impide variaciones significativas en la temperatura de la edificación. Para el verano el confort térmico es alcanzable fácilmente al mantenerse fresca y para e invierno la cantidad de energía empelada para mantenerse a gusto dentro de la edificación se reduce al mínimo. • Al construir una vivienda con piedra se está construyendo una vivienda bioclimática, la cual se comporta como una masa térmica que es capaz de almacenar el calor. Este material requiere de mantenimiento mínimo y es capaz de mantener sus propiedades a pesar del paso del tiempo y cabe mencionar que su aislamiento acústico es bueno. <p><u>Las principales desventajas de la piedra son:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Construcción más lenta de lo habitual • Para la construcción con este tipo de material se tiene que empelar mano de obra calificada, lo cual aumenta más el coste de la mano de obra.
<p>Tablarroca</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Un muro de tablarroca se puede construir de manera muy rápida • Este método de construcción es muy limpio comparado con el método tradicional de construcción. • Los materiales usados para la construcción de muros tablarroca no son inflamables, lo que representa un bajo riesgo en los incendios. • La inversión para construcción en este tipo de material es menor en comparación con el método tradicional de construcción. • Ya que en los muros quedan espacios huecos, estos se pueden aprovechar para mejorar el aislamiento térmico y acústico agregando materiales que den esas características al muro • Como desventaja estos muros son susceptibles a la humedad y la intemperie.
<p>Madera</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Antes de ser usada la madera debió de ser previamente tratada para repeler insectos y humedad. • Mantenimiento alto y costoso.

	<ul style="list-style-type: none"> • Debe ser barnizada o recubierta con algún esmalte protector si se va a usar en ambientes húmedos o estará expuesta al sol para aumentar su durabilidad. • Versatilidad y alta belleza al ser trabajada. • Rapidez de construcción. • Ofrece buen aislamiento térmico y acústico. • Alta resistencia mecánica. • Bajo costo comparado con el método tradicional de construcción.
--	--

Tabla 2. 2 Propiedades térmicas de los materiales de construcción más comunes para viviendas en Tabasco.

Nombre	Dimensiones (cm)	λ (W/m·K)	c_p (J/kg·K)	ρ (kg/m ³)	Referencia
Función: MUROS					
Ladrillo barro recocido	7 × 17 × 30	0.72	835	1920	(Incropera & de, 2009)
Block macizo	10 × 20 × 40	0.72	780	1860	
Piedra		2.9	745	2150	
Concreto		1.4	880	2300	
Función: RECUBRIMIENTOS					
Revoco de cemento y arena		0.72	780	1860	(Incropera & de, 2009)
Revoco de yeso y arena		0.22	1085	1680	

2.6.1 Normas de construcción

La comisión nacional de vivienda (CONAVI) da una serie de guías en su texto “Recomendaciones estructurales y constructivas para vivienda nueva”, que se

requieren para el diseño y ejecución de cualquier tipo de construcción basada en edificaciones, en esta se incluyen especificaciones y recomendaciones para ejercer una buena práctica en la construcción, esto, con el fin de asegurar un buen funcionamiento de los edificios, así como su higiene y su habitabilidad. Dentro de las recomendaciones se presentan indicaciones sobre: muros de mampostería, varillas de acero, grava, arena, mortero y concreto. A continuación, se presenta información resumida de cada punto.

Muros de mampostería: Este tipo de muros son los más utilizados en la construcción en México y por supuesto en el estado de Tabasco y sus municipios, estos al ser construidos se realizarán con piezas de bloques o tabiques, los cuales pueden ser de origen industrial o artesanal, la colocación de dichos elementos se hará de tal forma que las piezas vayan escalonadas, algo importante de decir es que la junta entre estos elementos deberá tener un espesor de 1-1.5 cm, aunque en muchas obras no supervisadas se encuentran juntas de hasta 2 cm lo cual se toma como aceptable, de igual manera el zarpeado o repello estará en el rango de 1-1.5 cm. Una vez levantados los muros, estos se cerrarán con castillos y cadenas de cerramiento. Los elementos para utilizar en una construcción tales como cemento, varillas, bloques de cemento, mortero, cal, yeso, etc. deben cumplir con la normatividad mexicana que esté vigente, para así dar un uso adecuado a los materiales, sin embargo, por la existencia de zonas en las que algunos de estos materiales pueden ser suplidos por materiales de fácil acceso en la región, un ejemplo claro de esto sería el uso de bloques de Adobe o ladrillo de barro.

Varillas de acero: Las varillas de acero se comercializan en diámetros clasificados del 2 al 10, cuyos esfuerzos de fluencia nominal es de 4200 kg/cm². En la Tabla 2.3 se muestran las especificaciones nominales de las varillas representativas

Tabla 2. 3 Diámetro de varilla CONAVI (2020)

Diámetro (in)	Área (m ²)	Peso (kg/m)
1/4	0.32	0.250
3/8	0.71	0.560
4/8	1.27	0.994
5/8	1.98	1.552
6/8	2.85	2.235

Grava: Su almacenamiento deberá hacerse cuidando que no se mezcle con tierra u otros materiales orgánicos. Se deberá cuidar que no esté susceptible a mojarse por lluvia. Cerciorarse de que el agregado sea producto de la trituración de piedra y no de piedras por acumulación de sedimentos. Cuidar que el tamaño máximo de la grava no exceda los 19 mm.

Arena: Debe ser cernida mediante el uso de un colador de malla, esto, con el fin de limpiarla de maleza o cualquier materia orgánica. Debe ser igual que la grava, debe protegerse de la lluvia. Deberá ser de un tamaño de grano medio fino.

Mortero: Para la preparación del mortero se deberán de seguir las siguientes recomendaciones:

- Primeramente, se deberán mezclar la arena y el mortero hasta alcanzar una consistencia de mezcla homogénea, seguidamente se hará el agregado de agua en un 35% a 45% en comparación de la mezcla de arena y cemento.
- Al hacer la preparación de la mezcla, esta se hará sobre un entarimado o una superficie que esté asilada directamente de la tierra para evitar la contaminación con material orgánico.
- En el caso de usar arena húmeda se deberá reducir el porcentaje de agua, de acuerdo con la Tabla 4.

Tabla 2. 4 Dosificación de mezcla de mortero y su uso CONAVI (2020).

Sacos de mortero de 50 kg	Botes de arena de 19 L	Uso
1	6	Plantillas
1	5	Cimientos de piedra
1	5	Aplanados
1	6	Revestimientos ligeros
1	4	Piezas de mampostería

Concreto: Para la preparación del concreto se deben tomar en cuenta las siguientes recomendaciones, y debe ser preparado de acuerdo con la Tabla 2.5:

- Prepararse por medios mecánicos, a excepción de losas y pisos
- Al vaciarse evitar el contacto con el terreno natural
- Los agregados como arena y grava deberán de seleccionarse de manera adecuada cuidando las recomendaciones de almacenamiento de estos.
- No exceder la cantidad de agua para la preparación
- Revolver perfectamente la mezcla de todos los agregados
- Para climas demasiado cálidos usar agua fría en la preparación de la mezcla o en su caso usar agregados que permitan bajar la temperatura a la mezcla.
- Una vez hecho el vaciado del concreto cuidarlo de la creación de grietas, humedeciéndolo (para plantillas y pisos).

Tabla 2. 5 Dosificación del concreto CONAVI (2020).

Cemento (saco de 50 kg)	Arena (Bote de 19 L)	Grava (Bote de 19 L)	Agua (Bote de 19 L)	Uso
1	6.5	9	2 1/4	Plantillas
1	4	5	1 1/2	Losa de cimentación, pisos, cadenas, etc.
1	3	4	1 1/3	Zapatas de concreto, cadenas de desplante.

2.7 Software para simulación

Para el desarrollo de códigos numéricos existen diferentes softwares con licencia (Matlab, Energy plus, ANSYS, etc.) y softwares libres (Octave, Phyton, Open Foam). En este software se desarrolla código a partir del uso de un lenguaje de programación muy parecido al lenguaje C o también a partir de las mismas geometrías y propiedades físicas y químicas del caso en el que se trabaja.

Para este caso se tiene dos softwares de interés (Octave y OpenFoam) ambos softwares contribuyen a estudios donde se requieren resolver ecuaciones diferenciales muy complejas a partir de la discretización de estas mediante métodos matriciales, dando resultados más rápidos y permitiendo el análisis de geometrías complejas.

- **Octave**

Este programa utiliza un lenguaje de programación de gran desempeño a la hora de realizar cálculos de forma numérica, este software es capaz de procesar las resoluciones desde simples operaciones aritméticas hasta el manejo de matrices y ecuaciones diferenciales lineales y no lineales, todo esto de una forma un tanto sencilla pues cuenta con una interfase de usuario muy amigable en la que se usan comandos, sin embargo, también se puede tener la opción de utilizar un modo no interactivo utilizando las órdenes de su fichero (Figura 2.13).

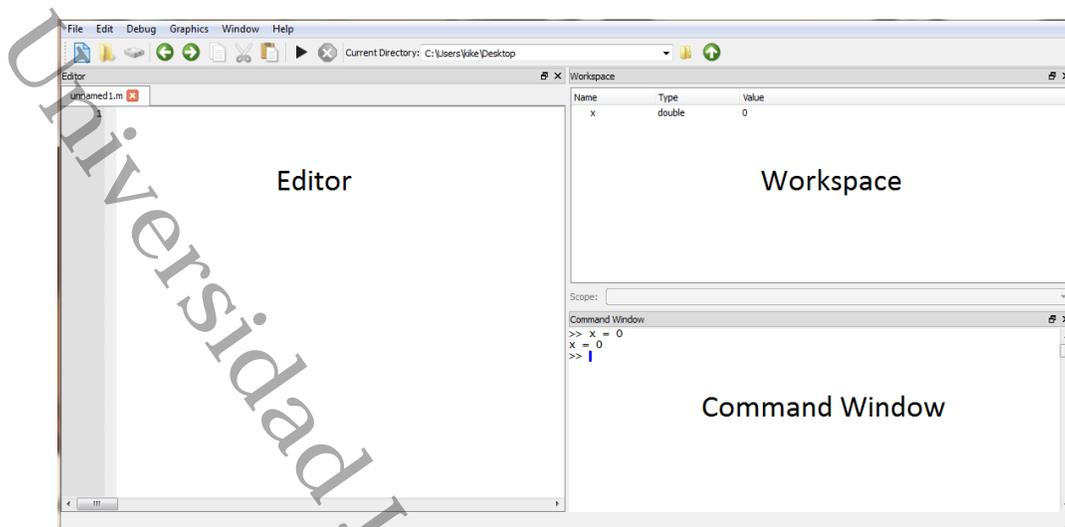


Figura 2.13 Interfaz de Octave,

Aunque se creó alrededor del año 1988, el proyecto tenía otra intención: ser utilizado en un curso de diseño de reactores químicos. Después, en 1992, se tomó la decisión de ampliarlo y John W. Eaton comenzó a desarrollarlo. El 4 de enero de 1993 fue el día en que se lanzó la primera versión Alpha. La versión 1.0 se publica un año después, el 17 de febrero de 1994.

El nombre proviene del nombre de un profesor de uno de los autores, conocido por sus excelentes aproximaciones a problemas numéricos mediante cálculos mentales. (*GNU Octave - EcuRed*, 2024).

El programa cuenta con muchas herramientas con las cuales se podrán resolver las siguientes problemáticas:

- Solución de ecuaciones algebraicas lineales y no lineales.
- Integración y derivación de funciones.
- Manipulación de ecuaciones vectoriales.
- Solución de ecuaciones diferenciales
- Aplicación de métodos numéricos mediante programación.

De igual manera, Octave muestra detalles técnicos que lo hacen una potente herramienta, incluso casi a la par de software de licencia Matlab, las cuales se presentan en la lista siguiente:

- Si se está conectado a internet el programa ofrece ayuda en español.
- El programa está escrito en lenguaje C.
- Es compatible con sistemas operativos LINUX y Windows.
- Permite el uso de extensiones del programa con el uso de funciones (tal como Matlab) .
- Permite la creación, visualización y edición de gráficos mediante la impresión y guardado de estos.
- Cuenta con un intérprete para su propio lenguaje (de estructura sintáctica parecida a la de Matlab), y permite una ejecución interactiva.
- Corre archivos de extensión .m (archivos de propios de Matlab).
- Generación de scrips.
- Es capaz de soportar la mayoría de las funciones que maneja la biblioteca estándar del lenguaje C.

Capítulo 3

Metodología

En este capítulo se presentan las muestras de estudio, así como, sus propiedades geométricas y térmicas. También, se presenta la metodología para el análisis del comportamiento térmico de distintas configuraciones de muros compuestos utilizados como forma de construcción más usuales en el estado de Tabasco y también de propuestas de configuraciones de muros que pueden mejorar su desempeño térmico, todo esto para su análisis comparativo y establecer su factibilidad de uso para contribuir a reducir las ganancias de calor en una vivienda.

3.1 Modelo físico

En la Figura 3.1 se muestra un modelo preliminar de uno de los muros, en esta figura se muestran las propiedades termo físicas que se toman en cuenta para el análisis de la transferencia de calor, de igual manera, se observan las condiciones de frontera que se tienen para este fenómeno de transferencia de calor y seguidamente.

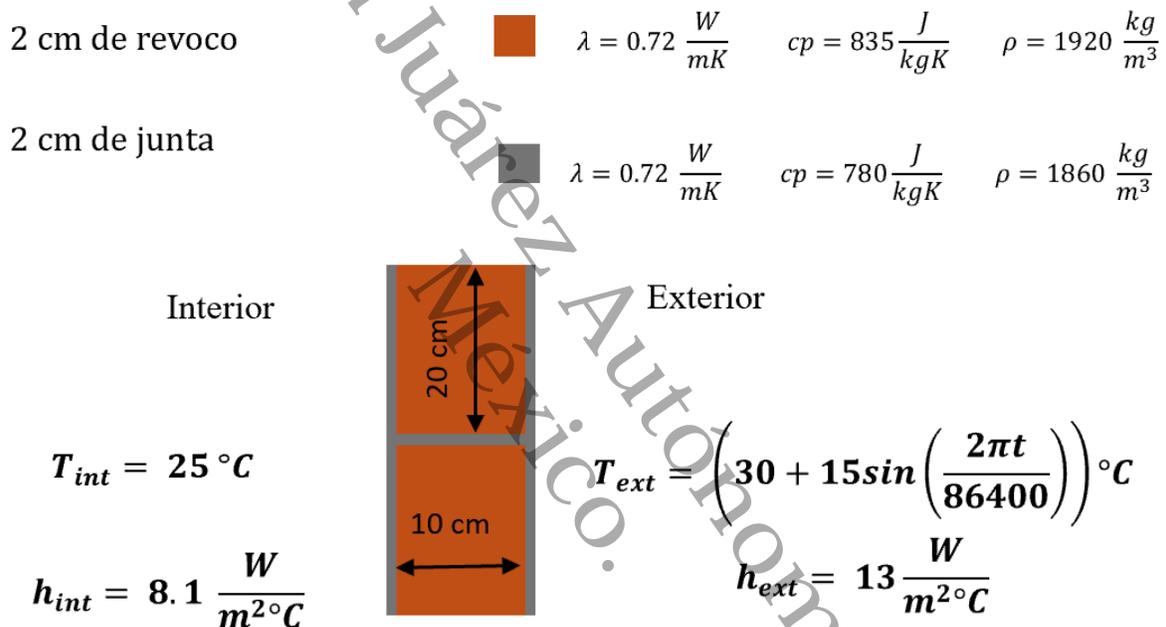
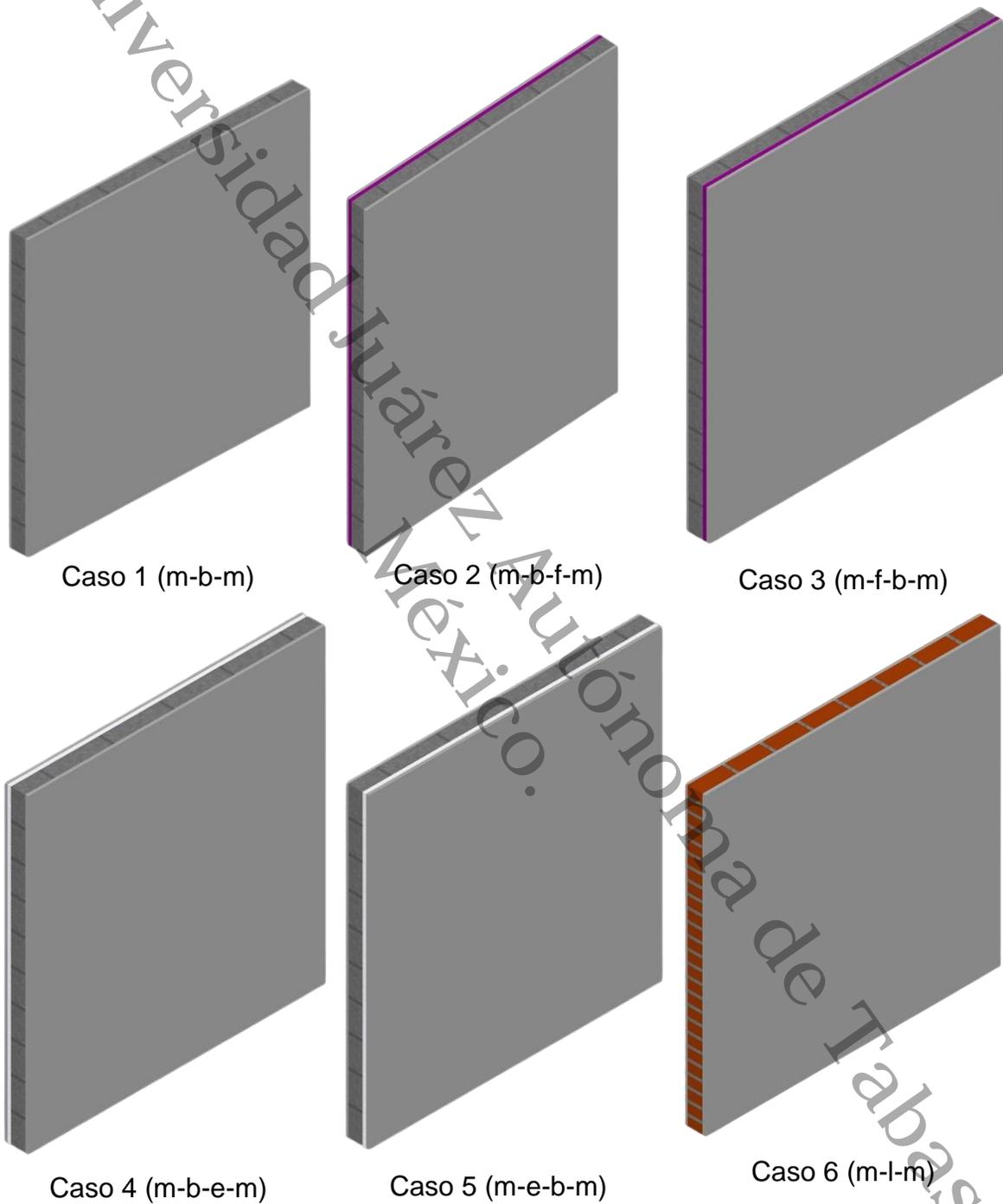


Figura 3. 1 Materiales y condiciones de frontera.

En la Figura 3.2 se muestran modelos de los muros de forma más realista en dimensiones y texturas.



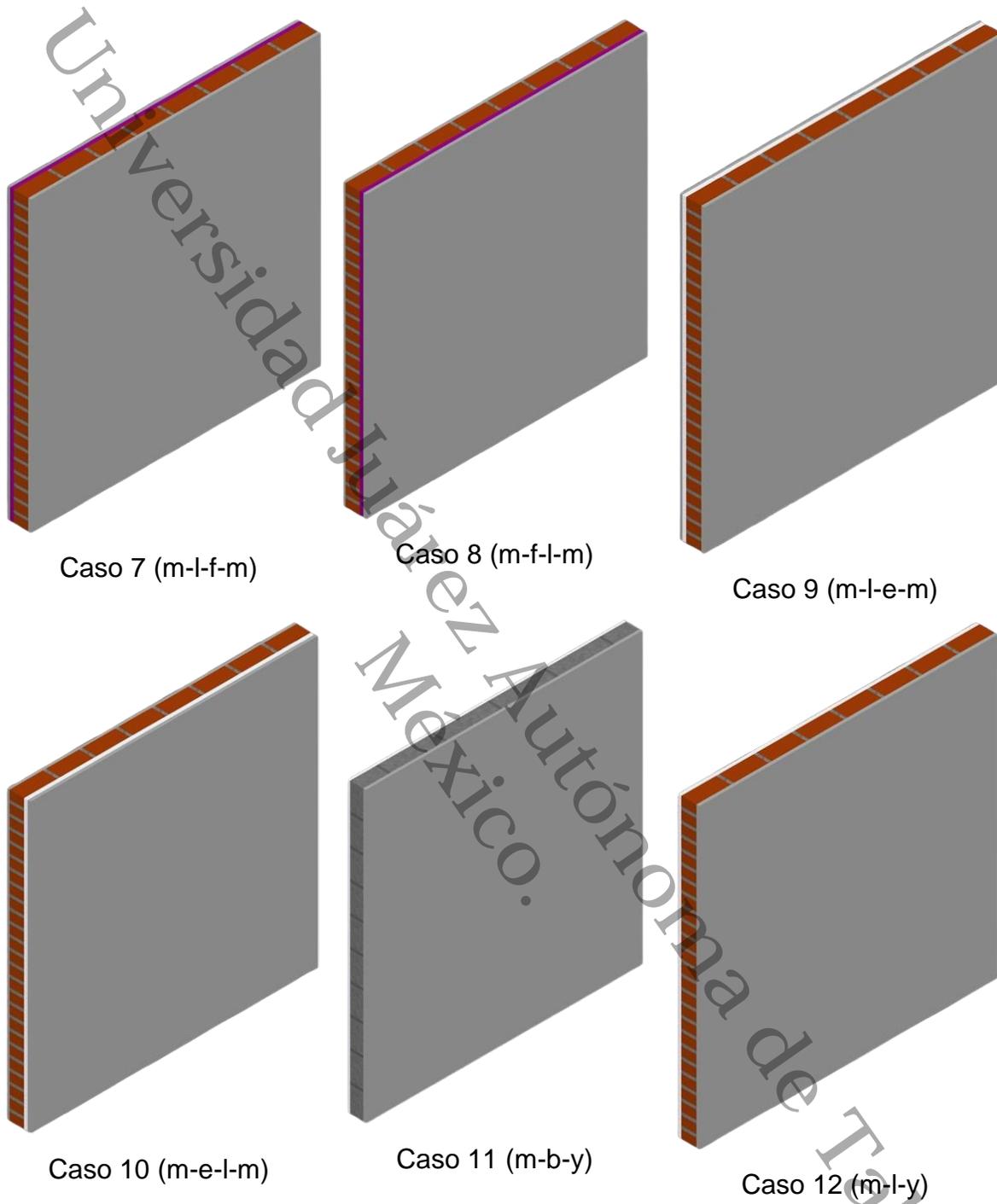


Figura 3. 2 Muros de paredes compuestas.

3.2 Modelo matemático

Como se mencionó anteriormente este estudio se centra en la conducción de calor en una pared de forma bidimensional, por lo que el modelo que representa dicho fenómeno es la ecuación general de conducción de calor bidimensional:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \dot{e}_{gen} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1)$$

Esta ecuación es una ecuación de derivadas parciales no homogéneas de segundo orden, por lo cual, no se puede encontrar una solución general de una forma analítica y menos si en la geometría que sucede el fenómeno es una geometría caprichosa. Por lo mencionado anteriormente, para resolver esta ecuación se tiene que resolver numéricamente usando el método de volumen finito por su gran adaptabilidad a geometrías de distintas configuraciones.

3.2.1 Método de volumen finito

El método de volúmenes finitos (MVF) fue originalmente diseñado para usar en la formulación de diferencias finitas. Este enfoque comienza utilizando la forma integral de las ecuaciones de conservación. El dominio de análisis se divide en un número finito de volúmenes de control seguidos uno del otro, y se aplican ecuaciones de conservación a cada VC. Cada VC tiene un nodo computacional en su centroide, donde se realiza el cálculo del valor de las variables. Se utiliza una forma de interpolación para representar los valores de las variables en las superficies del VC en relación con los valores nodales, que se encuentran en el centro del VC. La fórmula de cuadratura disponible se utiliza para calcular las integrales de superficie.

Como producto se crea una ecuación algebraica para cada VC que incluye los valores de los nodos cercanos. El MVF puede funcionar con cualquier tipo de malla, por lo que puede usarse con geometrías complejas. La malla limita los volúmenes

de control. Las integrales de superficie, que representan flujos convectivos y difusivos, son las mismas para las interfaces (fronteras) de los VC porque el método es conservativo por construcción (las propiedades relevantes cumplen con conservación para cada volumen). Quizás la aproximación MVF sea la más fácil de entender y programar. Cada término que debe aproximarse tiene un significado físico. A continuación, se muestran los pasos a seguir para aplicar el MVF.

Pasos para la aplicación del MVF:

- Creación de la malla
- Discretización, la cual consiste en pasar de un sistema de ecuaciones diferenciales a un sistema de ecuaciones algebraicas integrando las ecuaciones diferenciales en un volumen de control para finalmente obtener un sistema de ecuaciones algebraicas.
- Solución del sistema de ecuaciones obtenido.
- Aplicación del método de volumen finito a la ecuación de conducción de calor unidimensional en estado estacionario de una pared.

En la Figura 3.3 se plantea un ejemplo para su solución mediante el método de volumen finito



Figura 3. 3 Ejemplo de pared por la que pasa un flujo de calor unidimensional

- **Mallado**

Como primer paso del método se tiene que dividir la pared en pequeños volúmenes de control tomando como punto representativo el punto de interés (punto P). La Ec. (3.2) muestra la ecuación de difusión de calor en estado estacionario en 1D utilizada para el análisis.

$$\frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) + S = 0 \quad (3.2)$$

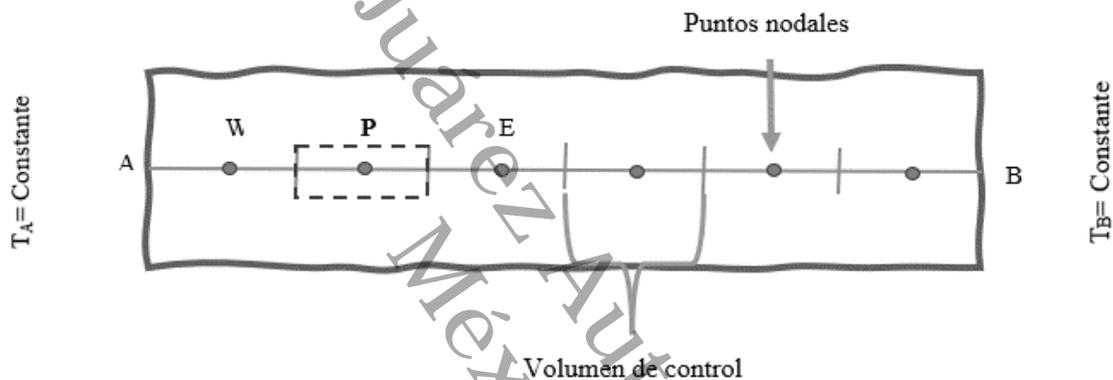


Figura 3. 4 Mallado de la superficie de análisis.

En la Figura 3.4 se observa que el espesor de la pared se ha dividido en 6 espacios en los que se encuentran posicionados a la mitad de dichos espacios los puntos P , en los que se calculará la Temperatura, nótese que los puntos W (west) y E (east) son los puntos vecinos.

Para poder hacer la generación de la malla se deben definir puntos intermedios entre los segmentos WP y PE , los cuales como se observa en la Figura 3.5 son los puntos w y e , para poder conocer el punto P debo tener información de las propiedades de los puntos w y e , sin embargo se necesita información de los puntos W y E que son los puntos contiguos a w y e este mismo proceso se deberá seguir con cada uno de los volúmenes de control, nótese que el tamaño de estos elementos de malla o volúmenes de control son Δx que son las distancias de los volúmenes de control.

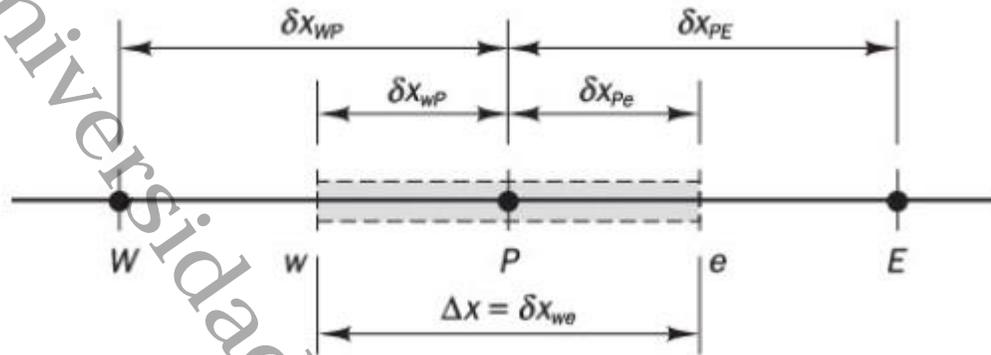


Figura 3. 5 Análisis del nodal respecto al punto P.

- **Discretización**

Como se mencionó antes la discretización consiste en pasar una ecuación de una forma diferencial a una forma aritmética que pueda ser resuelta con métodos algebraicos. La Ec. (3.2) se integra la ecuación diferencial respecto a su volumen de control (sabiendo que el volumen de control es de w hasta e).

$$\int_{\Delta V_c} \frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) + \int_{\Delta V_c} S dV = 0 \quad (3.3)$$

Operando se obtiene lo siguiente:

$$\lambda A \left(\frac{dT}{dx} \right)_e - \lambda A \left(\frac{dT}{dx} \right)_w + \bar{S} \Delta V = 0 \quad (3.4)$$

Donde A es el área de la sección transversal del volumen de control ΔV es el volumen de control y \bar{S} es la fuente de calor sobre el volumen de control.

Como se observa en la ecuación se tienen dos valores para el coeficiente de conductividad térmica λA_e y λA_w , por lo que para conocer estos valores se aplican diferencias centradas tomando como referencias los puntos W , E y P .

$$T_w = \frac{TW+TP}{2} \quad (3.5)$$

$$T_e = \frac{TP+TE}{2} \quad (3.6)$$

Ahora bien, analizando el mallado hecho anteriormente se tiene que la Ec. (3.4) se puede reescribir como se muestra en la Ec. (3.7).

$$\lambda A \left(\frac{dT}{dx} \right)_e = \frac{\lambda_e A_e (T_E - T_P)}{\delta_{xPE}} \quad \lambda A \left(\frac{dT}{dx} \right)_w = \frac{\lambda_w A_w (T_P - T_W)}{\delta_{xWP}} \quad (3.7)$$

Nota: Para el nodo 1 la distancia del punto P a los puntos vecinos W y E es $\delta_x/2$.

Ahora falta conocer la manera de aproximar la ecuación que representa la fuente de energía, la cual se puede aproximar como se muestra en la Ec. (3.8).

$$\bar{S} \Delta V = S_u + S_{PTP} \quad (3.8)$$

Sustituyendo las Ecs. (3.6), (3.7) y (3.8) en la Ec. (3.4) se obtiene la Ec. (3.9).

$$\lambda_e A_e \left(\frac{T_E - T_P}{\delta_{xPE}} \right) - \lambda_w A_w \left(\frac{T_P - T_W}{\delta_{xWP}} \right) + S_u + S_{PTP} = 0 \quad (3.9)$$

Desarrollando y factorizando las temperaturas se llega a la Ec. (3.10).

$$\left(\frac{\lambda_e}{\delta_{xPE}} A_e + \frac{\lambda_w}{\delta_{xWP}} A_w - S_P \right) T_P = \left(\frac{\lambda_w}{\delta_{xWP}} A_w \right) T_W + \left(\frac{\lambda_e}{\delta_{xPE}} A_e \right) T_E + S_u \quad (3.10)$$

La Ec. (3.10) se puede simplificar nombrando los corchetes con coeficientes, como se muestra en las Ecs. (3.11), (3.12) y (3.13).

$$a_W = \frac{\lambda_w}{\delta_{xWP}} A_w \quad (3.11)$$

$$a_E = \frac{\lambda_e}{\delta_{xPE}} A_e \quad (3.12)$$

$$a_p = a_W + a_E - S_p \quad (3.13)$$

Para finalmente obtener un polinomio como el que se presenta en la Ec. (3.14).

$$a_p T_p = a_W T_W + a_E T_E + S_u \quad (3.14)$$

El procedimiento anterior se aplica de igual manera para los demás nodos, teniendo cuidado de que en el primer y último nodo de tomar en cuenta que en las referencias A y B (que en este caso sustituyen a W y E) la distancia no es δx sino $\delta x/2$.

Finalmente, se obtiene una ecuación por cada nodo y se resuelven de forma simultánea para encontrar las temperaturas en cada uno de los nodos.

A continuación, se describe el orden de las operaciones que realiza el código computacional desarrollado en el software Octave para realizar las simulaciones del estudio, de igual manera se presenta en la Figura 3.6:

1. Especificar la geometría de los materiales de construcción con los que se construya el muro.
2. Delimitar la geometría del muro, así como su dominio computacional.
3. Definir las propiedades térmicas de los materiales de construcción.
4. Establecer los Δx , Δy y Δt y así mismo determinar el tiempo total de simulación.
5. Definir los coeficientes convectivos al interior y exterior del muro, así como sus condiciones iniciales y de frontera (temperaturas exterior e interior).

6. Calcular los coeficientes de las ecuaciones discretizada, Ec. (3.2), ($a_p, a_e, a_w, a_s, a_n, b, a$ y $b1$).
7. Resolver el sistema de ecuaciones algebraicas hasta cumplir el criterio de convergencia y obtener la distribución de temperaturas para un tiempo Δt y el flujo de calor bidimensional para el nodo central.
8. Se repite el proceso del 6-8 para cada nodo hasta llegar al nodo final, cumplir el criterio de convergencia y cumplir el tiempo de simulación.
9. Calcular la carga térmica diaria.
10. Calcular el factor de amortiguamiento.
11. Calcular el tiempo de retraso.
12. Imprimir gráficas.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

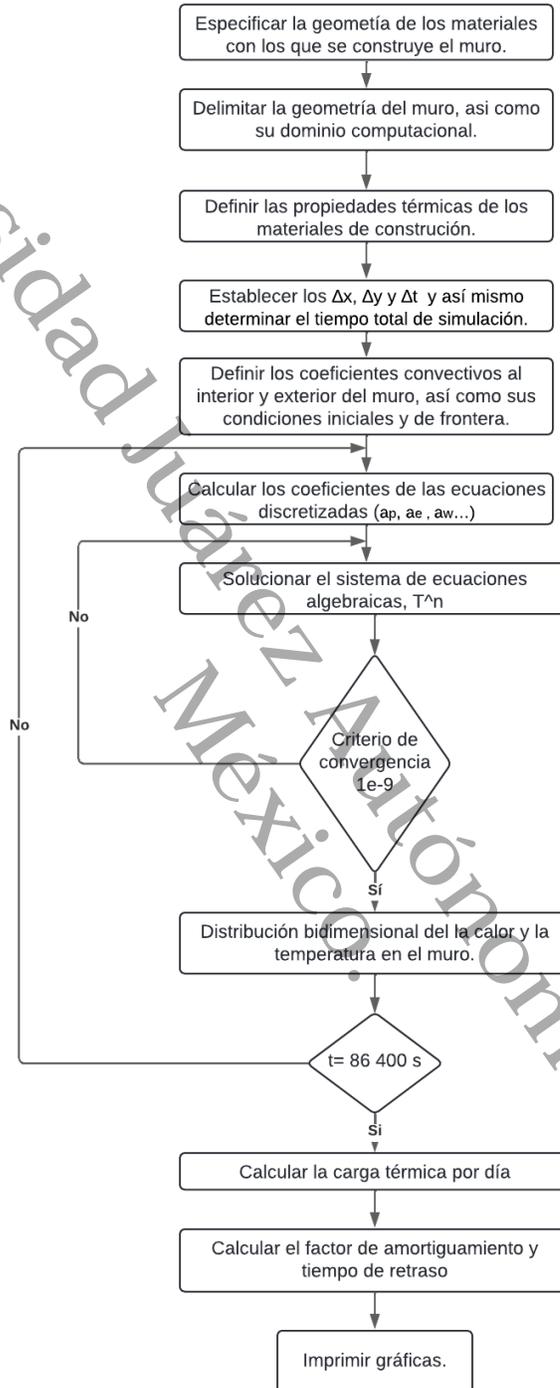


Figura 3. 6 Diagrama de flujo del algoritmo computacional para hacer las simulaciones de transferencia de calor en estado transitorio.

Capítulo 4

Resultados y Discusión

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de tiempo de retraso, factor de amortiguamiento y ganancia de calor para las configuraciones distintas de muros para casa habitación y de estos el mejor y peor caso respecto a desempeño térmico se toman para comparar su comportamiento térmico en los climas más representativos del país, todo lo anterior mediante un programa de simulación elaborado en el software libre de programación Octave. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones para los trabajos futuros.

4.1 Comportamiento de la temperatura-sección transversal de una pared

El comportamiento de las temperaturas a través de la sección transversal de un muro varía en gran manera respecto a la composición del muro y a las variantes de temperatura que hay en el medio ambiente. En un muro constituido por un solo material la temperatura tendría una variación lineal esto porque las propiedades termo físicas del material son las mismas en todas direcciones, a medida que transcurre el tiempo el gradiente térmico llega a ser constante debido a que no hay variaciones dentro de la sección transversal. En cambio en muro que está construido de varios materiales la variación de la temperatura se dará de forma no lineal esto debido al cambio de las propiedades térmicas a través del muro pues un material con alta conductividad térmica transmitirá el calor más rápido que un material de menor conductividad térmica, las interfaces en este tipo de muros puede crear zonas en donde la temperatura desciende o se aumenta y esto puede afectar

el desempeño térmico del muro lo cual es aprovechable cuando se busca la eficiencia térmica.

En las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3 se muestran los perfiles de temperatura obtenidos en la sección transversal de los casos de estudio. Los resultados obtenidos consideraron las condiciones climáticas de Villahermosa, Tabasco. Se observa que la transferencia de calor para temperaturas mínimas se realiza del interior al exterior en estado transitorio debido a la diferencia de temperatura. Por lo que, el calor fluye del punto más caliente al punto más frío teniendo la zona más fría en el centro de la pared. Para temperaturas máximas el calor fluye del exterior al interior de la vivienda, de igual manera se observa que la zona de menor temperatura fue la zona de medianía de la pared.

Dentro de los casos que se simularon se tienen tres de ellos en particular los cuales se consideran como el sistema de construcción en mampostería más usuales en el estado de Tabasco, la característica principal de estos sistemas es que no cuentan con un tipo de aislante ni al interior ni exterior lo cual permite una mayor ganancia de calor, por esa razón, este tipo de muros se tienen como las configuraciones de peor desempeño térmico, por el contrario el usar algún tipo de aislante mejora considerablemente la habitabilidad de la vivienda al reducir hasta 4 veces la ganancia de calor durante el día, cabe aclarar que la cantidad de veces en las que se reduce la transmisión de energía de exterior a interior tiene que ver mucho en primera instancia con el tipo de aislante usado, que para este estudio se usaron como aislantes el foamular y el unicel, en lo que se encontró que los muros con foamular tenían mejor desempeño térmico que los de unicel, y en segunda instancia se encontró que la posición del aislante es de suma importancia, dado que, el colocar el aislante del lado exterior de los muros ofrece mayor beneficio que el colocarlo al interior. Algo que también es importante mencionar es que para los casos de configuración en los que el elemento estructural era el ladrillo de barro se encontraban mejores comportamientos térmicos, siendo el muro de mortero-foamular-ladrillo.

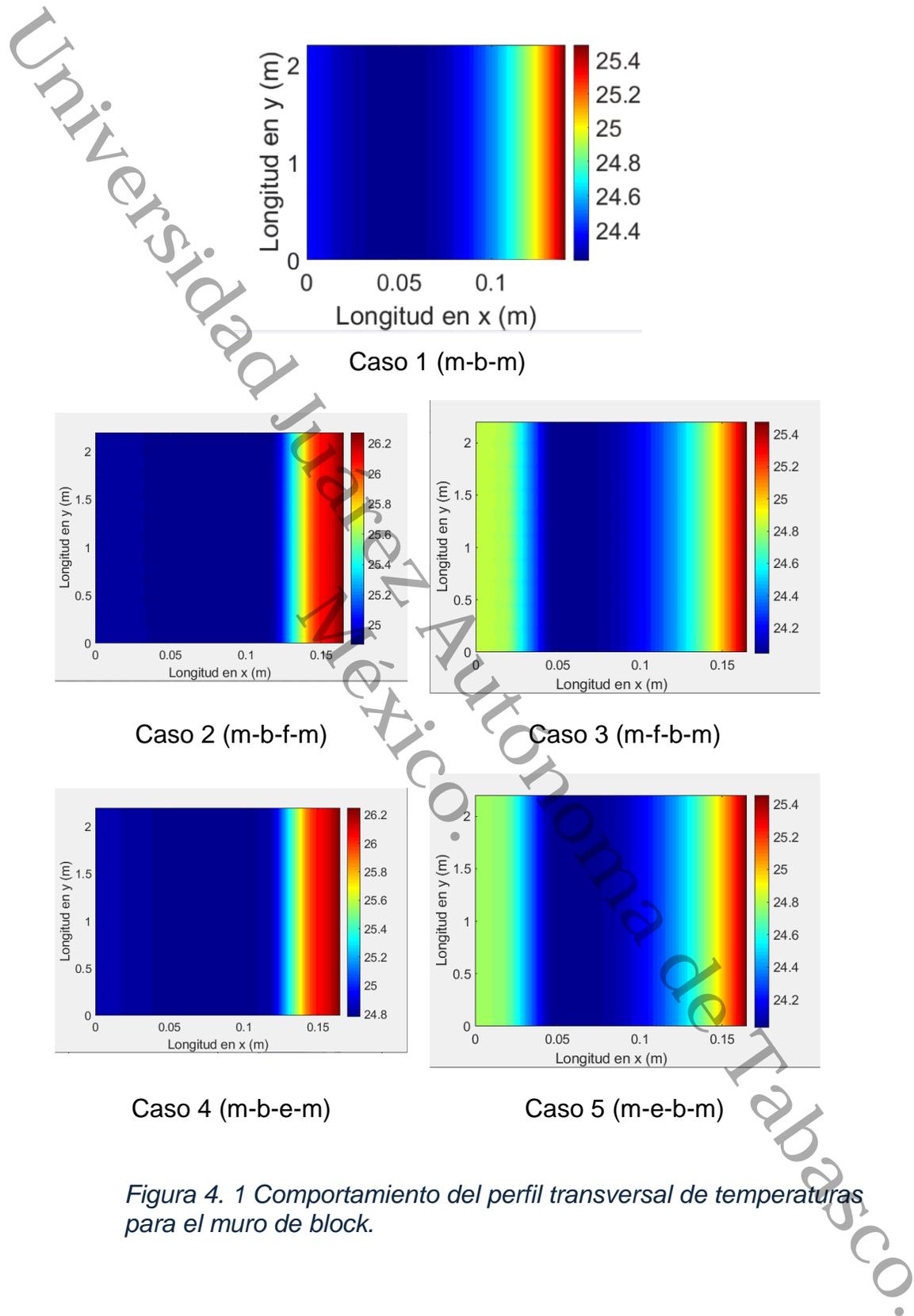


Figura 4. 1 Comportamiento del perfil transversal de temperaturas para el muro de block.

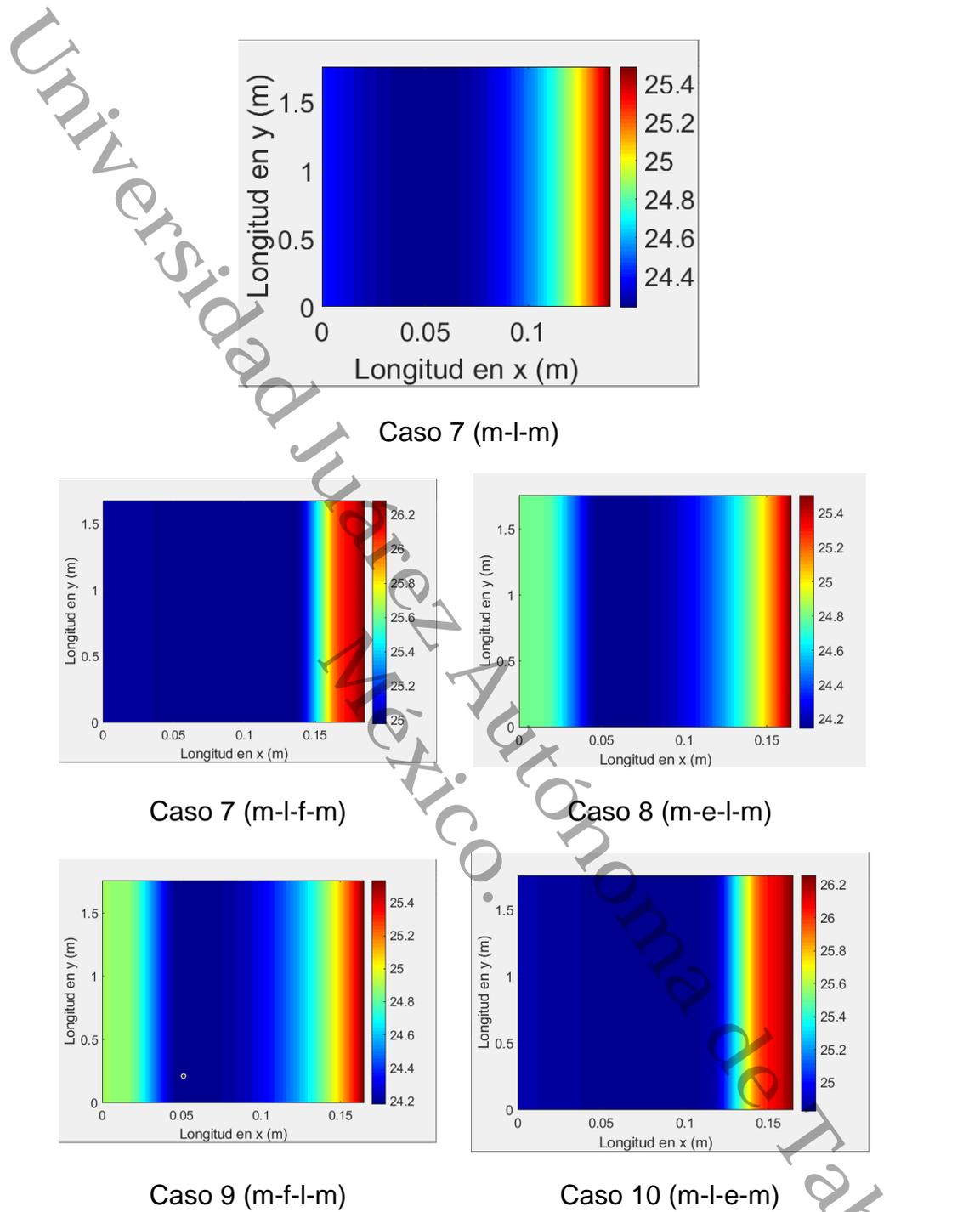


Figura 4. 2 Comportamiento del perfil transversal de temperaturas para el muro de ladrillo.

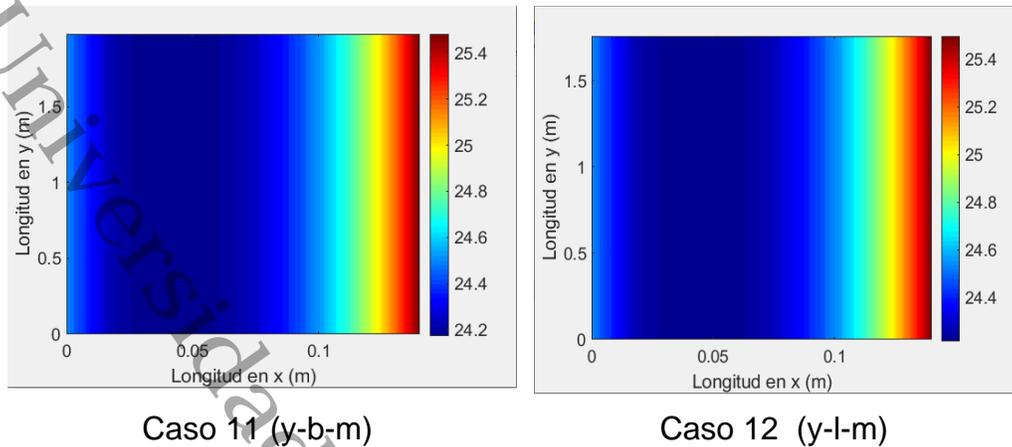


Figura 4. 3 Comportamiento del perfil transversal de temperaturas para el muro block y ladrillo con yeso.

4.2 Comportamiento transitorio de la temperatura

El comportamiento transitorio de la temperatura hace referencia al fenómeno de transferencia de calor que ocurre al existir un gradiente de temperatura entre dos lados de un muro, este comportamiento se va dando gradualmente, pues al principio la temperatura es constante, sin embargo, al existir la diferencia de temperaturas inicia la transferencia de calor, esto provoca que al transcurrir el tiempo la temperatura en la pared aumente o disminuya según las variaciones de temperatura del exterior. En el estado transitorio la temperatura varía no solo en función del tiempo sino también en función de la posición, esto como se mostró en capítulos anteriores es descrito matemáticamente por la ecuación de difusión de calor. En esta difusión del calor influye en gran manera los tipos de materiales con los que está construido el muro por el cual atraviesa el calor pues la construcción usando materiales aislantes puede mejorar el desempeño térmico de la pared disminuyendo la transferencia de calor, dando beneficios tales como poder reducir la pérdida de calor en invierno, reducir la ganancia de calor para el verano y disminuir la carga térmica que se necesite para mejorar la comodidad al interior de la vivienda.

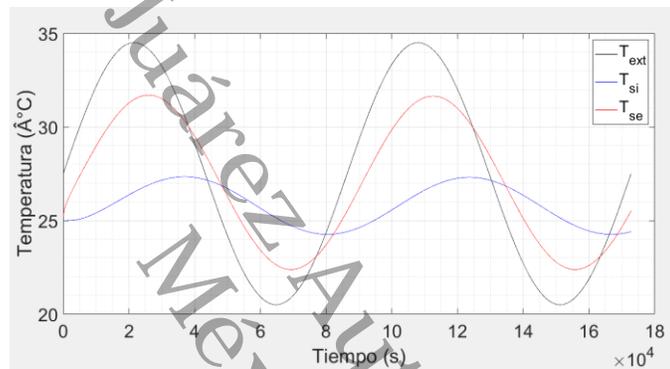
En la Figura 4.4 se presenta el comportamiento transitorio de las temperaturas para las superficies del muro de block como elemento estructural del muro. Lo anterior, para los casos en los que se considera el muro convencional y los casos cuando se agrega una capa de aislante en diferente posición, así como, dos aislantes distintos y para los casos en los que se consideran los materiales más usuales. Como se puede observar el comportamiento de las temperaturas tiene una forma senoidal, lo cual era de esperarse pues la temperatura en las paredes de todos los modelos cambia periódicamente respecto al tiempo, de igual manera, se puede notar que para este tipo de muro se tienen las mayores temperaturas de pared exterior y centrándose en el caso más convencional (mortero-block-mortero) se observa que este tiene la temperatura mínima exterior más alta, ahora bien, en el caso de las temperaturas interiores tanto máximas como mínimas, este tipo de muro aún con algún tipo de aislamiento presenta las temperaturas más altas al interior de la pared.

Este mismo comportamiento sinusoidal se observó para el caso del muro de ladrillo (Figura 4.5), sin embargo, se nota una diferencia en las temperaturas tanto máximas como mínimas al exterior e interior, pues para los distintos casos de muros en los que se usó como elemento estructural la mampostería de ladrillo se observó que en estos se presentan las menores temperaturas al interior y exterior si se compara con los muros construidos con block.

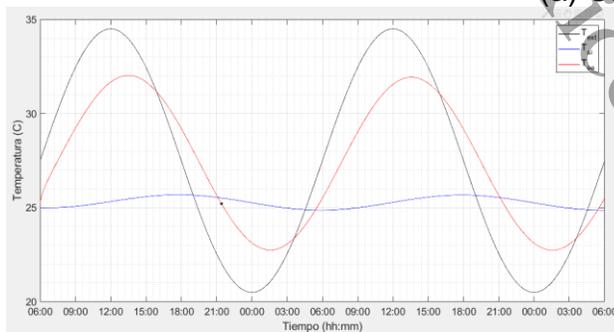
Finalmente, se realizó el comparativo Comportamiento transitorio de la temperatura para el muro mortero-block-yeso (Caso 11) y Mortero-Ladrillo-Yeso (Caso 12), esto con fin de evaluar su comportamiento con uno de los acabados que se han incorporado a las construcciones en viviendas sustituyendo el mortero, esto puede verse en la Figura 4.6. Como puede observarse la incorporación de este acabado interior no representa un gran cambio en el aislamiento del muro pues sus temperaturas son casi iguales y de igual manera lo son las ganancias de calor, aunque en donde se notó un cambio que se podría considerar como significativo fue en el muro de yeso-ladrillo-mortero, lo cual se le atribuye a la capacidad aislante del ladrillo, que para el caso de mortero-ladrillo-mortero también se notan cambios significativos por el uso del ladrillo, lo cual dice que el usar ladrillo en los muros es

una buena estrategia para asilar los muros en primera instancia. En esta sección se definirá gráfica y textualmente lo que representan el factor de amortiguamiento y el tiempo de retraso, los cuales más adelante en este estudio serán variables de interés al estudiar comportamiento térmico de muros.

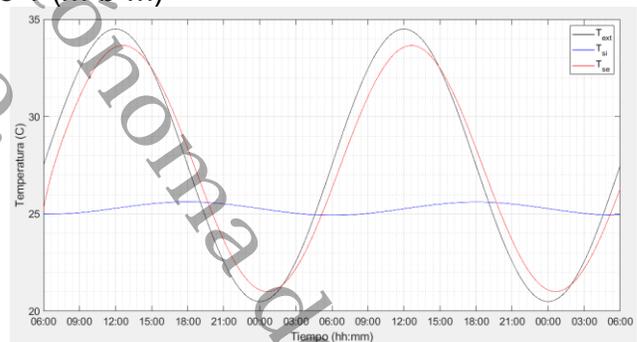
A continuación, se muestran los comportamientos de las temperaturas en estado transitorio para las configuraciones de block, ladrillo y yeso (como dos configuraciones especiales) para los tiempos de simulación corridos.



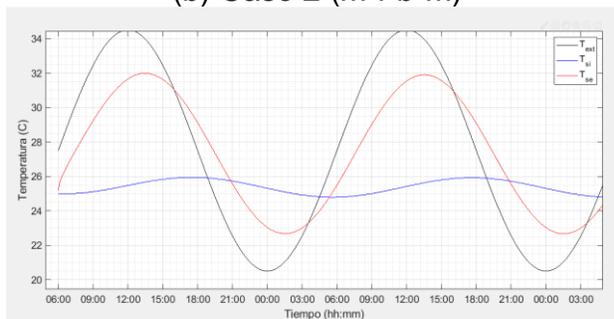
(a) Caso 1 (m-b-m)



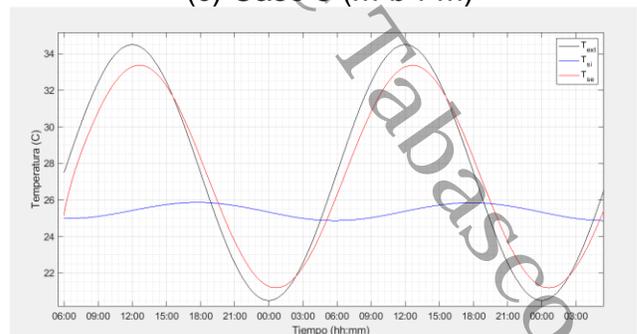
(b) Caso 2 (m-f-b-m)



(c) Caso 3 (m-b-f-m)



(d) Caso 4 (m-e-b-m)



(e) Caso 5 (m-b-e-m)

Figura 4. 4 Comportamiento transitorio de las temperaturas para las superficies del muro de block y el ambiente exterior, a) Caso 1, b) Caso 2, c) Caso 3, d) Caso 4 y e) Caso 5.

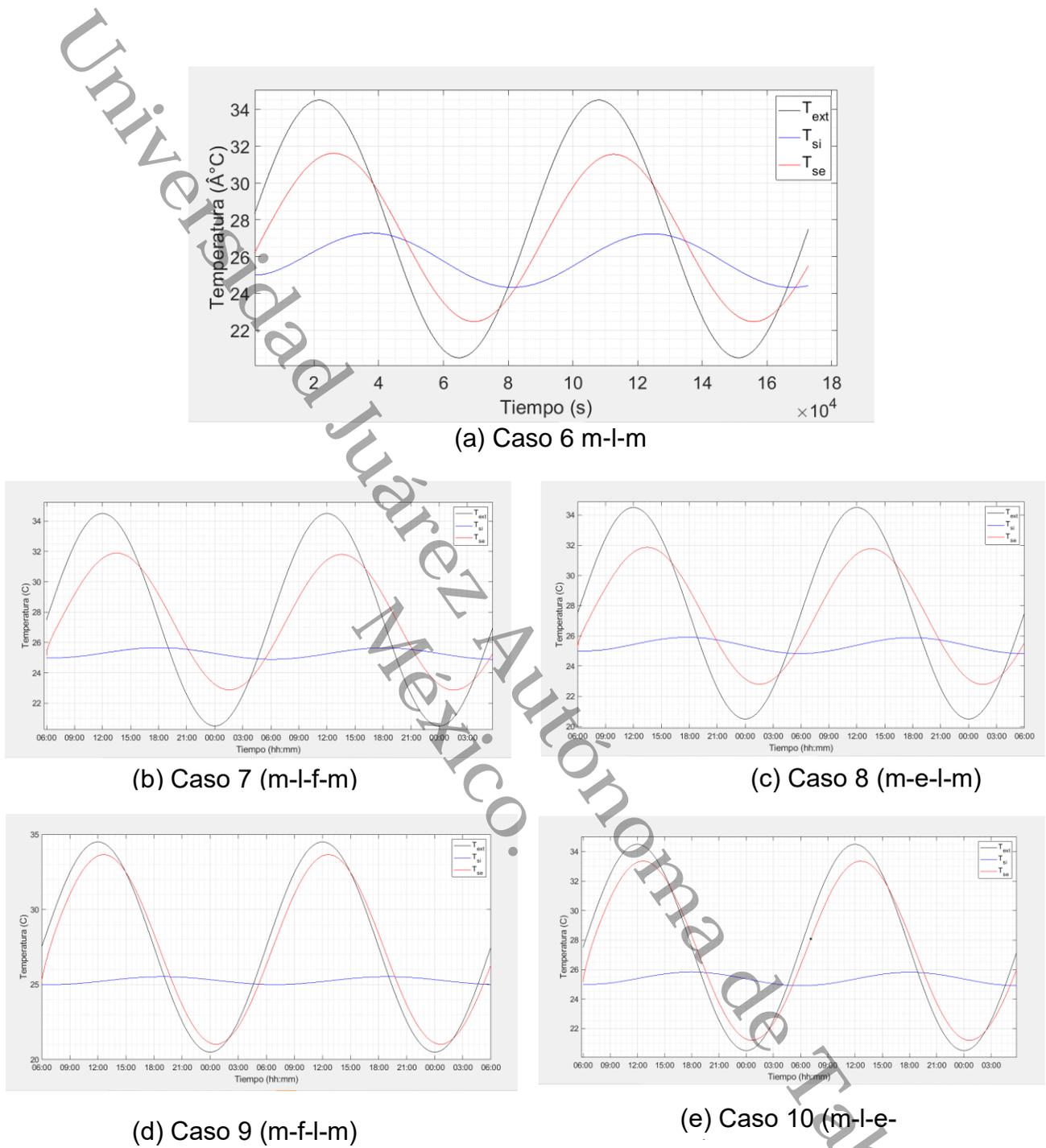
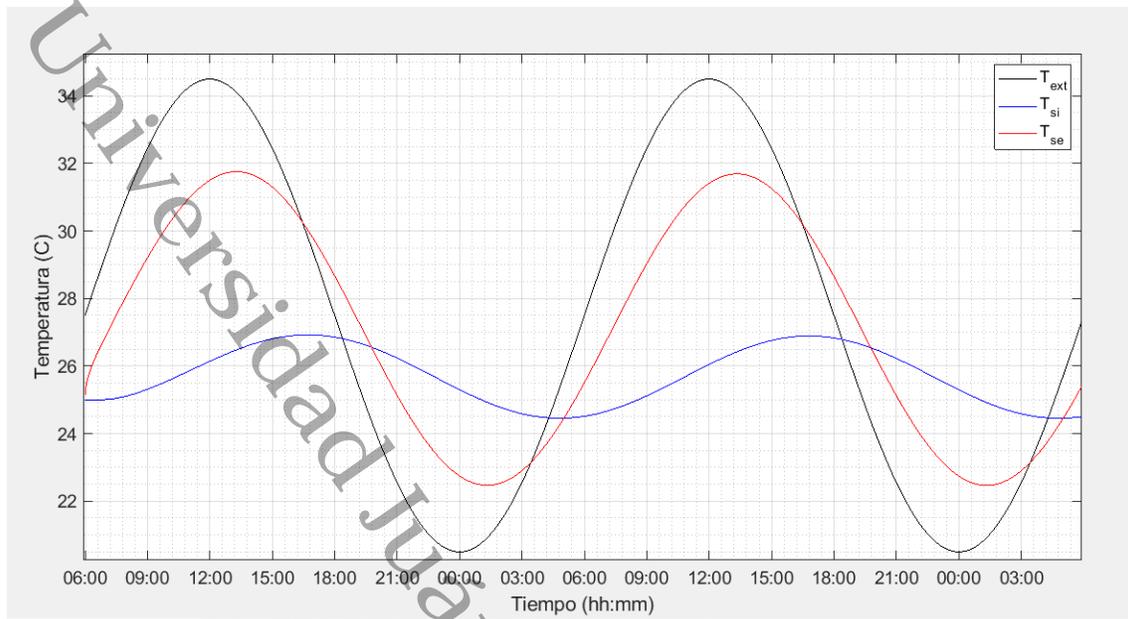
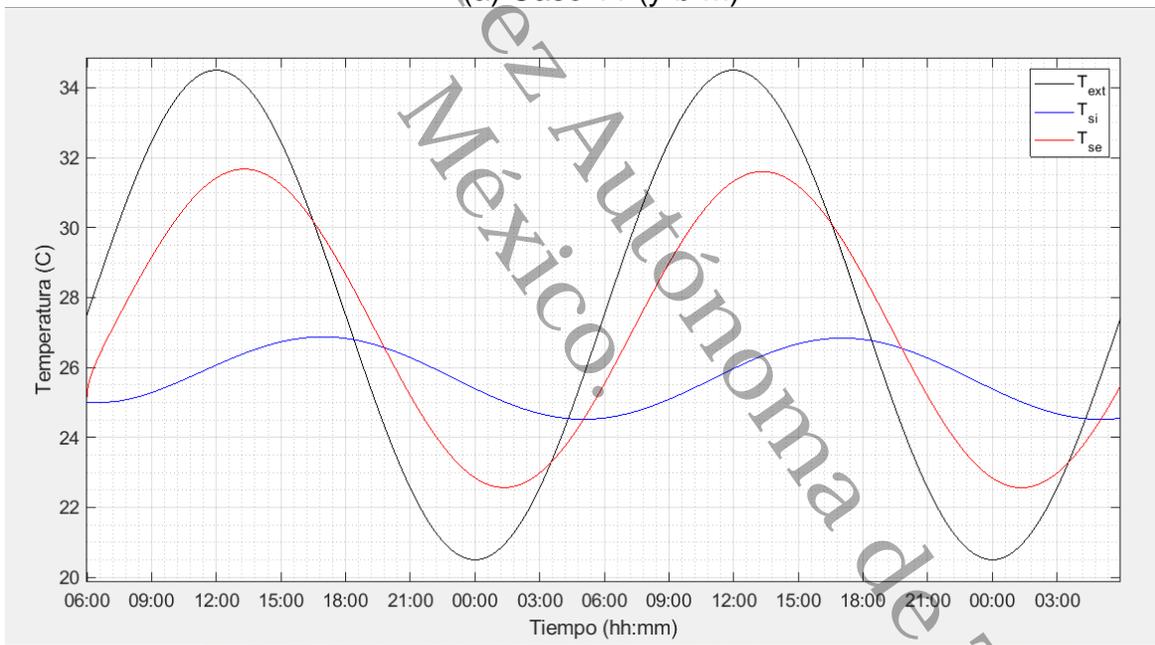


Figura 4. 5 Comportamiento de la temperatura para el muro de ladrillo, a) Caso 6, b) Caso 7, c) Caso 8, d) Caso 9 y e) Caso 10.



(a) Caso 11 (y-b-m)



(b) Caso 12 (y-l-m)

Figura 4. 6 Comportamiento de la temperatura para el muro mortero-block-yeso (Caso 11) y Mortero-Ladrillo-Yeso Caso 12.

4.2.1 Factor de amortiguamiento y tiempo de retraso

Al observar la Figura 4.7 se nota que hay plasmadas tres gráficas de temperatura vs tiempo, a manera de explicar gráficamente lo que es el factor de amortiguamiento, FA , y el tiempo de retraso, tr , se señalaron en la imagen con flechas roja y azul. Al analizar la gráfica se observa que hay una diferencia considerable entre los picos de temperatura de las gráficas antes mencionadas, esto da paso a definir que el *factor de amortiguamiento* que se entiende como el cociente de la diferencia de los valores máximos y mínimos entre dos gráficas. Para este caso, el flujo de calor periódico que se puede observar con el factor de amortiguamiento de la propagación de la temperatura representa la reducción del flujo comparado con un flujo de calor estacionario. Siguiendo con el análisis de la imagen al observar se puede ver que el tiempo de retraso gráficamente se puede definir como el desfase entre ambos comportamientos de la temperatura.

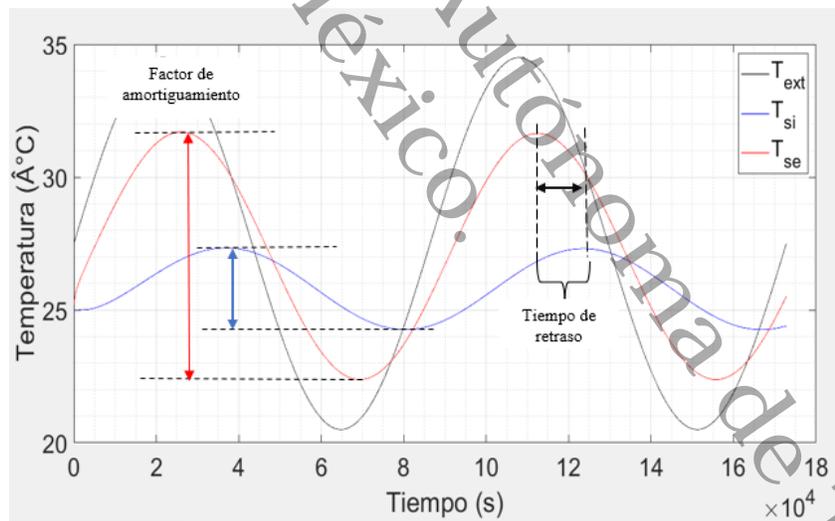


Figura 4. 7 Factor de amortiguamiento y tiempo de retraso.

Esto coincide con la definición de tiempo de retraso que es definido por Ordóñez, (2018) como el lapso de tiempo entre los momentos en que se dan las temperaturas máximas en las superficies exteriores e interiores.

4.2 Comparativo de los casos de estudio

En la Tabla 4.1 se presenta un comparativo de las temperaturas, factor de amortiguamiento, tiempo de retraso, y energía ganada a través de las diferentes configuraciones de muros que se analizaron. En esta tabla se puede observar que como se mencionó en las secciones anteriores el muro de ladrillo es el que mejor comportamiento térmico presenta, particularmente el **Caso 7** en donde el aislante (foamular) se localiza en la sección exterior. Mientras que, el muro con peor comportamiento térmico fue el **Caso 1**, que consta de tres capas: mortero-block-mortero, algo que se esperaba en este estudio era que los muros en los que el recubrimiento interno fue yeso tuvieran un desempeño térmico que lo hiciera diferenciar del resto de los muros que no contaban con algún tipo de aislante, sin embargo, el desempeño térmico fue bastante parecido a los modelos donde no se usó ningún tipo de aislante como recubrimiento.

La ganancia de energía es la variable más representativa en este estudio, tenemos otras variables de interés, en secciones anteriores se habló de lo que representan el **tr** (tiempo de retraso) y el **FA** (factor de amortiguamiento) que son variables que nos indican que tan cómoda llega a ser una habitación respecto al tiempo en el que se puede estar en ella, como se mencionó anteriormente dos casos sobresalen en este estudio, **Caso 1** y **Caso 7**. Estos casos son comparando en primera instancia como se puede ver en la Tabla 4.1, para el **Caso 1** se tiene un $FA= 0.18571$, un $tr = 2:15$ h y una ganancia de 0.37879 kW-h/día·m², mientras que, para el **Caso 7** se obtuvo un $FA=0.017798$, un $tr= 4:57$ y una ganancia de 0.091537 kW-h/día·m². Al comparar los factores de amortiguamiento se tiene que para el **Caso 7** fue el menor valor obtenido, por esta razón se sabe que el flujo de calor es mucho menor que el de los demás y más aún si se compara con el **Caso 1**. También, vale la pena mencionar que el **tr** del **Caso 7** es prácticamente el doble, si se compara con el **Caso 1**, lo que nos dice que el tiempo de comodidad en la habitación es mucho mayor, y finalmente se tiene que la ganancia de calor del **Caso 1** es mucho mayor que la del **Caso 7**. Por lo que, quiere decir que este muro deja pasar mucho más calor que el muro del **Caso 7** y todos los demás, esto se traduce en un mayor gasto

de energía a la hora de buscar hacer cómoda la habitación con el uso de sistemas de acondicionamiento de aire.

Los valores de energía ganada durante el día para las diferentes configuraciones permiten observar el comportamiento térmico de los muros compuestos. La técnica de MVF aplicada en este análisis revela que los coeficientes de difusión varían significativamente según la composición del muro. Por ejemplo, los valores de energía ganada son más altos en el caso del muro con aislamiento (**Caso 1**) en comparación con otros casos, como el **Caso 7**, lo que indica una mayor transferencia de calor en este último. El FA, que mide la capacidad del material para suavizar las fluctuaciones térmicas, muestra que configuraciones como el Caso 2 y el Caso 6 presentan valores bajos (0.015836 y 0.017798, respectivamente), indicando una alta capacidad de aislamiento, lo cual es ideal en climas donde la temperatura varía drásticamente.

Tabla 4. 1 Comparativo de las variables y parámetros de los casos de estudio.

Caso	Te (°C)		Ti (°C)		FA	tr	Energía ganada durante el día	
	Max	Min	Max	Min			(J/día)	(kW-h/día·m ²)
1 mbm	31.700	28.680	27.340	24.26	0.186	0.002	1363627.738	0.379
2 mbfm	33.660	21.010	25.620	24.930	0.016	0.166	392134.274	0.109
3 mfbm	32.020	22.750	25.680	24.870	0.030	0.003	430380.525	0.120
4 mbem	33.380	21.190	25.870	24.870	0.027	0.003	547057.170	0.152
5 mebm	31.980	22.670	25.930	24.790	0.046	0.147	588569.836	0.163
6 mlm	31.620	22.470	27.280	24.320	0.170	0.002	1353683.471	0.376
7 mlfm	33.650	21.020	25.520	25.000	0.018	0.206	329534.374	0.092
8 melm	31.860	22.800	25.910	24.830	0.040	0.003	570302.110	0.158
9 mflm	31.890	22.880	25.660	24.890	0.026	4.000	416978.499	0.116
10 mlem	33.370	21.200	25.830	24.900	0.022	0.003	526402.622	0.146
11 ybm	31.760	22.470	26.930	24.460	0.131	0.002	1163284.926	0.323
12 ylm	31.570	22.670	26.870	24.520	0.118	0.002	1145558.975	0.318

4.3 Comportamiento de los muros con diferentes condiciones climáticas

Considerando los casos de los muros con funcionamiento extremos, **Caso 1** y **Caso 7**, se realizó un comparativo para determinar su comportamiento energético cuando se cambian las condiciones climáticas. En la Tabla 4.2 se presentan las condiciones climáticas consideradas, según la CONAGUA (2022). Estas condiciones fueron seleccionadas buscando climas representativos de la República Mexicana.

Tabla 4. 2 Condiciones ambientales de los estados para analizar.

Estado	Clima	ΔT (°C)*	T promedio (°C) *
Tabasco	Cálido húmedo	14	27.5
Ciudad Juárez	Desértico (muy seco)	17.5	18.7
Hidalgo	Cálido húmedo	7.4	19.0
Ciudad de México	Cálido subhúmedo	4.2	18.3

*De acuerdo con: CONAGUA (2022)

En la Tabla 4.3 se presentan los comportamientos térmicos del **Caso 1** y **Caso 7** para diferentes condiciones climáticas. Como se mencionó en la sección anterior los muros del **Caso 1** y **Caso 7** son el peor y mejor en desempeño térmico. Por lo cual, se tomaron las variables climatológicas de estas ciudades para simular el comportamiento térmico de estos dos muros para los climas más representativos en México, y se encontró que para todos los casos el **Caso 1** contó con el mayor *FA* (si se compara con el **Caso 7**). Por ello, se deduce que tanto para climas calurosos como el del estado de Tabasco y climas más fríos el **Caso 1** fue la opción menos viable térmicamente pues en el caso de clima cálido deja fluir mucho calor y para climas fríos este no es capaz de mantener el calor. Por lo que, una habitación construida de este material no es adecuada térmicamente. Si ahora nos centramos en el **Caso 7** este tuvo mejor desempeño, dado que los climas evaluados son un poco más fríos que el clima en Tabasco, el modelo de muro del **Caso 7** para todos los casos demostró que pierde menos cantidad de calor, lo que se traduce en que es capaz de mantener la habitación más cómoda (no se enfría tan rápido) por más

tiempo. Ahora bien, cabe mencionar que el mejor desempeño para el muro del **Caso 7** considerando otros climas se dio en Ciudad Juárez, en donde su pérdida de calor fue de $0.0054542 \text{ kW-h/día}\cdot\text{m}^2$, contrastantemente el **Caso 1** tuvo su peor desempeño en otro tipo de clima para la ciudad de México en donde perdió $0.30619 \text{ kW-h/día}\cdot\text{m}^2$. Analizados estos resultados se ve que es importante tomar en cuenta las condiciones climatológicas del lugar donde se construye para así poder seleccionar los materiales que ofrezcan un mejor costo beneficio respecto al aprovechamiento de la energía.

Tabla 4. 3 Comportamiento térmico del Caso 1 y Caso 6 para diferentes condiciones climáticas.

Estado	Caso	FA	tr	Energía ganada durante el día (kW-h/día·m ²)
Tabasco	1	0.186	02:14:03	0.792
	6	0.017	04:54.6	0.192
Ciudad Juárez	1	0.205	01:36.3	-0.058
	6	0.016	02:58.3	-0.005
Hidalgo	1	0.226	21:03	-0.212
	6	0.032	0	-0.045
Ciudad de México	1	0.278	0	-0.306
	6	0.066	0	-0.067

Analizado lo anterior se pudo notar que el desempeño de estos materiales si bien fue bueno para el **Caso 7**, es importante considerar que la temperatura de confort al interior para localidades con climas cálidos, es decir, que su temperatura media está sobre los 25°C , por lo que, es conveniente establecer como condición de confort interior 25°C . Sin embargo, para lugares que resultan ser más fríos, en los cuales la temperatura media se encuentra por debajo de los 25°C se pudiese establecer como condición de confort los 20°C , tomando en cuenta que la sensación de confort térmico se encuentra en los niveles de $20\text{-}25^{\circ}\text{C}$.

Los resultados comparativos entre los climas y las configuraciones de los muros revelan que la ubicación del material aislante tiene un impacto significativo en el rendimiento térmico. Por ejemplo, en climas cálidos representados por **T_e (temperatura externa)** de 33.65 °C, el muro del **Caso 7** posee un bajo FA y una baja energía ganada (329534.3744 J/día), lo cual, demuestra que los aislantes ubicados en la capa externa son más efectivos para mitigar el calor en zonas cálidas, mientras que otras configuraciones como **Caso 1**, a pesar de tener una temperatura externa menor, acumulan más calor, lo que no resulta tan favorable en zonas cálidas (Tiwari et al., 2016).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1 Conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros

En este trabajo de investigación se analizó mediante simulación el comportamiento térmico y la ganancia de calor en doce configuraciones de muros multicapa contruidos con los materiales más usados en la región del estado de Tabasco. También, se comparó el desempeño de estos muros en los climas más representativos de México y se analizó de igual manera el desempeño térmico de estos, una vez obtenido resultados, se puede concluir que:

- Al simular los doce casos se encontraron dos casos de gran interés, el caso con peor desempeño térmico que fue el muro de mortero-block-mortero y el de mejor desempeño térmico que fue el de mortero-ladrillo-foamular-mortero. La ganancia de calor para ambos casos fue de $0.39898 \text{ KW-h/día}\cdot\text{m}^2$ y de $0.091537 \text{ KW-h/día}\cdot\text{m}^2$ lo que muestra una eficiencia térmica 4 veces mayor si se compara el peor y mejor caso.
- El uso de materiales aislantes en la construcción de edificaciones favorece en gran manera al aprovechamiento de los recursos energéticos, en este caso se usaron como aislantes placas de poliestireno extruido o oamular (como es comúnmente conocido) y el poliestireno expandido. Cabe destacar que el de mejor desempeño como aislante fue el foamular, sin embargo, el poliestireno expandido no se queda atrás por lo que también es muy buena opción como aislante.
- El colocar el aislante en la parte exterior de la pared después del revoco permite un mayor aislamiento térmico que el colocarlo por la parte interior pues inhibe el flujo de calor de mayor forma.

- El usar yeso como recubrimiento interior no es de gran ayuda, ya que, comparado con el revoco de mortero, para los casos mortero-block-mortero, mortero-ladrillo-mortero vs yeso-block-mortero, y yeso-ladrillo-mortero apenas se obtuvo una diferencia en la ganancia de calor de 14.6 % para los muros de block y para los de ladrillo de 18 %.
- Se encontró que el hacer la evaluación con condiciones promedio no resulta representativo para condiciones de clima extremo como las que se pudieran presentar durante todo el año, por esta razón se propone que para estudios futuros este se realice con las condiciones reales de los climas extremos en la región, que pudiera ser invierno y otoño que son los días más fríos y calurosos para cada uno de los estados que se evaluaron. Esto con el fin de verificar la inercia térmica de las edificaciones en el comportamiento al interior y las ganancias de calor.

Referencias bibliográficas

- Bautista, F., Antaramian, E., Inna Dubrovina, & Ihl, T. (2019, December). *Diversidad climática y tendencias de cambio*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/255686042_Diversidad_climatica_y_tendencias_de_cambio
- Borbón, A. C., Cabanillas, R. E., & Pérez, J. B. (2010). *Determinación Experimental y Contraste Numérico de la Resistencia Térmica de un Muro de Bloques de Concreto Hueco* *Experimental Determination and Numerical Contrast of Thermal Resistance in a Hollow Concrete Block Wall*. 21(6), 163–176. <https://doi.org/10.1612/inf.tecnol.4407it.10>
- Brito-Peña, R., Villa-Enderica, D., & Zalamea-León, E. (2022). Análisis comparativo de confort térmico de vivienda unifamiliar en LSF frente a mampostería. *Ingenius: Revista de Ciencia Y Tecnología*, 28, 100–124. <https://doi.org/10.17163/ings.n28.2022.10>
- Cassandro-Cajiao, R. (2018). Muro panel térmico estructural compuesto en guadua y cartón. Modelo experimental aplicado al clima de la zona cafetera. *Revista de Arquitectura*, 20(2). <https://doi.org/10.14718/revarq.2018.20.2.2116>
- Çengel Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa : fundamentos y aplicaciones* (4ta ed.). Mcgraw-Hill.
- Cordero, B., García-Santos, A., & Overend, M. (2015). Thermal performance of novel frame-integrated unitised curtain wall. *Revista de La Construcción*, 14(1), 23–31. <https://doi.org/10.4067/s0718-915x2015000100003>
- Guadalupe Huelsz Lesbros, Gabriela Álvarez Almeida, Jorge Rojas Menéndez, & Barrios, G. (2022). Importance of taking into account the thermal mass in simulations for a non-air-conditioned house. *Ingeniería Investigación Y Tecnología*, 23(3), 1–15. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2022.23.3.024>

- Holman, J. P., De, P., De, T., Isabel Pérez Grande, PérezP., & Antonio Sánchez Sánchez. (2000). *Transferencia de calor* (8va ed.). Mcgraw Hill, D.L.
- Incoprera, F. P., & de Witt, D. P. (2009). *Fundamento De Transferencia De Calor*. Prentice Hall.
- INEGI. (2024). *Clima. Tabasco*. Inegi.org.mx.
<https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/tab/territorio/clima.aspx>
- Jose Antonio Diego-Mas. (2015). *Método Fanger - Evaluación de la sensación térmica*. Ergonautas.upv.es.
<https://www.ergonautas.upv.es/metodos/fanger/fanger-ayuda.php>
- K.J. Kontoleon, & E.A. Eumorfopoulou. (2008). The influence of wall orientation and exterior surface solar absorptivity on time lag and decrement factor in the Greek region. *Renewable Energy*, 33(7), 1652–1664.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.09.008>
- S&P. (2022, June 23). *Factores que inciden en el confort térmico humano | S&P*. S&P Sistemas de Ventilación. <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/factores-que-inciden-en-el-confort-termico-humano/>
- SEMARNAT. (2024). *Hacer más con menos energía*. Gob.mx.
<https://www.gob.mx/semarnat/articulos/hacer-mas-con-menos-energia?idiom=es>
- SEMARNAT - Atlas / Atmósfera. (2024). Semarnat.gob.mx.
https://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/atm_climas.html#:~:text=En%20el%20territorio%20nacional%20se,Fr%C3%ADo%20con%20la%20m%C3%ADnima%20superficie.
- Sergio Saldes Báez, Vasco, D. A., Díaz, A., & Saavedra, E. I. (2017). Computational study of transient conjugate conductive heat transfer in light porous building walls. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 25(4), 654–661.
<https://doi.org/10.4067/s0718-33052017000400654>

Suasaca Pelinco, L., Apaza Mamani, A., Flores Alfaro, J. A., Perca Chura, O. A., & Quinto Machaca, W. (2020). INFLUENCIA DE LAS PACAS DE AVENA EN LA TEMPERATURA Y HUMEDAD EN LAS VIVIENDAS EN ZONAS ALTOANDINAS. *INVESTIGACION & DESARROLLO*, 20(1), 215–227. <https://doi.org/10.23881/idupbo.020.1-15i>

Villa, K., César Echavarría, & Blessent, D. (2019). Muro de madera aislado con fibra de coco. *DYNA*, 86(210), 333–337. <https://www.redalyc.org/journal/496/49662789042/html/>

Gaceta oficial de la ciudad de México. (2020). NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA. In *cgservicios*. <http://cgservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/745.pdf>

Ibiblio. (2024). <https://www.ibiblio.org/pub/linux/docs/LuCaS/Presentaciones/200304curso-glisa/octave/curso-glisa-octave-html/x18.html>

Secretaria de desarrollo agrario, territorial y urbano. (2020). Criterios técnicos para una vivienda adecuada RECOMENDACIONES ESTRUCTURALES Y CONSTRUCTIVAS PARA VIVIENDA NUEVA Documento informativo. In *siesco.conavi.gob.mx*. <https://siesco.conavi.gob.mx/doc/tecnicos/recomendaciones/RECOMENDACIONES%20DE%20OBRA%20NUEVA.pdf>

Ascheri, M., & Pizarro, R. (n.d.). *Propuesta sobre la Enseñanza del Lenguaje Octave*. Retrieved March 9, 2024, from https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/19161/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Octave%20es%20un%20lenguaje%20de

Ecured. (2024). *GNU Octave - EcuRed*. Ecured.cu. https://www.ecured.cu/GNU_Octave

Versteeg. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method*, 2/e. Pearson Education India.

CONAGUA. *Temperatura Media Promedio por Entidad Federativa y Nacional 2022*.

(n.d.).

<https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Pron%C3%B3stico%20clim%C3%A1tico/Temperatura%20y%20Lluvia/TMED/2022.pdf>

Tiwari, G. N., Deo, A., Singh, V., & Tiwari, A. (2016). Energy Efficient Passive Building: A Case Study of SODHA BERS COMPLEX. *Foundations and Trends® in Renewable Energy*, 1(3), 109–183. <https://doi.org/10.1561/27000000003>

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

Anexo 7

Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional	
Título de Tesis:	Estudio de la transferencia de calor en estado transitorio de una pared compuesta con la técnica de volumen finito.
Autor(a) o autores(ras) de la Tesis:	Isaias Leyva Palma
ORCID:	0000-0003-2611-2820 ORCID del director de tesis
Resumen de la Tesis:	En este estudio se realizó un análisis comparativo entre 12 tipos distintos de muros compuestos que se pueden fabricar con materiales disponibles en el estado, esto con el fin de determinar sus coeficientes de difusión de calor mediante la técnica de volumen finito. Este análisis se hizo en estado transitorio, considerando condiciones de temperatura del estado de Tabasco, para luego analizarlas de manera comparativa e identificar el de mejor desempeño térmicamente para condiciones de temperatura de otros estados.
Palabras claves de la Tesis:	Transferencia de calor, método de volumen finito, fronteras, mecanismos de transferencia de calor, conductividad térmica, programación.
Referencias citadas:	Bautista, F., Antaramian, E., Inna Dubrovina, & Ihl, T. (2019, December). Diversidad climática y tendencias de cambio. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/255686042_Diversidad_climatica_y_tendencias_de_cambio Borbón, A. C., Cabanillas, R. E., & Pérez, J. B. (2010). Determinación Experimental y Contraste Numérico de la Resistencia Térmica de un Muro de Bloques de Concreto Hueco Experimental Determination and Numerical Contrast of Thermal Resistance in a Hollow Concrete Block Wall. 21(6), 163–176. https://doi.org/10.1612/inf.tecnol.4407it.10 Brito-Peña, R., Villa-Enderica, D., & Zalamea-León, E. (2022). Análisis comparativo de confort térmico de vivienda unifamiliar en LSF frente a mampostería. Ingenius: Revista de Ciencia Y Tecnología, 28, 100–124. https://doi.org/10.17163/ings.n28.2022.10 Cassandro-Cajiao, R. (2018). Muro panel

térmico estructural compuesto en guadua y cartón. Modelo experimental aplicado al clima de la zona cafetera. *Revista de Arquitectura*, 20(2).
<https://doi.org/10.14718/revarq.2018.20.2.2116>

Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa : fundamentos y aplicaciones* (4ta ed.). McGraw-Hill.

Cordero, B., García-Santos, A., & Overend, M. (2015). Thermal performance of novel frame-integrated unitised curtain wall. *Revista de La Construcción*, 14(1), 23–31. <https://doi.org/10.4067/s0718-915x2015000100003>

Guadalupe Huelsz Lesbros, Gabriela Álvarez Almeida, Jorge Rojas Menéndez, & Barrios, G. (2022). Importance of taking into account the thermal mass in simulations for a non-air-conditioned house. *Ingeniería Investigación Y Tecnología*, 23(3), 1–15.
<https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2022.23.3.024>

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

80

Holman, J. P., De, P., De, T., Isabel Pérez Grande, Pérez P., & Antonio Sánchez Sánchez. (2000). *Transferencia de calor* (8va ed.). McGraw Hill, D.L.

Incoprera, F. P., & de Witt, D. P. (2009). *Fundamento De Transferencia De Calor*. Prentice Hall.

INEGI. (2024). *Clima. Tabasco*. Inegi.org.mx.
<https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/tab/territorio/clima.aspx>

Jose Antonio Diego-Mas. (2015). *Método Fanger - Evaluación de la sensación térmica*. Ergonautas.upv.es.
<https://www.ergonautas.upv.es/metodos/fanger/fanger-ayuda.php>

K.J. Kontoleon, & E.A. Eumorfopoulou. (2008). The influence of wall orientation and exterior surface solar absorptivity on time lag and decrement factor in the Greek region. *Renewable Energy*, 33(7), 1652–1664.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.09.008>

S&P. (2022, June 23). Factores que inciden en el confort térmico humano | S&P. S&P Sistemas de Ventilación.
<https://www.solerpalau.com/es-es/blog/factores-que-inciden-en-el-confort-termico-humano/>

SEMARNAT. (2024). *Hacer más con menos energía*. Gob.mx.
<https://www.gob.mx/semarnat/articulos/hacer->

mas-con-menos-
energia?idiom=es
SEMARNAT - Atlas / Atmósfera. (2024).
Semarnat.gob.mx.
https://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/atm_climas.html#:~:text=En%20el%20territorio%20nacional%20se,Fr%C3%ADo%20con%20la%20m%C3%ADnima%20superficie.
Sergio Saldes Báez, Vasco, D. A., Díaz, A., & Saavedra, E. I. (2017). Computational study of transient conjugate conductive heat transfer in light porous building walls. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 25(4), 654–661.
<https://doi.org/10.4067/s0718-33052017000400654>

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

81

Suasaca Pelinco, L., Apaza Mamani, A., Flores Alfaro, J. A., Perca Chura, O. A., & Quinto Machaca, W. (2020). INFLUENCIA DE LAS PACAS DE AVENA EN LA TEMPERATURA Y HUMEDAD EN LAS VIVIENDAS EN ZONAS ALTOANDINAS. *INVESTIGACION & DESARROLLO*, 20(1), 215–227.
<https://doi.org/10.23881/idupbo.020.1-15i>

Villa, K., César Echavarría, & Blessent, D. (2019). Muro de madera aislado con fibra de coco. *DYNA*, 86(210), 333–337.
<https://www.redalyc.org/journal/496/49662789042/html/>

Gaceta oficial de la ciudad de México. (2020). **NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA.** In *cgservicios*.
<http://cgservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/745.pdf>

Ibiblio. (2024). *Ibiblio.org*.
<https://www.ibiblio.org/pub/linux/docs/LuCaS/Presentaciones/200304curso-galisa/octave/curso-galisa-octave-html/x18.html>

Secretaria de desarrollo agrario, territorial y urbano. (2020). **Criterios técnicos para una vivienda adecuada**
RECOMENDACIONES ESTRUCTURALES Y CONSTRUCTIVAS PARA VIVIENDA NUEVA
Documento informativo. In *siesco.conavi.gob.mx*.
<https://siesco.conavi.gob.mx/doc/tecnicos/recomendaciones/RECOMENDACIONES%20DE%20OBRA%20NUEVA.pdf>

Ascheri, M., & Pizarro, R. (n.d.). *Propuesta sobre la Enseñanza del Lenguaje Octave*. Retrieved March 9, 2024, from <https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10>

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

915/19161/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Octave%20es%20un%20lenguaje%20de EcuRed. (2024). GNU Octave - EcuRed. EcuRed.cu.
https://www.ecured.cu/GNU_Octave
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS
82
Versteeg. (2007). An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method, 2/e. Pearson Education India.
CONAGUA. Temperatura Media Promedio por Entidad Federativa y Nacional 2022. (n.d.).
<https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Pron%C3%B3stico%20clim%C3%A1tico/Temperatura%20y%20Lluvia/TMED/2022.pdf>
Tiwari, G. N., Deo, A., Singh, V., & Tiwari, A. (2016). Energy Efficient Passive Building: A Case Study of SODHA BERS COMPLEX. Foundations and Trends® in Renewable Energy, 1(3), 109–183.
<https://doi.org/10.1561/27000000003>