



UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
METALURGIA

**Estudio Paramétrico de un Muro Trombe con un Material de
Cambio de Fase (PCM-TW): Efecto de la Ubicación del PCM y
de los Materiales de Construcción.**

Tesis de Licenciatura
para obtener el título de:

INGENIERO QUÍMICO

Presenta

JUAN PABLO IBARRA SALAZAR

Hermosillo, Sonora enero 2023

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

UNIVERSIDAD DE SONORA

VOTOS APROBATORIOS

Hermosillo, Sonora, a 24 de febrero de 2023.

DR. PAUL ZAVALA RIVERA
JEFE DEL DEPARTAMENTO
INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA

Por medio de la presente, nos permitimos informarle que los miembros del Jurado designado para revisar la Tesis Profesional **"Estudio paramétrico de un muro trombe con un material de cambio de fase (PCM-TW): Efecto de la ubicación del PCM y de los materiales de construcción"**, presentada por:

JUAN PABLO IBARRA SALAZAR

La han revisado y cada uno de los integrantes da su **VOTO APROBATORIO** ya que cumple con los requisitos parciales para la obtención del Título de:

INGENIERO QUÍMICO

16/Feb/23
Fecha



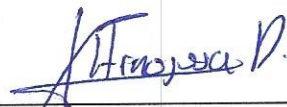
DR. IRVING OSIRIS HERNÁNDEZ LÓPEZ

16/Feb/2023



DR. ARMANDO PIÑA ORTIZ

16/Feb/2023



DR. JESÚS FERNANDO HINOJOSA PALAFOX

20/Feb/2023



DR. RAFAEL ENRIQUE CABANILLAS LÓPEZ

DEDICATORIAS

La vida es bella y una de las principales características de esta belleza es que podemos compartir y disfrutar con quienes amamos, pero también podemos ser ayudados y guiados durante nuestra vida; por esto mismo, mediante esta dedicatoria de tesis, quiero resaltar la labor de todas las personas que me acompañaron en este proyecto: familia, amigos y pareja.

Este nuevo logro es en gran parte gracias a ustedes; he logrado concluir con éxito un proyecto que en un principio podría parecer una tarea titánica e interminable.

Ustedes han sido mis pilares para seguir adelante, por eso, es para mí una gran satisfacción y un honor dedicarles todo este tiempo, esfuerzo y esmero.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor y director de tesis Dr. Irving Osiris Hernández López por darme la oportunidad de realizar este trabajo, por cada detalle y momento dedicado para aclarar cualquier tipo de duda que me surgiera, por su enorme compromiso y apoyo incondicional para la realización de este trabajo.

Al comité revisor: Dr. Armando Piña Ortiz, Dr. Jesús Fernando Hinojosa Palafox y Dr. Rafael Enrique Cabanillas López por sus comentarios y acertadas sugerencias en la revisión de este trabajo.

A la Universidad de Sonora por haberme permitido formarme como profesionista.

Al TECNМ y CENIDET por permitirme compartir una parte del trabajo de tesis en la revista semestral de Ciencia y Tecnología Aplicada.

A mi madre, Margarita. Por ser el principal motor de mis sueños, gracias a ti por confiar y creer en mí y en mis expectativas. Gracias por estar dispuesta a acompañarme en cada decisión de mi vida. Por siempre desear y anhelar siempre lo mejor para mí.

A mis abuelos, Eduardo y Blanca Irene, quienes a pesar de todo siempre encuentran la manera de ayudarme y apoyarme en la vida, siendo pilares fundamentales para mi crecimiento y desarrollo como persona.

A mis tíos Juan Carlos e Irene, porque todo su apoyo en mi vida como si fuera su hijo. Ustedes fueron una pieza fundamental para mi educación como profesionista. Gracias por todo ese amor incondicional. Espero pronto poder devolverles el mismo apoyo.

A Claudia, por todo el apoyo brindado en todo momento. Gracias por motivarme a ser cada vez mejor en todos los ámbitos posibles. Te agradezco por tantas ayudas y tantos aportes, no solo para el desarrollo de este trabajo, sino también para mi vida; eres mi inspiración y mi motivación.

A todos mis amigos, que los considero como a otra familia. Gracias por esas palabras de aliento, no sólo en para el desarrollo de este trabajo, sino en todas mis decisiones. Gracias por ayudarme a despejar mi mente cuando más saturado o decaído me encontraba. Sin duda, la vida es más llevadera gracias a ustedes: Medina, Claudia, Memo, Diana, Hannia, Pato, Tapia, Caro, Lara, Righetti, Zárate, Michel, Fernanda, Ángel, Axel, Many y al resto de amigos que forman parte de mi vida.

Por último, a todos mis maestros que fueron parte de mi educación como profesionista.

RESUMEN

Se presenta el estudio paramétrico de un sistema de calentamiento pasivo de muro trombe con un material de cambio de fase (PCM-TW). Los parámetros considerados fueron la posición del PCM (x_{PCM}) y los materiales de construcción del muro entre los cuales el PCM está encapsulado: M1-PCM-M2. Para ello, se hizo la evaluación térmica del sistema PCM-TW bajo las condiciones climáticas del día más frío en la alcaldía de Tacubaya, Ciudad de México. Para realizar la predicción numérica del sistema PCM-TW, se implementó un modelo matemático basado en el método de balances globales (BG) para la transferencia de calor en el vidrio colector y el canal de aire y se utilizó el método de volumen finito (MVF) para la difusión térmica en el muro con PCM. Los modelos se acoplaron de manera dinámica y se obtuvo un sistema de ecuaciones algebraicas que fue resuelto con un código numérico desarrollado en Fortran. Se consideró un PCM con punto de fusión de 29 °C, las posiciones $x_{PCM} = 1$ cm, 3 cm, 5 cm, 7 cm, 9 cm y los materiales de construcción adobe (A), ladrillo (B) y concreto (C). Para el estudio del efecto de x_{PCM} , se fijó una configuración de C-C. Se encontró que el mejor desempeño durante el periodo diurno se consigue cuando $x_{PCM} = 1$ cm, mientras que, para el periodo nocturno, la posición óptima es cuando $x_{PCM} = 9$ cm. Para el análisis sobre los efectos de los materiales se evaluaron 9 casos: A-A, A-B, A-C, B-A, B-B, B-C, C-A, C-B y C-C y el PCM se fijó en $x_{PCM} = 5$ cm. Se encontró que la configuración A-C presentó el mejor desempeño al momento de entregar energía a la habitación durante el periodo diurno, mientras que el mejor caso para el suministro nocturno de energía lo presentó el Caso C-B seguido con apenas una diferencia del Caso C-C de 3% (0.31 MJ/m²). Con base a los resultados obtenidos, se puede afirmar que la configuración C-C con $x_{PCM}=1$ cm es recomendable para una edificación de uso exclusivamente diurno, mientras que, si la edificación tendrá un uso nocturno, lo ideal sería utilizar la variación de C-C con $x_{PCM}=9$ cm. En el caso que se desee utilizar una habitación tanto para el periodo diurno como uso nocturno, el caso que presenta mejor desempeño es C-C con $x_{PCM}=5$ cm.

TABLA DE CONTENIDO	
RESUMEN.....	8
ÍNDICE DE FIGURAS.....	12
ÍNDICE DE TABLAS.....	14
NOMENCLATURA	15
CAPÍTULO 1:	18
INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.....	18
1.1. Introducción.	18
1.2. Revisión bibliográfica.	22
1.3. Conclusión de la revisión bibliográfica.	28
CAPÍTULO 2:	29
OBJETIVOS.....	29
2.1. Objetivo General.	29
2.2. Objetivos Específicos.....	29
2.3. Alcance.	29
CAPÍTULO 3:	30
METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN	30
3.1 Modelo físico.	30
3.2 Modelo matemático del PCM-TW.....	33
3.2.1 Determinación de la emisividad efectiva y coeficientes de transferencia de calor convectivos.	35
3.2.3- Propiedades termofísicas del aire.	38
3.3 Metodología de solución.....	39
3.3.1 Implementación del método de volumen finito en el sistema muro-PCM	39
3.3.2 Metodología del calor específico efectivo.	39
3.3.3 Residuales del proceso iterativo.....	42
3.3.4 Bajo-relajación del proceso iterativo.	43
3.3.5 Procedimiento general de solución del modelo matemático.....	44

3.4 Verificación del código numérico.....	46
3.4.1 Actividades de verificación para el método de balances globales.	46
Tabla 1. Comparación de la solución analítica contra la solución numérica.....	49
Tabla 2. Valores de temperatura para una losa de concreto en diferentes instantes de tiempo.	51
Tabla 3. Parámetros de entrada para los sistemas canal-colector-canal.....	53
Tabla 4. Valores de flujo de calor en W/m^2 para el sistema canal mediante balances globales	53
Tabla 5. Valores de flujo de calor en W/m^2 obtenido mediante balances globales.	55
3.4.2 Número de nodos de la malla computacional y paso del tiempo.....	56
CAPÍTULO 4:	57
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	57
4.1. Parámetros de Estudio.....	57
4.2. Estudio paramétrico del Sistema: Efecto de la Posición del PCM	59
Tabla 4.1. Energía almacenada y suministrada (MJ/m^2).	62
4.3. Estudio paramétrico del Sistema: Efecto de los materiales.	63
4.3.1 Configuraciones de Adobe.....	63
4.3.2 Configuraciones de Ladrillo.	64
4.3.3 Configuraciones de Concreto.....	64
Tabla 4.2. Energía almacenada y suministrada (MJ/m^2).	69
4.4. Análisis del comportamiento de la fracción líquida media.....	69
CAPÍTULO 5:	75
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
5.1. Conclusiones.....	75
5.2. Recomendaciones para trabajos futuros.....	78
CAPÍTULO 6:	79
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
Anexo A	82
Propiedades termofísicas de los materiales y hoja de datos del PCM	82
Tabla A.1. Propiedades termofísicas y radiativas.	82
Tabla A.2. Propiedades termofísicas del PCM PureTemp 29.....	82

Anexo B.....	84
Productos y Beneficios obtenidos	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Diseño del muro Trombe de Morse (1881).	20
Figura 1.2. Modos de operación del sistema muro Trombe de Morse	20
Figura 3.1. Diagrama térmico resistivo del sistema TW-PCM.....	32
Figura 3.2. Diagrama de flujo del procedimiento general	45
Figura 3.3. Descripción de la metodología realizada.....	47
Figura 3.4. Modelo físico de una losa de concreto con condiciones de Frontera de Robin no-lineal y Dirichlet.	48
Figura 3.5. Estudio de simetría para el ejercicio 1.....	50
Figura 3.6. Modelo físico de una losa de concreto con condiciones de Frontera de Dirichlet. ...	50
Figura 3.7. Comparación de la evaluación del perfil de temperatura en una losa.	52
Figura 3.8. Modelo físico del sistema canal convectivo.....	54
Figura 3.9. Modelo físico del sistema colector-canal.	55
Figura 4.1 Flujo de calor útil con variación en la posición del PCM para C-C.....	61
Figura 4.3. Flujo de calor interior con variación en la posición del PCM para C-C	61
Figura 4.4. Flujo de calor útil para configuraciones de adobe.....	66
Figura 4.5. Flujo de calor en el muro para configuraciones de adobe.	66
Figura 4.6. Flujo de calor al interior para configuraciones de adobe.	66
Figura 4.7. Flujo de calor útil para configuraciones de ladrillo.....	67
Figura 4.8. Flujo de calor en el muro para configuraciones de ladrillo.	67
Figura 4.9. Flujo de calor al interior para configuraciones de ladrillo.	67
Figura 4.10. Flujo de calor útil para configuraciones de concreto	68
Figura 4.11. Flujo de calor en el muro para configuraciones de concreto.....	68
Figura 4.12. Flujo de calor al interior para configuraciones de concreto.	68

Figura 4.13. Efecto de la configuración de materiales sobre f_{ave} : Caso C-C.	72
Figura 4.14. Efecto de la configuración de materiales sobre f_{ave} : Caso C-B.	72
Figura 4.15. Efecto de la configuración de materiales sobre f_{ave} : Caso C-A.	72
Figura 4.16. Efecto de la configuración de materiales sobre f_{ave} : Caso A-C.	73
Figura 4.17. Efecto de la configuración de materiales sobre f_{ave} : Caso A-B.	73
Figura 4.18. Efecto de la configuración de materiales sobre f_{ave} : Caso A-A.	73
Figura 4.19. Efecto de la configuración de materiales sobre f_{ave} : Caso B-A.	74
Figura 4.20. Efecto de la configuración de materiales sobre f_{ave} : Caso B-B.	74
Figura 4.21 Efecto de la configuración de materiales sobre f_{ave} : Caso B-C	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de la solución analítica contra la solución numérica.	49
Tabla 2. Valores de temperatura para una losa de concreto en diferentes instantes de tiempo. ..	51
Tabla 3. Parámetros de entrada para los sistemas canal-colector-canal.....	53
Tabla 4. Valores de flujo de calor en W/m^2 para el sistema canal mediante balances globales ..	53
Tabla 5. Valores de flujo de calor en W/m^2 obtenido mediante balances globales.	55
Tabla 4.1. Energía almacenada y suministrada (MJ/m^2).	62
Tabla 4.2. Energía almacenada y suministrada (MJ/m^2).	69
Tabla A.1. Propiedades termofísicas y radiativas.	82
Tabla A.2. Propiedades termofísicas del PCM PureTemp 29.....	82

NOMENCLATURA

H_y	Altura del canal [m]
H_w	Altura del muro [m]
$H_{x,c}$	Ancho del canal [m]
H_x	Ancho del muro
A	Área superficial del muro [m ²]
A_c	Área transversal del canal [m ²]
A_v	Área transversal de las ventilas [m ²]
C	Calor específico efectivo [J/kgK]
C_p	Calor específico a presión constante [J/kgK]
h_s	Calor latente de fusión [J/kgK]
q_c^*	Calor útil normalizado ($q_c^* = q_c A_c / A$) [W/m ²]
T	Campo de temperatura en el muro almacenador [°C]
h^{conv}	Coeficiente convectivo [W/m ² K]
g	Constante de gravedad [m/s ²]
Q	Flujo de calor [W]
q	Flujo de calor por unidad de superficie [W/m ²]
$\dot{m}$	Flujo másico [kg/m ³]
f	Fracción líquida
L	Longitud [m]
$M1$	Material de construcción de losa junto al absorbedor
$M2$	Material de construcción de losa junto a la habitación
W	Profundidad del sistema [m]
G_{sol}	Radiación solar incidente [W/m ²]
T_{amb}	Temperatura ambiente [°C]
T_{abs}	Temperatura del absorbedor [°C]
T_{sky}	Temperatura del cielo [°C]
T_{room}	Temperatura de la habitación [°C]

$T_{g,i}$	Temperatura de la superficie del vidrio al interior del canal [°C]
$T_{g,o}$	Temperatura de la superficie del vidrio expuesta al exterior [°C]
T_f	Temperatura del fluido en el canal [°C]
T_g	Temperatura del vidrio [°C]
$T_{abs,m}$	Temperatura de película del absorbedor [°C]
$T_{g,m}$	Temperatura de película del vidrio [°C]
$\bar{V}$	Velocidad media del aire a través del canal [m/s]

Números adimensionales

Gr	Número de Grashof
Nu	Número de Nusselt
Pr	Número de Prandtl
Ra	Número de Reynolds

Símbolos griegos

α^*	Absortancia
β	Coeficiente de expansión volumétrica [K ⁻¹]
λ	Conductividad térmica [W/mK]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann [W/m ² K ⁴]
ρ	Densidad [kg/m ³]
Δx	Espesor del volumen de control [m]
ε^*	Emitancia
ρ^*	Reflectancia
δx	Separación entre nodos [m]
τ^*	Transmitancia
μ	Viscosidad dinámica [m ² /s ²]

Subíndices

<i>abs</i>	Absorbedor
<i>c</i>	Canal

<i>cond</i>	Conducción
<i>conv</i>	Convección
<i>f</i>	Fluido en el canal
PCM	Material de cambio de fase
<i>wall</i>	Muro masivo
<i>rad</i>	Radiación
<i>g</i>	Vidrio

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.

1.1. Introducción.

Desde que surgieron las primeras civilizaciones, los humanos han aprendido a trabajar como sociedad para satisfacer una serie de necesidades básicas para su propia supervivencia. Estas necesidades incluyen comida, ropa, refugio de condiciones climáticas extremas y de posibles depredadores. Inicialmente, estos problemas se resolvieron cuando el hombre aprendió a modificarse y adaptarse a su entorno. A diferencia de otros seres vivos, satisfacer estas necesidades llevó a los humanos a manipular la naturaleza a través de la ciencia. Con ello, es posible diseñar, construir o incluso mejorar equipos y/o máquinas para obtener bienes y servicios que satisfagan necesidades nuevas y diferentes, no solo prioritarias. Sin embargo, atender estas necesidades actualmente está causando un crecimiento demográfico excesivo, lo que a su vez conduce a problemas mayores, como lo es la sobrepoblación a nivel mundial. Solo en 2015, se registraron 7 mil 300 millones de residentes y para 2050 se espera que sean 11 mil millones de residentes. Al mismo tiempo en el Instituto Nacional de Estadística de México y Geografía (INEGI, 2020) reportó una población de 126 millones de habitantes en 2020.

Un aumento de la población significa satisfacer la demanda de más servicios y necesidades, lo que genera problemas de alto consumo de energía y producción insostenible, incluso de los recursos naturales del planeta. De esta manera, se puede decir que la forma actual de producir bienes y servicios conlleva altos costos.

Ante cada nueva problemática la ciencia y su comunidad entra en escena proponiendo el uso de fuentes de energía que excluya la combustión de hidrocarburos. Dando inicio al uso de energías renovables como la solar fotovoltaica, solar térmica, mareomotriz, hidráulica, eólica y geotérmica. Especialmente la energía solar, es una fuente de energía limpia, y es tan abundante que, se considera una fuente inagotable de energía, esta última es la clave de su desarrollo.

En este punto, cabe mencionar que en la actualidad existen tecnologías tradicionales como equipos aire acondicionado o calentadores que ayudan a mantener el confort térmico dentro de las edificaciones. Aquí es donde más gastamos la mayor parte de nuestro tiempo. En ellos desarrollamos nuestras actividades diarias. No obstante, la exploración continua del uso y la mejora de estas condiciones de confort térmico requiere demanda continua de recursos energéticos en los edificios. Esto contradice la filosofía del Desarrollo Sustentabilidad, concepto que surgió ante la necesidad de obtener y producir bienes y servicios sin comprometer lo propio para las futuras generaciones.

Esto último se pone en contexto con el hecho de que cerca del 70% de la energía eléctrica (energía para aires acondicionados y calentadores) que se produce en México proviene de la quema de combustibles fósiles (SENER, 2019). Esto aumenta directamente los gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global. a). Así, el confort térmico de los edificios se ha convertido poco a poco en uno de los principales problemas de la sociedad contemporánea y representa el problema del control energético.

El consumo global de energía en los edificios ha aumentado un 14 % durante la última década (Najat, 2015). Por este motivo, los edificios son responsables de un tercio de las emisiones de gases de efecto invernadero. En este sentido, es necesario encontrar soluciones alternativas para reducir el consumo de energía. Por un lado, reducir la energía solar captada en la envolvente del edificio y, por otro lado, integrar sistemas solares pasivos eficientes para conseguir condiciones de confort. En particular, para fines de calefacción pasiva, el sistema de muro Trombe (TW) es una tecnología ideal.

Este sistema fue diseñado por Edward Morse a finales del siglo XIX con la principal característica de almacenar energía en forma de calor sensible. Actualmente, este sistema es usado para proporcionar calentamiento diurno mediante la recirculación de aire calentado por la exposición solar. Si el muro es lo suficientemente grueso como para almacenar energía, el calentamiento pasivo puede extenderse un par de horas después de la puesta del sol mediante la liberación de energía a través de los mecanismos de convección y radiación.

La Figura 1.1 muestra el diseño de Morse (1881), mientras que en la Figura 1.2 se presentan los distintos modos de operación para este sistema: (a) calentamiento (b) calentamiento con ventilación y (c) enfriamiento mediante la extracción del aire

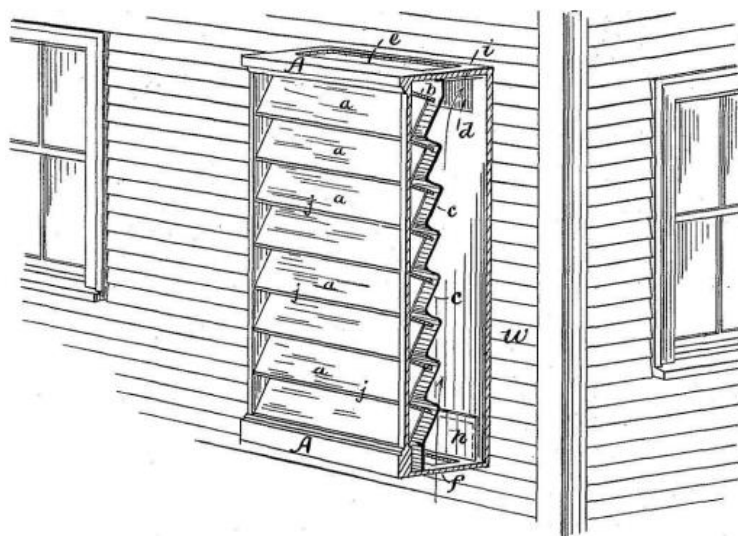
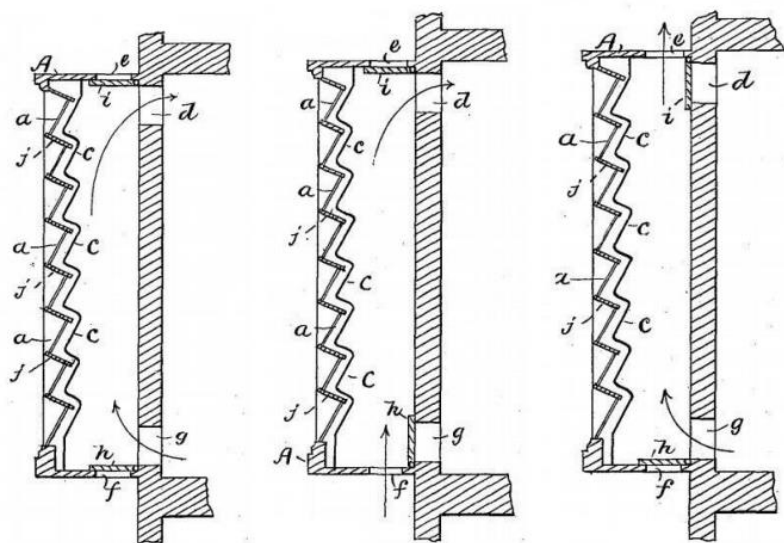


Figura 1.1. Diseño del muro Trombe de Morse (1881).



(a) Enfriamiento

(b) Cal. con ventilación

(c) Calentamiento

Figura 1.2. Modos de operación del sistema muro Trombe de Morse

Este sistema consta básicamente de 5 elementos:

- 1) Vidrio-Colector: El colector solar se compone de un vidrio semi o completamente transparente y tiene la principal función de recolectar la mayor cantidad de energía suministrada los rayos del sol y transmitirla para aumentar la temperatura del fluido.
- 2) Absorbedor: Es una superficie sólida y preferiblemente de color negro. Este se expone a la radiación solar que atraviesa el colector para convertirla en energía térmica.
- 3) Almacenador: El elemento de almacenamiento se forma por uno o más materiales capaces de almacenar grandes cantidades de calor para su posterior aprovechamiento. El absorbedor y el almacén son generalmente iguales. La diferencia entre los dos es que el absorbedor es la superficie expuesta mientras que el almacenador es el material debajo de esa superficie.
- 4) El Medio de Distribución: Método por el cual la energía recibida y/o almacenada se transfiere a la habitación. Un buen diseño solar pasivo tiene en cuenta los mecanismos de radiación, convección y conductividad térmica para este fin.
- 5) El Sistema de Control: Regula la pérdida y/o ganancia de calor en los sistemas solares pasivos de acuerdo con las condiciones en las que se opera.

Sin embargo, la incorporación de Materiales de Cambio de Fase (PCM) en el muro aumenta su capacidad de almacenamiento y por lo tanto la eficiencia térmica del sistema sin el uso de paredes gruesas.

Un material de cambio de fase ideal debe cumplir una serie de características tales como: uniformidad en la transición de fase, alta conductividad térmica, larga vida útil durante muchos ciclos de cambio de fase y temperatura de cambio de fase adecuada para el proceso.

1.2. Revisión bibliográfica.

A continuación, se proporciona una revisión bibliográfica relacionada con la investigación en TW y su implementación en la edificación. Para esta sección la literatura consultada abarca la eficiencia térmica del TW convencional y la implementación de PCM bajo diferentes condiciones climáticas:

Castellón et al. (2006) demostraron de manera experimental que es posible mejorar el confort térmico y reducir el consumo energético para el interior de un edificio utilizando PCM para condiciones reales de Puigverd de Leída, España.

Los autores construyeron nueve cubículos del tamaño de una casa; dos de hormigón, cinco de ladrillo convencional y dos de ladrillo alveolar. Se le agregó PCM en un cubículo de cada tipología.

En todos los cubículos, se realizaron experimentos de temperatura de flotación libre para determinar los beneficios de usar PCM. Para estos experimentos, los cubículos fueron equipados con una bomba de calor para controlar la temperatura interior y se monitoreó el consumo de energía. Los resultados de las pruebas de temperatura controlada a 24 ° C muestran la reducción esperada en el consumo de energía de las celdas aisladas térmicamente con respecto a la sin aislamiento de Referencia, con una disminución de alrededor del 50% en la demanda eléctrica. Los resultados de los experimentos de flotación libre muestran que los cubículos con PCM reducen las oscilaciones de temperatura diarias

Omara y Abuelnuor (2011) realizaron una revisión sobre las diferentes ventajas de integrar el PCM en un TW. Para esto, recurrieron a artículos de diferentes autores que hablan sobre cómo el TW se ve afectado por el PCM y por los diferentes materiales utilizados para la construcción del muro. Con base en la revisión, los autores encontraron áreas de oportunidades en la investigación del sistema PCM-TW. Así, emitieron las siguientes recomendaciones para trabajos futuros: 1.- considerar un análisis de evaluación del ciclo de vida de la integración de los PCM con el muro de Trombe. 2.- Utilizar el método de análisis de exergía para comprender y mejorar la eficiencia real de un sistema. 3.- Realizar investigaciones sobre tipos de PCM llamado materiales de control de humedad por cambio de fase para controlar pasivamente la temperatura y la humedad interior. 4.-

La incorporación del PCM sólido-sólido.

Rabani, et al. (2013) realizaron un estudio numérico de la transferencia de calor en una habitación con un TW para determinar la duración del calentamiento pasivo durante periodos nocturnos. El estudio se realizó para condiciones climáticas de Yazd, Irán durante el periodo más frío del año (21 de enero al 19 de febrero). Los autores consideraron diferentes materiales para el TW: concreto, ladrillo, sal hidratada y cera de parafina. La solución de las ecuaciones gobernantes fue a través del método de volumen finito, en estado transitorio.

Los autores observaron que el TW de cera parafina es más efectiva para mantener una mejor calefacción durante la noche, obteniendo una duración de calentamiento de 8 h 55 min.

Mientras que, para las paredes de concreto, ladrillo y sal hidratada se obtuvieron tiempos de 7 h 12 min, 8 h 11 min y 8 h 30 min respectivamente.

Hernández-López et al. (2016) realizaron un estudio numérico para estimar el almacenamiento y las pérdidas de energía térmica para un sistema R-TW para las ciudades de Huitzilac, Morelos y Toluca, Estado de México, utilizando los datos climáticos del año 2014. Los autores consideraron transferencia de calor conjugada: conducción en el muro masivo y en el vidrio colector, convección natural turbulenta en la habitación e intercambio radiativo en todo el sistema. La solución de las ecuaciones gobernantes fue a través del método de volumen finito. Los resultados obtenidos de la energía máxima almacenada para las dos ciudades en el día más frío fueron aproximadamente 109 MJ y para el día más cálido 70 MJ. Los autores encontraron que, las pérdidas de energía térmica a través de la pared semitransparente; para Huitzilac, representan entre el 56% y el 62 % y para la ciudad de Toluca entre el 57.3% y el 64.6%. Se concluyó que el sistema almacena energía suficiente para mantener el aire interior de la habitación con una temperatura superior a 35 °C.

Leang. et al. (2017) presentaron el rendimiento de un muro Trombe con un PCM microencapsulado (M_PCM) de 4 cm de espesor y lo compararon con un muro Trombe de concreto (C_TW) de 15 cm de espesor. Los autores utilizaron los resultados experimentales obtenidos en el caso de un TW compuesto de hormigón para validar los resultados numéricos obtenidos con un software de simulación para posteriormente utilizar los primeros resultados

numéricos y compararlos con una pared solar compuesta equipada con una pared de almacenamiento M_PCM. Los resultados indican que el M_PCM tiene una capacidad de recuperación de calor mayor al 58% comparado con el C_TW.

Quezada M. (2017) investigó el comportamiento de los materiales con cambio de fase (PCM) en los sistemas constructivos, para posteriormente elaborar modelos matemáticos y así, predecir la transferencia de calor a través de un envolvente del edificio que cuente con PCM. La resolución del problema fue mediante el uso de balances microscópicos y apoyándose con el modelo de volumen de control para resolver las ecuaciones gobernantes.

Los resultados obtenidos, muestran que las temperaturas de las paredes se reducen cuando se utiliza un PCM. La autora concluye que el modelo de volumen de control es muy preciso y recomendable, debido a que la eficiencia computacional que presenta, la flexibilidad del mismo y sobre todo, las condiciones frontera que utiliza entre el medio ambiente y las paredes interiores y exteriores.

Li S. et al. (2019) realizaron un estudio numérico del rendimiento térmico de un sistema de muro Trombe con una doble capa de material de cambio de fase (PCM-TW) con el propósito de mejorar la eficiencia térmica del sistema y mantenerlo activo durante todo el año. El estudio se realizó para las condiciones climáticas de Wuhan, China en los periodos de invierno (noviembre 1 a enero 31) y verano (junio 1 a agosto 31). Para estudiar el efecto del PCM-TW, los autores compararon sus resultados con muro Trombe convencional (C-TW). Los resultados obtenidos mostraron que, en el verano el C-TW presentó temperaturas máxima, mínima y promedio de 34.04 °C, 31.61 °C y 32.81 °C respectivamente. Mientras que para el PCM-TW las temperaturas obtenidas fueron de 30.31 °C, 28.90 °C y 29.56 °C, es decir, menores que el C-TW. Por otro lado, para el periodo de invierno, ambos sistemas proporcionaron temperaturas similares entre ellos. Sin embargo, para el PCM-TW presentó fluctuaciones de temperatura menores que al C-TW. Los autores concluyeron que el PCM-TW puede evitar el sobrecalentamiento de la habitación, además de amortiguar las fluctuaciones de temperatura y de esta manera, mejorar el confort térmico interior.

Arici et al. (2020) realizaron un estudio sobre el rendimiento térmico del PCM acoplado a un muro exterior, para las condiciones climáticas de Diyarbakir, Konya y Erzurum, Turquía. Los autores consideraron la ubicación del PCM, la temperatura de fusión y el grosor de la capa de PCM. Se construyó una pared de referencia la cual constó de cuatro capas con distintos espesores: yeso interior (20 mm), hormigón (250 mm), aislante (20 mm) y yeso exterior (8 mm); esto con el fin de obtener dos escenarios de estudio: 1) ubicar el PCM entre el aislamiento y el yeso exterior. 2) colocar PCM entre el yeso interior y el hormigón, utilizando un grosor que varía entre 1 a 20 mm de PCM para ambos casos.

Los resultados obtenidos muestran que, ubicando el PCM entre el yeso interior y el hormigón, el ahorro energético anual funciona mejor para las ciudades Diyarbakir y Konya. Por el contrario, el ahorro energético anual de Erzurum es mayor cuando se coloca PCM entre el aislamiento y el yeso exterior.

Las temperaturas de fusión óptimas anuales del PCM para las ciudades de Diyarbakir, Konya y Erzurum son: 20 °C, 25 °C y 16 °C respectivamente. Los autores concluyen que, la colocación de PCM entre el aislamiento y el yeso exterior proporciona el máximo ahorro de energía en condiciones de calefacción. Bajo enfriamiento condiciones, el máximo ahorro energético se obtiene colocando PCM entre el yeso interior y el hormigón.

Leang et al. (2020) desarrollaron un modelo numérico para la simulación del rendimiento térmico de una pared solar compuesta con un PCM microencapsulado. Los autores utilizaron varios elementos básicos existentes de la biblioteca del software “building”. Por otra parte, diseñaron un nuevo elemento para modelar las transferencias de calor del PCM-TW, utilizando el método de entalpía. Los autores utilizaron el modelo para comparar el rendimiento de dos paredes solares compuestas, una con almacenamiento de calor sensible y la otra basada en almacenamiento de calor latente. Para la validación del modelo, los autores construyeron un muro a pequeña escala, el cual se expuso a condiciones climáticas reales. Los resultados obtenidos revelan que la diferencia entre las mediciones experimentales y los resultados numéricos es inferior al 10% tanto para el flujo de calor como para la energía liberada por la pared solar. Se demostró que el almacenamiento de calor latente no mejora la eficiencia de la pared solar.

Andreozzi et al. (2021) estudiaron numéricamente un PCM asistido por energía solar utilizado para el almacenamiento de energía ORC. Los autores resolvieron las ecuaciones gobernantes con el método de capacidad calorífica aparente para la ecuación de energía utiliza una función de amortiguación en la ecuación de momento para resolver el campo de velocidad en todas partes, con valores insignificantes cuando PCM está en la fase sólida, que incluye efectos de convección natural mediante el término de aproximación de Boussinesq en la ecuación del momento. Se investigaron cuatro condiciones de contorno diferentes en la interfaz PCM / ORC que se refieren a temperatura uniforme y constante, flujo de calor o flujo de calor convectivo, o condiciones adiabáticas. utiliza una función de amortiguación en la ecuación de momento para resolver el campo de velocidad en todas partes, con valores insignificantes cuando PCM está en la fase sólida.

Los autores concluyen que los campos de velocidad confirman que cuanto mayor es la transferencia de calor en el límite derecho, menores son las temperaturas y, en consecuencia, la energía acumulada obtenida.

Duan et al. (2021) realizaron un estudio teórico de un PCM-TW para determinar el punto de fusión y el espesor óptimos del PCM en el TW bajo las condiciones climáticas de tres ciudades de China: Jiuquan, Beijing y Sheyang. Se consideró que el muro almacenador es completamente de PCM. Haciendo uso del modelo “espacio estado”, resolvieron de manera numérica la ecuación de conducción de calor en estado transitorio. Los autores consideraron PCM's con temperaturas de fusión desde 15 °C hasta 25 °C con intervalos de 2 °C, y para el espesor de PCM desde 1 cm hasta 11 cm con intervalos de 2 cm. De los resultados obtenidos se observó que la combinación óptima de temperaturas de fusión y de espesor para las ciudades de Jiuquan y Beijing es de 23 °C y 5 cm. Mientras que para la ciudad de Sheyang fue de 21 °C y 5 cm.

Hernández-López et al. (2021) presentaron una evaluación de un sistema de muro Trombe (TW) para la calefacción en una ciudad mexicana con un clima dentro de la clasificación de Köppen de *Cwa-Cwb*. Para predecir el comportamiento térmico del sistema, los autores desarrollaron un código computacional basado en el método de balance global en el que se alimentó con los datos meteorológicos del día más frío y el más cálido de cada mes.

Se encontró que el sistema TW suministra una energía anual total de $26.87 \text{ kWh} / \text{m}^2$, presentando una mayor cantidad de oferta durante otoño e invierno con un máximo de 2.19 y $0.67 \text{ kWh} / \text{m}^2$ correspondiente al día más frío de diciembre y al día más cálido de febrero. Finalmente, los autores recomiendan que, durante los meses de primavera y verano, se recomienda dispensar el sistema TW, ya que no es capaz de contrarrestar las pérdidas térmicas al ambiente y podría presentar resultados pocos favorables.

Licholai et al. (2021) determinaron la influencia de los parámetros de acristalamiento en el rendimiento térmico del muro Trombe que contiene un material de cambio de fase (PCM). Los autores utilizaron tres acristalamientos (G1, G2 y G3) con diferente coeficiente de transferencia de calor y factor de transmitancia de energía solar. Las pruebas se llevaron a cabo en condiciones de laboratorio en una cámara de simulación a pequeña escala. Los resultados obtenidos sugieren que la barrera más eficaz para los "días soleados" es la B1 barrera a la temperatura exterior $T_e = 0.0 \text{ }^\circ\text{C}$ y $T_e = -10.0 \text{ }^\circ\text{C}$. La barrera B2 es adecuada para días alternos en el ciclo: "día soleado", "día nublado", etc. Sin embargo, la barrera B3 es el más ventajoso en periodos con predominio de "días nublados". Por último, los autores concluyen que la consistencia de los resultados obtenidos en la primera y segunda simulaciones numéricas confirmó la corrección de utilizar la placa calefactora como fuente de calor en la pared de almacenamiento térmico resultante de la absorción de la radiación solar.

Zhu et al. (2021) investigaron el rendimiento térmico y energético de una sala Trombe con PCM para las condiciones climáticas de verano cálido e invierno frío en Wuhan, China. Los autores analizaron seis factores clave que afectan al rendimiento térmico y energético del sistema PCM-TW, los cuales fueron: el grosor del canal de aire, la longitud de la protección solar externa, el grosor de la pared de almacenamiento térmico, el área de los respiraderos, la temperatura de fusión de la capa de PCM de menor temperatura y la capa de PCM de mayor temperatura. Los resultados obtenidos muestran que la combinación óptima de los seis factores clave son: 0.05 m , 0.78 m , 0.68 m , 0.6 m^2 , $16.5 \text{ }^\circ\text{C}$ y $27.75 \text{ }^\circ\text{C}$ respectivamente. La carga anual de refrigeración fue de 754.72 kW/h , la carga anual de calefacción fue de 477.83 kW/h , y la carga total anual fue de 1232.54 kW/h . Los autores concluyen que el efecto de ahorro de energía fue evidente después de que se optimizaran los seis factores clave.

1.3. Conclusión de la revisión bibliográfica.

De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada, se pueden distinguir diferentes estudios teóricos, experimentales y teóricos-experimentales realizados para diferentes tipos de muro Trombe y bajo diferentes condiciones climáticas en conjunto. Se revisaron aspectos como el tipo de material, muros de PCM, el grosor del canal de aire y una doble capa de PCM en el TW, entre otros. Sin embargo, el desempeño de los materiales que cambian de fase es una característica esencial de este trabajo. Según la documentación, el uso de PCM integrado en TW mejora el rendimiento térmico. Sin embargo, a pesar de los estudios sobre el desempeño de estos sistemas, no se han reportado resultados para condiciones climáticas típicas en México utilizando el sistema PCM-TW, su posición dentro del muro y los materiales de este. Además, existe el problema de la selección de PCM; Debe cumplir ciertos requisitos para funcionar correctamente. En este sentido, el modelo numérico ofrece una solución a esta tarea, ya que permitirá la evaluación económica de estos sistemas (el desarrollo de su código) y permitirá el análisis del impacto y ubicación de cada PCM.

CAPÍTULO 2:

OBJETIVOS.

2. Objetivos.

2.1. Objetivo General.

Realizar un estudio numérico de la transferencia de calor en un sistema de muro Trombe con un material de cambio de fase para determinar los parámetros que producen el desempeño térmico óptimo del sistema.

2.2. Objetivos Específicos.

- Modelar la transferencia de calor entre el sistema colector-canal mediante el método de balances globales.
- Comprender la técnica de volumen finito para resolver la transferencia de calor por difusión en el muro almacenador.
- Resolver de manera numérica la transferencia de calor en un sistema PCM-TW para determinar su desempeño térmico.
- Realizar un estudio paramétrico del sistema PCM-TW para obtener la posición, la configuración de los materiales de construcción y el punto de fusión del PCM que permiten obtener el desempeño óptimo del sistema.

2.3. Alcance.

Implementar un código numérico para predecir el desempeño térmico de un sistema de calentamiento pasivo de muro Trombe con un material de cambio de fase. Se resolverá la ecuación de la conservación de la energía en estado transitorio utilizando datos climáticos reales de una ciudad mexicana con clima templado.

CAPÍTULO 3:

METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

3.1 Modelo físico.

A la hora de estudiar un problema de la naturaleza o nuestro entorno, uno de los elementos clave para una mejor comprensión del fenómeno es el uso de modelos físicos. Esto nos da una representación simple del sistema en cuestión, en el que ocurren uno o más fenómenos físicos con el objetivo de recrearlos lo más cerca posible de la realidad a partir de las consideraciones bien establecidas de la investigación.

Las consideraciones para la realización del modelo del muro Trombe con PCM se enlistan a continuación:

1. El aire se comporta como gas ideal, se considera isotrópico y homogéneo, fluido newtoniano e incompresible.
2. La transferencia de calor en el PCM ocurre únicamente por difusión. Se desprecian efectos convectivos.
3. El fenómeno ocurre en estado transitorio.
4. El fluido se mueve a bajas velocidades por lo que la disipación viscosa es despreciable.
5. El fluido en la cavidad se considera aire seco y radiativamente no participante
6. Transferencia de calor por conducción en la pared semitransparente, por convección natural en el fluido, por conducción en el muro con PCM y por radiación térmica en las superficies involucrada.

A continuación, se describe el sistema de muro Trombe-PCM constituido por los siguientes elementos:

- 1) Una pared semitransparente (colector) de espesor Δx .
- 2) Un muro masivo con PCM encapsulado por dos losas de diferente material, de espesor δx cada una.

3) Un canal de aire formado por la pared semitransparente y el muro masivo.

4) Un canal con un ancho de $H_{x,c}$. El sistema cuenta con ventilas en la parte superior e inferior que funcionan para establecer un lazo convectivo entre el canal y la habitación. El sistema tiene una profundidad W y una altura H_y . El sistema PCM-TW se considera con una orientación hacia el sur con el fin de garantizar la mayor incidencia de radiación solar sobre el absorbedor a lo largo del día.

El proceso comienza cuando la radiación solar incide sobre el vidrio, debido a las propiedades ópticas de la pared semitransparente, parte de la energía se refleja hacia el exterior y otra parte es absorbida y convertida en energía sensible, el resto se transmite y la radiación se emite a través de ondas electromagnéticas cortas. Éstas presentan una mayor cantidad de energía, por lo que pueden atravesar la pared semitransparente, pero su efecto térmico sobre el fluido del canal es nulo al ser considerados como fluidos no participantes.

Posteriormente, la energía externa incide luego en el absorbedor, donde se convierte en energía térmica, que se transmite por difusión al muro masivo, donde tanto el PCM como dicho material de pared actúan como contenedor. Este almacenamiento de energía provoca un aumento de la temperatura del muro, del mismo modo que la energía absorbida por la pared semitransparente aumenta el calor sensible, para ambas partes este aumento se percibe como un crecimiento en su valor de temperatura, este aumento provoca una emisión de radiación de estas zonas en el infrarrojo lejano comprendida aproximadamente de 50 a 1000 μm .

Esta energía queda contenida en la sección del canal debido a que el infrarrojo lejano la pared semitransparente actúa como un medio opaco. Esto genera un efecto invernadero haciendo que el aire en el canal eleve su temperatura, donde este aumento provoca que la densidad del fluido disminuya a lo largo de todo el canal creando así un efecto chimenea mientras que en la parte inferior del canal se promueve un efecto de succión a través de la ventila inferior. De esta manera, el sistema de muro Trombe-PCM suministra de manera pasiva energía a la habitación ayudando a establecer una condición de confort térmico.

En la Figura 3.1 se puede apreciar que la pared semitransparente considera tanto pérdidas convectivas como radiativas hacia el medio exterior. Posteriormente, en la sección del canal se observa la transferencia de calor por parte del fluido y un intercambio radiativo superficial entre el absorbedor y la pared semitransparente. Finalmente, pero no menos importante el muro masivo con PCM considera la transferencia de calor por conducción unidimensional, así como pérdidas convectivas y radiativas hacia el interior de la habitación.

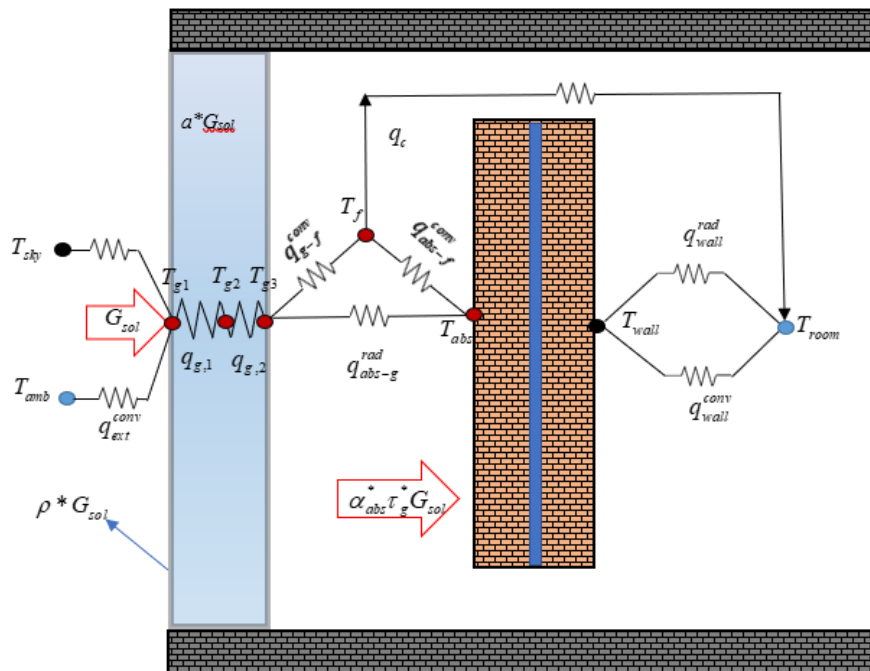


Figura 3.1. Diagrama térmico resistivo del sistema TW-PCM.

3.2 Modelo matemático del PCM-TW

El sistema TW está compuesto por distintos componentes, se dividió en dos secciones principales con el fin de reducir la complejidad del modelo matemático. Lo anterior se puede observar en la Figura 3.1 la cual se compone por el vidrio y el canal, donde se agrupa la pared semitransparente, el fluido y el canal. Aquí ocurren tres mecanismos de transferencia de calor: conducción térmica en el vidrio, convección en el fluido y radiación térmica entre las superficies sólidas. La resolución de las ecuaciones gobernantes del sistema fue con el método de balances globales de energía (BG). Por otra parte, el segundo sistema corresponde al muro masivo con PCM. En este caso se lleva a cabo el fenómeno de difusión térmica a través de todo el componente. Para modelar la transferencia de calor en el sistema de vidrio-canal se decidió utilizar 5 nodos con la finalidad conocer lo que sucede en todo el sistema de muro Trombe-PCM.

Sistema vidrio-canal:

Se emplean balances de energía en cada uno de los nodos del sistema vidrio-canal y después de realizar el procedimiento algebraico se obtienen ecuaciones para cada uno de ellos. El procedimiento detallado para la obtención del modelo matemático se presenta en el trabajo de Aparicio-Mercado (2021).

Para el Nodo g_o ,

$$\left(\frac{\lambda}{\delta x_{12}} + h_{ext} \right) T_{go} - \left(\frac{\lambda}{\delta x_{12}} \right) T_g = h_{ext}^{conv} T_{amb} - \varepsilon \sigma (T_{go}^4 - T_{sky}^4) + \alpha_g G_{sol} \quad (3.1)$$

Para Nodo g :

$$\left(\frac{\lambda_g}{\delta x_{12}} + \frac{\lambda_g}{\delta x_{23}} + \frac{\rho_g C_{p,g} \Delta x_g}{\Delta t} \right) T_g - \left(\frac{\lambda_g}{\delta x_{12}} \right) T_{go} - \left(\frac{\lambda_g}{\delta x_{23}} \right) T_{gi} = \frac{\rho_g C_{p,g} \Delta x_g T_g^\circ}{\Delta t} \quad (3.2)$$

Para Nodo g_i :

$$\left(\frac{\lambda_g}{\delta x_{23}} + h_{g-f} \right) T_{gi} - \frac{\lambda_g}{\delta x_{23}} T_{go} - h_{g-f} T_f = \varepsilon \sigma (T_{abs}^4 - T_{gi}^4) \quad (3.3)$$

Se obtuvieron las siguientes ecuaciones para el nodo del fluido f :

Para Nodo f :

$$\left(h_{g-f} + h_{abs-f} + h_f + \frac{\rho_f C_{p,f} \Delta x_f}{\Delta t} \right) T_f - h_{g-f} T_{gi} - h_{abs-f} T_{abs} = \frac{\rho_f C_{p,f} \Delta x_f T_f^\circ}{\Delta t} + h_f T_{in} \quad (3.4)$$

Para Nodo Abs :

$$(h_{abs-f}) T_{abs} - h_{abs-f} T_f = -\varepsilon \sigma (T_{abs}^4 - T_{gi}^4) + \alpha_{abs} \tau_g G_{sol} - q_{abs}^{cond} \quad (3.5)$$

A continuación, este modelo está representado por la ecuación de difusión de calor, donde:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.6)$$

Donde C es $C = C_p + h_{ls} / \Delta T_{ls}$ éste es el calor específico efectivo. El cual representa la suma de contribuciones de la energía sensible y latente por unidad de masa y por unidad de temperatura.

Las condiciones de frontera para el sistema del muro masivo son las siguientes:

1) En $x = x_w = L_g + L_c, t > 0$:

$$\alpha_{abs}^* \tau_g^* G_{sol} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_w} + h_{abs-f}^{conv} [T(x_w) - T_f] + \varepsilon_{abs-g}^* \sigma [T^4(x_w) - T_{g,3}^4] \quad (3.7)$$

2) En $x = x_r = L_g + L_c + L_w, t > 0$:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_r} = h_{w-room}^{conv} [T(x_r) - T_{room}] + \varepsilon_r^* \sigma [T^4(x_r) - T_{room}^4] \quad (3.8)$$

Cuyas condiciones iniciales son:

$$T(x, 0) = T_{room}, \quad \forall x_w \leq x \leq x_r \quad (3.9)$$

3.2.1 Determinación de la emisividad efectiva y coeficientes de transferencia de calor convectivos.

Para la deducción de la emisividad efectiva entre dos superficies cercanas, se utilizó la siguiente ecuación dada por Incropera y De Witt (2002):

$$Q_{abs-g}^{rad} = \frac{\sigma [T_{abs}^4 - T_g^4]}{(1 - \varepsilon_1) / A_g \varepsilon_1 + (1 - \varepsilon_2) / A_{abs} \varepsilon_2 - 1 / A_g F_{g,abs}} \quad (3.10)$$

Donde:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{abs}, \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_g \quad (3.11)$$

El área de las paredes que conforman el sistema del canal son iguales, por lo que:

$$A_g = A_{abs} = A \quad (3.12)$$

$$F_{g,abs} = 1 \quad (3.13)$$

Al sustituir las Ec. (3.11), (3.12) y (3.13) en la Ec. (3.10), se obtiene:

$$q_{abs-g}^{rad} = \frac{\sigma [T_{abs}^4 - T_g^4]}{1 / \varepsilon_{abs} + 1 / \varepsilon_g - 1} \quad (3.14)$$

Para calcular los coeficientes de transferencia de calor por convección natural entre las superficies que conforman el canal vertical, es necesario determinarlos de la siguiente manera:

Coeficiente convectivo entre la pared semitransparente y el fluido:

$$h_{g-f}^{conv} = \frac{Nu_{g-f} \lambda_f}{H_{xc}} \quad (3.15)$$

Coeficiente convectivo entre el absorbedor y el fluido:

$$h_{abs-f}^{conv} = \frac{Nu_{abs-f} \lambda_f}{H_{xc}} \quad (3.16)$$

Donde Nu_{g-f} ; Nu_{abs-f} corresponden al número de Nusselt entre vidrio-fluido y absorbedor-fluido respectivamente.

Las propiedades del fluido se estiman mediante el uso de una temperatura promedio de película, la cual se define como:

Para la pared semitransparente y el fluido:

$$T_{g-f} = \frac{T_g + T_f}{2} \quad (3.17)$$

Para el absorbedor y el fluido:

$$T_{abs-f} = \frac{T_{abs} + T_f}{2} \quad (3.18)$$

Para la correlación para el coeficiente convectivo por convección natural es presentada por Churchill y Chu (1975) para flujos laminares ($Ra \leq 10^9$):

$$Nu_{g-f} = 0.68 + \frac{(0.67 Ra^{1/4})}{\left[1 + (0.492/Pr)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad (3.19)$$

Para flujos turbulentos ($Ra > 10^9$):

$$Nu_{g-f} = \left\{ 0.825 + \frac{(0.387 Ra^{1/6})}{\left[1 + (0.492/Pr)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3.20)$$

Donde el número de Prandtl (Pr) se define como:

$$Pr = \frac{C_{p,f} \mu_f}{\lambda_f} \quad (3.21)$$

El número de Rayleigh (Ra) se define como:

$$Ra = GrPr \quad (3.22)$$

El número de Grashof (Gr) se define como:

$$Gr = \left[\frac{\rho_f^2 g \beta_f (T_g - T_f) L_j^3}{\mu_f^2} \right] \quad (3.23)$$

donde:

$$\beta_f = 1/T_{m,g} \quad (3.24)$$

$$\beta_f = 1/T_{m,abs} \quad (3.25)$$

De esta forma se determinó el coeficiente convectivo entre la pared semitransparente y el fluido, de igual manera, para la determinación del coeficiente convectivo entre la superficie del absorbedor y el fluido del aire, se utilizó la temperatura de película de la Ec. (3.18) y se aplicaron las Ec. (3.19)-(3.25).

Se supone que la temperatura y la densidad del aire en la canal varia linealmente con la altura. La velocidad media del aire a través del canal es propuesta por Duffie y Beckman (2006):

$$\bar{V} = \left(\frac{2gH_y}{C_1 (A_{v,in} / A_{v,out})^2 + C_2} \times \frac{T_f - T_{in}}{T_f} \right)^{0.5} \quad (3.26)$$

donde $C_1(A_{v,in}/A_{v,out})^2 + C_2$ representan la caída de presión en el canal, $A_{v,in}/A_{v,out}$ es la relación de las áreas de la ventila de entrada al canal con relación a la de salida de este; y C_1 y C_2 son constantes empíricas adimensionales evaluadas en 8.0 y 2.0 respectivamente por Utzinger (1980).

Para el cálculo del flujo másico se tiene:

$$\dot{m} = \rho_f \bar{V} A_c \quad (3.27)$$

3.2.3- Propiedades termofísicas del aire.

Para este trabajo, se asume que las propiedades termofísicas del fluido varían linealmente. Las correlaciones fueron basadas en datos tabulados de Incropera y DeWitt (2002).

Para un intervalo de 250 a 400 K. Para evaluar las propiedades del fluido se utiliza la temperatura media de película en, donde:

Viscosidad cinemática:

$$\mu_f = \left[2.2078 (T_{m,g}^{0.7756}) \right] \times 10^{-7} \quad (3.28)$$

Densidad:

$$\rho_f = \frac{351.9}{T_{m,g}} \quad (3.29)$$

Conductividad térmica:

$$\lambda_f = \left[0.1723 (T_{m,g}^{0.8812}) \right] \times 10^{-3} \quad (3.30)$$

Calor específico:

$$C_{p,f} = \left[0.9125 (T_{m,g}^{0.0174}) \right] \times 10^3 \quad (3.31)$$

donde $T_{m,g}$ se encuentra en Kelvin.

3.3 Metodología de solución.

El desarrollo y descripción de los métodos de resolución de las ecuaciones gobernantes elegidas para el sistema TW-PCM, los coeficientes de transferencia de calor por convección natural entre las superficies y propiedades termofísicas del fluido, se obtienen de la misma manera que con Aparicio-Mercado (2021).

3.3.1 Implementación del método de volumen finito en el sistema muro-PCM

Este sistema de muro-PCM no utilizó el método de volumen finito (MVF). Sin embargo, a continuación, se da una explicación del método. El MVF permite discretizar y resolver numéricamente las ecuaciones diferenciales gobernantes del sistema, siendo un método alternativo al de elementos y diferencias finitos. Primeramente, se considera una malla del dominio del sistema, en torno a cada punto de esta malla se construyen múltiples volúmenes de control que no se traslapan entre ellos. La ecuación gobernante para resolver se integra sobre cada volumen de control, lo cual da como resultado una versión discretizada de dicha ecuación. El MVF es adecuado para cualquier tipo de malla y, por lo tanto, puede ser aplicado en geometrías complejas. Se puede consultar el trabajo de Aparicio-Mercado (2021) para obtener más detalles sobre el método.

3.3.2 Metodología del calor específico efectivo.

La transferencia de calor a través de la losa PCM fue modelado unidimensional debido a que el flujo de calor en dirección perpendicular a la superficie de la losa es dominante. Para la solución del Modelo matemático de cambio de fase por difusión se utilizó el método del calor específico efectivo, junto con las condiciones generales antes mencionadas, la ecuación gobernante se puede expresar de la siguiente manera:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.32)$$

La Ec. (3.32) es válida para toda temperatura debajo de la temperatura crítica en un PCM es decir sin llegar al cambio de fase. Sin embargo, durante el proceso de cambio de fase (fusión o solidificación) de un PCM, la Ec. (3.32) se debe trabajar en términos de entalpia:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.33)$$

Donde:

No hay cambio de fase:

$$h = C_p T \quad (3.34)$$

Si hay cambio de fase:

$$h = C_p T + h_{ls} f_{pc,l} \quad (3.35)$$

Se sabe que $C_p T$ representa la energía sensible, es decir un cambio de temperaturas sin cambio de fase, por otro lado, el termino $h_{ls} f_{pc,l}$ representa a la energía latente. Por lo tanto, cuando existe cambio de fase la entalpia contendrá los efectos de la energía sensible tanto como de la energía latente tal como se muestra la Ec. (3.33)

$$\rho \left(C_p \frac{\partial T}{\partial t} + h_{ls} \frac{\partial f_{pc,l}}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.36)$$

Donde h_{ls} es el calor latente de fusión del PCM. Éste representa la energía necesaria para fundir una unidad de masa de una sustancia, $f_{pc,l}$ es la fracción líquida de cambio de fase del PCM. Ésta es la relación entre la cantidad de líquido comparado con la cantidad total de la masa de la sustancia. Ésta dada por la Ec. (3.36).

$$f_{pc,l} = \left(\frac{T - T_s}{T_l - T_s} \right)^m \quad (3.37)$$

Donde T_l y T_s son las temperaturas de fusión y de líquido del PCM, respectivamente. Dependiendo del valor de m se utiliza un modelo para PCM.

Sea $\Delta T_{ls} = T_l - T$, considerando un modelo lineal se obtiene:

$$f_{pc,l} = \left(\frac{T - T_s}{\Delta T_{ls}} \right)^l \quad (3.38)$$

Entonces:

$$\frac{\partial f_{pc,l}}{\partial t} = \frac{1}{\Delta T_{ls}} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.39)$$

Sustituyendo la Ec. (3.39) en la Ec. (3.36):

$$\rho \left(C_p + \frac{h_{ls}}{\Delta T_{ls}} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.40)$$

El término del calor específico relativo a la energía latente se acciona cuando se presenta el proceso de cambio de fase y así junto al termino de calor específico apropiado a la energía sensible contribuyen a formar el término del calor específico efectivo (C).

$$C = C_p + \frac{h_{ls}}{\Delta T_{ls}} \quad (3.41)$$

Para finalizar, las propiedades termofísicas del PCM se determinan de acuerdo con la temperatura y la fracción líquida local $f(T)$ mediante las siguientes ecuaciones:

$$\rho(T) = \begin{cases} \rho_s, & T \leq T_s \\ f \rho_l + (1-f) \rho_s, & T_s < T < T_l \\ \rho_l, & T \geq T_l \end{cases} \quad (3.42)$$

$$\lambda(T) = \begin{cases} \lambda_s, & T \leq T_s \\ f \lambda_l + (1-f) \lambda_s, & T_s < T < T_l \\ \lambda_l, & T \geq T_l \end{cases} \quad (3.43)$$

$$C(T) = \begin{cases} C_{p,s}, & T \leq T_s \\ f \cdot C_{p,l} + (1-f) C_{p,s} + \frac{h_{ls}}{\Delta T_{ls}}, & T_s < T < T_l \\ C_{p,l}, & T \geq T_l \end{cases} \quad (3.44)$$

3.3.3 Residuales del proceso iterativo.

Cuando se utilizan métodos iterativos para resolver sistemas de ecuaciones algebraicas siempre existe de manera implícita un error numérico, debido su misma naturaleza, por lo que es necesario establecer un criterio para el cual la solución obtenida es numéricamente aceptable. Este criterio es comúnmente llamado criterio de convergencia y se utilizó para el método de balances globales, método con el cual se resolvió el sistema vidrio-canal, este criterio se presenta primeramente en forma de sistema de ecuaciones:

$$a_p^{go} T_{go} = a_E^{go} T_g + b_p^{go} \quad (3.45a)$$

$$a_p^g T_g = a_E^g T_{gi} + a_W^g T_{go} + b_p^g \quad (3.45b)$$

$$a_p^{gi} T_{gi} = a_E^{gi} T_f + a_W^{gi} T_g + b_p^{gi} \quad (3.45c)$$

$$a_p^f T_f = a_E^f T_{abs} + a_W^f T_{gi} + b_p^f \quad (3.45d)$$

$$a_p^{abs} T_{abs} = a_E^{abs} T_f + b_p^{abs} \quad (3.45e)$$

Reordenando el sistema se obtiene la matriz tridiagonal, posteriormente se suman las ecuaciones 3.45 y se renombran:

$$a_1 T_{go} + a_2 T_{g2} + a_3 T_{g3} + a_4 T_f + a_5 T_{abs} = b \quad (3.46)$$

Donde cada coeficiente equivale a:

$$a_1 = a_p^{go} - a_W^g \quad (3.46a)$$

$$a_2 = a_p^g - a_E^{go} - a_W^{gi} \quad (3.46b)$$

$$a_3 = a_p^{gi} - a_E^g - a_W^f \quad (3.46c)$$

$$a_4 = a_p^f - a_E^{gi} - a_W^{abs} \quad (3.46d)$$

$$a_5 = a_p^{abs} - a_E^f \quad (3.46e)$$

$$b = b_p^{go} + b_p^g + b_p^{gi} + b_p^f + b_p^{abs} \quad (3.46f)$$

Finalmente, el criterio de convergencia para el método de balances globales se presenta en la Ec. (3.47)

$$R = |a_1 T_{go} + a_2 T_g + a_3 T_{gi} + a_4 T_f + a_5 T_{abs} - b| \quad (3.47)$$

3.3.4 Bajo-relajación del proceso iterativo.

La naturaleza no lineal de los modelos, así como su fuerte acoplamiento, demanda limitar la evolución de la variable de iteración a iteración debido a que, un cambio fuerte en esa variable puede provocar cambios bruscos en los coeficientes de otras variables y de esta manera llevar a una divergencia. La relajación de la solución numérica es una opción para optimizar y/o alcanzar la convergencia numérica. Sin embargo, esta técnica no se utilizó en la solución del modelo matemático.

3.3.5 Procedimiento general de solución del modelo matemático.

El diagrama de flujo presentado en la Figura 3.2 muestra el procedimiento general. Los pasos son enlistados a continuación:

1. Se introducen los datos conocidos, se declaran los parámetros constantes, se establecen las condiciones iniciales y se elige un paso de tiempo Δt .
2. Generación de la malla espacial computacional. Se construye el espacio discreto en el cual se resolverá el modelo matemático.
3. Se establece un criterio de convergencia temporal para el proceso iterativo: Contador de paso de tiempo.
4. Se calculan propiedades termofísicas del aire. Debido a que las temperaturas iniciales en el sistema se desconocen, las propiedades se calculan en cada iteración.
5. Resolución del sistema vidrio-canal por medio del método de balances globales. Determinación del campo de temperatura en el canal.
6. Se calcula las propiedades termofísicas del muro-PCM. Debido al comportamiento de material de cambio de fase, se utiliza el método de calor específico efectivo.
7. Se establece un criterio de convergencia para ambos métodos de solución del sistema.
8. Repetir desde el punto cuatro hasta cumplir los criterios de convergencia.
9. Finalmente, una vez que se haya cumplido los criterios de convergencia para los métodos de solución, se verifica con el criterio de convergencia temporal, si aún no se ha cumplido el tiempo de modelación, este condicional hace que el proceso iterativo se repita a partir del paso tres con el nuevo tiempo, de lo contrario imprime y termina.

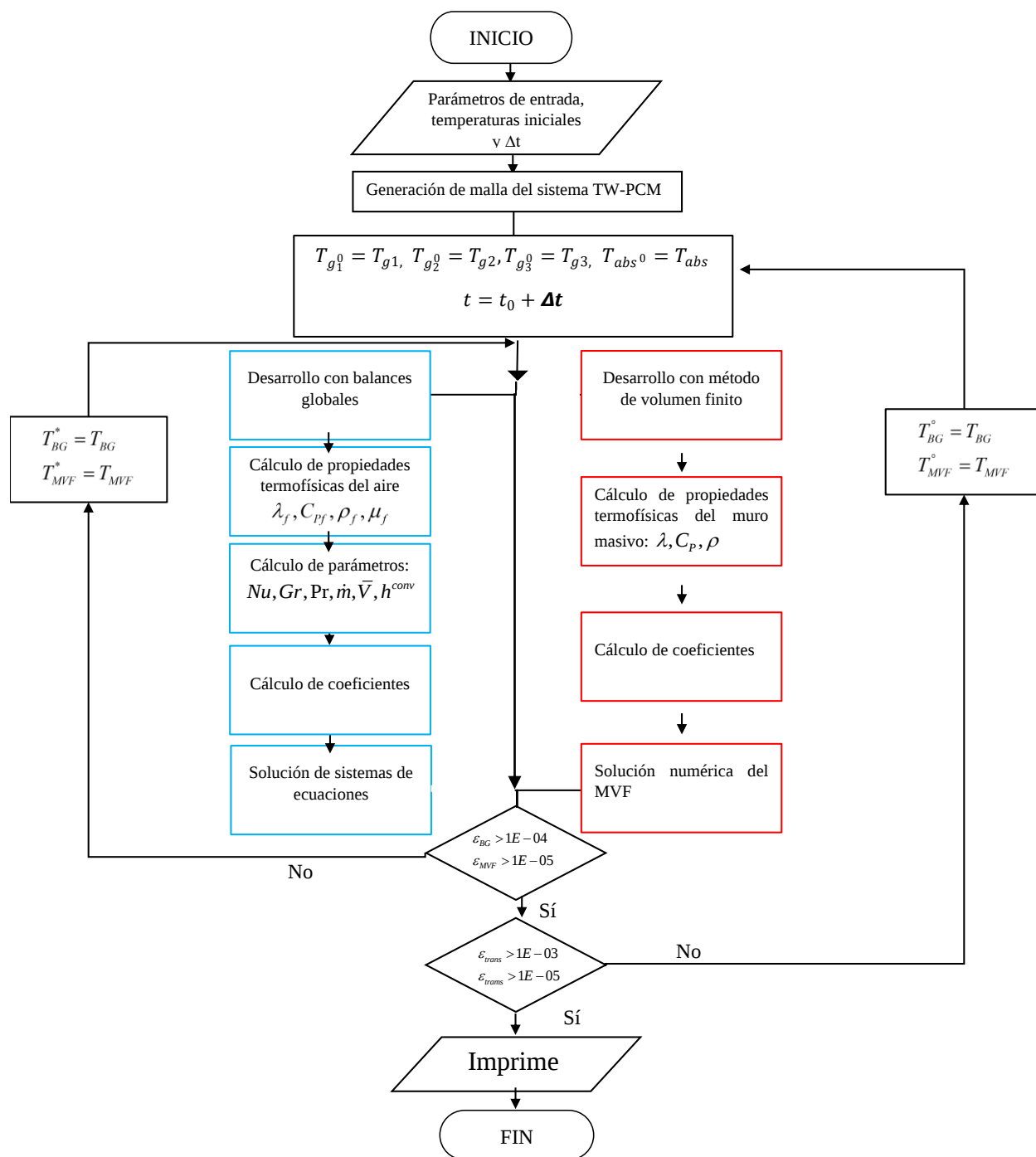


Figura 3.2. Diagrama de flujo del procedimiento general.

3.4 Verificación del código numérico.

El método consistió resolver problemas que parten de soluciones de referencia sencillos e ir incrementando la complejidad del problema de tesis. En la Figura 3.3 se muestra la metodología realizada para los diferentes casos presentados. El primer problema es acerca de la conducción de calor en estado permanente con condiciones frontera de primera clase. El siguiente problema se trata sobre la conducción de calor de una losa con condiciones de frontera de tercera clase. El tercer problema cuenta con la convección natural en un canal vertical utilizando el método de balances globales. Por último, se acoplan las 3 actividades realizadas para dar lugar al problema estudiado en esta tesis

3.4.1 Actividades de verificación para el método de balances globales.

Primero, se resuelve el flujo de calor unidimensional en estado estacionario. Luego, el modelo va presentando diferentes propiedades termofísicas, como temperatura y espacio, se comienza a trabajar con modelos de transferencia de calor en estados de transitorios, se discretizan los diferentes tipos de condiciones de frontera y se le da un tratamiento especial al material de cambio de fase.

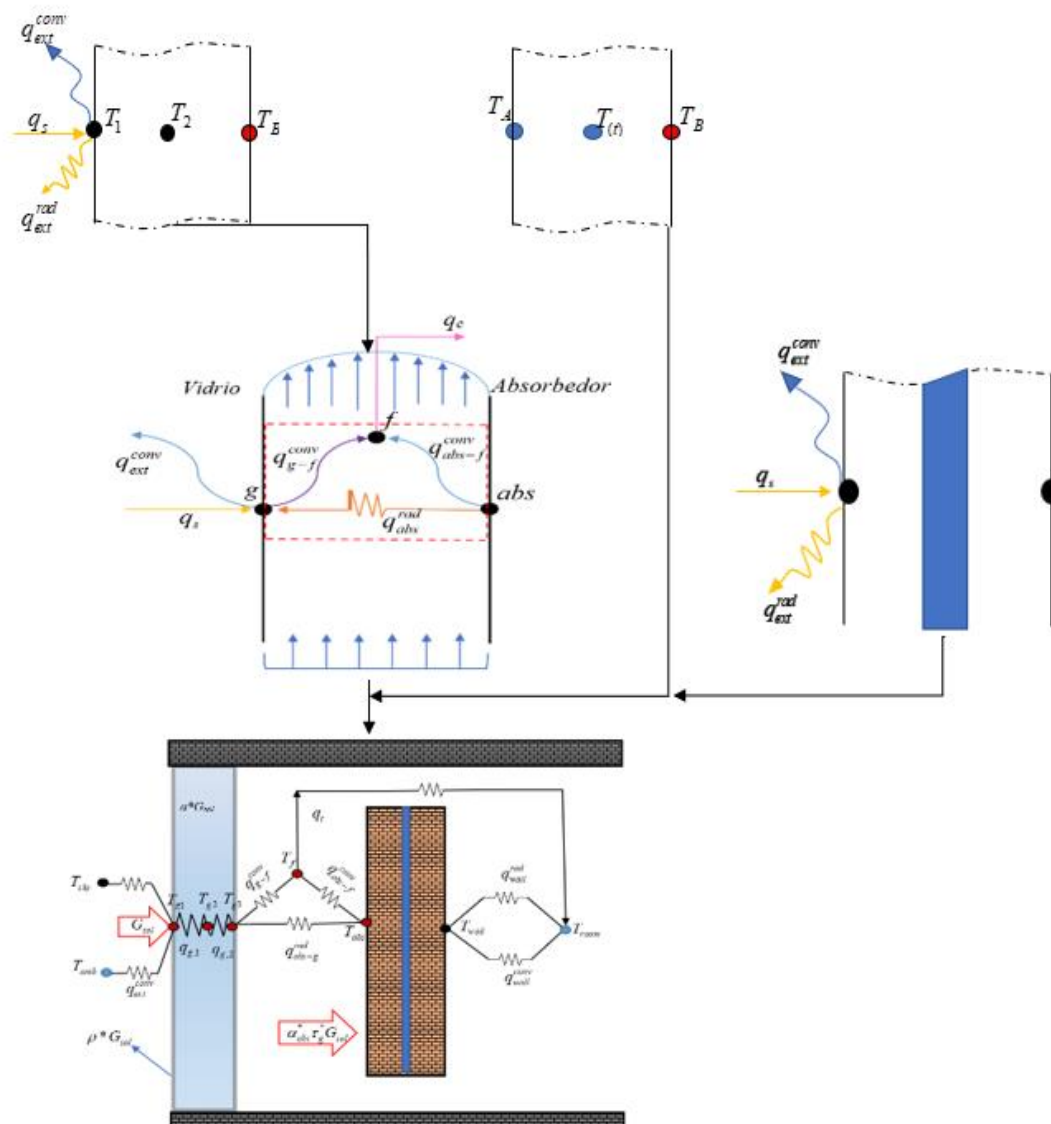


Figura 3.3. Descripción de la metodología realizada

Implementación del método de balances globales para la transferencia de calor en una losa de concreto.

Para esta actividad se realizaron dos casos similares entre sí. En la Figura 3.4 se muestra la conducción de calor en una losa homogénea de concreto con tres nodos de espesor $H_x = 0.1$ m, la separación entre los nodos es equidistante y se define como Δx_1 y Δx_2 . La Frontera A se somete a un flujo de calor $q_x = 750$ W/m²K en $x = 0$ m y se consideran pérdidas radiativas y convectivas

hacia un medio exterior. Por otro lado, en la Frontera B, $x = H_x$ se encuentra a una temperatura constante $T_B = 297 \text{ K}$. Por otra parte, se consideran los siguientes parámetros: $h = 6 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\varepsilon = 0.90$, $T_{amb} = 303 \text{ K}$ y $A = 1 \text{ m}^2$. El segundo caso sólo considera las pérdidas convectivas, las radiativas son despreciadas ($\varepsilon = 0.0$).

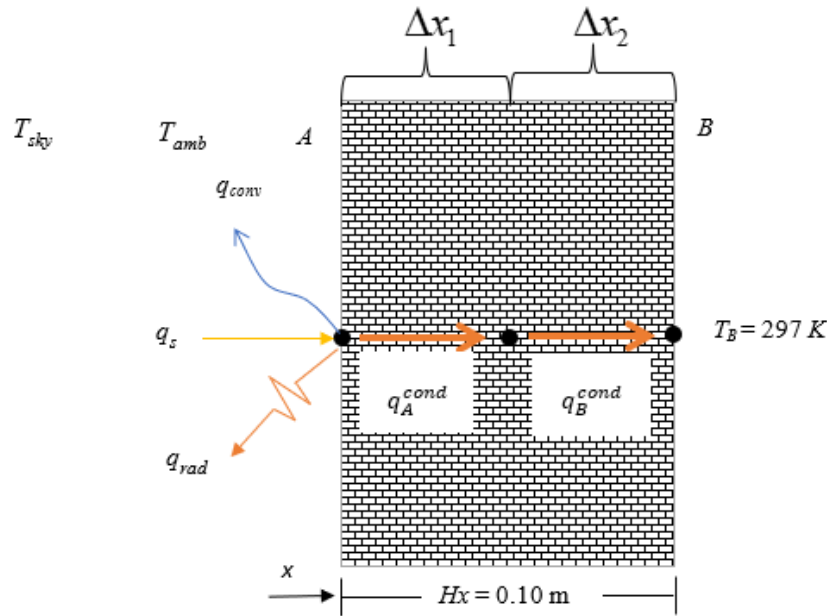


Figura 3.4. Modelo físico de una losa de concreto con condiciones de Frontera de Robin no-lineal y Dirichlet.

El segundo caso consiste en un modelo físico con pérdidas solamente convectivas el cual cuenta con las mismas especificaciones que el primer caso.

Para verificar la solución numérica de ambos casos, se desarrolló una solución analítica del problema. Ésta está dada por la siguiente ecuación:

$$A = \frac{T_B - B}{H_x} \quad (3.48)$$

$$(\varepsilon \sigma H_x) B^4 + (\lambda + h H_x) B + [-(\varepsilon \sigma H_x T_{sky}^4 + h H_x T_{amb} + q_s H_x + \lambda T_B)] = 0 \quad (3.49)$$

Sustituyendo valores numéricos:

$$T(x) = -280.92x + 325.092$$

En la Tabla 1 se muestran los valores de la temperatura al inicio del muro $x = 0$ m y el flujo de calor convectivo al final del muro $x = H_x$. Por otra parte, $\varepsilon = 0$ representa el caso con pérdidas convectivas, mientras que $\varepsilon = 0.9$ representa el caso con pérdidas convectivas y radiativas. Se observa que los resultados obtenidos por ambas soluciones son bastantes parecidos, esto lo podemos comprobar viendo el error residual tanto para el cálculo de la temperatura por ambos métodos como para el cálculo del flux de calor conductivo por ambos métodos.

Tabla 1. Comparación de la solución analítica contra la solución numérica.

Caso	Solución	$T(x) = 0$ [K]	Error [%]	$q(x = H_x)$ w/m ²	Error [%]
$\varepsilon=0.0$	Analítica	331.17	0.003	580.94	0.020
	Balance global	331.16		580.82	
$\varepsilon=0.9$	Analítica	325.09	0.000	476.00	0.172
	Balance global	325.09		476.82	

Con el propósito de verificar que el tratamiento implementado para las condiciones de frontera es el correcto, el Ejercicio 2 es una prueba de simetría. Consiste en resolver el mismo problema que en el Ejercicio 1, pero con las condiciones de frontera invertidas.

Con esto se espera que el perfil de temperaturas conserve su comportamiento lineal y se invierta de manera simétrica con respecto al original.

La Figura 3.5 muestra los perfiles de temperatura de la prueba de simetría, se observa que efectivamente son simétricos, así se demuestra que el tratamiento dado a las condiciones de Frontera de Robin es correcto en ambas fronteras.

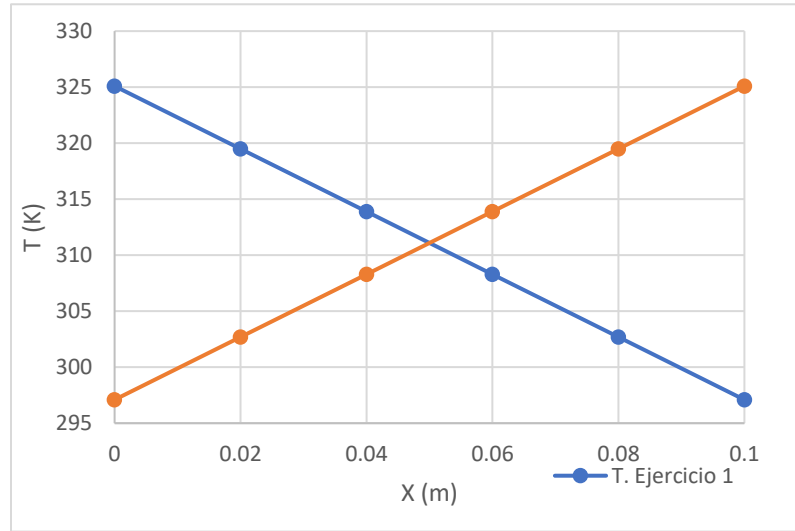


Figura 3.5. Estudio de simetría para el ejercicio 1.

Implementación del método de balances globales en estado transitorio para la transferencia de calor en una losa de concreto.

En esta actividad se resolvieron dos casos similares entre sí, uno considerando una losa de concreto sólido y una losa de plomo sólido. La losa cuenta con una conductividad térmica de $\lambda = 1.70 \text{ W/m K}$. El sistema se encuentra sometido a una condición de Frontera de Dirichlet tanto en $x = 0$ (Frontera A) como en $x = L$ (Frontera B). Se observa que el sistema está sometido a un flujo de calor $q_s = 750 \text{ W}$ en $x = 0$. Para la Frontera A se impone una $T_A = 313 \text{ K}$. Por otro lado, en $x = L$ se impone una temperatura constante $T_B = 297 \text{ K}$. En la Figura 3.6 se muestra el modelo físico del sistema descrito.

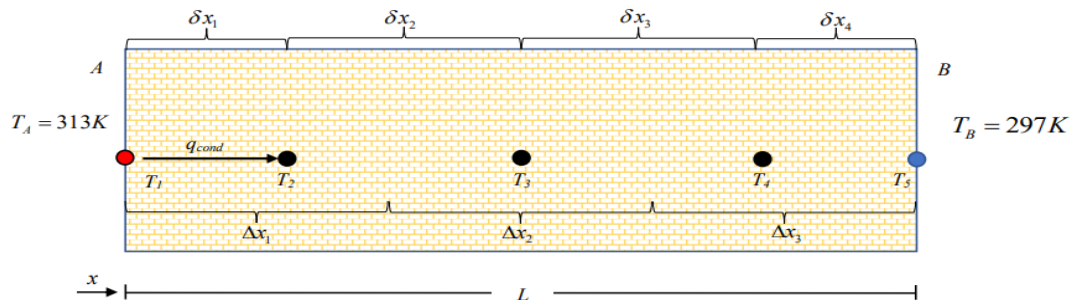


Figura 3.6. Modelo físico de una losa de concreto con condiciones de Frontera de Dirichlet.

Para el segundo caso se tiene una losa de plomo sólido que comparte las mismas especificaciones que la losa de concreto. En la Figura 3.6 se muestra el modelo físico descrito.

Para verificar la solución numérica de ambos casos, se desarrolló una solución analítica del problema. Ésta está dada por la siguiente ecuación:

$$T(x,t) = T_A + \left(\frac{T_B - T_A}{L} \right) x + \frac{2}{L} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ e^{-\alpha \beta_m^2 t} \operatorname{sen}(\beta_m x) \left[\frac{T_0 - T_A}{\beta_m} [1 - (-1)^m] + \frac{T_B - T_A}{\beta_m} (-1)^m \right] \right\} \quad (3.50)$$

Donde:

$$\beta_m = m\pi / L \quad (3.51)$$

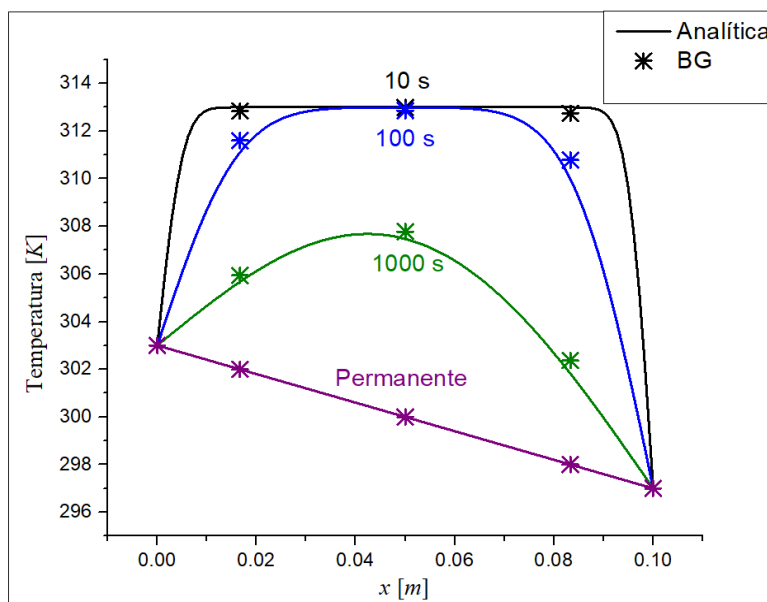
$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (3.52)$$

En la Tabla 2 se muestran los valores de temperatura obtenidos para una losa de concreto mediante el método de balances globales. Para este estudio, se utilizaron 5 nodos computacionales distribuidos en una losa de $L = 0.1$ m, donde se fijó una condición inicial $T_0 = 313K$ con un paso de tiempo de $\Delta t = 0, 10, 100, 1000$ hasta llegar al estado estacionario que son aproximadamente 20,000 segundos.

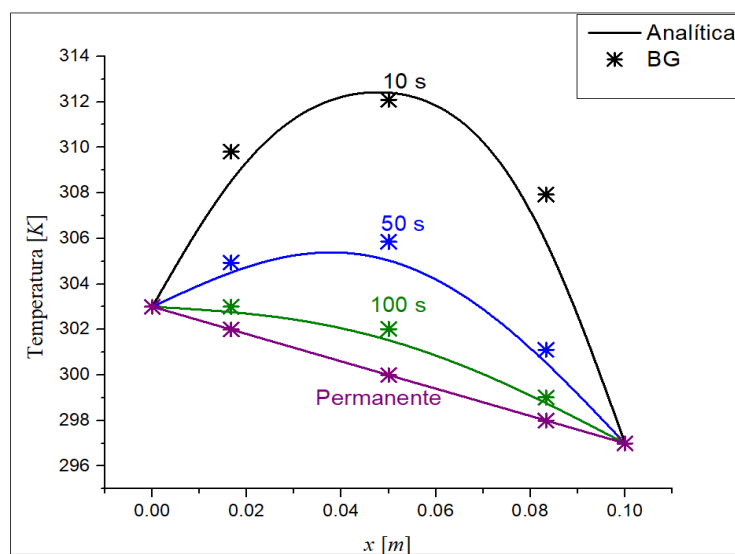
Tabla 2. Valores de temperatura para una losa de concreto en diferentes instantes de tiempo.

$x[m]$	$T_1[K]$	$T_2[K]$	$T_3[K]$	$T_4[K]$	$T_5[K]$
	$t_1 = 0$ s	$t_2 = 10$ s	$t_3 = 100$ s	$t_4 = 1000$ s	$t_5 = 20000$ s
0.000	313.00	303.00	303.00	303.00	303.00
0.016	313.00	312.84	311.61	305.95	302.00
0.050	313.00	312.99	312.86	307.78	300.00
0.086	313.00	312.75	310.78	302.37	298.00
0.100	313.00	297.00	297.00	297.00	297.00

En las Figura 3.7a y 3.7b se muestran los perfiles de temperatura de las losas de concreto y de plomo, respectivamente. Se observa que los resultados obtenidos con BG corresponden de manera aceptable con la solución analítica.



(a) Losa de concreto



(b) Losa de plomo

Figura 3.7. Comparación de la evaluación del perfil de temperatura en una losa.

Transferencia de calor natural en un canal con balances globales.

Para la siguiente actividad, se consideró la transferencia de calor unidimensional en un sistema compuesto por un colector-canal con balances globales. Los parámetros de entrada son iguales para el sistema canal y colector-canal, éstos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de entrada para los sistemas canal-colector-canal.

Parámetro	Valor
q_s	750 W/m ²
α_g	0.14
α_{abs}	0.95

En la Figura 3.8 se tiene un problema que consiste en un sistema canal de aire que cuenta con 3 nodos, los cuales están distribuidos de manera proporcional en un espesor $H_{x,c}=0.20$ m, el nodo g está sometido a un flujo de calor q_s , asimismo existe un intercambio de calor radiativo entre el colector y la pared derecha del canal, por último, este nodo tiene una pérdida de calor debido a un flujo convectivo exterior y un flujo convectivo hacia el fluido al interior del canal. Para el nodo f , se consideran dos entradas de flujo de calor debido al intercambio conectivo entre las dos superficies que conforman el canal con el fluido y una salida de calor útil q_c . El nodo abs describe un intercambio convectivo con el fluido del canal y un intercambio radiativo con la superficie del vidrio.

En la Tabla 4 se muestran los valores de flujo de calor obtenidos mediante el uso de balances globales para el sistema canal en estado permanente.

Tabla 4. Valores de flujo de calor en W/m² para el sistema canal mediante balances globales

Parámetro	W/m ²
q_s	750.00
q_{abs-f}^{rad}	-20.95
q_{abs-f}^{conv}	186.70
q_{ext}^{conv}	531.00
q_c	385.43

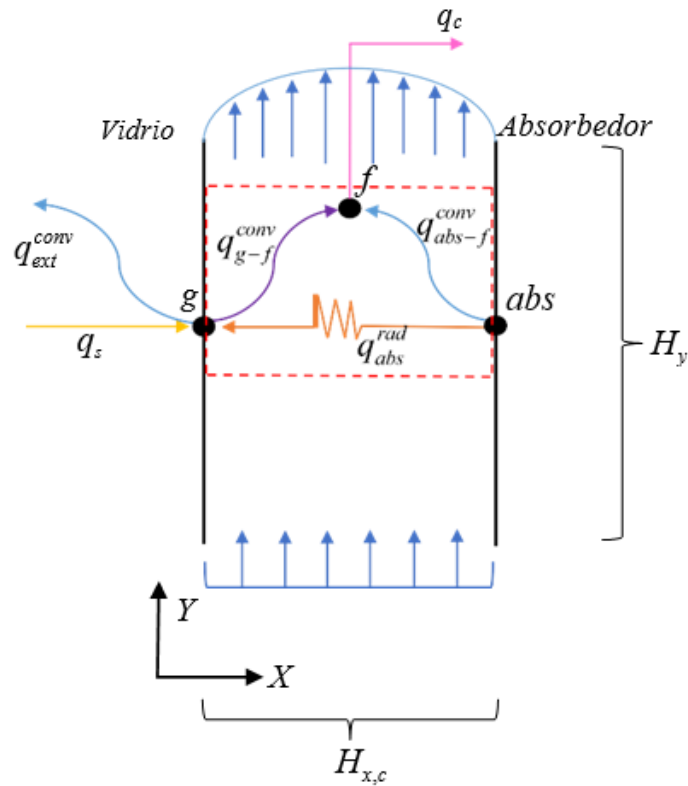


Figura 3.8. Modelo físico del sistema canal convectivo.

Transferencia de calor en un sistema “colector-canal” con balances globales en estado transitorio.

El Modelo físico que se muestra en la Figura 3.9, consiste en un sistema colector-canal provisto con 5 nodos distribuidos proporcionalmente en todo el espesor del sistema, donde el nodo g_o es sometido por un flujo de calor impuesto q_s , a un intercambio convectivo y radiativo con el exterior y a un intercambio conductivo con la pared semitransparente del vidrio

Para el nodo g se cuenta con una entrada y una salida de flujo de calor conductivo por parte de los nodos g_1 y g_3 respectivamente, el nodo g_i recibe el flujo de calor conductivo del nodo anterior; por otra parte, existe un intercambio de calor convectivo con el fluido del canal y un intercambio de calor radiativo proveniente de la superficie del absorbedor

El nodo del fluido f cuenta con entradas de flujo de calor debido al intercambio convectivo entre las dos superficies que conforman el canal con el fluido y una salida de calor útil q_c , por último, el nodo abs describe un intercambio convectivo con el fluido del canal, un intercambio radiativo con la superficie del vidrio y una parte se transforma en un flujo de calor conductivo que recibe el muro masivo.

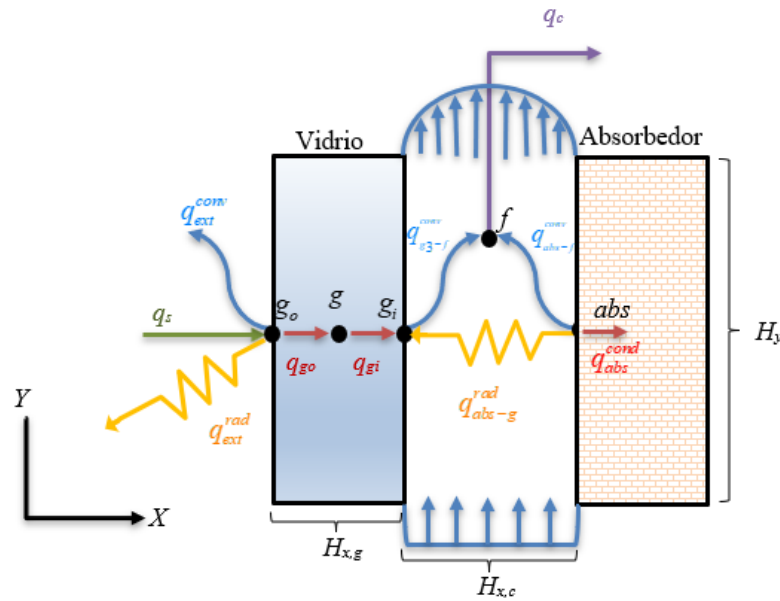


Figura 3.9. Modelo físico del sistema colector-canal.

Para verificar que la solución utilizada es la correcta, se realiza un balance de energía en todo el sistema, respetando así, el principio de conservación de energía. En la Tabla 5 se muestran los valores de flujo de calor obtenidos:

Tabla 5. Valores de flujo de calor en W/m^2 obtenido mediante balances globales.

q_{ext}^{conv}	178.04
q_{ext}^{rad}	89.00
q_{abs-f}^{conv}	135.82
q_{g-f}^{conv}	7.87
q_{abs-g}^{rad}	169.92
q_{abs}^{cond}	250.00
q_c	143.69

Balance resultante para todo el sistema colector-canal:

$$\alpha_g G_{sol} A + \alpha_{abs} \tau_g G_{sol} A = q_{ext}^{conv} A + q_{ext}^{rad} A + q_{abs}^{cond} A + q_c A_c \quad (3.53)$$

$$G_{sol} A (\alpha_g + \alpha_{abs} \tau_g) = q_{ext}^{conv} A + q_{ext}^{rad} A + q_{abs}^{cond} A + q_c A_c$$

$$G_{sol} = \frac{q_{ext}^{conv} + q_{ext}^{rad} + q_{abs}^{cond} + q_c (A_c / A)}{(\alpha_g + \alpha_{abs} \tau_g)} \quad (3.54)$$

Sustituyendo los valores de los flujos de calor obtenidos: $750 \text{ W/m}^2 = 749.99 \text{ W/m}^2$. Esto corresponde a un error relativo porcentual menor al 0.001 %.

Se puede observar cómo los resultados obtenidos mediante los balances globales satisfacen la primera ley de la termodinámica, en donde la diferencia se debe al error numérico establecido en los parámetros de entrada del código desarrollado.

3.4.2 Número de nodos de la malla computacional y paso del tiempo.

De acuerdo con el estudio de independencia de malla utilizado por Aparicio-Mercado sobre un sistema muro Trombe con PCM integrado, recomendó utilizar 62 nodos para la sección de concreto y 41 para la sección del PCM. Con relación al paso de tiempo, Aparicio-Mercado encontró que para un paso de tiempo de 1 segundo, los resultados son independientes de este parámetro.

Con base a lo anterior, este trabajo utilizó una malla numérica con 62 nodos para la sección del concreto y 41 para la sección del PCM.

CAPÍTULO 4:

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados del sistema PCM-TW en la configuración de calentamiento. Para el estudio, se consideró a la alcaldía de Tacubaya, Ciudad de México como una ciudad representativa de clima generalmente frío de la República Mexicana. El análisis térmico se realizó utilizando datos climáticos (G_{sol} , T_{amb} y V_{wind}) del día más frío de cada mes de todo un año. Con base al estudio realizado por Aparicio-Mercado (2021), se utilizó un PCM P-29.

El capítulo está compuesto por cuatro secciones. En primer lugar, se definen los parámetros de estudio. Posteriormente, se continúa con el estudio paramétrico del sistema en función del efecto del punto de fusión del PCM (segunda sección) y el efecto de los materiales de construcción (tercera sección). Finalmente, se presenta la evaluación térmica del PCM-TW para la ciudad de estudio.

4.1. Parámetros de Estudio.

El análisis térmico se efectuó durante un lapso de 24 horas a partir de la primera hora de radiación solar (7:00 AM). Se consideró que el PCM-TW está al Sur. Esto es debido a que, en el hemisferio norte, esta orientación presenta la máxima exposición solar a lo largo del año. Los datos climáticos utilizados para cada ciudad fueron proporcionados por la Comisión Nacional del Agua y el Servicio Meteorológico Nacional (CONAGUA-SMN). Esta información se presenta en el Anexo A. Con relación a las dimensiones del PCM-TW, de acuerdo con Hernández-López (2016), las dimensiones del ancho de canal y de las ventilas que proporcionan el mejor desempeño de un TW en una habitación de 3 m de altura son $L_c=20$ cm, $H_v=20$ cm. En ese sentido, estas dimensiones fueron consideradas en este trabajo. El espesor del muro almacenador es de 11 cm. De estos 11, 1 cm corresponde al espesor del PCM el cual se encuentra entre dos losas de material: adobe, concreto o ladrillo. Adicionalmente, el espesor de cada losa es variable, esto según la posición del PCM. Por otro lado, la temperatura de la habitación es constante y se estableció a un valor de 24 °C (297 K). Adicionalmente, se eligió un PCM con punto de fusión de 29 °C (PureTemp 29), ya

que de acuerdo con el trabajo de Aparicio (2021), este PCM presentó mejor desempeño térmico que aquellos con punto de fusión más alto.

Como parámetros de análisis se emplean temperaturas en el sistema, la fracción líquida media (f_{ave}), el calor útil (q_c^*), el calor suministrado por el muro hacia la habitación (q_{wall}), y la energía almacenada/suministrada por el sistema. Tanto los flujos de calor como la energía se definen por unidad de superficie expuesta al Sol ($A=H_w W$).

La fracción líquida media se obtiene mediante la Ec. (4.1)

$$f_{ave} = \frac{1}{L_{PCM}} \int_{L_{PCM}} f(T) \cdot dx \quad (4.1)$$

donde $f(T)$ es la fracción líquida local. Ésta está definida, de acuerdo con la consideración de comportamiento lineal (Capítulo 3) como:

$$f(T) = \frac{T(x,t) - T_s}{T_l - T_s} \quad (4.2)$$

Por un lado, en el grupo de flujos de calor están el flujo de calor suministrado por el aire en el canal, conocido como calor útil (q_c^*); el flujo de calor suministrado por el muro hacia la habitación (q_{wall}) y el flujo de calor al interior (q_{int}). q_c^* está definido en la Nomenclatura, mientras que q_{wall} y q_{int} , así como la relación entre estos tres parámetros se definen por las siguientes ecuaciones:

$$q_{wall} = q_{wall}^{conv} + q_{wall}^{rad} \quad (4.3)$$

$$q_{int} = q_{wall} + q_c^* \quad (4.4)$$

Por otro lado, en el grupo de energía se consideran la energía almacenada en el muro durante las horas de día ($E_{sto,d}$), la energía suministrada a la edificación durante el día ($E_{int,d}$), la energía suministrada a la edificación durante la noche ($E_{int,n}$) y la energía total suministrada (E_{int}). La definición de estos parámetros se presenta en las Ecuaciones (4.5)- (4.8).

$$E_{sto,d} = \int_{7:00\ AM}^{7:00\ PM} \int_0^{L_w} \left(\rho C \frac{\partial T}{\partial t} \right) dx dt \quad (4.5)$$

$$E_{int,d} = \int_{7:00\ AM}^{7:00\ PM} q_{int}(t) dt \quad (4.6)$$

$$E_{int,n} = \int_{7:00\ AM}^{7:00\ PM} q_{int}(t) dt \quad (4.7)$$

$$E_{int} = E_{int,d} + E_{int,n} \quad (4.8)$$

Por último, se comenta que con el propósito de comparar el desempeño del PCM-TW, se usa como referencia a un sistema de muro Trombe convencional sin PCM (C-TW).

4.2. Estudio paramétrico del Sistema: Efecto de la Posición del PCM

Para realizar este estudio, se consideró el día más frío de todo el año (18 de enero) en la alcaldía de Tacubaya, CDMX. Este análisis tiene el propósito de determinar la posición ideal del PCM para proporcionar el mejor desempeño del PCM-TW. Así, se evaluaron 5 casos con variación en la posición del PCM: 1 cm, 3 cm, 5 cm, 7 cm y 9 cm, utilizando una configuración estándar de concreto-concreto (C-C) para los materiales del muro en los que está embebido el PCM.

En la Figura 4.1 se presenta la evolución del flujo de calor útil (q_c^*) para las distintas posiciones de PCM. Se observa como el comportamiento es bastante similar para las primeras 4 horas del día. Poco antes de las 12 PM se pueden apreciar que el comportamiento comienza a variar según la posición del PCM, obteniendo un aumento para el primer y tercer centímetro, mientras que el comportamiento de las posiciones restantes varía muy poco. A partir de las 6 PM, el calor útil para $x_{PCM} = 3, 5, 7$ y 9 cm, comienzan a tener un comportamiento parecido. Sin embargo, para $x_{PCM} = 1$ cm, el calor útil disminuye por debajo del resto.

En la Figura 4.2 se tiene el cambio del flujo de calor entregado por el muro (q_{wall}) para diferentes posiciones del PCM. Se nota rápidamente que el comportamiento de las diferentes composiciones es similar, sin embargo, éstas se encuentran desfasadas entre sí. Esto se debe a que la energía en la primera posición alcanza con mayor facilidad al PCM con respecto a las demás posiciones. La campana se genera cuando el flujo de calor llega al PCM y comienza a aumentar la temperatura de éste. Una vez que alcanza la cantidad máxima de energía acumulada, comienza a avanzar sobre el PCM por el resto del muro.

En la Figura 4.3 se muestra el comportamiento del flujo de calor al interior (q_{int}), compuesto por el flujo de calor útil y el flujo de calor en el muro. Se puede apreciar que para las primeras horas del día, q_c^* tiene mayor influencia. Sin embargo, a partir de la 1 PM la conducta de las diferentes posiciones comienza a variar, siendo influenciada mayormente por el flujo de calor del muro. Durante el turno diurno, el mejor desempeño lo obtiene el PCM a un centímetro, conforme se acerca el periodo nocturno, ésta última posición demuestra tener el peor desempeño, mientras que para el comportamiento de la posición del PCM al noveno centímetro, presenta un comportamiento más efectivo.

La Tabla 4.1 muestra de manera cuantitativa la energía almacenada hasta las 7:00 PM, es decir, durante las horas de exposición solar. También se presenta la energía suministrada a la edificación. Si se analiza detalladamente a la energía almacenada durante el día ($E_{sto,d}$) se puede encontrar que para $x_{PCM} = 9$ cm se logra almacenar más energía, mientras que para $x_{PCM} = 1$ cm se tiene el caso con la menor capacidad de almacenamiento. Analizando la energía total suministrada en periodo diurno ($E_{int,d}$), se encuentra que el caso al primer PCM presenta el mejor desempeño con 5.50 MJ/m^2 . Se puede observar que conforme la posición del PCM se acerca al interior de la habitación, el desempeño del muro comienza a disminuir. Este comportamiento se debe a que cuando el PCM se encuentra más cerca del absorbedor, más cantidad de energía absorbida es cedida durante el periodo diurno por el mecanismo de convección al canal y de éste a la habitación (q_c^*).

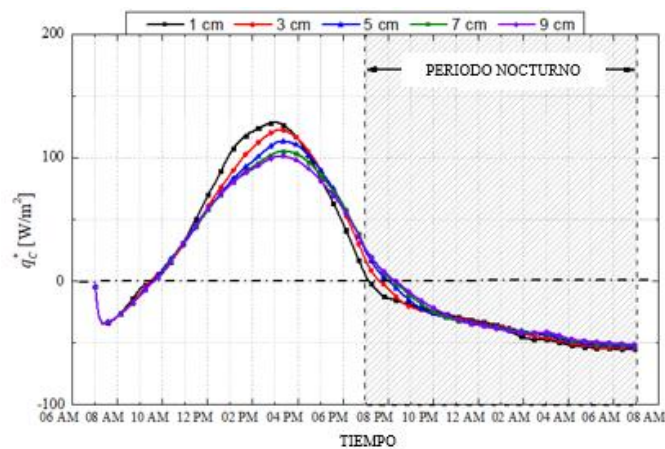


Figura 4.1 Flujo de calor útil con variación en la posición del PCM para C-C.

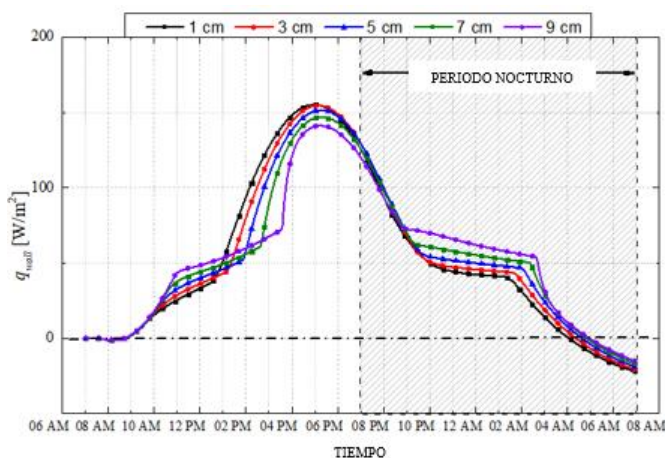


Figura 4.2. Flujo de calor en el muro con variación en la posición del PCM para C-C.

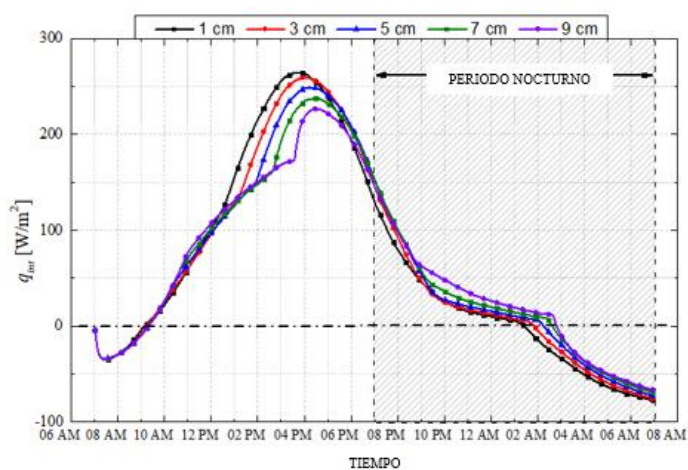


Figura 4.3. Flujo de calor interior con variación en la posición del PCM para C-C.

Para $x_{PCM} = 1$ cm, la cantidad de energía suministrada entre 7:00 PM y 7:00 AM ($E_{int,n}$) es negativa. Esto indica que, la cantidad almacenada en el muro no fue lo suficiente como para evitar la extracción de energía desde la habitación hacia el exterior a través del vidrio colector.

Se observa que, en caso contrario con la energía suministrada en el día, conforme el PCM se acerca al interior de la habitación, su capacidad de suministro de energía comienza a aumentar, siendo así el mejor desempeño nocturno presentado por el PCM con la posición $x_{PCM} = 9$ cm, ofreciendo una energía de 0.68 MJ/m^2 .

Ahora, de acuerdo con la energía total suministrada E_{int} , se observa que el sistema que suministra más energía durante el periodo de estudio es cuando $x_{PCM} = 5$ cm (5.43 MJ/m^2), mientras que $x_{PCM} = 1$ cm es el que suministra menos (5.39 MJ/m^2) y con valores intermedios para $x_{PCM} = 3$ y 7 cm (5.42 MJ/m^2) lo cual corresponde a una diferencia menor al 0.8% entre los valores máximo y mínimo. Esto indica que la posición del PCM no tiene un efecto considerable sobre E_{int} . La explicación a este esto es que, como ya se expuso líneas arriba, cuando x_{PCM} está más próximo al absorbedor, la fracción de energía que no es almacenada durante el día por el muro es cedida a través de q_c^* durante ese periodo. Por otro lado, para cuando x_{PCM} está más alejado del absorbedor, la porción de energía que no es cedida al canal durante el día es almacenada por el muro y posteriormente liberada en la noche por q_{wall} .

Tabla 4.1. Energía almacenada y suministrada (MJ/m^2).

x_{PCM}	$E_{sto,d}$	$E_{int,d}$	$E_{int,n}$	E_{int}	t_{supply}
1 cm	3.96	5.50	-0.10	5.39	6 h 22 min
3 cm	4.20	5.32	0.10	5.42	6 h 47 min
5 cm	4.50	5.11	0.31	5.43	7 h 17 min
7 cm	4.78	4.91	0.51	5.42	7 h 34 min
9 cm	5.02	4.72	0.68	5.41	7 h 46 min

Resultados resaltados en negrita indican el mejor caso.

4.3. Estudio paramétrico del Sistema: Efecto de los materiales.

Este análisis tiene el propósito de determinar la configuración ideal de los materiales para proporcionar el mejor desempeño del PCM-TW. Así, se evaluaron 9 casos con variación en los materiales del muro: adobe-adobe (A-A), adobe-ladrillo (A-B), adobe-concreto (A-C), ladrillo-adobe (B-A), ladrillo-ladrillo (B-B), ladrillo-concreto (B-C), concreto-adobe (C-A), concreto-ladrillo (C-B) y concreto-concreto (C-C) utilizando un PCM fijado en $x_{PCM} = 5$ cm.

4.3.1 Configuraciones de Adobe.

En la Figura 4.4 se presenta el comportamiento del calor útil para diferentes configuraciones del adobe. Se observa que la conducta de los materiales es bastante similar para los tres casos. La configuración A-A presenta una ligera ventaja con respecto a las configuraciones A-B y A-C. También se observa que, en general, estas configuraciones tienen poco efecto sobre el flujo de calor útil en el canal de aire.

La Figura 4.5 muestra el comportamiento del flujo de calor por unidad de superficie que suministra el muro hacia la habitación. Se observa cómo para la configuración de A-A, el PCM almacena menos energía con respecto a los Casos A-B y A-C. Sin embargo, esta configuración almacena energía por mayor tiempo y demostrando un mejor desempeño en el periodo nocturno, presentando menos pérdidas de energía. Por otra parte, se puede ver cómo en el periodo diurno, q_{wall} tiene una mayor influencia para la configuración A-C, almacenando más energía, pero liberándola de manera más acelerada que en las configuraciones A-A y A-B. Esto es debido a la conductividad del concreto, siendo esta mayor que la del adobe y la del ladrillo, facilita la transferencia de calor hacia la habitación.

Para la Figura 4.6 se presenta el flujo de calor total suministrado. Se aprecia que éste es mayor para la configuración A-C, presentando un mejor desempeño térmico para el periodo diurno. Por otra parte, para el periodo nocturno, muestra un mal desempeño. Para las configuraciones A-A y A-B, la evolución del flujo de calor total es bastante similar, pareciendo que el caso que presenta mejor desempeño tanto diurno como nocturno es el A-B.

4.3.2 Configuraciones de Ladrillo.

En la Figura 4.7 se observa que para las configuraciones de ladrillo en $x_{PCM}=5$ cm, el comportamiento de q_c^* es prácticamente el mismo, no se aprecian diferencias significativas entre las tres configuraciones.

Por otro lado, para el caso de q_{wall} , en la Figura 4.8 se aprecia cómo la configuración de B-C presenta, en general un mejor comportamiento que en los Casos B-A y B-B, en especial durante el periodo diurno. Algo que resaltar es que, para el periodo nocturno, el caso del B-C presenta un descenso más pronunciado, esto se debe a que el concreto tiene una resistencia térmica menor, por lo que permite la transferencia de calor más fácilmente hacia el interior de la habitación.

De acuerdo con q_{int} , en la Figura 4.9 se observa y comprueba que el mejor desempeño térmico lo posee la configuración B-C durante todo el periodo diurno y la mayor parte del nocturno. Para esta última, se muestra un descenso más pronunciado con respecto a las configuraciones B-A y B-B.

4.3.3 Configuraciones de Concreto.

En la Figura 4.10 se muestra el comportamiento de q_c^* para diferentes las configuraciones del concreto. Durante las primeras 7 horas del día, el comportamiento para los tres casos es idéntico, no obstante, se presentan diferencias entre C-C y los Casos C-A y C-B entre la 1 y las 10 PM. Después de las 10 PM, en los tres casos, q_c^* vuelve a comportarse prácticamente igual.

Para la Figura 4.11 se muestra el comportamiento de q_{wall} . Se observa cómo para la configuración de C-C se presenta ligeramente un mejor desempeño térmico durante el día y durante las 11 PM y las 2 AM. Sin embargo, para las últimas horas del periodo nocturno, cae de una manera más pronunciada con respecto a las configuraciones C-A y C-B.

En la Figura 4.12 se presenta el flujo de calor hacia el interior del muro, en el cual se observa que el comportamiento del muro de concreto-concreto presenta una influencia mayor por parte del q_{wall} con respecto a los otros casos, éstos muestran una evolución similar durante todo el día. Justamente antes de comenzar el periodo nocturno, el comportamiento de los tres casos es bastante

parecido, a partir de las 9:30, el muro de concreto-concreto tiende a mantener la transferencia de energía durante más horas, sin embargo, después de las 2 AM, esta configuración sufre un descenso más pronunciado. Se observa que los otros dos casos tienen descensos más suaves, no obstante, estos comienzan a extraer energía de la habitación entre las 11 PM y las 12 AM.

En la Tabla 4.2 se muestra de manera cuantitativa la energía almacenada ($E_{sto,d}$), la energía suministrada en periodo diurno ($E_{int,d}$), la suministrada en periodo nocturno ($E_{int,n}$), la suministrada durante todo el día y el tiempo de suministro de energía (E_{int}). Se observa que el Caso C-A, con 4.79 MJ/m^2 es el que almacena mayor cantidad de energía durante el día, mientras que la configuración de A-C, al almacenar 22.7% menos energía que el Caso C-A, muestra el peor desempeño (3.70 MJ/m^2). Con relación a $E_{int,d}$, la configuración A-C presentó el mejor desempeño al momento con un resultado de 5.15 MJ/m^2 . Por otro lado, el muro compuesto de C-A mostró el desempeño más bajo con 4.61 MJ/m^2 . Para $E_{int,n}$, se observa que para la configuración C-B presenta 0.32 MJ/m^2 , apenas un 3% mejor que el Caso C-C, siendo estos dos los que mejor desempeño térmico tienen. Por el contrario, el caso A-A presenta el peor desempeño térmico, ya que termina extrayendo hasta 0.22 MJ/m^2 de la habitación, comportamiento que debe evitarse en este sistema.

Analizando la energía total suministrada en el día (E_{int}), se tiene que el Caso C-C presenta un mejor desempeño térmico. De igual manera, este caso es el que suministra energía durante más tiempo (7 horas y 17 minutos), lo cual sugiere que éste es el caso ideal al momento de implementarse en una habitación. Por otro lado, la configuración A-A resultó ser la que suministra energía durante menos tiempo.

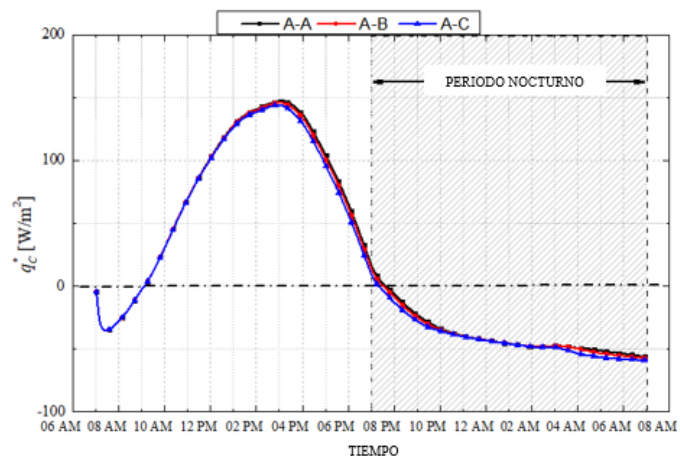


Figura 4.4. Flujo de calor útil para configuraciones de adobe.

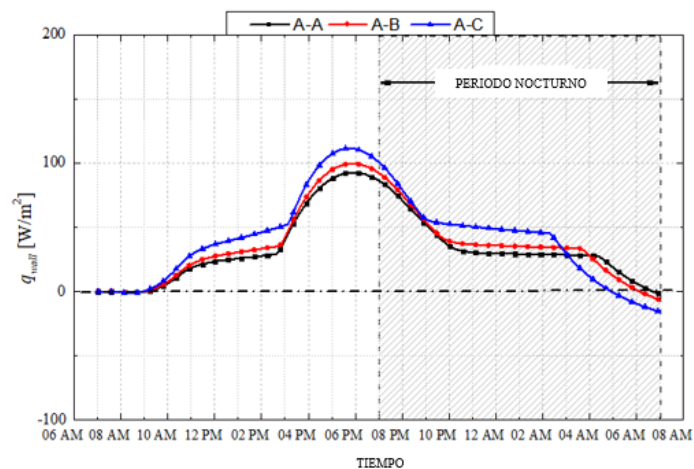


Figura 4.5. Flujo de calor en el muro para configuraciones de adobe.

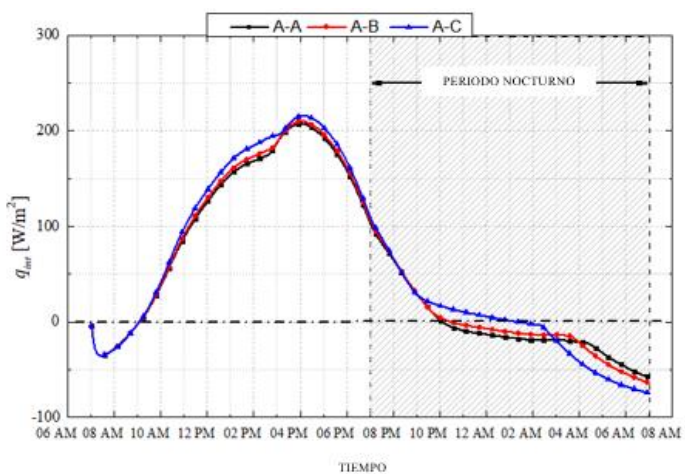


Figura 4.6. Flujo de calor al interior para configuraciones de adobe.

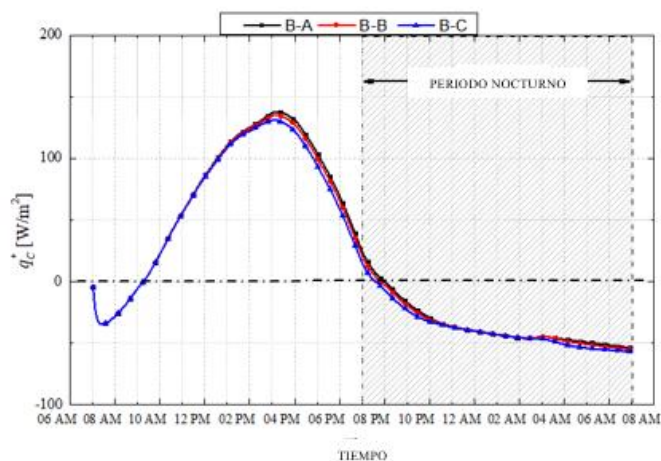


Figura 4.7. Flujo de calor útil para configuraciones de ladrillo.

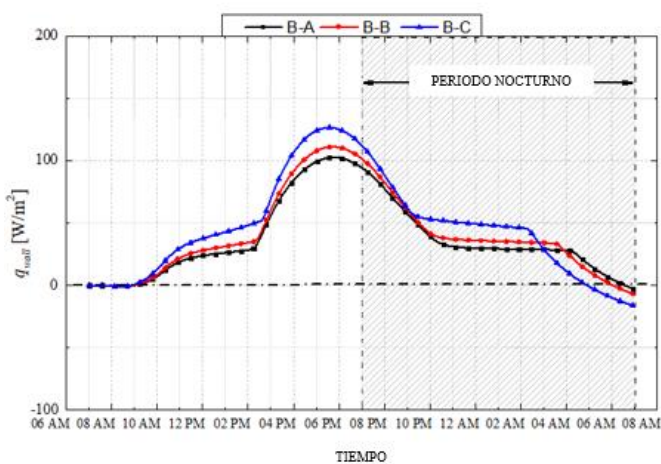


Figura 4.8. Flujo de calor en el muro para configuraciones de ladrillo.

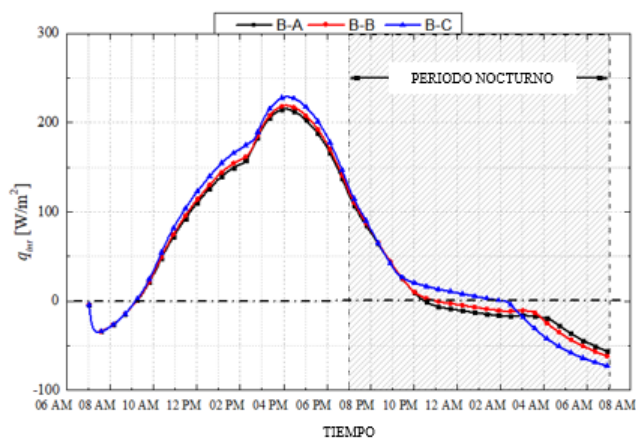


Figura 4.9. Flujo de calor al interior para configuraciones de ladrillo.

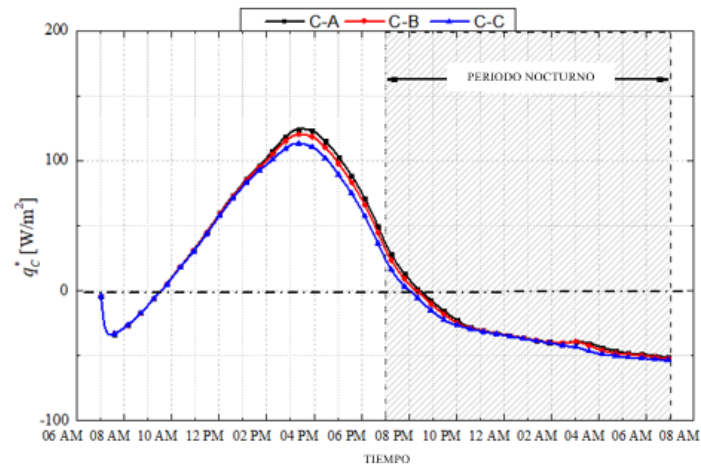


Figura 4.10. Flujo de calor útil para configuraciones de concreto.

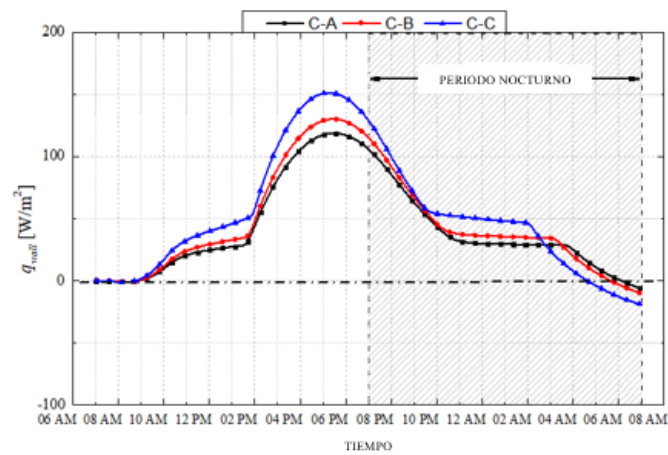


Figura 4.11. Flujo de calor en el muro para configuraciones de concreto.

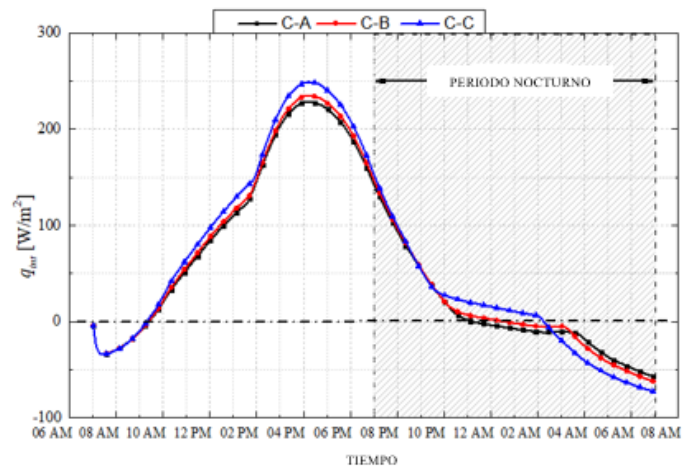


Figura 4.12. Flujo de calor al interior para configuraciones de concreto.

Tabla 4.2. Energía almacenada y suministrada (MJ/m²).

Configuración	$E_{sto,d}$	$E_{int,d}$	$E_{int,n}$	E_{int}	t_{supply}
A-A	3.93	4.79	-0.22	4.57	3 h 04 min
A-B	3.87	4.90	-0.16	4.73	4 h 24 min
A-C	3.70	5.15	-0.15	4.99	6 h 22 min
B-A	4.30	4.68	0.00	4.68	3 h 26 min
B-B	4.23	4.81	0.04	4.86	3 h 20 min
B-C	4.04	5.09	0.05	5.15	6 h 40 min
C-A	4.79	4.61	0.27	4.88	4 h 07 min
C-B	4.72	4.76	0.32	5.08	5 h 32 min
C-C	4.50	5.11	0.31	5.43	7 h 17 min

Resultados resaltados en negrita indican el mejor caso del bloque M1 y resultados en rojo, el mejor de todos.

4.4. Análisis del comportamiento de la fracción líquida media.

Este análisis pretende comprender el comportamiento de la fracción líquida media al momento de variar los materiales de construcción del muro y la posición del PCM. De esta manera, se evaluaron 9 casos donde se varían los materiales del muro: concreto-concreto, concreto-ladrillo, concreto-adobe, adobe-concreto, adobe-ladrillo, adobe-adobe, ladrillo-adobe, ladrillo-ladrillo, ladrillo-concreto. Adicionalmente, se varía la ubicación del PCM, posicionándolo en $x_{PCM} = 1, 5$ y 9 cm.

En la Figura 4.13 se presenta la comparación de la fracción líquida media para las 3 posiciones del PCM en la configuración C-C. Por medio de esta figura, es posible observar si el PCM en el muro se funde en su totalidad ($f = 1.0$) o no ($0.0 < f < 1.0$). Así, se observa que para las tres posiciones el PCM consigue fundirse por completo y mantenerse líquida.

En la Figura 4.14 se muestra la evolución del comportamiento de la fracción líquida media para el caso C-B. Se observa que, entre las 9 AM y 12 PM, el PCM en $x_{PCM} = 1$ cm se funde por completo, esto debido a que se ubica más cerca del absorbedor y de que el Material 1 (M1) es de concreto, el cual posee una mayor conductividad térmica, haciendo que la energía llegue con mayor facilidad al PCM. Así mismo, se puede observar cómo a medida que x_{PCM} se aleja del absorbedor, tiende a fundirse cada vez más tarde: 2 PM para $x_{PCM} = 5$ cm y 3 PM para $x_{PCM} = 9$ cm. Por otro lado, durante el periodo nocturno el PCM en $x_{PCM} = 1$ cm comienza a liberar calor a partir de las 8 PM, mientras

que $x_{PCM}=5$ y 9 cm, comienzan a hacerlo entre las 9 y 10 PM, respectivamente. Esto implica que el suministro de energía a la habitación durante más tiempo.

La Figura 4.15 indica que el Caso C-A tiene una conducta similar. En $x_{PCM}=1$ cm la fusión completa se alcanza a mediodía, mientras que para $x_{PCM}=5$ y 9 cm se alcanza la fusión a partir de la 1 PM y a las 3 PM, respectivamente.

Con respecto al proceso de solidificación, al igual que para el Caso C-B, en el Caso C-A, no existe un efecto aparente en f_{ave} para $x_{PCM}=5$ y 9 cm, mientras que para $x_{PCM}=1$ cm, la solidificación se lleva a cabo en menos tiempo, alcanzándola 1 hora antes que para $x_{PCM}=5$ y 9 cm.

En la Figura 4.16 se observa que para el Caso A-C, cuando $x_{PCM}=1$ cm la fusión completa se alcanza a la 1 PM, mientras que para $x_{PCM}=5$ cm, ocurre a las 3 PM. Sin embargo, para $x_{PCM}=9$ cm el PCM nunca se funde por completo, cuando mucho alcanza un 90% de fracción líquida.

Lo anterior se repite en los Casos A-B y A-A; alcanzando un máximo de 95% para el primero y, de acuerdo con la Figura 4.18, 98% para el segundo. Esto se debe a que la baja conductividad térmica del adobe limita el transporte de energía hacia el PCM a través de él y de esta manera, restringe el proceso de cambio de fase y a su vez el almacenamiento en calor latente.

Así, de acuerdo con lo anterior, queda explicada la razón por la cual el menor almacenamiento de energía entre todas las configuraciones de materiales corresponde a los casos en los que M1 es el adobe.

De este modo, el impacto considerable sobre la cantidad de energía acumulada en el día se verá reflejado en la energía suministrada a la habitación durante la noche, siendo estos casos los que peor desempeño térmico presentan, al grado de incluso de provocar extracción de energía desde la habitación hacia el exterior a través del sistema PCM-TW, como puede corroborarse en las cantidades negativas de la Tabla 4.2.

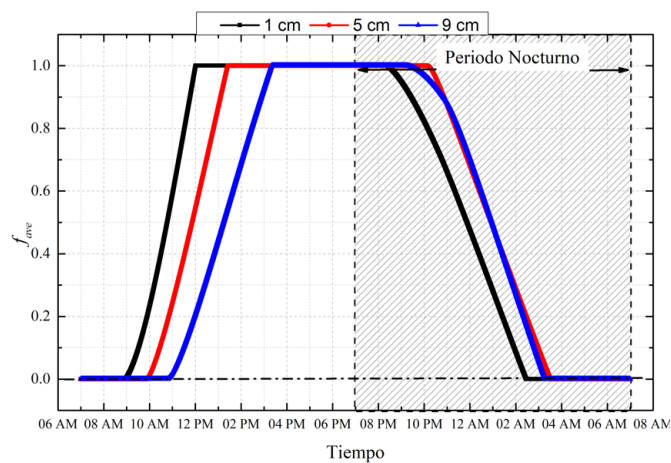
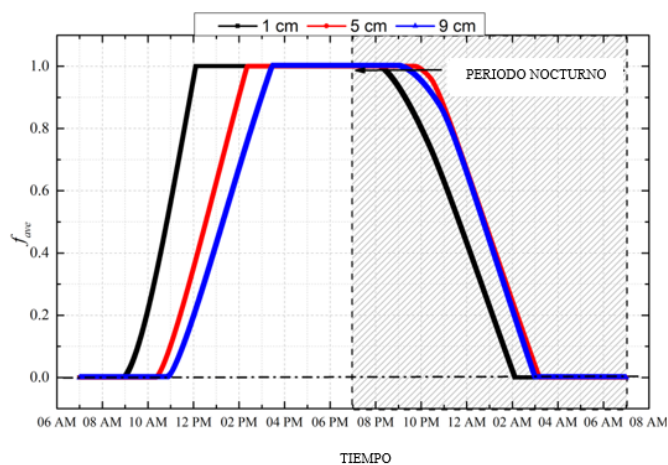
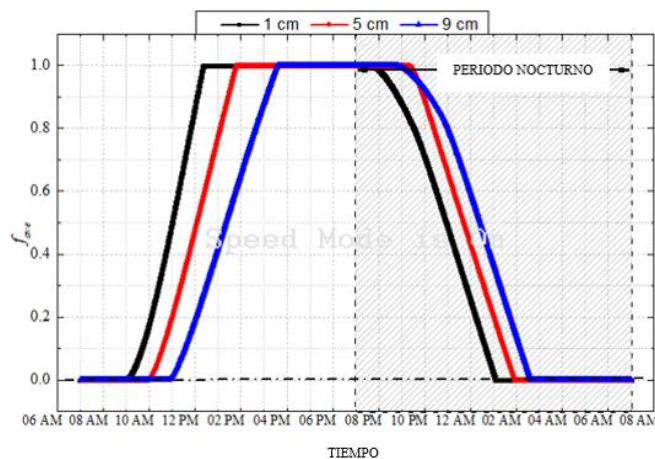
Finalmente, en los casos donde M1 es ladrillo, en las Figura 4.19-4.21 se observa el comportamiento ya habitual de que a medida que x_{PCM} está más próximo al absorbedor, más temprano se alcanza la fusión completa del PCM. Adicionalmente, se comprueba que a medida que x_{PCM} se aleja del absorbedor, suceden los siguientes dos comportamientos: 1) el PCM se funde más tarde y 2) de alcanzarse la fusión completa, ésta dura menor tiempo que cuando x_{PCM} está más próximo al absorbedor.

Así, en el Caso B-A, para $x_{PCM} = 1$ cm la fusión completa se alcanza a mediodía, mientras que para $x_{PCM} = 5$ y 9 cm se alcanza la fusión a partir de las 2 PM y a las 6 PM, respectivamente. La solidificación para $x_{PCM} = 1$ cm ocurre alrededor de las 3 AM, mientras que para $x_{PCM} = 5$ y 9 cm sucede a las 3:40 AM de manera casi simultánea.

Para el Caso B-B, cuando $x_{PCM} = 1$ cm la fusión completa se alcanza poco después de mediodía, mientras que para $x_{PCM} = 5$ y 9 cm esto sucede a las 2 PM y a las 5:40 PM, respectivamente. La solidificación para $x_{PCM} = 1$ cm ocurre poco después de las 2 AM, mientras que para $x_{PCM} = 5$ y 9 cm sucede a las 3:20 AM, igual que el caso anterior, casi simultáneamente.

Finalmente, para el Caso B-C, en $x_{PCM} = 1$ cm la fusión completa acontece poco después de las 12:30 PM, mientras que para $x_{PCM} = 5$ y 9 cm esto ocurre a las 2:30 PM y hasta las 6 PM, respectivamente. La solidificación para $x_{PCM} = 1$ cm ocurre poco después de las 1 AM, mientras que para $x_{PCM} = 5$ y 9 cm sucede a las 2:10 AM y 3 AM, respectivamente.

En general, a partir de las Figuras 4.13-4.21 puede establecerse la recomendación de evitar el uso de la configuración donde el material más cercano al absorbedor en el muro esté hecho de adobe.



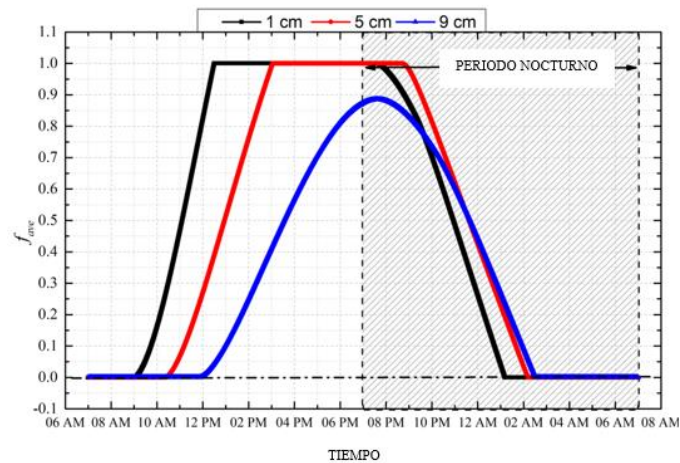


Figura 4.16. Efecto de la configuración de materiales sobre f_{ave} : Caso A-C.

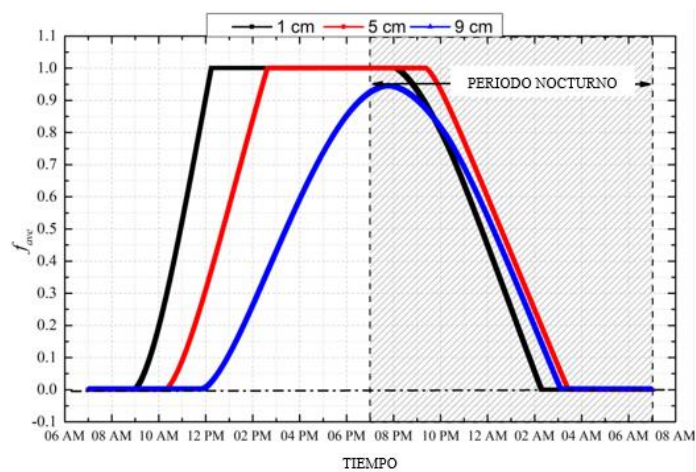


Figura 4.17. Efecto de la configuración de materiales sobre f_{ave} : Caso A-B.

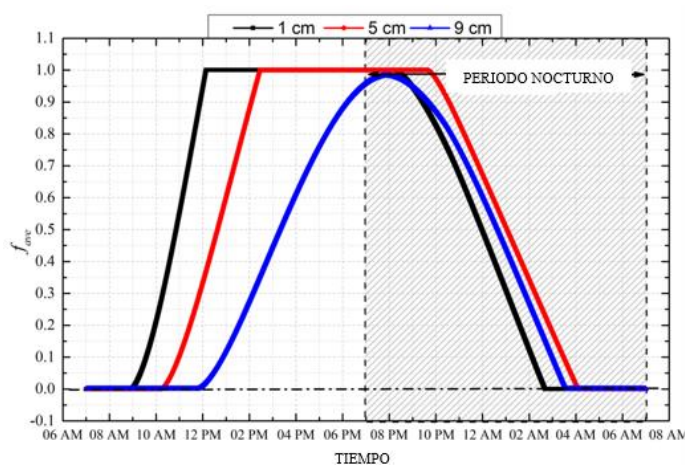


Figura 4.18. Efecto de la configuración de materiales sobre f_{ave} : Caso A-A.

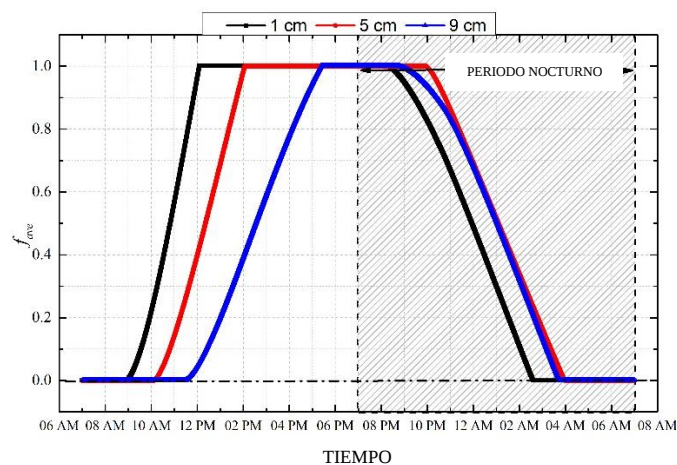


Figura 4.19. Efecto de la configuración de materiales sobre f_{ave} : Caso B-A.

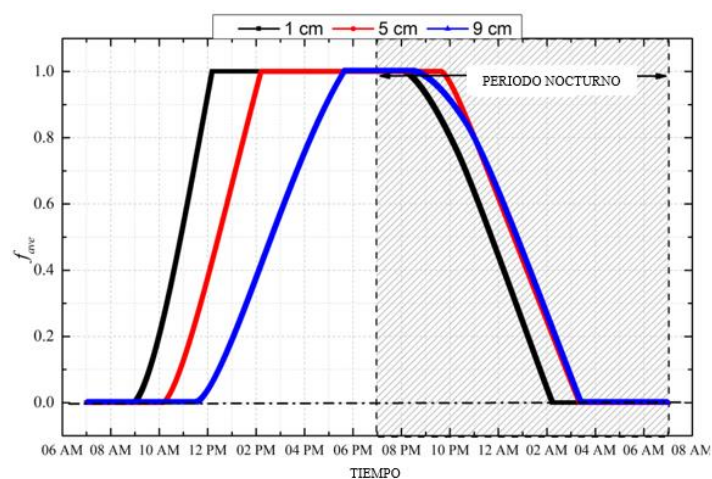


Figura 4.20. Efecto de la configuración de materiales sobre f_{ave} : Caso B-B.

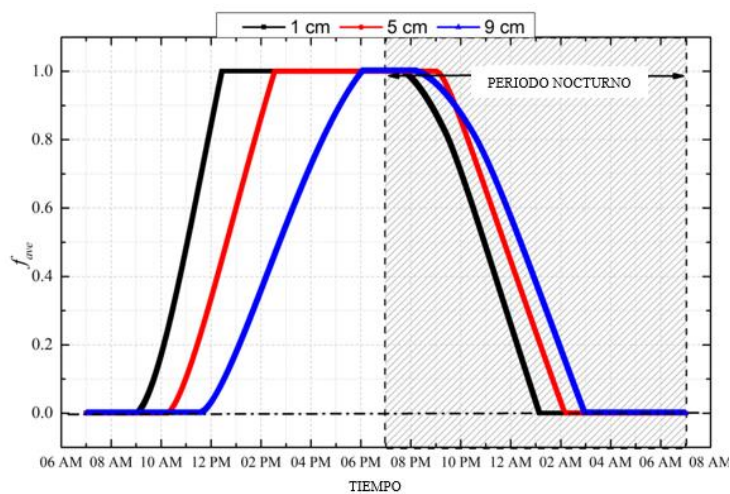


Figura 4.21 Efecto de la configuración de materiales sobre f_{ave} : Caso B-C

CAPÍTULO 5:

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

En este capítulo se presentan las conclusiones de los resultados obtenidos del estudio paramétrico del sistema PCM-TW. Asimismo, se proporcionan recomendaciones para la elaboración de trabajos futuros. Primeramente, se presentan las conclusiones del estudio paramétrico de la ubicación y efecto de la configuración de los materiales de construcción para el PCM-TW.

5.1. Conclusiones.

Se realizó un estudio paramétrico de la posición del PCM en el muro ($x_{PCM} = 1 \text{ cm}, 3 \text{ cm}, 5 \text{ cm}, 7 \text{ cm}, 9 \text{ cm}$) y del efecto de la configuración de los materiales de construcción bajo las condiciones climáticas de la alcaldía de Tacubaya, Ciudad de México. Para el estudio del parámetro de posición, se estableció como referencia a la configuración estándar de concreto-concreto (C-C). Por otro lado, para el análisis paramétrico sobre los efectos de los materiales en el sistema, se evaluaron 9 casos adobe-adobe (A-A), adobe-ladrillo (A-B), adobe-concreto (A-C), ladrillo-adobe (B-A), ladrillo-ladrillo (B-B), ladrillo-concreto (B-C), concreto-adobe (C-A), concreto-ladrillo (C-B) y concreto-concreto (C-C). Para este estudio, el PCM se fijó en $x_{PCM} = 5 \text{ cm}$. Con base a los resultados, puede concluirse lo siguiente:

- La cantidad de energía suministrada en periodo diurno ($E_{int,d}$) es inversamente proporcional a la distancia entre el absorbedor y la ubicación del PCM (x_{PCM}). Por otro lado, la energía solar almacenada en el PCM-TW ($E_{sto,d}$) así como el suministro de energía en periodo nocturno ($E_{int,n}$) y el tiempo de suministro nocturno (t_{supply}) son directamente proporcionales a x_{PCM} , cuanto mayor sea la distancia entre el absorbedor y el PCM, mayor serán estos tres parámetros.
- El mejor desempeño durante el periodo diurno se consigue cuando $x_{PCM} = 1 \text{ cm}$, suministrando 5.50 MJ/m^2 . Sin embargo, ésta es la peor posición para suministrar energía

durante la noche, teniendo un resultado negativo de -0.10 MJ/m^2 , lo que indica pérdidas de calor en el sistema.

- Para el periodo nocturno, la posición óptima es cuando $x_{PCM} = 9 \text{ cm}$, suministrando 0.68 MJ/m^2 . No obstante, esta ubicación no es conveniente durante el día, ya que suministra 14% menos energía con respecto al mejor caso en periodo diurno, que es $x_{PCM}=1 \text{ cm}$.
- En relación con el tiempo total de energía suministrada, se encontró que los casos $x_{PCM}= 7$ y 9 cm suministran energía durante 7 h 34 min y 7 h 46 min, respectivamente durante el periodo nocturno, lo cual corresponde hasta 1 h 24 min más que los casos $x_{PCM}= 1, 3$ y 5 cm .
- La ubicación del PCM en el muro tiene poca influencia sobre la cantidad total de energía suministrada durante todo el día (E_{int}), como lo indica la diferencia menor del 0.8% entre el máximo y el mínimo valor de este parámetro.
- De acuerdo con los resultados en el estudio del efecto de los materiales, con un resultado de 5.15 MJ/m^2 , la configuración A-C presentó el mejor desempeño al momento de entregar energía a la habitación durante el periodo diurno. Por otro lado, la configuración C-A mostró el desempeño más bajo con 4.61 MJ/m^2 , una diferencia de 10.4% con relación al mejor caso.
- El mejor caso para el suministro nocturno de energía lo presentó el Caso C-B con 0.32 MJ/m^2 . Es importante notar que el Caso C-C presenta un suministro apenas de 3% (0.31 MJ/m^2) por debajo del mejor caso.
- Todas las configuraciones donde el material en contacto con el absorbedor es adobe (A-M2) terminan extrayendo energía de la habitación.
- Con un suministro de 7 h 17 min después del ocaso, la configuración C-C es la que proporciona calentamiento nocturno por más tiempo. Adicionalmente, las configuraciones

en las que el material expuesto al interior de la habitación es concreto (M1-C) proporcionan energía por más tiempo en periodos nocturnos.

- Similar al caso de la energía suministrada por la noche, las configuraciones con concreto en la segunda losa proporcionan los mejores desempeños en la entre total de energía diaria, siendo el muro de C-C el que entrega la mayor cantidad de energía total en el día (5.43 MJ/m²).
- Las configuraciones donde la primera losa es tanto adobe como ladrillo presentan los desempeños más pobres y los tiempos de suministro más cortos; mientras que los casos que involucran concreto en la primera y/o segunda losa mejoran el desempeño del muro y aumenta y aumenta el tiempo de suministro.
- De acuerdo con los resultados de la fracción líquida media con variación en la posición del PCM, las configuraciones C-C, C-B- y C-A presentan un mejor desempeño, alcanzando el cambio de fase al 100% y manteniéndolo en mayor tiempo con respecto a las demás situaciones. Por otra parte, las configuraciones cuya primera losa es adobe, no alcanzan el cambio de fase por completo cuando $x_{PCM}=9$ cm. De igual manera, los muros en los cuales la primera losa es ladrillo logran alcanzar el cambio de fase con dificultad, en especial para $x_{PCM}=9$ cm y logran mantenerse en fase líquida por menos tiempo que los casos donde la primera losa es de concreto.

Como conclusión general, se concluye que las configuraciones que involucran concreto como material de construcción tienen a presentar mejor desempeño térmico en el sistema PCM-TW. Así, no se recomienda utilizar configuraciones con adobe y ladrillo, en especial en la primera losa, ni tampoco ubicar el PCM a los 9 centímetros, ya que presentan los desempeños térmicos más pobres. Por último, antes de incorporar un PCM-TW a una edificación, debe considerarse el uso que tendrá la habitación. Si ésta es de uso diurno como un aula de clase u oficina, se recomienda emplear la configuración de C-C con $x_{PCM}=1$ cm. Por otra parte, si la edificación tendrá un uso nocturno, lo ideal sería utilizar la variación de C-C con $x_{PCM}=9$ cm. En el caso que se desee utilizar una

habitación tanto para el periodo diurno como el nocturno, el caso que presenta mejor desempeño es C-C con $x_{PCM}=5$ cm.

Adicionalmente a esto, se concluye que tanto el objetivo general como los objetivos específicos y el alcance se cumplieron satisfactoriamente.

5.2. Recomendaciones para trabajos futuros.

Con el fin de dar un seguimiento al estudio realizado en este trabajo, se recomiendan los siguientes puntos para estudios posteriores:

- Elaborar un estudio experimental de un PCM-TW con el fin de obtener información para validar el modelo teórico.
- Realizar un estudio que considere la manipulación controlada del paso del fluido del canal a la edificación con el fin de disminuir pérdidas a través del vidrio y aumentar el tiempo de suministro de energía durante la noche.
- Continuar con el análisis del comportamiento térmico del PCM-TW para condiciones climáticas de otros climas de la República Mexicana.
- Evaluar el efecto del punto de fusión del PCM sobre el desempeño térmico del sistema .
- Considerar el efecto convectivo en el PCM cuando este se funde.

CAPÍTULO 6:

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Andreozzi A., Iasiello M., Tucci C. (2021) Numerical Investigation of a phase Change Material including natural convection effects. *Energies*. Vol. 14, pág. 348.

Aparicio-Mercado (2021) Análisis dinámico de un sistema solar pasivo de Muro Trombe con un material de cambio de fase bajo condiciones climáticas de México. Tesis de maestría, UNISON, Hermosillo, Sonora, México.

Arıcı M., Bilgina F., Nižetić S., Karabaya H. (2020). PCM integrated to external building walls: An optimization study on maximum activation of latent heat. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 165, pág. 114560.

Castellón C., Castell A., Medrano M., Martorell I., Cabeza L. (2006). Experimental study of PCM inclusion in different building envelopes. *Journal of Solar Energy Engineering*. Vol. 131, págs 041006:1-5.

Churchill S, Chu H, Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 18 (1975): 1323– 1329.

Duan S., Li H., Zhao Z., Wang L. (2021). Investigation on heating performance of an integrated phase change material Trombe wall based on state space method. *Journal of Energy Storage*. Vol 38, pág. 102460.

Duffie A, Beckman A, (2006) *Solar engineering of thermal processes*, John Wiley and Sons, Inc, New York.

Hernández-López I., Vázquez-Beltrán E., Xamán J., Chávez Y., Hinojosa J. (2021) Heating potential prediction of a Trombe wall system under temperate climate conditions of Mexico: Case of Cwa-Cwb Köppen classification. *Journal of Building Engineering*. Vol. 44, pág. 103308.

Hernández-López I., Xamán J., Chávez Y., Hernández-Pérez I., Alvarado R. (2016) Thermal energy storage and losses in a room-Trombe wall system located in Mexico. *Energy*, Vol. 109, págs. 512-524.0

Incropera F, De Witt D, *Fundamentals of heat and mass transfer*, 5ta edición, John Wiley, New York (2002).

INEGI, *Presentación de resultados*, Estados Unidos Mexicanos (2020): 9-13

Leang E., Tittlein P., Zalewski L., Lassue S. (2017) Numerical study of a composite Trombe solar wall integrating microencapsulated PCM. *Energy Procedia*. Vol. 122, págs. 1009-1014.

Leang E., Tittlein P., Zalewski L., Lassue S. (2020) Numerical and experimental investigations of composite solar walls integrating sensible or latent heat thermal storage. *Applied science*. Vol 10, pág. 1854.

Li S., Zhu N., Hu P., Lei F., Deng R. (2019) Numerical study on thermal performance of PCM Trombe Wall. *Energy Procedia*. Vol. 158, págs. 2441-2447.

Licholai L., Starakiewicz A., Krason J., Miasik P. (2021) The Influence of Glazing on the Functioning of a Trombe Wall Containing a Phase Change Material. *Energies*. Vol. 14, pág. 5243.

Morse ES, *Warming and ventilating apartments by the suns' rays*, U.S. Patent (1881): 246-626, 1881.

Nejat P, Jomehzadeh F, Taheri MM, Gohari M, Majid MZA, (2015) A global review of energy consumption, CO2 emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO2 emitting countries), *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43: 843-862.

Omara A. y Abuelnuor A. (2011). Trombe walls with phase change materials: A review. *Energy Storage*. Vol. 2, pág. 123.

Quezada-García M. (2017). Análisis de transporte de calor a través de un sistema constructivo con cambio de fase. Tesis de Maestría, UNAM, Ciudad de México, Edo. De México (México).

Rabani M., Kalantar V., Faghieh A., Rabani M., Rabani R. (2013). Numerical simulation of a Trombe wall to Predict the energy storage rate and time duration of room heating during the non-sunny periods. *Heat Mass Transfer*, Vol. 49, págs. 1395-1404.

SENER (2019) Balance Nacional de Energía: 29-36.

Uttinger D, Klein S, Mitchell J, (1980) The effect of air rate in collector-storage wall, *Solar Energy* 25: 511-519.

Zhu N., Deng R., Hu P., Lei F., Xu L., Jiang Z. (2021). Coupling optimization study of key influencing factors on PCM Trombe wall for year thermal management. *Energy*. Vol 236, pág, 121470.

Anexo A

Propiedades termofísicas de los materiales y hoja de datos del PCM

En la Tabla A.1 se presentan las propiedades termofísicas y radiativas de los materiales que fueron evaluados en el TW, obtenidos de Vázquez-Beltrán³ (2019).

Tabla A.1. Propiedades termofísicas y radiativas.

Pared semitransparente		Adobe ¹	Ladrillo ²	Concreto ²
$\varepsilon_g^* = 0.85$		$\varepsilon_A^* = 0.90$	$\varepsilon_B^* = 0.93$	$\varepsilon_C^* = 0.90$
$\rho_g^* = 0.08$	$\lambda_g = 1.40 \text{ W/mK}$	$\lambda_A = 0.49 \text{ W/mK}$	$\lambda_B = 0.70 \text{ W/mK}$	$\lambda_C = 1.70 \text{ W/mK}$
$\tau_g^* = 0.78$	$\rho_g = 2500 \text{ kg/m}^3$	$\rho_A = 1306 \text{ kg/m}^3$	$\rho_B = 1600 \text{ kg/m}^3$	$\rho_C = 2240 \text{ kg/m}^3$
$\alpha_g^* = 0.14$	$C_{p,g} = 750 \text{ J/kgK}$	$C_{p,A} = 1150 \text{ J/kgK}$	$C_{p,B} = 1073 \text{ J/kgK}$	$C_{p,C} = 880 \text{ J/kgK}$
-	$\alpha_g = 7.47 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^2$	$\alpha_A = 3.26 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^2$	$\alpha_B = 4.08 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^2$	$\alpha_C = 8.62 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^2$

Para la Tabla A.2 se muestran las propiedades termofísicas del PCM P-29 obtenidas a partir de la hoja de datos de PureTemp⁴.

Tabla A.2. Propiedades termofísicas del PCM PureTemp 29

Apariencia	Líquido claro, sólido ceroso
Punto de fusión	29 °C
Capacidad de acumulación de calor	202,000 J/kg
Conductividad térmica (líquido)	0.15 W/m°C
Conductividad térmica (sólido)	0.25 W/m°C
Densidad (líquido)	85,000 kg/m ³
Densidad (sólido)	94,000 kg/m ³
Calor específico (líquido)	1940 J/kg°C
Calor específico (sólido)	1770 J/kg°C

¹ Chávez-Galán P.T., Almanza R y Rodríguez N., (2007) Experimental measurements of thermal properties for Mexican building materials to simulate behavior to save energy. Proceedings of ISES world congress, I-V:496-501.

² ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2009). Fundamentals handbook, E.U.A.

³ Vázquez-Beltrán (2019) Análisis dinámico de un sistema solar pasivo de Muro Trombe para condiciones climáticas de México. Tesis de maestría, Tecnológico Nacional de México, Cuernavaca, Morelos, México.

⁴ PureTemp (2021), Hoja de datos de PureTemp:
<https://www.puretemp.com/stories/puretemp-technical-data-sheets>

Anexo B

Productos y Beneficios obtenidos

En este anexo se muestran los productos y beneficios obtenidos durante la elaboración del presente trabajo. Estos se presentan a continuación:

1. Un artículo en la Revista semestral Académica de la 8ª Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada del TECNOM/CENIDET.
2. Una ponencia titulada “Estudio Paramétrico de un Muro Trombe con un Material de Cambio de Fase: Efecto de los Materiales de Construcción.”, en la 8ª Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada TECNOM/CENIDE

Estudio paramétrico de un muro Trombe con un material de cambio de fase: efecto de los materiales de construcción.

J. P. Ibarra-Salazar*, E. Vázquez-Beltrán*, I. Hernández-López*, I. Zavala-Guillén**

*Universidad de Sonora, DIQyM-UNISON, Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N, Hermosillo, Sonora, CP 83000
(e-mail: irving.hernandez@unison.mx).

**Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, CICESE, Carr. Ensenada-Tijuana
No. 3918, Zona Playitas, Ensenada, Baja California, CP 22860.

Resumen:

Este trabajo presenta el estudio teórico del efecto de los materiales de construcción de un sistema de muro Trombe con un material de cambio de fase (PCM-TW) sobre la energía suministrada a una edificación bajo las condiciones climáticas de Tacubaya, Ciudad de México. El sistema consiste en un muro compuesto por un material de cambio de fase ubicado entre dos losas de igual espesor que pueden ser de adobe o concreto. Con el propósito de determinar la configuración óptima, se realizó un análisis dinámico del sistema PCM-TW utilizando las configuraciones de Concreto-Adobe (C-A), Adobe-Concreto (A-C) y Concreto-Concreto (C-C). Se consideró la incorporación del sistema PCM-TW a una habitación con temperatura de confort térmico de 24 °C. Se utilizó el método de balances globales de energía (GE) para resolver la conducción de calor en el vidrio colector, y la convección y radiación en el canal de aire. Adicionalmente, se utilizó el método de volumen finito para la resolver la difusión térmica en el muro masivo con PCM. Los resultados mostraron que una configuración de Concreto-Adobe (C-A) proporcionó hasta 10% más energía durante el día, por lo cual es ideal para uso diurno. En el caso de uso nocturno, con un suministro de energía de hasta 12%, la configuración de Concreto-Concreto (C-C) resultó ser la mejor para uso nocturno.

Palabras clave: muro Trombe, PCM, arquitectura bioclimática, calefacción pasiva, evaluación dinámica.

1. INTRODUCCIÓN

Las edificaciones representan un sector importante en el ámbito energético a nivel mundial, de acuerdo con cifras reportadas por la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés), la producción de energía en 2019 se incrementó en un 2.82% con respecto al año anterior, donde las edificaciones representan alrededor del 22% del consumo energético a nivel mundial. IEA, (2021).

El informe sobre la situación mundial de los edificios y la construcción 2020, reporta que la operación y construcción de una edificación emite hasta un 38% de CO₂, donde alrededor del 28% de las emisiones corresponde al consumo de energía dentro de las edificaciones, United Nations Environment Programme, (2020). Casi una quinta parte del aumento de las emisiones de CO₂ en este sector, se debe al uso continuo de la energía eléctrica. Esto último es entendible ya que la energía eléctrica es el tipo de energía que se utiliza en sistemas de aire acondicionado y calefacción para el establecimiento de condiciones de confort térmico en edificaciones.

Considerando lo anterior, es primordial la implementación de nuevas tecnologías que ayuden a mantener un confort térmico, a disminuir el consumo energético y así, minimizar su impacto ambiental. En este sentido, el sistema de muro Trombe (TW por sus siglas en inglés) es un sistema solar pasivo de ganancia indirecta que se utiliza con fines de calefacción y en ciertas ocasiones, para ventilación, (Morse, 1881).

Este sistema ha sido estudiado desde el siglo pasado principalmente en su configuración de calefacción. En el trabajo de Utzinger et al. (1980) desarrollaron un modelo unidimensional (1D) basado en el método de balances globales (GB) para determinar, los efectos del flujo de calor no uniforme (2D) a través del TW. Los autores concluyen que el modelo 1D con una variación exponencial de la temperatura brinda una excelente concordancia en comparación con un modelo 2D.

Hernández-López, (2016) realizó un estudio paramétrico bajo las condiciones de un clima clasificación Köppen Cwb de México. De acuerdo con el autor, el uso de concreto en el muro mejora desempeño térmico del TW. Además, cuando el ancho

del canal y el espesor del muro son mayor o igual a 20 y 30 cm, respectivamente, no presenta mejoras significativas.

Por otro lado, Hernández-López et al. (2016) determinaron, el almacenamiento térmico para el día más frío y cálido en un clima Cwb con valores de 109 MJ y 70 MJ, respectivamente. Mientras que, las pérdidas a través del vidrio colector hacia el exterior fueron de 57.3 al 64.6%. En otras palabras, más de la mitad de la energía solar que se introduce al sistema se pierde en esta componente. Los autores señalan que la implementación de materiales convencionales en el sistema TW tiene una importante limitación en la capacidad almacenamiento térmico del muro. Así como un alto coeficiente de pérdidas por la pared semitransparente.

Por lo tanto, para mejorar el desempeño térmico del sistema TW diversos autores han incorporado materiales de cambio de fase (PCM, por sus siglas en inglés), los cuales, son usados como medio de almacenamiento de energía térmica mediante el aprovechamiento del calor latente durante el cambio de fase. Es decir, absorben energía sensible del muro mientras se derriten y la liberan hacia él mientras se solidifican (Xiong et al. 2022).

Rabani et al. (2013) determinaron el uso de materiales de PCM como un muro almacenador el cual incrementa su capacidad de almacenamiento térmico lo que mantiene una mayor temperatura en la habitación y con ello, un mejor desempeño térmico del sistema sin la necesidad de emplear muros gruesos.

Por otro lado, Li et al. (2019) propusieron un nuevo diseño de muro almacenador integrado con una doble capa (exterior e interior) de PCM. El cual mejora el calentamiento en verano y reduce las fluctuaciones en invierno. Subsecuentemente, Liu et al. (2020) estudiaron los efectos de un componente aislante externo en el desempeño térmico del TW con PCM. Los autores observaron que, el confort térmico mejora significativamente durante la noche. Posteriormente, Duan et al. (2021) determinó, la relación óptima de la temperatura de fusión y el espesor de capa del PCM de 23°C y 5 cm respectivamente.

Recientemente, Aparicio (2021) realizó un estudio del efecto del punto de fusión de un PCM sobre el desempeño del sistema TW. El autor determinó que el mejor desempeño del sistema se obtiene al utilizar un PCM con punto de fusión de 29°C mismo que es 1.25 veces mejor que el TW sin PCM para calentamiento exclusivamente nocturno. En la configuración propuesta por el autor se colocó el PCM entre dos losas de concreto.

Si bien en la literatura existen estudios publicados sobre el desempeño térmico de sistemas PCM-TW, hasta la fecha no se han reportado algunos parámetros que podrían optimizar su desempeño. Un parámetro importante por analizar es el material de construcción que rodea al PCM.

En este sentido, el propósito de este trabajo es el de estudiar el efecto que tiene el uso de dos distintos materiales en el almacenador sobre el desempeño de un PCM-TW. En el presente estudio se consideran dos materiales típicos: Adobe y Concreto. Estas configuraciones se evalúan bajo las condiciones climáticas de una ciudad mexicana con clima templado.

2. MODELO FÍSICO Y MATEMÁTICO

La Figura 1 muestra el modelo físico del sistema PCM-TW. Éste está constituido por los siguientes elementos: 1) la pared del vidrio colector con espesor L_g ; 2) el muro almacenador con PCM encapsulado por dos losas que pueden ser de adobe (A) o concreto (C), la primera con espesor L_1 y la segunda con L_2 . El muro tiene una altura de H_w , un espesor en conjunto de L_w : el espesor de PCM de L_{PCM} , donde $L_w = L_1 + L_{PCM} + L_2$; 3) el canal de aire formado por el vidrio y el muro almacenador; 4) el canal con ancho de L_c . El sistema cuenta con ventilas en la parte superior e inferior que funcionan para establecer un lazo convectivo entre el canal y la habitación. Cada ventila tiene una longitud de apertura H_v igual al ancho del canal ($H_v = L_c$). El sistema tiene una profundidad W y una altura H . El sistema PCM-TW se considera orientado al sur con el fin de garantizar la mayor incidencia de radiación solar sobre el absorbente durante el día

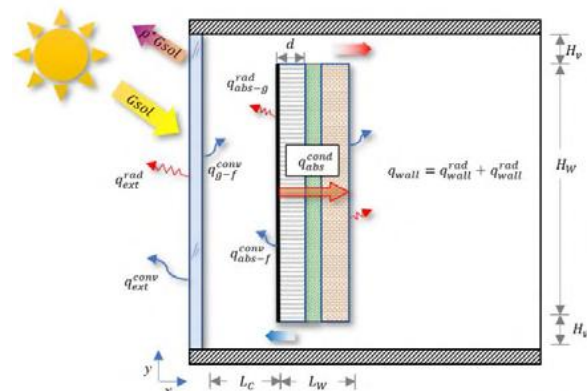


Fig. 1 Modelo físico del sistema PCM-TW.

Con el propósito de reducir la complejidad del modelo matemático, el sistema de muro Trombe se dividió en dos sistemas principales. El primero corresponde al conjunto vidrio-canal. En este conjunto ocurren tres mecanismos de transferencia de calor: conducción en el vidrio, convección en el aire y radiación térmica con las superficies que lo componen. Para resolver las ecuaciones gobernantes de dicho sistema se implementó el método de balances globales de energía (BG).

Por otro lado, el segundo sistema es el muro masivo con PCM. Aquí ocurre el fenómeno de difusión térmica y para su

solución, se optó por emplear al método de volumen finito (MVF).

2.1 Modelo de balances globales de energía en el sistema vidrio-canal.

Para modelar la transferencia de calor en el sistema de vidrio-canal se decidió utilizar 5 nodos con la finalidad conocer lo que sucede en todo el sistema de muro Trombe-PCM.

La Figura 2 muestra la disposición de los puntos nodales en el sistema, 3 se colocaron en el vidrio ($T_{g,1}$, $T_{g,2}$, $T_{g,3}$), uno en el canal (T_f) y otro en la frontera del muro masivo. Este último con el fin de ser el nodo enlace que brinde la información necesaria para el acoplamiento con el otro sistema de muro-PCM.

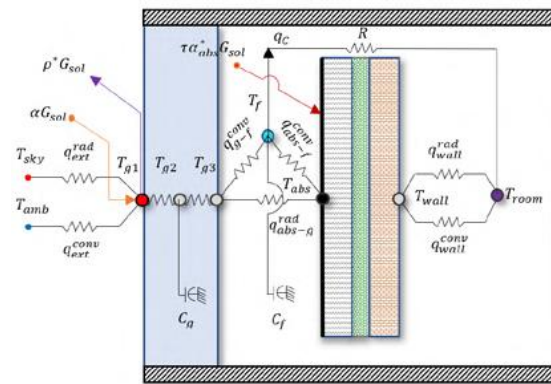


Fig. 2. Diagrama térmico resistivo del sistema.

El modelo matemático de transferencia de calor conjugado en el sistema vidrio-canal se encuentra descrito por las Ecs. (1)-(5):

Nodo $T_{g,1}$:

$$\alpha_g^* G_{sol} = h_{ext}^{conv} [T_{g,1} - T_{amb}] + \epsilon_g^* \sigma [T_{g,1}^4 - T_{sky}^4] + \lambda_g \frac{T_{g,1} - T_{g,2}}{L_g / 2} \quad (1)$$

Nodo $T_{g,2}$:

$$\lambda_g \frac{T_{g,1} - T_{g,2}}{L_g / 2} - \lambda_g \frac{T_{g,2} - T_{g,3}}{L_g / 2} = \rho_g C_{p,g} L_g \frac{dT_{g,2}}{dt} \quad (2)$$

Nodo $T_{g,3}$:

$$\lambda_g \frac{T_{g,2} - T_{g,3}}{L_g / 2} + \epsilon_{g-abs}^* \sigma [T_{abs}^4 - T_{g,3}^4] = h_{g-f}^{conv} (T_{g,3} - T_f) \quad (3)$$

Nodo T_f :

$$h_{g-f}^{conv} (T_{g,3} - T_f) + h_{abs-f}^{conv} (T_{abs} - T_f) - q_c^* = \rho_f C_{p,f} L_c \frac{dT_f}{dt} \quad (4)$$

Nodo T_{abs} :

$$\alpha_{abs}^* G_{sol} = \epsilon_{abs}^* \sigma [T_{abs}^4 - T_{sky}^4] + h_{abs-f}^{conv} (T_{abs} - T_f) + q_{abs}^{cond} \quad (5)$$

Donde las condiciones iniciales para cada punto nodal son igual la temperatura del cuarto ($T_{room}=24^\circ\text{C}$).

2.2 Modelo conductivo del muro almacenador.

En la Figura 3 se observa el sistema físico del muro con PCM el cual se trabajó bajo el método de volumen finito.

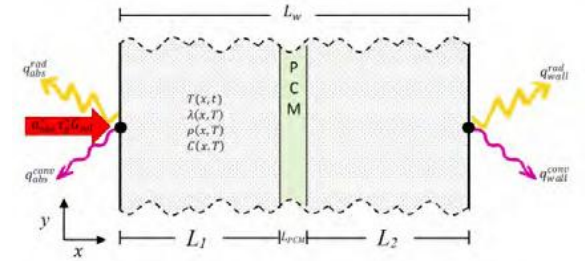


Fig. 3. Modelo físico del sistema muro masivo.

A continuación, se presenta el modelo matemático del sistema del muro almacenador con material de cambio de fase.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

Donde C es el calor específico efectivo ($C = C_p + h_{ls} / \Delta T_{ls}$) el cual representa la suma de las contribuciones de la energía sensible y la energía latente por unidad de masa y por unidad de temperatura Voller y Swaminathan (1991).

3. VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

Para el algoritmo de solución se resolvió el problema de referencia propuesto por Aparicio (2021). El Modelo físico de este problema se muestra en la Figura 4. Éste consiste en una losa compuesta por concreto y un PCM (PureTemp29). El PCM tiene un espesor de 0.01 m, se ubica entre dos secciones idénticas de concreto de 0.05 m de espesor. En la Frontera $x=0$ incide un flujo de calor q_s (750 W/m^2) y la Frontera $x=H_x$ se encuentra aislada.

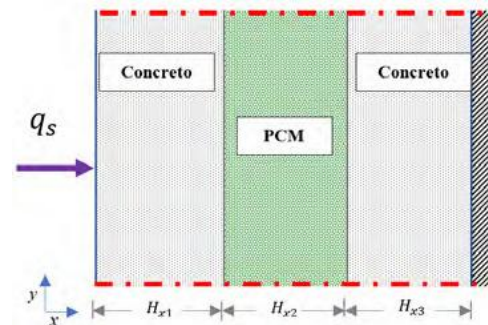


Fig. 4. Modelo físico de losa compuesta de concreto-PCM.

En la Tabla 1 se muestra la comparación de los valores de energía almacenada en los tres diferentes instantes de tiempo (una, dos y tres horas) a partir de un enfoque global y un enfoque diferencial. Se observa que la desviación máxima es de

0.24 % al tiempo de 3 h. Esto permite aseverar que la metodología implementada resuelve de manera satisfactoria la difusión de calor en un sistema de losas con PCM.

Tabla 1. Energía almacenada (en MJ).

t (h)	ΔE_{sto}^{BG}	ΔE_{sto}^{dif}	ε [%]
1.0	2.70	2.70	0.00
2.0	5.40	5.41	0.18
3.0	8.10	8.12	0.24

Para validar el modelo conductivo en una losa de concreto, se reprodujeron los datos experimentales de Chagolla-Aranda et al. (2017). Estos datos corresponden a mediciones realizadas del 21 al 23 de noviembre de 2016 en la ciudad de Cuernavaca, Morelos. En la Figura 5 se presenta la temperatura de la superficie exterior del techo de concreto del dato experimental y la obtenida mediante el modelo matemático. Se encontró una diferencia máxima de 1.9 °C, la cual corresponde al día 22 de noviembre.

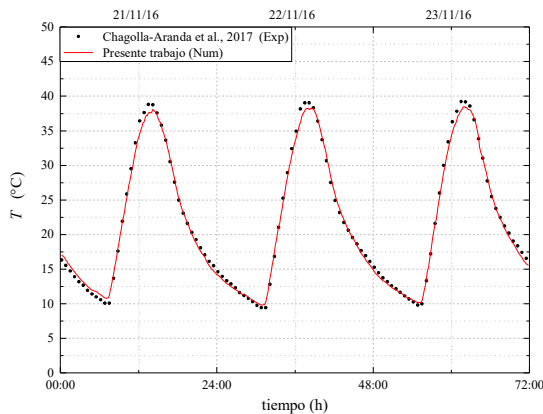


Fig. 5. Comparación de la Temperatura exterior de la losa de concreto.

Por otro lado, se observó que más del 90% de los valores calculados se acercan significativamente a las mediciones experimentales con una diferencia menor al 10% durante todo el período analizado. Así, se concluye que el modelo se ajusta a los datos experimentales de forma satisfactoria.

4. RESULTADOS

Para este estudio, se realizó un análisis dinámico PCM-TW sobre los materiales de construcción del muro: Adobe y Concreto. Con los materiales mencionados anteriormente, se decidió estudiar tres configuraciones diferentes para el muro.

Estas son: concreto-concreto (C-C), concreto-adobe (C-A) y adobe-concreto (A-C). Teniendo en cuenta que el PCM se encuentra situado entre las losas de las distintas configuraciones. Con el propósito de realizar esta evaluación, se fijó a la configuración C-C como la referencia y se consideraron las condiciones climáticas del día más frío del año de la alcaldía de Tacubaya, Ciudad de México.

En la Figura 6 se muestran el flujo calor suministrado a la edificación (q_{int}) para las tres configuraciones del muro. Es importante mencionar que q_{int} es la suma del flujo de calor útil, (el cual es proporcionado por la convección en el canal, q_c) y del flujo de calor suministrado por a través del muro (q_{wall}). Se observa que para las 7:00 AM, en los tres casos, q_{int} encuentra debajo del cero, significando que el muro está extrayendo energía de la habitación.

Se muestra que aproximadamente entre las 10:00 AM y 15:00 PM, el comportamiento del flujo de calor interior para la configuración A-C, está mayormente influenciada por q_c , esto se debe principalmente a la difusividad térmica del adobe ya que, para éste, es más difícil conducir la energía a través de él, provocando que el calor proveniente del sol, caliente el aire dentro del canal, dificultando el almacenamiento de energía para el muro.

Por otro lado, se observa que para los Casos C-C y C-A (donde la primera losa es de concreto) permiten el paso de la energía con mayor facilidad. Esto se debe a que el concreto, al tener mejor conductividad térmica que el Adobe, conduce de mejor manera el calor.

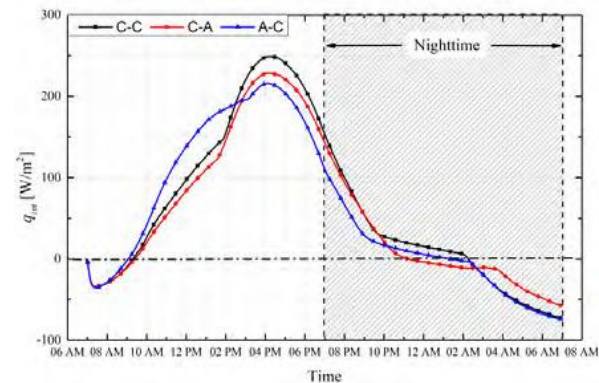


Fig. 6. Comportamiento de los flujos de calor hacia el interior de la habitación.

Conforme llega el periodo nocturno, se observa que para los Casos C-C y A-C (muros compuestos por una segunda losa de concreto) tienden a liberar más fácilmente la energía almacenada del muro hacia la habitación. Sin embargo, para el

Caso C-A se nota como el flujo de calor no desciende de manera tan abrupta como en los otros dos casos, una vez más esto se debe a las propiedades termofísicas del adobe, que dificultan el paso de la energía.

En la Figura 7 se muestra la evolución de la fracción líquida media para todos los casos. Por medio de esta figura es posible observar si el PCM en el muro se funde en su totalidad ($f_{ave} = 1.0$) o no ($0.0 < f_{ave} < 1.0$). Se observa que, para los Casos C-C y C-A, el PCM empiezan a fundirse alrededor de las 10 AM. En cuanto al Caso A-C, el proceso de cambio de fase inicia alrededor de 20 minutos después. Esto se debe, una vez más, a que el adobe retarda al flujo de energía a través del muro y con ello, el incremento de temperatura del PCM.

La Configuración C-A es la primera en fundir por completo el material de cambio de fase desde la 13:30 PM y consigue mantenerse en fase líquida hasta las 10:30 PM, esto es gracias que el PCM está en función de los materiales que lo rodean, primeramente, se tiene una losa de concreto la cual permite con mayor facilidad el flujo de calor hacia el PCM.

Por otro lado, se tiene la losa de adobe la cual retiene mucho más a la energía, lo que provoca que ésta se almacene en el PCM. Para el Caso A-C, se observa que el material de cambio de fase tarda en fundirse poco más de una hora con respecto al Caso C-A.

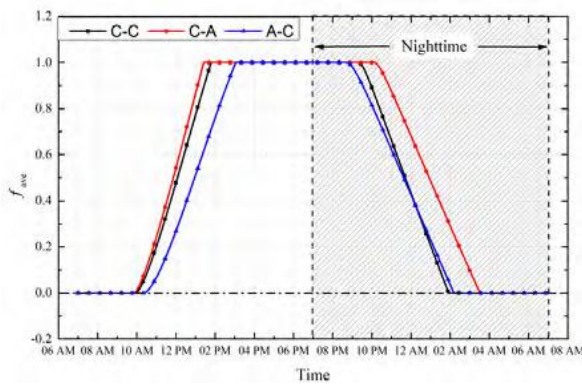


Fig. 7. Efecto del punto de fusión sobre la fracción líquida media.

Para el periodo nocturno se observa que la Configuración C-A es la que almacenó mayor energía por lo que tarda más en solidificarse, mientras que el Caso C-C fue el primero en solidificarse. Sin embargo, es secundado por el Caso A-C ya que fue este caso cuyo PCM permaneció en estado líquido por menor tiempo. Esto sugiere que el Caso A-C fue el que almacenó menor cantidad de energía.

La Tabla 2 muestra de manera cuantitativa la energía almacenada desde 7:00 AM hasta las 19:00 PM, es decir, durante las horas de exposición solar. También se presenta la energía suministrada a la edificación (E_{int}), la cual se divide en dos periodos: el diurno ($E_{int,d}$) y el nocturno ($E_{int,n}$), y la energía almacenada durante el día ($E_{sto,d}$).

Tabla 2. Energía almacenada y suministrada (en MJ/m²).

Caso	$E_{sto,d}$	$E_{int,d}$	$E_{int,n}$	E_{int}	t_{sp} [s]
C-C	4.50	5.11	0.31	5.42	7 hr 14 min
A-C	3.70	5.14	-0.15	4.99	6 hr 10 min
C-A	4.79	4.60	0.27	4.87	4 hr 09 min

En la Tabla 2 se comprueba que efectivamente el Caso A-C, con 3.70 MJ/m² fue el que retuvo menor cantidad de energía durante el día. Con 4.79 MJ/m², el Caso C-A fue la mejor configuración para almacenar calor ($E_{sto,d}$), apenas 6.44% más que el Caso C-C. Con relación a la energía suministrada en periodo diurno ($E_{int,d}$), los Casos A-C y C-C son los mejores; el primero con una superioridad menor al 0.6% con relación al segundo. Para la energía suministrada en periodo nocturno ($E_{int,n}$), el Caso C-C fue el mejor; 12% superior al Caso C-A. En cuanto al Caso A-C, éste presentó un valor negativo, lo cual indica que se presentó la extracción de energía de la edificación, situación que debe evitarse. Finalmente, con respecto a la energía total suministrada (E_{int}) y por el tiempo de suministro en periodo diurno (t_{sp}), se aprecia que el muro con materiales C-C es el que presenta mejor desempeño.

5. CONCLUSIONES

Se analizó un PCM-TW con diferentes materiales bajo condiciones climáticas de la alcaldía de Tacubaya en la Ciudad de México. El comportamiento de este sistema se comparó con un PCM-TW con una configuración de concreto-concreto. Con base en los resultados, puede concluirse lo siguiente:

- El caso C-A fue el que almacenó mayor energía durante el día, sin embargo, fue el que peor desempeño tuvo al momento de entregar energía al recinto.
- Para periodos diurnos, las Configuraciones A-C y C-C, con una diferencia menor al 0.6% fueron las mejores.
- Durante el periodo nocturno, la configuración C-C proporcionó 12% más energía a la habitación y hasta por dos horas más con relación a los otros dos casos.

Como conclusión general, se puede afirmar que el sistema de PCM-TW tiene la capacidad para ser implementado en Tacubaya en la Ciudad de México. Finalmente, antes de incorporar un PCM al sistema de TW, debe considerarse el

uso que tendrá la edificación. Si la edificación es de uso diurno como un aula de clase, la configuración A-C es la opción más adecuada para calefacción pasiva. Por otro lado, si la edificación tendrá un uso nocturno como un dormitorio, la configuración C-C es la ideal. Si el sistema tendrá un uso mixto, la Configuración C-C es la idónea.

NOMENCLATURA

a	Radio del cilindro [m]
q_c^*	Flujo de calor útil normalizado [W/m ²]
G _{sol}	Radiación solar incidente
K	Razón de conductividad térmica
N(β_m)	Norma [m ²]
r	Coordenada radial [m]
R _{th}	Resistencia térmica de contacto [m ² K/W]
T	Temperatura [K]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann [W/m ² K ⁴]
z	Coordenada axial [m]
Z	Espesor de losa [m]
β	Valor propio [m ⁻¹]
ε^*	Emitancia
λ	Conductividad térmica [W/mK]
α^*	Absortancia
ρ^*	Reflectancia

REFERENCIAS

- Aparicio, L.F. (2021). Análisis dinámico de un sistema solar pasivo de muro Trombe con un material de cambio de fase bajo condiciones climáticas de México, Tesis de maestría, Universidad de Sonora.
- Chagolla-Aranda, M.A., Simá, E., Xamán, J., Álvarez G., Hernández-Pérez, I., Téllez-Velázquez E. (2017). Effect of irrigation on the experimental thermal performance of a green roof in a semi-warm climate in Mexico. *Energy and Buildings*, 154, 232-243.
- Churchill, S., Chu, H. (1975). Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 18, 1323-1329.
- Duan S., Li H., Zhao Z., Wang L. (2021) Investigation on heating performance of an integrated phase change material Trombe wall based on state space method. *Journal of Energy Storage*, 38, 102460.
- Hernández-López I. (2016). Análisis de la transferencia de calor conjugada en un sistema solar pasivo de muro Trombe para calentamiento y ventilación, Tesis de doctoral, Cenidet.
- Hernández-López, I., Xamán, J., Chávez, Y., Alvarado-Juárez, R. (2016). Thermal energy storage and losses in a room-trombe wall system located in México. *Energy*, 109, 512-524.
- INEGI (2020). Presentación de resultados, Estados Unidos Mexicanos. 9-13.
- International Energy Agency. (2021). World Energy Balance.
- Li S., Zhu N., Hu P., Lei F., Deng R. (2019). Numerical study on thermal performance of PCM Trombe Wall. *Energy Procedia*, 158, 2441-2447.
- Liu Y., Hou L., Yang Y., Feng Y., Yang L., Gao Q. (2020). Effects of external insulation component on thermal performance of a Trombe wall with phase change materials. *Solar Energy*, 204, 115-133.
- Morse, E.S. (1881). Warming and ventilating apartments by the sun's rays, U.S. Patent, 246-626.
- Rabani, M., Kalantar, V., Faghih A.K., Rabani, M., Rabani, R. (2013). Numerical simulation of a trombe wall to predict the energy storage rate in non-sunny periods. *Heat Mass Transfer*, 49, 1395-1404.
- United Nations Environment Programme. (2020). 2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emissions, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector - Executive Summary.
- Utzinger, D., Klein, S., Mitchell, J. (1980). The effect of air rate in collector-storage wall, *Solar Energy*, 25, 511-519.
- SENER. (2019). Balance Nacional de Energía. 29-36.
- Utzinger, D., Klein, S., Mitchell, J. (1980). The effect of air rate in collector-storage wall, *Solar Energy*, 25, 511-519.
- Vázquez-Beltrán, E. (2019). Análisis dinámico de un sistema solar pasivo de muro Trombe para condiciones climáticas de México. Tesis de Maestría CENIDET.
- Xiong Q., Alshehri H. M., Monfaredi R., Tayebi T., Majdoub F., Hajjar A., Delpisheh M., Izadi M. (2022) Application of phase change material in improving trombe wall efficiency: An up-to-date and comprehensive overview. *Energy and Buildings*, 258, 111824.
- Voller, V.R., Swaminathan, C.R. (1991). General source-based method for solidification phase-change, *Numerical Heat Transfer B*, 19, 175-189.



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO A TRAVÉS DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

OTORGA EL PRESENTE

RECONOCIMIENTO

A

**JUAN PABLO IBARRA, IRVING HERNÁNDEZ, EDGAR VÁZQUEZ AND
IVETT ZAVALA**

POR LA PRESENTACIÓN DEL ARTICULO:

ESTUDIO PARAMÉTRICO DE UN MURO TROMBE CON UN MATERIAL DE CAMBIO DE FASE:
EFECTO DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.

EN EL MARCO DE LA 8ª JORNADA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA APLICADA, CELEBRADA
DEL 25 AL 27 DE MAYO DE 2022, EN EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO.

CUERNAVACA, MORELOS, 27 DE MAYO DE 2022



DRA. YESICA IMELDA SAAVEDRA BENÍTEZ
**DIRECTORA DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO**

Sello Digital:

ws84Ksu9LSaiKuFb7N5wvYI9Px8wAuYm09Gnf117rFfAEyX01CkAuBSShyG56q0DvDxkhP/+f9/GJD1vD02AYd
hzWx2+i0QgnL/cmxAaQ9Q0Mh02ndBEKe3fRNSfUD0RjtQnZ0486tQGiwP0F6hAsgeTQf0I3IYtLeboop8N0fwv
iUwPquRUKQhVAS8Ayq6PoH7w64vRdk6vKYTzbWtszqIAVdVDRpDwDsD6cZ/XWeA+QxxupctIwMz3DBE4yzh101
AhrT6aR1DwE/cCo5jGJD8Kb90Nop3VaU2zmYP9inGsP0wDzY5WRVYLKdw2NLThiQfb1zsXsgZcTW4vBSELA==

JCYTA040722

<http://constancias.cenidet.tecnm.mx>