



**EDUCACIÓN**

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

# Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico

## Tesis de Doctorado

ESTUDIO DINÁMICO DE ELEMENTOS TÍPICOS  
CONSTRUCTIVOS DE MÉXICO INCLUYENDO UN  
MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

presentada por

**M. C. Daniel García Pérez**

como requisito para la obtención del grado de  
**Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica**

Director de tesis

**Dra. Yvonne Chávez Chena**

Codirector de tesis

**Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor †**

**Dra. Ivett Zavala Guillén**

Cuernavaca, Morelos, México. Agosto de 2023.



Cuernavaca, Mor.,  
No. De Oficio:  
Asunto:

03/agosto/2023

SAC/127/2023

Autorización de  
impresión de tesis

**DANIEL GARCÍA PÉREZ**  
**CANDIDAT AL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS**  
**EN INGENIERÍA MECÁNICA**  
**P R E S E N T E**

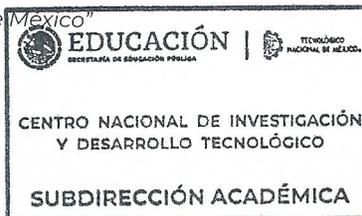
Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **“Estudio dinámico de elementos típicos constructivos de vivienda en México incluyendo un material de cambio de fase”**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

*Excelencia en Educación Tecnológica®*

*“Conocimiento y tecnología al servicio de México”*



**CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA**  
**SUBDIRECTOR ACADÉMICO**

C. c. p. Departamento de Ingeniería Mecánica  
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz





Cuernavaca, Mor., a 31 de julio de 2023

**DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA**  
SUBDIRECTOR ACADÉMICO  
PRESENTE

AT'n: **DR. JORGE COLÍN OCAMPO**  
PRESIDENTE DEL CLAUSTRO DOCTORAL  
DEL DEPARTAMENTO DE ING. MECÁNICA

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del estudiante **Daniel García Pérez** manifiestan que después de haber revisado el documento de tesis titulado "Estudio dinámico de elementos típicos constructivos de vivienda en México incluyendo un material de cambio de fase" realizado bajo la dirección de la Dra. Yvonne Chávez Chena y la codirección de la Dra. Ivett Zavala Guillén, el trabajo se ACEPTA para proceder a su impresión.

ATENTAMENTE

DR. JESÚS ARCE LANDA  
CENIDET

DR. EFRAÍN SIMÁ MOO  
CENIDET

DR. MIGUEL ÁNGEL CHAGOLLA ARANDA  
CENIDET

DR. IRVING OSIRIS HERNÁNDEZ LÓPEZ  
UNISON

DRA. YVONNE CHÁVEZ CHENA  
CENIDET

DRA. IVETT ZAVALA GUILLÉN  
CICESE

c.c.p: Mtra. Ma. Elena Gómez Torres jefa del Departamento de Servicios Escolares  
c.c.p: Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza Subdirector Académico  
c.c.p: Expediente



# *Dedicatoria*

*Dedico este trabajo a la memoria del **Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor**, quien me dio la oportunidad y me apoyo académicamente desde que llegue como residente, quien me apoyo académicamente y moralmente antes de entrar a la maestría, quien siempre se esforzó por transmitir todo su conocimiento, una persona digna de su profesión, una persona que trascendió no solo por sus logros, sino por el impacto que tuvo en sus alumnos, porque siempre confió en aquellos que no confiaban en sí mismo y les mostró de lo que eran capaces.*

*A la memoria de mi abuela **Teresa Pérez González**, a quien siempre quise como madre y que me enseñó a nunca rendirme ante las adversidades, ser humilde y honrado, quien me enseñó a siempre trabajar y siempre aconsejarme.*

*A mi madre **Martha García Pérez**, quien me dio la vida y siempre me ha apoyado en cada paso que doy, quien me enseñó a luchar por mis sueños.*

*A mi padre **Hector Sánchez Vega**, quien me ha enseñado a trabajar y a ganarme la vida horadamente.*

*A mi hermana **Isabel** y a mis hermanos **Misael** y **Héctor**, quienes siempre me han dado ánimos ante cualquier situación.*

*A mi tío **Alfredo**; A mi tía **Yolanda** y su esposo **Jorge**; a mi tía **Carmen** y su esposo **Jaime**; a mi tío **Alfonso** y su esposa **Marcela**; a mi tío **Franciso** y su esposa **Carmina**; y a mi tío **Evodio** y esposa **Gabriela** por sus consejos y ánimos.*

*A **Yessenia Olazo Gómez** por su gran amistad y consejos, siempre me dio el ejemplo de nunca rendirme, siempre luchar hasta el final.*

*A doña **Irma Bustamante Mendoza**, a la **Dra. Elva Lilia Reynoso Jardón** y a la **Lic. Patricia Armas León** por su gran apoyo.*

# *Agradecimientos*

*Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico y académico para la realización de esta tesis.*

*Agradezco al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por la oportunidad de crecer académicamente.*

*Agradezco a Dios por permitirme realizar este trabajo y por darme la fuerza para nunca rendirme.*

*Agradezco al Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor por la oportunidad de trabajar bajo su dirección, por compartir su conocimiento, por su apoyo que siempre me brindó y por su confianza hacia mí al permitirme desarrollar este trabajo. Donde quiera que esté le agradezco por su enseñanza, porque de ello aprendí que la disciplina es más poderosa que la inteligencia; la inteligencia logra cosas grandes pero la disciplina logra cosas extraordinarias.*

*Agradezco a la Dra. Yvonne Chávez Chena por su confianza para realizar este trabajo bajo su dirección, por su apoyo durante todo este tiempo, por todo su conocimiento compartido y por sus consejos para el desarrollo de este trabajo.*

*Agradezco a la Dra. Ivett Zavala Guillén por el apoyo que me brindó para continuar y terminar este trabajo, por su enseñanza, por permitirme trabajar bajo su dirección y por ser una guía para culminar exitosamente este trabajo.*

*Agradezco al Dr. Jesús Arce Landa, al Dr. Efraín Simá Moo, al Dr. Miguel Ángel Chagolla Aranda y al Dr. Irving Osiris Hernández López por sus observaciones y comentarios en la realización de esta tesis, pues cada uno de sus comentarios y observaciones ayudaron a mejorar académica y profesionalmente.*

*Agradezco especialmente a la Dra. Yessenia Olazo Gómez por su amistad, por sus consejos, por su apoyo y por sus comentarios durante la realización de la Tesis, pues con ello no solo mejore académicamente y profesionalmente, sino también aprendí a ser perseverante, a nunca rendirme.*

# Índice general

Índice de figuras	VI
Índice de tablas	VII
Resumen	VIII
Abstract	XI
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Paredes con material de cambio de fase . . . . .	5
1.2. Techos con material de cambio de fase . . . . .	10
1.3. Techo-pared con material de cambio de fase . . . . .	15
1.4. Estudios a nivel nacional . . . . .	16
1.5. Conclusión de la revisión bibliográfica . . . . .	19
1.6. Objetivos . . . . .	21
1.6.1. Objetivo general . . . . .	21
1.6.2. Objetivos específicos . . . . .	21
1.7. Alcance . . . . .	21
1.8. Descripción de los capítulos . . . . .	22
<b>2. Modelo físico y matemático</b>	<b>24</b>
2.1. Modelo físico y matemático de una pared . . . . .	24
2.1.1. Modelo físico . . . . .	25
2.1.2. Modelo matemático . . . . .	26
2.1.3. Condiciones de frontera . . . . .	28
2.2. Modelo físico y matemático de un techo de bovedilla . . . . .	31
2.2.1. Modelo físico . . . . .	31
2.2.2. Modelo matemático . . . . .	32
2.2.3. Condiciones de frontera . . . . .	33
<b>3. Metodología de solución</b>	<b>36</b>
3.1. Ecuación General de Convección-Difusión . . . . .	36
3.2. Método de Volumen Finito . . . . .	37
3.2.1. Generación de malla . . . . .	38

3.2.2.	Discretización espacial y temporal de la Ecuación General de Convección-Difusión . . . . .	38
3.2.3.	Esquemas de interpolación . . . . .	42
3.3.	Algoritmos de acople SIMPLE y PISO . . . . .	45
3.3.1.	Malla desplazada . . . . .	45
3.3.2.	Algoritmo SIMPLE . . . . .	47
3.3.3.	Algoritmo PISO . . . . .	49
3.4.	Condiciones de frontera . . . . .	53
3.4.1.	Condición de Dirichlet . . . . .	53
3.4.2.	Condición de Von Neuman . . . . .	54
3.4.3.	Condición de Robin . . . . .	54
3.4.4.	Condición de frontera para la ecuación de corrección de presión . . . . .	55
3.5.	Método de solución de ecuaciones algebraicas . . . . .	56
3.6.	Criterio de convergencia . . . . .	57
3.7.	Método de Calor Específico Efectivo . . . . .	58
3.8.	Variables de evaluación . . . . .	60
<b>4.</b>	<b>Verificación y validación</b>	<b>63</b>
4.1.	Cavidad calentada diferencialmente . . . . .	63
4.2.	Cavidad con sólido embebido . . . . .	67
4.3.	Sólido con fluido embebido . . . . .	70
4.4.	Transferencia de calor conjugada en una pared . . . . .	72
4.5.	Cavidad acoplada a una placa de PCM . . . . .	74
4.6.	Independencia de malla . . . . .	75
4.6.1.	Independencia de malla temporal . . . . .	76
4.6.2.	Independencia de malla espacial . . . . .	77
<b>5.</b>	<b>Resultados</b>	<b>81</b>
5.1.	Pared con y sin PCM . . . . .	82
5.1.1.	Comportamiento térmico de paredes típicas de México . . . . .	82
5.1.2.	Evaluación térmica de una pared con PCM . . . . .	86
5.1.3.	Evaluación anual . . . . .	92
5.2.	Techo con y sin PCM . . . . .	97
5.2.1.	Comportamiento térmico de un techo con PCM . . . . .	98
5.2.2.	Evaluación anual . . . . .	102
<b>6.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>106</b>
6.1.	Conclusiones acerca de las paredes con y sin PCM . . . . .	106
6.2.	Conclusiones acerca del techo con y sin PCM . . . . .	108
6.3.	Sugerencias para trabajos futuros . . . . .	109
	<b>Referencias</b>	<b>110</b>
	<b>Apéndice</b>	<b>123</b>

<b>A. Pared de ladrillo</b>	<b>124</b>
A.1. Modelo físico . . . . .	124
A.2. Modelo matemático . . . . .	125
A.2.1. Condiciones de frontera y de interfaz . . . . .	125
<b>Anexo</b>	<b>126</b>
<b>A. Estancia doctoral</b>	<b>127</b>
<b>B. Publicación de artículo</b>	<b>129</b>
<b>C. Conferencias y cursos</b>	<b>131</b>

# Índice de figuras

2.1. Composición de pared en México. . . . .	25
2.2. Modelo físico de BHP. . . . .	26
2.3. Condiciones termodinámicas. . . . .	29
2.4. Condiciones de frontera hidrodinámicas y de interfaz para BHP. . . . .	30
2.5. Composición del techo. . . . .	31
2.6. Modelo físico de TBP. . . . .	33
2.7. Condiciones termodinámicas de la configuración TBP. . . . .	34
2.8. Condiciones de frontera hidrodinámicas y de interfaz para TBP. . . . .	35
3.1. Generación de malla. . . . .	38
3.2. Volumen de control para la discretización. . . . .	40
3.3. Campo de presión zig-zag. . . . .	46
3.4. Malla desplazada. . . . .	46
3.5. Distribución de nodos en la malla computacional. . . . .	46
3.6. Diagrama de flujo del algoritmo PISO. . . . .	52
3.7. Condiciones de frontera. . . . .	53
3.8. Volumen de control con interfaz en contacto en la frontera. . . . .	56
3.9. Solución aproximada a la solución exacta. . . . .	58
3.10. Relación de $DF$ y $TL$ . . . . .	61
4.1. Cavity calentada diferencialmente. . . . .	64

4.2. Verificación con $Ra=10^3$ . . . . .	67
4.3. Verificación con $Ra=10^5$ . . . . .	67
4.4. Cavidad con sólido embebido. . . . .	68
4.5. Isotermas para $\lambda^* = 0.2$ . . . . .	69
4.6. Isotermas para $\lambda^* = 5.0$ . . . . .	70
4.7. Nusselt en función de $Ra$ y $\lambda^*$ . . . . .	70
4.8. Sólido con fluido embebido. . . . .	71
4.9. Pared de block hueco. . . . .	72
4.10. Temperatura; <sup>[1]</sup> : Uriarte-Flores et al. (2019). . . . .	73
4.11. Flujo de calor; <sup>[1]</sup> : Uriarte-Flores et al. (2019). . . . .	73
4.12. Cavidad con placa de PCM . . . . .	74
4.13. Temperatura promedio del aire y del PCM. . . . .	75
4.14. Independencia de malla temporal. . . . .	77
4.15. Distribución de la malla espacial. . . . .	78
4.16. Independencia de malla espacial en función de los nodos de las cavidades. . . . .	78
4.17. Independencia de malla espacial en función de los nodos del PCM. . . . .	79
5.1. Nomenclatura para las configuraciones. . . . .	81
5.2. Comportamiento térmico de las paredes durante el día más cálido. . . . .	83
5.3. Comportamiento térmico de las paredes durante el día más frío. . . . .	85
5.4. Comportamiento térmico de BH con y sin PCM durante el día más cálido. . . . .	87
5.5. Flujo de calor por unidad de área durante el día más cálido. . . . .	89
5.6. Comportamiento térmico de BH con y sin PCM durante el día más Frío. . . . .	90
5.7. Flujo de calor por unidad de área durante el día más frío. . . . .	92
5.8. Comportamiento térmico de los techos durante el día más cálido. . . . .	99
5.9. Comportamiento térmico de los techos durante el día más frío. . . . .	100
A.1. Modelo físico de LR. . . . .	124

A.2. Condiciones termodinámicas de la configuración LR. . . . .	126
A.3. Condiciones de interfaz de la configuración LR. . . . .	126

# Índice de tablas

2.1. Propiedades termofísicas de los materiales. . . . .	27
2.2. Propiedades termofísicas de los PCMs. . . . .	27
2.3. Propiedades ópticas. . . . .	27
3.1. Equivalencias de $\phi$ , $\Gamma$ y $S$ . . . . .	37
3.2. Valor de $A( Pe )$ para los esquemas. . . . .	45
4.1. Comparación de $u^*$ , $v^*$ y $Nu$ en estado permanente. . . . .	66
4.2. Valor de número de $Nu$ para $\zeta=0.5$ . . . . .	69
4.3. Flujo de calor adimensional ( $q^*$ ). . . . .	71
4.4. Desviación estándar en función de la malla temporal. . . . .	77
4.5. Desviación estándar en función de la malla espacial ( $Nx_2 \times Ny_2$ ). . . . .	79
5.1. Energía por unidad de área en el día cálido de cada mes. . . . .	94
5.2. Energía por unidad de área en el día frío de cada mes. . . . .	95
5.3. Energía por unidad de área mensual y emisiones de $CO_2$ al año. . . . .	97
5.4. Energía por unidad de área. . . . .	103
5.5. Energía por unidad de área mensual y emisiones de $CO_2$ al año. . . . .	104

# Resumen

Se presenta un estudio teórico sobre la evaluación térmica de una pared de block hueco y un techo de bovedilla, ambos con y sin material de cambio de fase (PCM por sus siglas en inglés) bajo las condiciones meteorológicas de Mérida, Yucatán. El estudio se llevó a cabo durante el día más cálido y más frío de cada mes del año. Para ello, se modeló la transferencia de calor conjugada en dos modelos de paredes y un modelo de techo con geometría y dimensiones similares a las indicadas en las normas de México. Las componentes estudiadas fueron: una pared de ladrillo (LR), una pared de block hueco (BH), una pared de block hueco con una capa de PCM (BHP), un techo de bovedilla (TB) y un techo de bovedilla con una capa de PCM (TBP). La configuración LR está compuesta por dos capas de revoque y un ladrillo sólido, la BH está conformada por dos capas de revoque y un block hueco y la BHP es la configuración BH con una capa de PCM de 10, 15 y 20 mm de espesor; por su parte, la configuración TB está formada por bovedilla y una capa de compresión y la TBP es la configuración TB con una capa de PCM de 10 mm de espesor. La capa de PCM se considera entre la capa de revoque interior y la componente, de tal manera que las configuraciones BHP y TBP pueden ser implementadas tanto en edificios en planeación como en operación.

La modelación se realizó en dos dimensiones y en estado transitorio con el método de volumen finito, para el acople de las ecuaciones de masa y momento se utilizó el algoritmo PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) y para los términos convectivos y difusivos se utilizaron los esquemas de interpolación híbrido y centrado, respectivamente; por su parte, para la discretización del término transitorio se implementó un esquema de

segundo orden y el paso de tiempo para la modelación fue de 30 s. Para el modelado del PCM se implementó el método de calor específico efectivo.

Respecto a los resultados de las paredes, se observó que la LR produjo un retraso de hasta dos horas la temperatura máxima de la superficie interior respecto a la temperatura máxima de la superficie exterior. Sin embargo, el BH presentó 14.6% menos energía por unidad de área hacia el interior en el día más cálido respecto al LR y 1.9% más energía por unidad de área hacia el interior. Por lo tanto, se seleccionó el BH para observar el aporte de una capa de PCM sobre su comportamiento térmico. Se apreció que la configuración BHP reduce la energía por unidad de área en los días cálidos entre 6.9 y 48.7% respecto a BH y en los días fríos disminuye entre 9.7 y 65.6%. Además, la configuración BH presenta emisiones de  $CO_2$  anuales de  $0.051 \text{ tCO}_2\text{e/m}^2$  y energía por unidad de área anual de  $120.2 \text{ kWh/m}^2$ , los cuales se reducen hasta 25.1, 31.9 y 37.4% con las configuraciones BHP10, BHP15 y BHP20, respectivamente. En general, se observó que la adición del PCM mejora el comportamiento térmico del BH en mayor medida durante los meses con mayor radiación solar.

Por otra parte, los resultados de los techos mostraron que la temperatura de la superficie interior del TB presenta una oscilación entre  $24.7$  y  $30.4$  °C, mientras que TBP oscila entre  $25.9$  y  $27.3$  °C; de tal manera que TBP reduce la energía por unidad de área hasta 65.3% en el día más frío del año respecto a TB y 68.7% en el día más cálido del año. También, se observó que la configuración TBP disminuye la energía por unidad de área mensual hasta 62.2% en enero respecto a TB y la mínima disminución es de 15.6% en junio. Anualmente, la configuración TB muestra una energía por unidad de área de  $363.4 \text{ kWh/m}^2$  lo cual equivale a  $0.154 \text{ tCO}_2\text{e/m}^2$  y se disminuyen hasta 35.7% cuando se implementa un PCM.

De acuerdo con los resultados, se recomienda implementar un espesor de PCM menor o igual a 15 mm en el BH, debido a que el PCM de 20 mm aumenta su volumen 100.0%

respecto a 10 mm y 33.3 % respecto a 15 mm, no obstante, la configuración BHP20 disminuye el flujo de calor anual solamente un 12.3 % respecto a BHP10 y un 5.5 % respecto a BHP15. Además, se recomienda la adición de una capa de PCM de 10 mm de espesor en TB disponibles en el mercado mexicano bajo condiciones meteorológicas similares a las de Mérida, Yucatán. Por lo tanto, se concluye que la capa de PCM es capaz de disminuir la oscilación térmica y el flujo de calor hacia el interior tanto en pared de BH como en TB, lo cual representa una disminución en el costo de consumo eléctrico destinado a acondicionamiento de espacios y las emisiones de gases de efecto invernadero que esto genera en ciudades como Mérida o en regiones climáticas similares.

# Abstract

A theoretical study of the thermal evaluation of a hollow block wall and a hollow block ceiling, both with and without phase change material (PCM), is presented under the meteorological conditions of Merida, Yucatan. The study was carried out during the warmest and coldest days of each month of the year. The conjugated heat transfer was modeled in two wall models and a roof model with geometry and dimensions similar to those indicated in the Mexican standards. The components studied were: a brick wall (LR), a hollow block wall (BH), a hollow block wall with a layer of PCM (BHP), a hollow block for ceiling (TB), and a hollow block for ceiling with a PCM layer (TBP). The LR configuration is formed by two layers of plaster and solid brick, the BH comprises two layers of plaster and a hollow block, and the BHP is the BH configuration with a layer of PCM of 10, 15, and 20 mm thickness. On the other hand, the TB configuration comprises a hollow block and a compression layer, and the TBP is the TB configuration with a PCM layer of 10 mm in thickness. The PCM layer is considered between the interior plaster layer and the component so that the BHP and TBP configurations can be implemented in buildings in planning and operation.

The modeling was carried out in two dimensions and a transient state with the finite volume method; for the coupling of the mass and momentum equations, the PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) algorithm was used, and for the convective and diffusive terms, the hybrid and centered interpolation schemes were used, respectively; on his hand, a second order scheme was implemented for the transient term, and a time step of 30 s was used for the modeling. Besides, the effective specific heat method was

implemented for the PCM modeling.

Regarding the results of the walls, it was observed that the LR produced a delay of up to two hours in the inside surface's maximum temperature concerning the outside surface's maximum temperature. However, the BH presented 14.6 % less energy per unit area and 1.9 % more energy per unit area gain than LR on the warmest and the coldest day, respectively. Therefore, the BH was selected to observe the effect of a PCM layer on its thermal behavior. It was observed that the BHP configuration reduces the energy per unit area on the warmest days between 6.9 and 48.7 % concerning BH, and on the coldest days, it decreases between 9.7 and 65.6 %. In addition, the BH configuration presents annual  $CO_2$  emissions of 0.051 tCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup> and annual energy per unit area of 120.2 kWh/m<sup>2</sup>, which are reduced to 25.1, 31.9 and 37.4 % with the BHP10, BHP15, and BHP20 configurations, respectively. In general, it was observed that the addition of PCM improves the thermal behavior of the BH to a greater extent during the months with higher solar radiation.

On the other hand, the results of the roofs showed that the temperature of the inside surface of the TB presents an oscillation between 24.7 and 30.4 °C, while the TBP oscillates between 25.9 and 27.3 °C; in such a way that TBP reduces the energy per unit area up to 65.3 % on the coldest day of the year concerning TB and 68.7 % on the warmest day of the year. Also, it was observed that the TBP configuration decreases the monthly energy per unit area up to 62.2 % in January concerning TB, and the minimum decrease is 15.6 % in June. Annually, the TB configuration shows an energy per unit area of 363.4 kWh/m<sup>2</sup>, equivalent to 0.154 tCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>, and decreases to 35.7 % when a PCM is implemented.

According to the results, it is recommended to implement a PCM thickness less than or equal to 15 mm in the BH because the 20 mm PCM increases its volume by 100.0 % concerning 10 mm and 33.3 % regarding 15 mm. However, the BHP20 configuration decreases the annual energy by only 12.3 % compared to BHP10 and 5.5 % regarding BHP15. In addition, a 10 mm thick layer of PCM is recommended in TB available in the Mexi-

can market under weather conditions similar to those of Mérida, Yucatán. Therefore, it is concluded that the PCM layer is capable of reducing the thermal oscillation and the energy flow towards the inside both in the wall of BH and in TB, which causes a decrease in the cost of electrical consumption for spaces conditioning and, therefore, a reduction in the indirect greenhouse gas emissions generates by this electrical consumption in cities like Mérida or similar climatic regions.

# Capítulo 1

## Introducción

Desde el inicio de la era del ser humano se ha observado que éste mismo ha consumido recursos en la medida de su demanda; sin embargo, se ha tenido un consumo descontrolado a causa del aumento de la población en los últimos años. La mayoría de las necesidades del ser humano actual requiere principalmente el consumo de combustibles fósiles para su manufactura, esto genera grandes cantidades de gases de efecto invernadero que provocan el calentamiento global. A pesar de que el planeta puede disminuir los gases de efecto invernadero a través de la fotosíntesis, cada día es más difícil realizar dicha mitigación de manera natural a causa de los altos niveles de estos gases en el medio ambiente.

La generación de energía eléctrica es una de las necesidades que demanda el consumo de combustibles fósiles. De acuerdo con la IEA (2021), el 63.1 % de la energía eléctrica fue generada a través de la quema de hidrocarburos (carbón, petróleo y gas) en el 2019 y el sector residencial consumió aproximadamente el 26.6 % de la energía consumida a nivel mundial. Por su parte en México, de acuerdo con las estadísticas de SENER (2020), cerca del 24.0 % (1 240.5 petajoules) de los recursos consumidos en el 2019 se destinó a la generación de energía eléctrica y solo el 18.7 % fue consumida por el sector residencial. Las estadísticas muestran que el sector residencial tiene una gran contribución en la contaminación del medio ambiente; su consumo de energía eléctrica es ocasionado principalmente por la refrigeración de alimentos, el confort visual y el confort térmico.

---

La quema de combustibles fósiles no solo tiene un impacto negativo hacia el medio ambiente, sino también hacia el propio ser humano. De acuerdo con WHO (2016), alrededor de 3 millones de personas murieron por problemas de salud respiratorios relacionados con la contaminación del aire en el 2012. Sin embargo, a partir del 2021 las cifras se estimaron a más de 7 millones de defunciones (WHO, 2021).

En la actualidad existen fuentes de energías limpias y sistemas pasivos como alternativas para disminuir el uso de hidrocarburos relacionados con las edificaciones. La radiación solar es una fuente de energía relativamente inagotable. Por ello, los sistemas desarrollados para el aprovechamiento de energía solar han recibido una gran atención por parte de la comunidad científica y por parte de la población en general. La energía solar puede ser aprovechada de diferentes maneras, su aprovechamiento depende de la aplicación de interés, puede ser desde el secado de alimentos hasta el confort térmico al interior de viviendas; algunas aplicaciones que tiene la energía solar son:

- Secado de alimentos.
- Precalentamiento de agua para procesos industriales.
- Producción de combustible derivado del hidrógeno.
- Generación de energía eléctrica.
- Confort térmico.

Particularmente, en los últimos años se han desarrollado tecnologías para el ahorro de energía en edificaciones, entre ellas, algunas que reducen la transferencia de energía térmica generada por la radiación solar hacia el interior y otras que aprovechan la energía solar para su funcionamiento relacionado con la ventilación. Algunos sistemas disponibles en la actualidad son:

- Intercambiadores de calor tierra-aire.

- Chimeneas solares o muros Trombe.
- Ventanas de doble vidrio.
- Películas reflectivas o materiales aislantes.
- Pisos radiantes.
- Block y ladrillo huecos para paredes.
- Block hueco (bovedilla) para techos.

La mayoría de los sistemas pasivos implementados aprovecha las propiedades térmicas de los materiales usados en la construcción de las edificaciones, por ejemplo, las propiedades radiativas de las películas reflectivas ayudan a reflejar o absorber la energía solar incidente. El objetivo de emplear un sistema pasivo en las edificaciones es optimizar térmicamente la envolvente de las edificaciones (piso, fachadas, paredes y/o techo). Algunos sistemas pasivos implican una modificación en la estética de las envolventes, por ejemplo, la chimenea solar. Otros sistemas como las paredes de ladrillo o block hueco y/o techos no requieren un cambio estético de las edificaciones.

Una de las maneras de mejorar el comportamiento térmico de las paredes es la modificación de las propiedades termofísicas de sus materiales, tal como lo muestran los estudios de Kaşka y Yumrutaş (2008), Kus et al. (2013), Zhang et al. (2014), Shaik y Babu (2015) y Byrne et al. (2017), quienes evaluaron diferentes materiales para paredes, como briqueta, ladrillo, piedra pómez, hormigón celular, entre otros materiales y mostraron que la selección correcta del material disminuye la transferencia de calor hasta 70.0 %, mientras que Al-Hazmy (2006), Arici et al. (2016) y Wang et al. (2017) evaluaron materiales como la perlita o el poliestireno al interior de ladrillos y blocks huecos y lograron disminuir el flujo de calor hasta 29.0 %. También los materiales aislantes proporcionan un mejor comportamiento térmico en la envolvente de las edificaciones, tal como lo mostraron dos Santos y Mendes (2009), Tang et al. (2015), Kisilewicz et al. (2019), Xu et al. (2019) y Rosti et al.

---

(2020), quienes reportaron una reducción en el flujo de calor de hasta 81.0%. La distribución y cantidad de cavidades en un block o un ladrillo también afecta su comportamiento térmico, ejemplo de ello, se tiene el estudio de del Coz Díaz et al. (2007), Antar y Baig (2009), Antar (2010), Al-Khameis et al. (2011) y Jamal et al. (2020), quienes analizaron el comportamiento térmico de una pared de ladrillo y block en función del tamaño y número de huecos, también el estudio de Alhazmy (2010), quien realizó el estudio térmico de ladrillos huecos con hasta 12 divisiones en forma triangular; en resumen, estos estudios mostraron que la implementación de blocks huecos no asegura un mejor rendimiento térmico de las paredes.

Por su parte, existen diferentes alternativas para disminuir la transferencia de calor entre el medio ambiente y el medio interior de las viviendas a través del techo, por ejemplo, los techos reflectivos, tal como lo mostraron las investigaciones de Mahmoud y Ismaeel (2019), Piselli et al. (2019b) y Zingre et al. (2015), asimismo, Saafi y Daouas (2018) mostraron que el uso de un material aislante adecuado en un techo de concreto reduce el flujo de calor. Otra alternativa para el ahorro de energía a través de los techos es el uso de block hueco (conocido como bovedilla en México), como lo muestra Daouas (2016) y Chihab et al. (2021), quienes mostraron un decremento de hasta 70.0% en el flujo de calor. Sin embargo, Ait-Taleb et al. (2014) y del Coz Díaz et al. (2011) determinaron que la variación de la cantidad de huecos en las bovedillas influye en su comportamiento térmico.

La búsqueda constante de materiales alternativos ha permitido el desarrollo de materiales con mayor capacidad de almacenamiento de energía conocidos como materiales de cambio de fase (PCM por sus siglas en inglés). Sin embargo, su funcionamiento en una fase o en otra puede cambiar drásticamente el comportamiento de las componentes de las viviendas. Por ello, es importante seleccionar un PCM con temperatura de cambio de fase adecuada para las necesidades del edificio, un ejemplo de ello es el estudio de Elnajjar (2017) quien evaluó una pared con 3 PCMs con diferentes temperatura de fusión, n-octadecano (27.0 °C), n-eicosano (37.0 °C) y P116 (47.0 °C) y encontró que el

PCM P116 reduce hasta 30.0% la ganancia de calor al interior. Mientras que Li et al. (2019) evaluaron una pared con 13 PCMs distintos, entre ellos, ácido cáprico, RT-27, n-octadecano y  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  y recomendaron una selección adecuada del PCM. Tres años después, Arunkumar et al. (2020) realizaron de manera numérica el estudio térmico de un block hueco con PCM OM29, los autores observaron que la implementación de PCM en los huecos del block reduce 5.7% la temperatura y 33.0% el flujo de calor.

Con base a los estudios mencionados, se observa que el comportamiento térmico de una pared con block o ladrillo hueco y el de un techo con bovedilla pueden mejorar al implementarse un PCM, por lo tanto, en las siguientes secciones se muestra la revisión bibliográfica sobre los estudios enfocados a paredes de block y/o ladrillos huecos y a techos de bovedilla con y sin PCMs.

## 1.1. Paredes con material de cambio de fase

Algunos estudios comparan el comportamiento térmico del PCM respecto a otras alternativas o materiales, tal es el caso de Principi y Fioretti (2012); quienes estudiaron, experimental y numéricamente, un block hueco con PCM de sal hidratada y de un block hueco con una capa de revestimiento de baja emisividad al interior de sus cavidades. Los resultados mostraron que al disminuir la emisividad, la conductividad térmica del block se reduce hasta 20.0% y la transmitancia hasta 30.0%, mientras que el PCM logra reducir el flujo de calor alrededor del 26.0%. En ese mismo año, Silva et al. (2012) evaluaron el comportamiento térmico de un ladrillo hueco con PCM (RT-18) y aire a través de un estudio numérico-experimental; sus resultados mostraron que se logra reducir la oscilación de la temperatura de 10.0 a 5.0 °C. Thattoth y Daniel (2020) también realizaron el estudio de la transferencia de calor en tres modelos de ladrillo, el primero, un ladrillo sólido; el segundo, un ladrillo con huecos llenos de aire; y el tercero, con huecos llenos de PCM; los huecos se consideraron cerca de la superficie exterior. Sus resultados mostraron que el ladrillo lleno de PCM reduce hasta 20.5% la ganancia de calor con respecto al ladrillo

sólido; a baja temperatura ambiente se tiene gran diferencia en la reducción de calor entre el ladrillo lleno de PCM y el ladrillo lleno de aire; y a mayor temperatura ambiente, el porcentaje de reducción es similar.

Por su parte, Chen et al. (2008) compararon el comportamiento térmico de una placa de yeso y una placa de yeso combinada con PCM, para ello, los autores consideraron una capa de PCM acoplada a una pared compuesta por una capa de cemento y una capa de hormigón de cerámica, el estudio se realizó de manera experimental. Sus resultados mostraron que la placa de PCM retarda la ganancia o pérdida de calor hasta por 200 minutos. Los autores concluyeron que el PCM con espesor de 30 mm y entalpía de cambio de fase de 60.0 kJ/kg puede proporcionar hasta 17.0% de ahorro de energía en temporada de calor. Dos años después, Zhou et al. (2010) realizaron el estudio térmico de cuatro paredes distintas, una de ladrillo, una de concreto, una de poliestireno expandido y una de PCM. Los resultados mostraron que todos los materiales presentan una temperatura con oscilación senoidal sobre la superficie interior; sin embargo, el PCM presenta una amplitud de la curva de temperatura interior menor con respecto al resto de las paredes.

Por otro lado, algunos investigadores han realizado estudios en los que se evalúan distintos PCMs, entre estos estudios se tiene el de Alawadhi (2008), quien realizó el análisis térmico de un ladrillo hueco con PCM de n-octadecano, de n-eicosano y de P116, el autor varió la cantidad de huecos (de 1 a 3) y la ubicación y cantidad de cada PCM. Los resultados mostraron que el PCM con mejor comportamiento térmico es el n-eicosano con reducción de ganancia de calor de 24.0% respecto al ladrillo sin PCM, además la cantidad óptima de huecos es de tres en el centro del ladrillo. El autor concluyó que conforme se aumenta la cantidad de huecos con PCM, el rendimiento térmico del ladrillo mejora. Dos años después, Castell et al. (2010) también analizaron el comportamiento térmico de ladrillos huecos con PCM de parafina RT-27 y de sal hidratada (SP25) a través de un estudio experimental en cubículos a escala; los autores concluyeron que el consumo de energía para el confort térmico disminuye alrededor de 15.0% con el uso de PCM.

De la misma manera, Hichem et al. (2013) realizaron el estudio numérico-experimental de un ladrillo de 12 huecos con PCM de parafina 52-54, P116-Wax, n-eicosano, cera de parafina y  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . Ellos determinaron que el ladrillo con  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  presentó la menor ganancia de calor respecto al ladrillo sin PCM. Los autores concluyeron que varios parámetros afectan la eficiencia térmica de los ladrillos, entre ellos la cantidad y la posición del PCM, además, la temperatura descendió alrededor de  $3.8\text{ }^\circ\text{C}$  y recomiendan cambiar la geometría para disminuir la cantidad de PCM. El estudio de Gao et al. (2020) también se enfocó en el estudio de la transferencia de calor en ladrillo hueco con PCM a través de un estudio numérico-experimental. Para ello, los autores consideraron un ladrillo de 20 huecos y colocaron en distintas ubicaciones el PCM, en los huecos adyacente a la superficie interior, adyacentes a la superficie exterior y en medio del ladrillo; los resultados mostraron que el PCM disminuyó la ganancia de calor hasta  $50.0\%$  respecto a una pared de ladrillo sin PCM. Ese mismo año, Kumar et al. (2020) realizaron un estudio térmico y experimental de un ladrillo de 12 huecos con PCM, los autores construyeron habitaciones cúbicas de  $3.0\text{ m}$  por lado y consideraron un PCM HS29; los resultados mostraron una reducción de  $6.0\text{ }^\circ\text{C}$  en el mes de enero y de  $2.0\text{ }^\circ\text{C}$  en el mes de julio.

Existen estudios experimentales en los que construyeron habitaciones a escala con paredes con y sin PCM, tal es el caso de Hasan et al. (2018), quienes realizaron el estudio térmico de una cavidad con paredes con y sin PCM en las cuatro orientaciones (norte, sur, este y oeste). Ellos concluyeron que el consumo de energía de enfriamiento disminuyó hasta  $2.1\text{ kW/m}^2$  debido al PCM y que la pared con orientación al sur presentó mayor reducción en el consumo de energía. Ese mismo año, Lee et al. (2018) también realizaron el estudio experimental de una cavidad a escala en la que se utilizó aislante de celulosa con PCM de parafina. En general, los autores encontraron una disminución de flujo de calor notable con el PCM de  $26.0$ ,  $16.1$ ,  $38.5$  y  $20.8\%$  en la pared norte, sur, este y oeste, respectivamente. Los autores concluyeron que el calor al interior de la cavidad se redujo un  $26.6\%$  en promedio.

Algunos estudios se enfocan en evaluar el comportamiento térmico del PCM en función del tipo o valor de temperatura de diferentes climas, tal es el caso de Kuznik y Virgone (2009), quienes realizaron un estudio experimental de una pared con y sin PCM compuesta por una capa de madera, una capa de yeso y una capa de poliestireno (del exterior al interior). Se observó que el uso de PCM aminora la temperatura del aire al interior hasta 3.9 °C en un día cálido; en un día templado, la temperatura del aire al interior descendió 2.3 °C; y en un día frío se observó una reducción de 4.2 °C. También Sun et al. (2014) realizaron el estudio de una pared con PCM de parafina n-octadecano con tres temperaturas de fusión, bajo condiciones meteorológicas de cinco ciudades de China (Hong Kong, Kunming, Changsha, Zhengzhou y Shenyang). Ellos determinaron un ahorro de energía con la pared con PCM de entre 11.0 y 19.5 % respecto a la pared típica para todas las ciudades, excepto para Hong Kong que mostró una disminución de solo 5.0 %. Los autores concluyeron que el uso de un PCM no asegura un beneficio en el ahorro de energía y la temperatura óptima del PCM es de 3.0 °C por encima de la temperatura ambiente. Por su parte, Mi et al. (2016) evaluaron el comportamiento de una pared con PCM con temperatura de fusión de 27.0 °C bajo condiciones de 5 ciudades de china (Shenyang, Zhengzhou, Changsha, Kunming, Hong Kong); ellos obtuvieron un mayor ahorro de energía en Shenyang, la cual está ubicada en una zona extremadamente fría (de -17.0 °C a -5.0 °C).

Un año después, Bilgin y Arici (2017) realizaron el estudio del comportamiento térmico de una pared con y sin PCM formada por dos capas de mortero y una capa de concreto bajo condiciones de cuatro ciudades de Turquía (Antalya, Samsun, Ankara y Van). Los resultados mostraron un ahorro de energía para enfriamiento de 215.0 Wh/m<sup>2</sup> día en Antalya y de 121.0 Wh/m<sup>2</sup> día en Samsun; el ahorro de energía para calefacción fue de 135.0 Wh/m<sup>2</sup> día en Van y de 88.0 Wh/m<sup>2</sup> día en Antalya. El estudio de Aketouane et al. (2018) también evaluó el comportamiento térmico de un block con 8 huecos y PCM bajo condiciones de seis diferentes zonas de Marruecos (Agadir, Ouarzazate, Marrakech, Ifrane, Fez y Tangier), para ello los autores consideraron cuatro tipos de PCM (parafina 5913,

n-octadecano, ácido cáprico y n-eicosano) y tres diferentes tipos de construcción (una casa-habitación, un edificio departamental y un edificio hotelero). Los autores encontraron que el PCM ácido cáprico presentó mayor reducción de calor al interior de un edificio hotelero, mientras que el PCM n-eicosano disminuyó mayor flujo de calor en una casa-habitación y en un edificio departamental.

La ubicación del PCM también juega un papel importante en el comportamiento térmico de las paredes; por ello, Zhang et al. (2016) realizaron el estudio numérico-experimental de un block de 6 huecos con PCM de ácido cáprico y variaron la posición del PCM (cerca de la superficie interior, cerca de la superficie exterior y en medio del block). Ellos mostraron que el PCM causó una disminución en la temperatura de la pared de hasta 5.0 °C y un aumento en el tiempo en que se transfiere la energía de la superficie interior hacia el exterior de hasta 3.0 horas; concluyeron que el block hueco mejora su comportamiento térmico cuando la temperatura de transición de fase del PCM está dentro del intervalo de temperatura del ambiente. También Arıcı et al. (2020) realizaron el estudio térmico de una pared con PCM compuesta por revoque, concreto, aislante y revoque (del interior hacia el exterior); el PCM se ubicó en dos lugares diferentes, entre el revoque exterior y el aislante y también entre el revoque interior y la capa de concreto, además se varió su espesor de 1 a 20 mm con intervalo de 1 mm y su temperatura de fusión de -10.0 a 40.0 °C con intervalo de 1.0 °C. Los autores concluyeron que la mejor posición del PCM es entre el revoque interior y el concreto, mientras que el espesor y la temperatura de fusión del PCM depende de la temporada.

Por su parte, Hanchi et al. (2020) evaluaron una pared de concreto, los autores consideraron dos paredes con una capa de aislante térmico y una capa de PCM, la primera estaba compuesta por concreto-PCM-concreto-aislante-concreto (CPCAC) y en la segunda intercambiaron de lugar el PCM con el aislante (CACPC), además, consideraron dos valores de temperatura de confort (18.0 y 20.0 °C) y dos valores de temperatura de fusión del PCM (19.0 y 21.0 °C). Ellos observaron que el decremento de la ganancia o pérdida de

calor depende de la temperatura de confort y la temperatura de fusión del PCM, por lo tanto, la configuración CPCAC con la temperatura de confort de 20.0 °C y temperatura de fusión de 21.0 °C mostró una disminución de  $\approx 98.0\%$ . Además, los autores concluyeron que la implementación de un PCM y una capa de aislante reducen significativamente la transferencia de calor.

## 1.2. Techos con material de cambio de fase

El material de cambio de fase no es exclusivo de las paredes, pues su capacidad de almacenar calor también permite mejorar el comportamiento térmico de una ventana, del piso o en su caso del techo. A diferencia de los PCMs que se implementan en las paredes, la mayoría de los PCMs en techos presentan una temperatura de fusión mayor a causa de las altas temperaturas que se pueden presentar en los techos, también, su espesor puede ser mayor para aumentar la masa térmica de la componente. El estudio de Li et al. (2015) muestra el comportamiento térmico de tres PCMs con temperatura de fusión de 29.8, 33.5 y 37.8 °C en un techo de dos aguas compuesto por una capa de aleación de aluminio, cemento y concreto reforzado. Li et al. (2015) encontraron que conforme aumentó el calor latente disminuyó el flujo de calor y también disminuyó conforme aumentó la inclinación del techo; asimismo, el tiempo de retraso del flujo de calor aumentó conforme incrementaron el espesor del PCM, por lo que el pico de temperatura sobre la superficie interior de la habitación se atrasa media hora respecto al pico de temperatura de la superficie exterior. Por su parte, Beemkumar et al. (2019), realizaron el estudio térmico de un techo sólido con un PCM polietilenglicol 600 (PEG 600) con espesor de 20, 30 y 40 mm y con temperatura de fusión entre 28.0 y 30.0 °C; los autores observaron que el PCM con espesor de 40 mm presentó el mejor comportamiento térmico, además la fluctuación de temperatura al interior de la cavidad disminuyó hasta 2.0 y 4.0 °C. Los autores concluyeron que el confort térmico al interior de la cavidad puede mejorar considerablemente al implementar un PCM sobre el techo.

Uno de los materiales más usados en techos y reportados en la literatura es el techo sólido, por ello Al-Yasiri y Szabó (2021) realizaron un estudio experimental de un techo sólido con y sin PCM compuesto por membrana bituminosa, concreto y aislante (fibra de vidrio); en tal estudio consideraron un PCM de cera de parafina con temperatura de fusión de 44.0 °C. Los autores observaron que la temperatura al interior decrece hasta 9.0 °C con el PCM cerca de la superficie exterior. Pasupathy et al. (2008) también realizaron un estudio térmico experimental de una cavidad con un techo sólido de concreto con una capa de ladrillo con y sin PCM de sal hidratada, con temperatura de fusión entre 27.0 y 28.0 °C y con espesor de 10 y 30 mm. Los autores encontraron que el PCM redujo la temperatura al interior de la cavidad hasta 4.0 °C y el espesor óptimo del PCM fue de 25 mm. También, Reddy et al. (2017) realizaron el estudio de un techo con ladrillo sólido y yeso, con y sin PCM. Los autores consideraron un techo con una y dos capas de PCM, con temperatura de fusión de 32.0 y 28.0 °C y con espesor de 30 y 20 mm, respectivamente.

En el mismo año, Reddy et al. (2017) demostraron que una capa de PCM redujo el flujo de calor entre 17.0 y 16.0 % , mientras que dos capas lo redujo entre 25.0 y 36.0 %. Shao et al. (2018) realizaron el estudio numérico de un techo de cemento, concreto reforzado y revoque con y sin PCM. Ellos observaron una reducción de hasta 63.4 % en el flujo de energía en el techo con PCM respecto al techo sin PCM; también, observaron que el PCM con temperatura de fusión de 31.0 °C ahorró hasta 13.1 % más energía que el PCM de 28.0 °C. Por su parte, Piselli et al. (2019a) evaluaron experimentalmente un techo de madera con poliuretano y lana mineral de roca, con y sin PCM; los autores consideraron tres PCMs con temperatura de fusión de 25.0, 31.0 y 44.0 °C. Para su caso el PCM óptimo fue aquel con temperatura de fusión entre 25.0 y 35.0 °C cuando se implementa poliuretano blanco y entre 31.0 y 45.0 °C cuando usan poliuretano negro.

Estudios similares al de Chung y Park (2016) muestran que el PCM puede mejorar el comportamiento térmico de los techos en comparación a otras alternativas, los autores compararon experimentalmente el comportamiento térmico de un techo con PCM respecto

a diferentes techos, un techo con pintura reflectiva blanca, techo típico, techo con impermeabilizante y un techo con caucho verde. En general, Chung y Park (2016) observaron que los techos de caucho verde e impermeabilizante presentaron mayor temperatura sobre la superficie exterior e interior de la cavidad, mientras que el techo con PCM y el techo con pintura blanca mostraron menor temperatura en comparación con el resto de hasta 10.0 °C.

Otros estudios han buscado otras alternativas para mejorar el comportamiento térmico de los techos modificando la estructura del mismo o del PCM; por ejemplo, el estudio de Alawadhi y Alqallaf (2011), quienes realizaron el estudio térmico de un techo con PCM insertado de forma cónica vertical. Los autores consideraron tres PCMs, n-octadecano, n-eicosano y P116 con temperatura de fusión de 27.0, 37.0 y 47.0 °C, respectivamente, y consideraron diferentes inclinaciones de los conos variando su diámetro superior. Sus resultados demostraron que el PCM n-Eicosano presentó 15.0 % menos pérdidas y ganancias de calor que el techo sin PCM y la forma cónica con mayor inclinación disminuyó el calor hasta 39.0 %. Una configuración similar evaluaron Mannivannan y Jaffarsathiq Ali (2015), quienes observaron numérica y experimentalmente el comportamiento térmico de un techo de concreto con huecos verticales con y sin PCM ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) con temperatura de fusión de 29.9 °C; ellos encontraron una reducción de 4.0 °C en la temperatura interior y 51.0 % en el flujo de calor.

Por su parte, Bhamare et al. (2020) mostraron que modificar la inclinación del PCM en el techo puede cambiar su comportamiento. Para ello, los autores consideraron un techo compuesto de una capa de ladrillo, una capa de concreto y una capa inclinada de PCM con temperatura de cambio de fase entre 25.9 y 27.9 °C y con un espesor de 25 mm. Los resultados mostraron que el ángulo óptimo de la capa de PCM es de 2.0°, con una disminución de temperatura al interior de 2.4 °C y de flujo de calor de 16.0 %. También la ventilación junto con el PCM puede mejorar el comportamiento, como lo muestran Li et al. (2020); quienes realizaron el estudio experimental de un techo ventilado con dos capas de PCM sobre un techo con ladrillo, un canal de ventilación, y una placa de polies-

tireno. Ellos determinaron que la implementación de PCM reduce la temperatura interior entre 6.4 y 7.1 °C con respecto al techo sin PCM, además observaron oscilaciones en el flujo de calor del techo entre 185.5 y -71.8 W/m<sup>2</sup> y con el PCM solo se presentó una ligera pérdida de calor de 23.3 W/m<sup>2</sup> en la noche. Los autores concluyeron que el techo con PCM presentó temperaturas al interior hasta 49.0% menores que las temperaturas exteriores. También Hu y Yu (2020) realizaron un estudio térmico de manera numérica de tres techos distintos compuesto por concreto, aislante y teja de asfalto, el primer techo con una capa de PCM, el segundo con un revestimiento y el tercero con PCM y revestimiento bajo condiciones meteorológicas de Pekín, Heilongjiang, Nanjing, Guangzhou y Kunming. Ellos lograron reducir el consumo de energía para calefacción y enfriamiento hasta 15.0 y 4.0 °C con el PCM, respectivamente, y hasta 19.0% cuando se implementan juntos el revestimiento y el PCM. Zhang et al. (2007) realizaron el estudio de un techo compuesto por concreto mezclado y PCM. Para el estudio los autores consideraron tres porcentajes de composición del PCM, 10.0, 20.0 y 30.0%, lo que aumenta el espesor del techo 10, 20 y 40 mm, respectivamente. Zhang et al. (2007) observaron que la fluctuación de la temperatura al interior disminuyó conforme aumentó el porcentaje de PCM y, como consecuencia, la ganancia de calor también tuvo un decremento. Los autores concluyeron que el porcentaje de PCM óptimo fue de 20.0%.

Estudios como el de Chang et al. (2020) han evaluado el comportamiento térmico de un techo de bovedilla con PCM; el estudio fue realizado experimentalmente bajo condiciones meteorológicas de Korea del sur y los autores consideraron el PCM n-octadecano al interior de los huecos de la bovedilla. Ellos obtuvieron una disminución de temperatura de hasta 14.2 °C. Similarmente, Alqallaf y Alawadhi (2013) realizaron el estudio numérico de un techo y un techo con tubos verticales llenos de tres PCMs de parafina con temperatura de fusión de 28.0, 32.0 y 39.0 °C bajo condiciones meteorológicas de Kuwait. Además, los autores variaron el diámetro de los tubos, manteniendo un volumen constante. Alqallaf y Alawadhi (2013) observaron que la reducción de calor es mayor conforme el diámetro aumenta, también concluyeron que la ganancia de calor depende fuertemente de la tem-

peratura de fusión del PCM. Ellos determinaron una reducción en la ganancia de calor entre 12.0 y 17.3%, dependiendo del volumen y tipo de PCM. Un año después, Srinivasan y Ravikumar (2014) también realizaron el estudio térmico de un techo de bovedilla con PCM y compararon su comportamiento con un techo convencional y un techo con capa de protección. Los autores mostraron que la temperatura promedio de la superficie interior del techo convencional alcanza entre 26.5 y 34.0 °C, mientras que la temperatura en el techo con protección alcanza entre 26.0 y 28.0 °C y en el techo de bovedilla llena de PCM alcanza entre 26.0 y 27.0 °C. Srinivasan y Ravikumar (2014) concluyeron que el techo con PCM redujo hasta 56.0% de la ganancia de calor que se tiene en el techo con protección y 81.0% con respecto al techo convencional. También, ming Lai y ming Chiang (2006) realizaron el estudio experimental del comportamiento térmico de un techo de ladrillo hueco con y sin PCM de parafina n-octadecano. Los autores observaron que la temperatura en la superficie inferior fue hasta 4.0 °C menor con el PCM y concluyeron que el uso del PCM en el ladrillo presentó un mejor aislamiento térmico que el ladrillo hueco sin PCM.

Por su parte Chung y Park (2017) realizaron un estudio térmico-experimental de tres cavidades, la primera cavidad con un techo de ladrillo hueco lleno de aire, la segunda cavidad con un techo de ladrillo hueco lleno de PCM RT-44 (n-docosano) y la tercera cavidad con un techo de ladrillo hueco lleno de PCM RT-25. Ellos observaron que el PCM RT-44 redujo mayor cantidad de la ganancia de calor al interior de la cavidad considerando el color marrón del ladrillo sobre la superficie exterior. Los autores concluyeron que el PCM con mejor comportamiento térmico fue el RT-44 y, al considerar la capacidad reflectiva de la superficie exterior del ladrillo, ambos PCMs presentaron mejor rendimiento que el ladrillo lleno de aire. Posteriormente, Yu et al. (2019) realizaron el estudio térmico de un techo con una capa de tubos, similar a una bovedilla hueca; ellos consideraron una capa de PCM de parafina y las condiciones meteorológicas de cinco ciudades de China: Wuhan, Pekín, Harbin, Guangzhou y Kunming. Los autores encontraron que la temperatura interior disminuyó entre 2.9 y 3.7 °C en Harbin, entre 2.5 y 4.0 °C en Pekín, entre 2.6 y 3.7 °C en Wuhan, entre 2.5 y 3.8 °C en Guangzhou y 3.7 °C en Kunming. Un año después,

Yu et al. (2020) realizaron un estudio paramétrico de un techo con una capa de PCM de parafina (85.0 %) combinado con polietileno (15.0 %), con temperatura de fusión de 31.0 a 41.0 °C y espesor de 5 a 30 mm (con intervalo de 5 mm) bajo condiciones meteorológicas de Harbin, Pekín, Wuhan, Guangzhou y Kunming. Los resultados mostraron que el intervalo de temperatura de fusión óptima fue de 31.0-33.0 °C en la ciudad de Habin, 34.0-36.0 °C en la ciudad de Pekín, 36.0-38.0 °C en la ciudad de Wuhan, 34.0-36.0 °C en la ciudad de Guangzhou y 29.0-31.0 °C en la ciudad de Kunming; y el espesor óptimo fue de 30 mm. Yu et al. (2020) concluyeron que un espesor mayor que 30 mm no mejoró el comportamiento térmico del sistema y la temperatura disminuyó hasta 3.7, 4.0, 3.9, 3.8 y 3.7 °C para Harbin, Beijing, Wuhan, Guangzhou y Kunming, respectivamente.

### **1.3. Techo-pared con material de cambio de fase**

En las secciones anteriores se observó el comportamiento térmico de paredes y techos con PCM, y tales estudios reportan solamente el análisis de una de las dos componentes mencionadas. No obstante, es importante conocer el beneficio que se podría obtener cuando el PCM se adiciona a ambas envolventes (pared y techo). Existen estudios experimentales y numéricos en los que se comparan el comportamiento de paredes y techos con y sin PCM, tal es el caso de Zwanzig et al. (2013), quienes evaluaron la ubicación de un PCM de parafina (con temperatura de fusión de 25.0 a 27.0 °C) en una pared compuesta por madera aislante, madera comprimida, aislamiento térmico-acústico y yeso, y en un techo compuesto por una capa de asfalto, madera comprimida, aislante y madera. Los resultados mostraron que la mejor ubicación del PCM fue en el centro de ambas componentes de la vivienda. También es el caso de Kharbouch et al. (2018), ellos realizaron un estudio térmico de techo y pared con y sin PCM para condiciones de clima del norte de Marruecos. Para la evaluación del sistema, los autores consideraron un techo compuesto por concreto, aislante y yeso (del exterior al interior) y una pared de cemento, ladrillo hueco, aislante y yeso (del exterior al interior) y observaron el efecto de la temperatura de cambio de fase y la posición de la placa de PCM. En general, los autores determinaron que la mejor posición

del PCM en la pared fue entre el aislante y el block hueco, mientras que en el techo fue entre el aislante y concreto. Ellos concluyeron que la selección adecuada de la temperatura de cambio de fase maximiza el rendimiento térmico, aumentando el tiempo de retardo.

Por su parte, Kong et al. (2014) realizaron el estudio experimental de una cavidad con PCM en la pared y en el techo como una capa adicional, para ello, construyeron tres habitaciones, la primera sin PCM, la segunda con el PCM sobre la superficie interior de sus componentes y la tercera con el PCM sobre la superficie exterior de sus componentes; ellos consideraron dos PCMs con temperatura de fusión de 26.5 y 30.2 °C. Los autores observaron un ahorro de energía de hasta 80.0% y concluyeron que la mejor posición del PCM es en la superficie interior de las envolventes. Rathore y Shukla (2020) también realizaron el estudio experimental de una cavidad con PCM en sus paredes y techo; sin embargo, los autores consideraron el PCM dentro de tubos incrustados en las componentes y el PCM considerado fue un OM37 con temperatura de fusión entre 35.0 y 40.0 °C. Los autores obtuvieron una reducción en la temperatura interior entre 7.2 y 9.2% y de 41.3% en la ganancia de calor hacia el interior.

## 1.4. Estudios a nivel nacional

En México existen algunos estudios enfocados en la mejora térmica de las paredes y techo, tal como los estudios de Barrios et al. (2011), Huelsz et al. (2016) y Huelsz et al. (2019), los cuales realizaron la evaluación paramétrica de block huecos en techos y paredes. Después, Moreles et al. (2018) realizaron el estudio numérico en una dimensión de una pared con PCM con temperatura de fusión de 28.2 °C, los autores concluyeron que el consumo de energía para enfriamiento se reduce 4.0% con un espesor de PCM de 6 mm y 29.0% con un espesor de 18 mm. Por otro lado, existen estudios en los que se evaluaron diferentes tipos de paredes, como el estudio de Uriarte-Flores et al. (2019), quienes se enfocaron en la evaluación de diferentes paredes. Los autores realizaron el estudio numérico del desempeño térmico de paredes de ladrillo rojo (L), tabicón (T) y block hueco (B) con

capa de yeso (1), capas de yeso reflectiva (2), capas de aislante y yeso (3), y capas de aislante con yeso y reflectiva (4). Ellos consideraron los climas de tres ciudades, Mérida, Hermosillo y Zacatepec, y analizaron el día más cálido y el día más frío de 2015 de cada ciudad. Uriarte-Flores et al. (2019) observaron que en Mérida la configuración de tabicón con capa de yeso (T1) presentó el mayor flujo de calor bajo condiciones del día más cálido, y la configuración de block hueco con capa de aislante, capa de yeso y capa reflectiva (B4) presentó el menor flujo de calor; durante el día más frío de Mérida, el flujo de calor máximo se presentó en el tabicón con capa de yeso y capa reflectiva (T2) y el menor en el block hueco con capa de aislante y yeso (B3); en el caso de Zacatepec y Hermosillo se tiene un comportamiento similar al de Mérida. Los autores concluyeron que la mejor configuración es la T4 con un tiempo de recuperación de inversión de 60 meses y una reducción de carga térmica de 41.0 a 49.0 %.

Otro estudio disponible es el de Lucero-Álvarez et al. (2016), quienes observaron el efecto que tiene la variación de la resistencia de la envolvente sobre el comportamiento térmico de una vivienda; ellos consideraron tres casos, el primero con aislante en el techo, el segundo con aislante en las paredes y el tercero con aislante en todas las componentes. Los autores concluyeron que el aislamiento de todas las componentes es viable económicamente. Un año después, Lucero-Álvarez y Martín-Domínguez (2017) reportaron el comportamiento térmico de un techo con diferentes valores de emisividad bajo condiciones meteorológicas de 20 ciudades de México, los autores concluyeron que las horas de malestar térmico puede disminuir entre 1.9 y 40.6 % con esta tecnología.

Por otra parte, Xamán et al. (2017) realizaron el análisis térmico de una bovedilla con y sin aislante térmico y materiales reflectivos para techos. Para ello, los autores consideraron bovedilla tradicional usada en México y las condiciones meteorológicas del día más frío y del día más cálido del año de la ciudad de Hermosillo. Los autores consideraron un block de dos cavidades (B2) y uno de tres cavidades (B3), con un material aislante (WINS) y sin material aislante (WOINS), con material reflectivo blanco (RW), negro (RB) y gris

(RG). Xamán et al. (2017) observaron que las configuraciones B2-WINS-RW y B3-WINS-RW presentaron menor ganancia de calor hacia interior. Los autores concluyeron que la configuración de bovedilla con menor carga térmica es la que está compuesta por capas de materiales aislantes y reflectivos. Un años después, Hernández-Pérez et al. (2018) realizaron de manera experimental el estudio térmico de un techo sólido con recubrimiento reflectivo. Los autores consideraron el recubrimiento reflectiva convencional (rojo) y dos recubrimientos reflectivos blancos, el experimento se sometió a condiciones meteorológicas de Cuernavaca, Morelos. Sus resultados mostraron que la temperatura al interior fue de hasta 33.0 °C con recubrimiento reflectiva gris y 25.0 °C con recubrimiento reflectivo blanco, además, el flujo de calor a través del techo con recubrimiento blanco fue 53.0% menor que el del techo con recubrimiento gris.

Lucero-Álvarez y Martín-Domínguez (2019) realizaron el estudio térmico de una vivienda residencial con un techo compuesto por una capa de impermeabilizante, aislamiento térmico, concreto y revoque bajo condiciones meteorológicas de 20 ciudades de México. Los autores observaron el efecto de la emisividad y reflectancia de la superficie exterior (impermeabilizante) y el efecto del aislante térmico, además, consideraron las paredes compuestas por mortero, block hueco y revoque. Se observó que las ciudades con demanda de energía anual mayor que 6 000.0 kWh fueron las ciudades de Acapulco, Campeche, Culiacán, Veracruz, Hermosillo y Chihuahua; y la reducción de consumo de energía fue entre 3 000.0 y 5 500.0 kWh excepto para Chihuahua, misma que solo tiene una reducción de 500.0 kWh.

Un año después, Xamán et al. (2020) realizaron un estudio numérico del comportamiento de un techo con tres PCM diferentes; los autores evaluaron el comportamiento térmico del techo con PCM variando su espesor (de 5 a 20 mm) y el tipo de PCM (cera de parafina MG29, n-eicosano y sal hidratada). Ellos observaron que el PCM de parafina MG29 con 20 mm de espesor presentó mejor rendimiento térmico que el techo típico, ya que disminuyó hasta 53.0% el consumo de energía para el confort térmico. Xamán et al. (2020) concluyeron que el PCM MG29 presentó el mayor beneficio para el ahorro de

energía y tiene un tiempo de recuperación entre 12.2 y 13.5 años, dependiendo del espesor.

## 1.5. Conclusión de la revisión bibliográfica

En conclusión, se observó que en la literatura se han reportado diferentes tipos de materiales para mejorar el comportamiento térmico de las paredes; entre los materiales reportados, se tienen los materiales aislantes, como el poliuretano, la fibra de vidrio, la perlita, entre otros. También, se ha observado que la implementación de éstos y otros materiales ayudan a reducir la transferencia de calor entre el medio ambiente y el interior de una edificación por lo menos 20.0%; el espesor de estos materiales no excede los 150 mm y la mayoría de los estudio reportan paredes compuestas de block o ladrillo.

Además, se encontraron estudios en los que se reporta el comportamiento de paredes compuesta de block o ladrillo huecos con materiales aislantes o alternativos para reducir la transferencia de calor. Algunos estudios se enfocan en encontrar el tamaño óptimo de los huecos en los blocks o ladrillos, asimismo, en la literatura se reporta la cantidad de cavidades con y sin materiales adicionales; la mayoría de los modelos de block o ladrillos reportados tienen entre dos y seis huecos; sin embargo, otros estudios reportan hasta 12 y 24 huecos.

Los estudios más recientes reportados en la literatura muestran el comportamiento térmico de las paredes con y sin PCM y han estudiado PCMs con punto de fusión de entre 19.0 y 54.0 °C; sin embargo, la mayoría no excede los 30.0 °C. Además, gran parte de los PCMs reportados son de tipo parafina (n-eicosano y n-octadecano) y sal hidratada ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). Algunos autores han concluido que los factores principales que afectan el comportamiento térmico del PCM son la temperatura de fusión, su espesor, su ubicación en la pared (cerca de la superficie interior o exterior, o dentro de los huecos de los blocks y ladrillos) y el tipo de clima. Además, se ha observado que los estudios donde se considera un block o ladrillo huecos se implementa el PCM al interior de los huecos

y no como una capa adicional, mientras que en los techos sólidos, consideran el PCM como capa adicional de entre 5 y 50 mm. De los estudios reportados para climas de México, el estudio de Uriarte-Flores et al. (2019) reporta el comportamiento térmico de una pared de tabicón, ladrillo y block hueco con diferentes materiales; sin embargo, no consideran la implementación de un PCM y su estudio se realizó en estado pseudo-transitorio.

También la mayoría de los estudios de techos se enfocan a techos convencionales (concreto sólido o madera) y, al igual que los estudios de las paredes, la mayoría implementan materiales aislantes o alternativas como los techos verdes o techos reflectivos para reducir la transferencia de calor y los techos de bovedilla son analizados con materiales aislantes.

Los techos con PCM reportados en la literatura son de concreto sólido o de madera y en estos casos se reportan PCMs con temperatura de fusión mayor a 30.0 °C. Al igual que las paredes, la ubicación del PCM en los techos es variado, algunos autores consideran el PCM cerca de la superficie interior, otros autores consideran el PCM cerca de la superficie exterior, o en el caso contrario, consideran el PCM en el centro del techo. También se observó que el espesor del PCM reportado es de entre 10 y 30 mm; la reducción del flujo de calor es al menos de 20.0%, dependiendo del tipo de PCM, de su espesor, de su temperatura de fusión y de su ubicación en el techo.

Finalmente, a nivel nacional se ha observado que los techos reportados en la literatura consideran techos sólidos de concreto con o sin materiales aislantes, y los estudios de techos de bovedilla no consideran el PCM. Por el contrario, los estudios con PCMs consideran techos convencionales; el estudio de Xamán et al. (2017) muestra el comportamiento térmico de un techo de bovedilla con material aislante, mientras que el estudio de Xamán et al. (2020) muestra el comportamiento térmico de un techo sólido con PCM; sin embargo, ninguno de estos estudios consideran un techo de bovedilla con PCM (estado transitorio). Cabe señalar, que en la literatura se reporta la inclusión de PCMs al interior de los huecos de los ladrillos o blocks y/o bovedilla, lo cual limita su aplicación a viviendas

en planeación, por lo tanto, la inclusión de PCMs como una capa adicional a la pared o al techo permite tener un panorama más general del comportamiento térmico de las paredes de block o ladrillo hueco y de los techos de bovedilla en viviendas tanto en planeación como en funcionamiento.

## 1.6. Objetivos

### 1.6.1. Objetivo general

Evaluar el comportamiento dinámico de paredes y techos que se utilizan en la industria de la construcción de viviendas en México, considerando la inclusión de un material de cambio de fase (PCM).

### 1.6.2. Objetivos específicos

- Aprender la técnica de volumen finito.
- Desarrollar un código numérico para la modelación de la transferencia de calor conjugada en paredes y techos, y adicionalmente un material de cambio de fase.
- Seleccionar las condiciones meteorológicas para diferentes ciudades de los Estados Unidos Mexicanos (al menos un clima cálido).
- Estudio paramétrico en estado transitorio de los diferentes modelos de blocks y ladrillos en paredes y techos bajo diferentes condiciones meteorológicas.
- Evaluación térmica de cada modelo de block y ladrillo en paredes y techos con material de cambio de fase.

## 1.7. Alcance

Desarrollar e implementar un código computacional mediante la técnica de volúmenes finitos para el modelado de la transferencia de calor bidimensional de paredes y techos con

condiciones de clima de México, considerando en la diferentes configuraciones de paredes y techos la inclusión de un material de cambio de fase (PCM). Para el techo se considera una configuración: techo de bovedilla; y para las configuraciones de las paredes se consideran dos: ladrillo y block de dos cavidades. Todos estos materiales con información disponibles del mercado Mexicano. Se seleccionarán condiciones meteorológicas de al menos un estado de México para días característicos del año como información para el modelado. Se realizará el estudio paramétrico con las condiciones meteorológicas seleccionadas y las diferentes configuraciones. Finalmente, mediante valores de flux de calor y temperatura se llevará a cabo la evaluación térmica para realizar una propuesta de techo y de pared con y sin material de cambio de fase. Para llevar a cabo este trabajo, se considera la plataforma computacional desarrollada en Cenidet, en el modelado numérico de diferentes sistemas térmicos.

## 1.8. Descripción de los capítulos

A continuación se presenta una breve descripción de los capítulos que componen esta tesis.

El **Capítulo 2: Modelo físico y matemático** muestra el modelo físico y matemático de un block de dos huecos con revoque y PCM y el modelo físico y matemático de un techo de bovedilla de dos huecos con una capa de revoque, una capa de compresión y un PCM; para ambos modelos se presenta las condiciones de frontera y de interfaz, además, se presenta las propiedades termofísicas de los materiales de las componentes.

El **Capítulo 3: Metodología de solución** muestra la metodología matemática para la solución de los modelos matemáticos del block hueco y del techo. Para ello, se presenta las aproximaciones de discretización espacial y temporalmente a través del método de volumen finito. Además, se presenta el algoritmo de acople de las ecuaciones de conservación deducidas; se presenta la discretización de las condiciones de frontera; y se establece el criterio de convergencia. Al final del capítulo se presentan las variables calculadas para la

evaluación del comportamiento térmico del block hueco y del techo.

El **Capítulo 4: Verificación y validación** muestra la reproducción de los distintos problemas de transferencia de calor modelados y reportados en la literatura con la finalidad de verificar que los códigos desarrollados en este trabajo doctoral modelen de manera correcta la transferencia de calor conjugada. Posteriormente, se presenta la independencia de malla espacial y temporal para establecer la malla óptima con base a la relación exactitud-tiempo computacional.

El **Capítulo 5: Resultados** muestra los resultados obtenidos en este trabajo doctoral, mismos que corresponden a los modelos de block hueco y techo. En la primera sección, se muestra el comportamiento térmico de un block hueco con revoque y un ladrillo con revoque. Posteriormente, se muestra el comportamiento térmico de un block hueco con y sin PCM y finalmente, se muestra el comportamiento térmico del techo de bovedilla con y sin PCM.

El **Capítulo 6: Conclusiones** muestra las conclusiones respecto a los resultados presentados en el capítulo 5 y su estructura es similar a este mismo; primeramente se presenta las conclusiones para el block hueco, después se presenta las conclusiones para el techo de bovedilla y, finalmente, se presentan las recomendaciones.

# Capítulo 2

## Modelo físico y matemático

A continuación se presenta el modelo físico, el modelo matemático, las condiciones de frontera y las condiciones de interfaz de la pared y posteriormente del techo. Se considera dos modelos de pared y un modelo de techo. Para mayor facilidad de lectura, en este capítulo solo se presentan las configuraciones con PCM. El modelo físico y matemático de la pared sin PCM se presenta en el apéndice A.

El modelo físico es solo una representación aproximada de un modelo real y el modelo matemático es un conjunto de ecuaciones gobernantes que representan el fenómeno físico y lo aproxima al comportamiento real. En este sentido, la aproximación del modelo matemático con respecto al comportamiento real depende de las consideraciones. Es importante considerar los efectos de mayor impacto sobre el modelo real ya que cuanto más consideraciones se introducen, más complejo es el modelo matemático, por tanto, implementar una herramienta matemática más compleja no siempre resulta en una mejor aproximación; sin embargo, el tiempo de solución podría ser mayor.

### 2.1. Modelo físico y matemático de una pared

La pared que se ha considerado para este estudio es una pared típica disponible en los Estados Unidos Mexicanos. En México existe la cultura de construcción informal de

viviendas, esto significa que la mayoría de las construcciones se realizan sin ningún diseño arquitectónico en términos estructurales y térmicos. En este sentido, existen variantes de paredes en relación a los tipos de materiales. Sin embargo, la mayoría tiene un patrón de orden como se muestra en la Figura 2.1. La composición general de una pared típica en México es de dos capas de revoque y una capa de una componente (tabicón, block hueco, ladrillo o alguna variante de estas mismas). A pesar de esto, las componentes están normalizadas dentro del mercado de la construcción y una de las normas que está disponible para la regulación de estas componentes es la NMX-C-404-ONNCCE, uno de los objetivos de esta norma es la normalización de las dimensiones. Por lo cual, las dimensiones de la Figura 2.1 están basadas a las dimensiones marcadas por la NMX-C-404-ONNCCE.

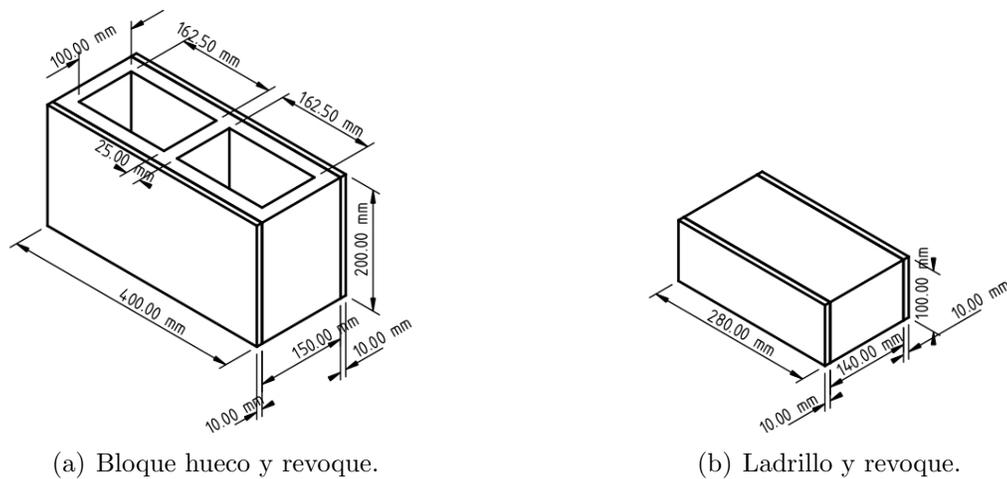


Figura 2.1: Composición de pared en México.

### 2.1.1. Modelo físico

La pared es la componente con mayor área en una edificación. Esta componente se encuentra expuesta a las condiciones ambientales, entre ellas, la radiación solar, la temperatura ambiente, la velocidad del viento, entre otras. Las condiciones meteorológicas, las propiedades termofísicas y la composición de la pared son los factores importantes al momento de diseñar y construir una vivienda, pues de ello depende un funcionamiento correcto desde el punto de vista térmico para conseguir un nivel de confort térmico al

## 2.1. Modelo físico y matemático de una pared

---

interior de las viviendas. En ese sentido, las consideraciones para el modelo físico de la pared son: dos capas de revoque, una de bloque hueco y una de PCM; radiación solar ( $G_{solar}$ ) incidente sobre la superficie derecha de la pared (superficie exterior); temperatura constante de la habitación ( $T_{hab}$ ) de 25.0 °C; pérdidas y ganancias de calor por convección y radiación en las superficies izquierda y derecha; superficies superior e inferior aisladas; capa de PCM ubicada entre la capa de revoque izquierda y la capa de block hueco; las superficies izquierda y derecha se consideran con recubrimiento blanco y gris, respectivamente. Las tablas 2.1 y 2.2 muestran las propiedades termofísicas de los materiales y la Tabla 2.3 muestra las propiedades ópticas de los recubrimientos. La Figura 2.2 muestra el modelo físico de la pared identificada como BHP. Las dimensiones de todas las capas de la pared, excepto del PCM (dimensión variante), se presentan en la Figura 2.1; se consideran espesores del PCM de 10, 15 y 20 mm.

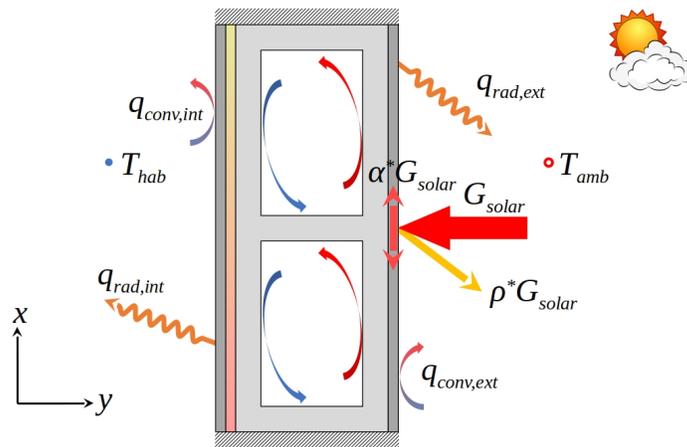


Figura 2.2: Modelo físico de BHP.

### 2.1.2. Modelo matemático

Las consideraciones para deducir el modelo matemático de la configuración BHP son: transferencia de calor por conducción en las capas de revoque; transferencia de calor por convección natural en régimen laminar dentro de las cavidades del block hueco y transferencia de calor por conducción en las regiones sólidas; aire dentro de las cavidades como fluido newtoniano, incompresible y radiativamente no-participante; transferencia de calor

Tabla 2.1: Propiedades termofísicas de los materiales.

Material	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/mK)	$C_P$ (J/kgK)	$\mu$ (kg/ms)
Aire <sup>a</sup>	1.20	$25.60 \times 10^{-3}$	1 004.00	$1.80 \times 10^{-5}$
Block <sup>b</sup>	2 500.00	1.74	920.00	–
Bovedilla <sup>a</sup>	2 500.00	1.74	920.00	–
Compresión <sup>c</sup>	2 400.00	1.80	1 080.00	–
Revoque <sup>a</sup>	1 920.00	1.40	880.00	–
Ladrillo <sup>b</sup>	1 600.00	0.70	1 073.00	–

<sup>[a]</sup>Xamán et al. (2017), <sup>[b]</sup>Uriarte-Flores et al. (2019), <sup>[c]</sup>Hernández-Pérez (2021).

Tabla 2.2: Propiedades termofísicas de los PCMs.

PCM	Fase	$T$ (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/mK)	$C_P$ (J/kgK)	$h_{ls}$ (J/kg)
RT25HC <sup>a</sup>	Sólido	22.00	770.00	0.20	2 000.00	230 000.00
	Líquido	26.00	880.00	0.20	2 000.00	230 000.00
OM29 <sup>b</sup>	Sólido	25.00	976.00	0.29	2 300.00	194 000.00
	Líquido	28.00	870.00	0.17	2 710.00	194 000.00

<sup>[a]</sup>Rubitherm<sup>®</sup> (2020), <sup>[b]</sup>Pluss<sup>®</sup> (2022).

por conducción con cambio de fase en la capa de PCM; estudio en estado transitorio y en dos dimensiones en dirección  $x$  y  $y$ ; y propiedades termofísicas constantes, excepto la densidad (aproximación de Boussinesq). A partir de estas consideraciones se deduce el modelo matemático de las ecuaciones (2.1)-(2.6). Las ecuaciones (2.1)-(2.4) representan la transferencia de calor en la capa de block hueco; la Ecuación (2.5) representa la transferencia de calor por conducción en las capas de revoque; y la Ecuación 2.6 representa la

Tabla 2.3: Propiedades ópticas.

Recubrimiento <sup>a</sup>	$\varepsilon$	$\rho^*$
Blanco	0.89	0.84
Gris	0.87	0.33

<sup>[a]</sup>Hernández-Pérez (2021).

transferencia de calor por conducción con cambio de fase en la capa de PCM. El término  $C_{P_{efec}}$  de la Ecuación (2.6) engloba el efecto de cambio de fase, en el capítulo 3 se presenta la metodología para implementar el método de calor latente para deducir esta ecuación.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \cdot u)}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \cdot v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \cdot v)}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \rho \beta g_y (T - T_\infty) \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial(\rho C_P T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \cdot C_P T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \cdot C_P T)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial(\rho_r C_{P,r} T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_r \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_r \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial(\rho_p C_{P,efec} T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_p \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_p \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (2.6)$$

### 2.1.3. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera termodinámicas se muestra en la Figura 2.3. En la superficie izquierda ( $x = 0$ ) se consideran pérdidas y ganancias de calor por convección y radiación, esta condición de frontera se muestra en la Ecuación (2.7). Sobre la superficie derecha ( $x = L_x$ ) se consideran nuevamente pérdidas y ganancias de calor por convección y radiación, además se considera la incidencia de radiación solar y, debido a las propiedades del recubrimiento, parte de la radiación solar se refleja ( $\rho^* G_{solar}$ ) hacia el medio ambiente, mientras que el resto se absorbe ( $\alpha^* G_{solar}$ ). A partir de estas consideraciones, se tiene la condición de frontera de la Ecuación (2.8). Estas dos condiciones de frontera son válidas en el límite  $0 \leq y \leq L_y$ . Las superficies inferior ( $y = 0$ ) y superior ( $y = L_y$ ) se consideran

adiabáticas, la condición de frontera para ambas superficies se muestra en la Ecuación (2.9) y es válida en  $0 < x < L_x$  para ambas superficies.

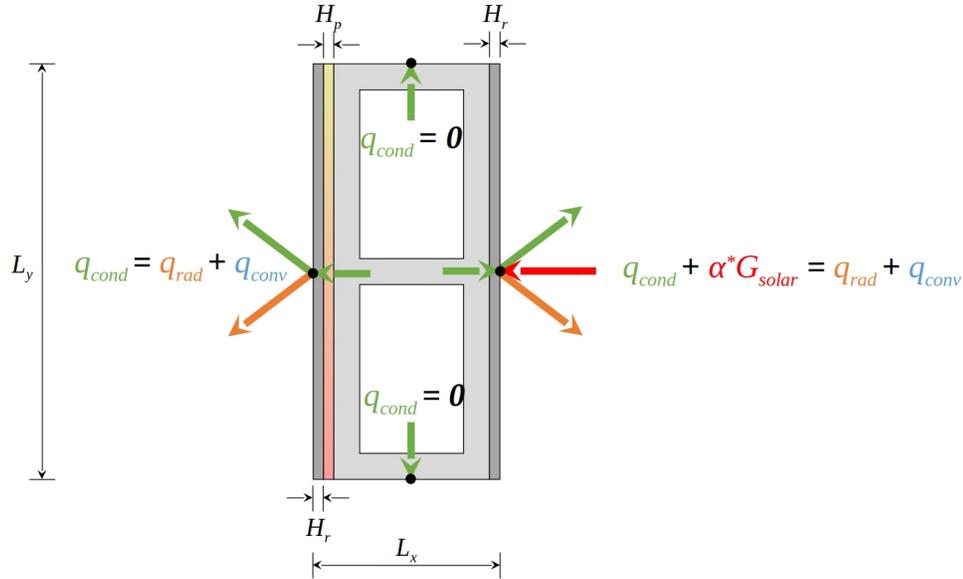


Figura 2.3: Condiciones termodinámicas.

$$-\lambda_r \frac{\partial T_r}{\partial x_r} = h_{int}(T_{int} - T_r) + \epsilon\sigma(T_{int}^4 - T_r^4) \quad (2.7)$$

$$-\lambda_r \frac{\partial T_r}{\partial x_r} + \alpha^* G_{solar} = h_{ext}(T_r - T_{amb}) + \epsilon\sigma(T_r^4 - T_{amb}^4) \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (2.9)$$

Las condiciones de frontera hidrodinámicas y de interfaz se muestran en la Figura 2.4. La condición de no-deslizamiento se considera solamente en las fronteras de la capa de block hueco, en consecuencia, la condición hidrodinámica de la Ecuación (2.10) es válida para la superficie izquierda ( $x = H_r + H_p$ ) y derecha ( $x = L_x - H_r$ ) en el límite  $0 \leq y \leq L_y$  y para la superficie inferior ( $y = 0$ ) y superior ( $y = L_y$ ) en el límite  $Hx_r + Hx_p < x < L_x - Hx_r$ .

$$u = v = 0 \quad (2.10)$$

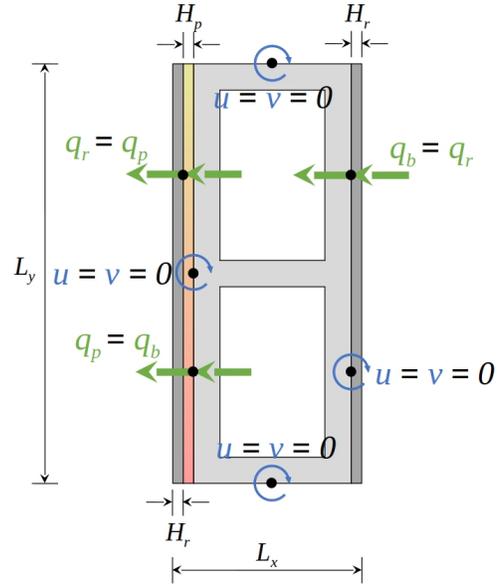


Figura 2.4: Condiciones de frontera hidrodinámicas y de interfaz para BHP.

Adicionalmente, se tienen tres balances de energía como condiciones de interfaz, el primero en  $x = H_r$ , el segundo en  $x = H_r + H_p$  y el tercero en  $x = L_x - H_r$ . Los tres balances son válidos en el límite  $0 < y < L_y$ , estos balances se representan a través de las ecuaciones (2.11)-(2.13), respectivamente.

$$\lambda_r \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda_p \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.11)$$

$$\lambda_p \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda_b \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.12)$$

$$\lambda_b \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda_r \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.13)$$

## 2.2. Modelo físico y matemático de un techo de bovedilla

El techo típica disponible en México está compuesta de una capa de concreto y una capa de revoque; sin embargo, también se puede encontrar un techo compuesta de una capa de concreto y una capa de bovedilla; la capa de revoque en un techo de bovedilla es opcional, ya que la ventaja de la bovedilla es que evita la inclusión de revoque debido a su acabado sobre la superficie interior. En la Figura 2.5 se muestra el ejemplo de un techo de bovedilla y un techo de concreto sólido.

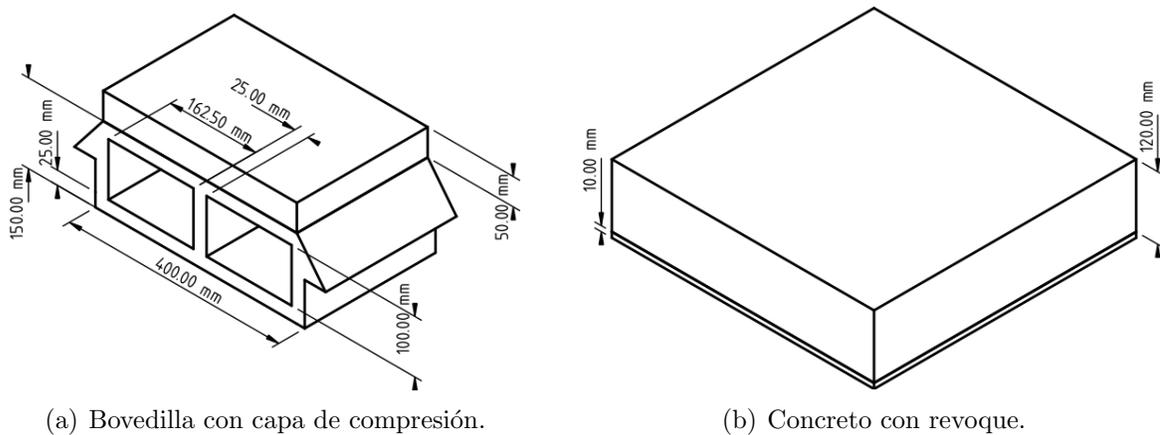


Figura 2.5: Composición del techo.

### 2.2.1. Modelo físico

El techo es la componente de una edificación con mayor ganancia de energía solar, ya que es la componente más expuesta a la radiación solar durante el día. Al igual que la pared, los factores que influyen en su comportamiento térmico son las condiciones meteorológicas, las propiedades termofísicas y su composición. Por lo tanto, las consideraciones del techo son: una capa de bovedilla, una capa de compresión, una capa de PCM y una capa de revoque; radiación solar ( $G_{solar}$ ) incidente sobre la superficie superior; temperatura constante de la habitación ( $T_{hab}$ ) de 25.0 °C; pérdidas y ganancias de calor por convección y radiación en las superficies superior e inferior; superficies derecha e izquierda aisladas;

una capa de PCM ubicada entre la capa de revoque y la capa de bovedilla; materiales homogéneos (Tabla 2.1 y Tabla 2.2); la superficie interior se considera con recubrimiento blanco y la superficie exterior se considera con recubrimiento gris. La Figura 2.6 muestra el modelo físico del techo de bovedilla identificada como TBP. Las dimensiones de todas las capas del techo se presentan en la Figura 2.5.

### 2.2.2. Modelo matemático

Las consideraciones para el modelo matemático son: transferencia de calor por conducción en la capa de revoque y en la capa de compresión; transferencia de calor por convección natural en régimen laminar dentro de las cavidades de la bovedilla y transferencia de calor por conducción en las regiones sólidas; aire dentro de las cavidades como fluido newtoniano, incompresible y radiativamente no-participante; transferencia de calor por conducción con cambio de fase en la capa de PCM; estudio en estado transitorio y en dos dimensiones en dirección  $x$  y  $y$ ; y propiedades termofísicas constantes, excepto la densidad. Las ecuaciones (2.14)-(2.19) es el modelo matemático del techo deducido con las consideraciones anteriores. Las ecuaciones (2.14)-(2.17) representan la transferencia de calor en la capa de bovedilla; la Ecuación (2.18) representa la transferencia de calor por conducción en la capa de revoque y en la capa de compresión; y la Ecuación (2.19) representa la transferencia de calor por conducción con cambio de fase en la capa de PCM.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \cdot u)}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \cdot v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \cdot v)}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \rho \beta g_y (T - T_\infty) \quad (2.16)$$

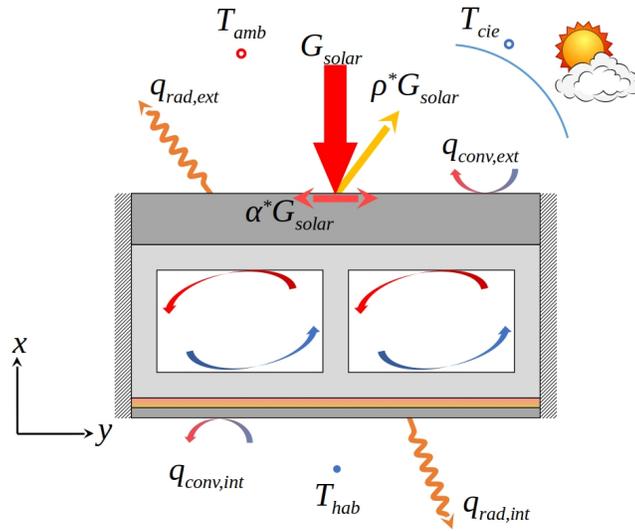


Figura 2.6: Modelo físico de TBP.

$$\frac{\partial(\rho C_P T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \cdot C_P T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \cdot C_P T)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial(\rho_r C_{P,r} T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_r \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_r \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial(\rho_p C_{P,pec} T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_p \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_p \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (2.19)$$

### 2.2.3. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera para el modelo matemático de TBP se muestran en la Figura 2.7 y son: en la superficie inferior ( $y = 0$ ) se consideran pérdidas y ganancias de calor por convección y radiación, matemáticamente se tiene la Ecuación (2.20). En la superficie superior ( $y = L_y$ ), se considera radiación solar incidente y debido a las propiedades ópticas del recubrimiento parte de esta energía se refleja ( $\rho^* G_{solar}$ ) y el resto se absorbe ( $\alpha^* G_{solar}$ ), también se consideran pérdidas y ganancias de calor por convección y radiación. La condición de esta frontera se muestra en la Ecuación (2.21). El límite para las ecuaciones (2.20) y (2.21) es  $0 < x < L_x$ . Las superficies izquierda ( $x = 0$ ) y derecha

## 2.2. Modelo físico y matemático de un techo de bovedilla

( $x = L_x$ ) se consideran superficies adiabáticas, por lo tanto la condición de frontera es la Ecuación (2.22) en  $0 \leq y \leq L_y$ .

$$-\lambda_r \frac{\partial T_r}{\partial y_r} = h_{int}(T_{int} - T_r) + \epsilon\sigma(T_{int}^4 - T_r^4) \quad (2.20)$$

$$-\lambda_r \frac{\partial T_r}{\partial y_r} + \alpha^* G_{solar} = h_{ext}(T_r - T_{amb}) + \epsilon\sigma(T_r^4 - T_{cie}^4) \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (2.22)$$

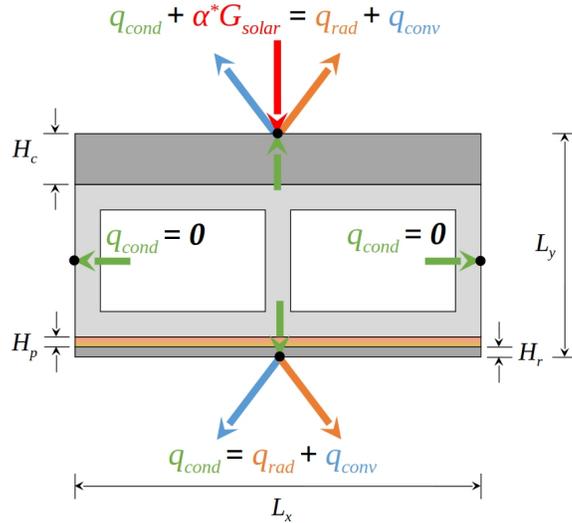


Figura 2.7: Condiciones termodinámicas de la configuración TBP.

Las condiciones de frontera hidrodinámicas solo se establecen para la capa de bovedilla (ver Figura 2.8). Para ello se considera la condición de no-deslizamiento mostrada en la Ecuación (2.23). Para las superficies superior ( $y = L_y - H_c$ ) e inferior ( $y = H_r + H_p$ ) el límite es  $0 < x < L_x$ ; para las superficies izquierda ( $x = 0$ ) y derecha ( $x = L_x$ ) el límite es  $H_r + H_p \leq y \leq L_y - H_c$ .

$$u = v = 0 \quad (2.23)$$

La Figura 2.8 se muestra los balances de energía como condiciones de interfaz. La

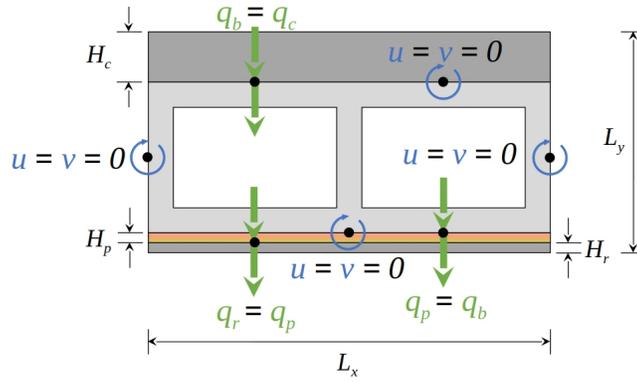


Figura 2.8: Condiciones de frontera hidrodinámicas y de interfaz para TBP.

primera condición de interfaz se presenta en la Ecuación (2.24) para  $y = H_r$ , la segunda se muestra en la Ecuación (2.25) para  $y = H_r + H_p$  y la tercera se muestra en la Ecuación (2.26) para  $y = L_y - H_c$ . El límite de las tres condiciones de interfaz es  $0 \leq x \leq L_x$ .

$$\lambda_r \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda_p \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.24)$$

$$\lambda_p \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda_b \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.25)$$

$$\lambda_b \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda_c \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.26)$$

En el siguiente capítulo, se muestra la metodología empleada para la solución de los modelos matemáticos presentados anteriormente, dentro de esta metodología se presenta el algoritmo empleado para el acoople de las ecuaciones de masa, momentum y energía, así como el método de calor específico efectivo, utilizado para el modelado del material de cambio de fase

# Capítulo 3

## Metodología de solución

A continuación se presenta el Método de Volumen Finito como metodología de solución. Primeramente, se presenta la ecuación general de convección-difusión para explicar la metodología en términos de una variable general. También, se describen los algoritmos SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) y PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) para el acople de las ecuaciones de masa y momentum. Posteriormente, se presenta el método de calor específico efectivo para la solución del PCM.

### 3.1. Ecuación General de Convección-Difusión

La transferencia de calor y masa se puede representar a través de una sola ecuación conocida como Ecuación General de Convección-Difusión. Esta ecuación representa el transporte de la variable de interés a través de los mecanismos de transporte convectivos y difusivos. De acuerdo con Xamán y Gijón-Rivera (2016) y Patankar (1980) se puede representar de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \frac{\partial \rho u \phi}{\partial x} + \frac{\partial \rho v \phi}{\partial y} + \frac{\partial \rho w \phi}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + S \quad (3.1)$$

La ecuación anterior representa el flujo neto de la propiedad dentro de un volumen de control, por lo tanto, el término temporal representa la acumulación de la propiedad en el tiempo; el término convectivo representa el flujo neto de la propiedad a causa del

mecanismo de transporte convectivo; el término difusivo representa el flujo de calor neto de la propiedad a causa del mecanismo de transporte difusivo; y finalmente, el término fuente representa la generación o destrucción interna de la variable. Este último término engloba todos los flujos de la propiedad que no pueden ser integrados en los demás términos, por ejemplo, el flujo neto de calor a causa del mecanismo de transporte radiativo. La Tabla 3.1 muestra la equivalencia de  $\phi$ ,  $\Gamma$  y  $S$  para las ecuaciones de masa, momentum y energía en dos dimensiones de los modelos matemáticos presentados en el capítulo anterior.

Tabla 3.1: Equivalencias de  $\phi$ ,  $\Gamma$  y  $S$ .

Ecuación de conservación	$\phi$	$\Gamma$	$S$
Masa	1	0	0
Momentum en $x$	$u$	$\mu$	$-\frac{\partial P}{\partial x}$
Momentum en $y$	$v$	$\mu$	$-\frac{\partial P}{\partial y} + \rho\beta g_y(T - T_\infty)$
Energía	$T$	$\frac{\lambda}{C_P}$	0

## 3.2. Método de Volumen Finito

La metodología de solución se puede llevar a cabo con diferentes métodos numéricos, por ejemplo el Método de Diferencias Finitas (FDM por sus siglas en inglés), el Método de Elemento Finito (FEM por sus siglas en inglés) o el Método de Volumen Finito (FVM por sus siglas en inglés). Sin embargo, la metodología de los métodos numéricos mencionados se puede resumir en tres pasos principales:

- Generación de malla (distribución de nodos computacionales con su respectivo volumen de control sobre el dominio, espacial y temporalmente).
- Discretización del modelo matemático (se obtiene una ecuación algebraica por cada nodo de interés del dominio).
- Solución de sistemas de ecuaciones algebraicas (solver).

En este estudio se seleccionó al FVM para la solución de las ecuaciones gobernantes,

ya que a diferencia de los otros métodos numéricos, éste es construido considerando la conservación de las diferentes cantidades físicas en un volumen de control y, por lo tanto, es conservativo en cada volumen de control infinitesimal. A continuación se explica cada uno de los pasos utilizados en el FVM.

### 3.2.1. Generación de malla

El modelo físico del sistema se divide en un número finito de volúmenes de control (dominio computacional) en los que se discretiza la ecuación gobernante para determinar el valor de la variable. Estos volúmenes de control deben de cumplir principalmente dos condiciones; la primera, cada volumen de control no debe traslaparse con los volúmenes vecinos; la segunda, la suma de los volúmenes de control es igual a la suma del volumen total del dominio. En la Figura 3.1 se muestra la división del sistema en un número finito de volúmenes de control, cada volumen tiene un punto central en el que se almacena todas las propiedades del sistema y la variable de interés.

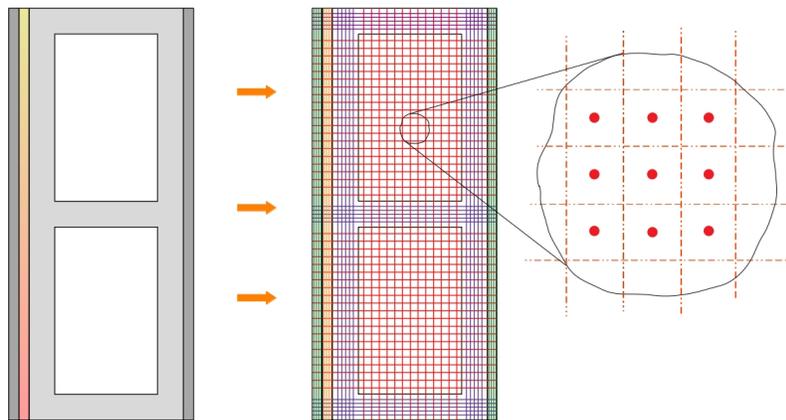


Figura 3.1: Generación de malla.

### 3.2.2. Discretización espacial y temporal de la Ecuación General de Convección-Difusión

La Figura 3.2 muestra el volumen de control para la discretización de la ecuación de convección-difusión en dos dimensiones y en estado transitorio (Ecuación (3.2)). El nodo

sobre el cual se discretiza la ecuación se denomina nodo principal ( $P$ ), mientras que los nodos denominados vecinos norte ( $N$ ), sur ( $S$ ), este ( $E$ ) y oeste ( $W$ ) son los nodos que tienen información para la solución de la variable en el nodo  $P$ . Por su parte, los nodos  $P(t - \Delta t)$ ,  $P(t)$  y  $P(t + \Delta t)$  corresponden al nodo principal  $P$  en el tiempo anterior, actual y posterior, respectivamente.

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \frac{\partial \rho u \phi}{\partial x} + \frac{\partial \rho v \phi}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S \quad (3.2)$$

La Ecuación (3.2) se integra dentro de los límites del volumen de control  $P$  en dirección  $x$  (de  $w$  a  $e$ ), en dirección  $y$  (de  $s$  a  $n$ ) y en el tiempo  $t$  (de  $t - \frac{\Delta t}{2}$  a  $t + \frac{\Delta t}{2}$ ), entonces se tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} & \int_{t-\frac{\Delta t}{2}}^{t+\frac{\Delta t}{2}} \int_s^n \int_w^e \left[ \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} \right] dx dy dt + \\ & \int_{t-\frac{\Delta t}{2}}^{t+\frac{\Delta t}{2}} \int_s^n \int_w^e \left[ \frac{\partial \rho u \phi}{\partial x} \right] dx dy dt + \int_{t_s}^{t_n} \int_s^n \int_w^e \left[ \frac{\partial \rho v \phi}{\partial y} \right] dx dy dt = \\ & \int_{t-\frac{\Delta t}{2}}^{t+\frac{\Delta t}{2}} \int_s^n \int_w^e \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right] dx dy dt + \int_{t-\frac{\Delta t}{2}}^{t+\frac{\Delta t}{2}} \int_s^n \int_w^e \left[ \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \right] dx dy dt + \\ & \int_{t-\frac{\Delta t}{2}}^{t+\frac{\Delta t}{2}} \int_s^n \int_w^e [S] dx dy dt \quad (3.3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left[ (\rho \phi)_{t+\frac{\Delta t}{2}} + (\rho \phi)_{t-\frac{\Delta t}{2}} \right] \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} + [(\rho u \phi)_e - (\rho u \phi)_w] \Delta y + [(\rho v \phi)_n - (\rho v \phi)_s] \Delta x = \\ & \left[ \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w \right] \Delta y + \left[ \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n - \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s \right] \Delta x + [S_P] \Delta x \Delta y \quad (3.4) \end{aligned}$$

La ecuación discretizada ha quedado en función de las interfaces del volumen de control  $P$ , espacial y temporalmente; sin embargo, la información disponible del sistema solo está disponible en el nodo de cada volumen de control, por lo tanto, se requiere interpolar en las interfaces. Se puede implementar una aproximación de primer orden para la discretización temporal a través de la Ecuación (3.5), donde: si  $f=0.0$ , es el esquema explícito; si  $f=0.5$ , es el esquema Crank-Nicolson; y si  $f=1.0$ , el esquema es implícito. Por su parte, una

### 3.2. Método de Volumen Finito

aproximación de segundo orden se puede implementar al considerar la Ecuación (3.6) (Darwish y Moukalled, 2016).

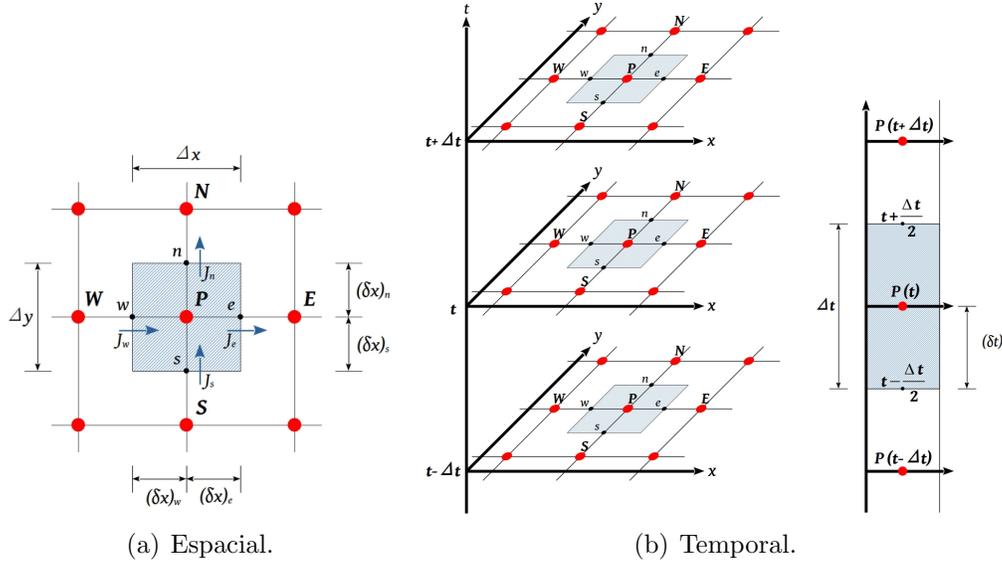


Figura 3.2: Volumen de control para la discretización.

$$\int_{t-\frac{\Delta t}{2}}^{t+\frac{\Delta t}{2}} [\phi] dt = [f\phi + (1.0 - f)\phi^{t-\Delta t}] \Delta t \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \phi^{t+\frac{\Delta t}{2}} &= \frac{3}{2}\phi - \frac{1}{2}\phi^n \\ \phi^{t-\frac{\Delta t}{2}} &= \frac{3}{2}\phi^n - \frac{1}{2}\phi^{nn} \end{aligned} \quad (3.6)$$

donde  $n = t - \Delta t$  y  $nn = t - 2\Delta t$ . Al implementar una aproximación de segundo orden en el tiempo en la Ecuación (3.4) se tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} &\left[ \frac{3}{2}\rho\phi_P - 2\rho\phi_P^n + \frac{1}{2}\rho\phi_P^{nn} \right] \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} + \\ &[(\rho u \phi)_e - (\rho u \phi)_w] \Delta y + [(\rho v \phi)_n - (\rho v \phi)_s] \Delta x = \\ &\left[ \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w \right] \Delta y + \left[ \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n - \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s \right] \Delta x + [S_P] \Delta x \Delta y \quad (3.7) \end{aligned}$$

La Ecuación (3.8) se define como el flujo total debido a los flujos convectivos y difusivos, por lo tanto, la Ecuación (3.9) muestra los flujos totales en las interfaces del volumen de

control  $P$ .

$$J = \rho u \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} = F \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} J_e &= \left[ (\rho u \phi)_e - \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e \right] \Delta y \\ J_w &= \left[ (\rho u \phi)_w - \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w \right] \Delta y \\ J_n &= \left[ (\rho v \phi)_n - \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n \right] \Delta x \\ J_s &= \left[ (\rho v \phi)_s - \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s \right] \Delta x \end{aligned} \quad (3.9)$$

La sustitución de la Ecuación (3.9) en la Ecuación (3.7) permite obtener la Ecuación (3.10).

$$\left[ \frac{3}{2} \rho \phi_P - 2\rho \phi_P^n + \frac{1}{2} \rho \phi_P^{nn} \right] \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} + (J_e - J_w) + (J_n - J_s) = S_P \Delta x \Delta y \quad (3.10)$$

Se hace uso de la ecuación de continuidad para asegurar que la ecuación de Convección-Difusión discretizada cumpla con el principio de continuidad, entonces al discretizar la ecuación de continuidad en dos dimensiones y en estado transitorio y después al aplicar una aproximación de segundo orden en el tiempo y multiplicar por  $\phi_P$  se tiene:

$$\left[ \frac{3}{2} \rho_P + 2\rho_P^n + \frac{1}{2} \rho_P^{nn} \right] \phi_P \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} + (F_e - F_w) \phi_P + (F_n - F_s) \phi_P + S_P \phi_P \Delta x \Delta y \quad (3.11)$$

donde:

$$\begin{aligned} F_e &= (\rho u)_e \Delta y \\ F_w &= (\rho u)_w \Delta y \\ F_n &= (\rho v)_n \Delta x \\ F_s &= (\rho v)_s \Delta x \end{aligned} \quad (3.12)$$

Al restar la Ecuación (3.11) en la Ecuación (3.10) para que se cumpla el principio de continuidad se tiene:

$$\left[ \frac{3}{2}\rho\phi_P - 2\rho\phi_P^n + \frac{1}{2}\rho\phi_P^{nn} \right] \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} + [(J_e - F_e\phi_P) - (J_w - F_w\phi_P)] + [(J_n - F_n\phi_P) - (J_s - F_s\phi_P)] = S_P\phi_P\Delta x\Delta y \quad (3.13)$$

La ecuación anterior sigue en función de la variable de interés ubicada en las interfaces del volumen de control en el espacio, por lo tanto, se requiere un segundo nivel de aproximación espacial conocido como interpolación para determinar la variable de interés en función de los nodos vecinos y así obtener una ecuación algebraica en cada nodo.

### 3.2.3. Esquemas de interpolación

La selección de un esquema de interpolación espacial adecuado reside en su exactitud y en su tiempo computacional. El esquema de interpolación debe ser principalmente: conservativo, esto se refiere a que el flujo de la variable que entra en la interfaz del volumen de control principal debe ser igual al flujo de la variable que sale de la interfaz del volumen adyacente; acotado, esto indica que el valor de la variable en el nodo principal debe estar dentro de los límites de los valores de la variable en los nodos vecinos; y debe tener transportividad, debe considerar la influencia de los nodos vecinos, para ello se determina el número de Peclet (Ecuación (3.14)), el cual determina la intensidad de convección; si  $Pe \rightarrow \infty$  entonces la convección tiene mayor influencia y si  $Pe \rightarrow 0$  entonces la difusión tiene mayor influencia (Xamán y Gijón-Rivera (2016)).

$$Pe = \frac{F}{D} \quad (3.14)$$

donde  $F$  son los flujos convectivos definidos en la Ecuación (3.12) y  $D$  son los flujos difusivos:

$$\begin{aligned}
 D_e &= \frac{\Gamma_e}{(\delta x)_e} \Delta y \\
 D_w &= \frac{\Gamma_w}{(\delta x)_w} \Delta y \\
 D_n &= \frac{\Gamma_n}{(\delta y)_n} \Delta x \\
 D_s &= \frac{\Gamma_s}{(\delta y)_s} \Delta x
 \end{aligned}
 \tag{3.15}$$

Por lo tanto, se puede definir el número de Peclet para cada interfaz del volumen de control  $P$  como:

$$\begin{aligned}
 Pe_e &= \frac{F_e}{D_e} \\
 Pe_w &= \frac{F_w}{D_w} \\
 Pe_n &= \frac{F_n}{D_n} \\
 Pe_s &= \frac{F_s}{D_s}
 \end{aligned}
 \tag{3.16}$$

Patankar (1980) propuso la formulación de esquema generalizado para pasar la ecuación discretizada de la Ecuación (3.13) a una notación de coeficientes agrupados, para ello considérese lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 (J_e - F_e \phi_P) &= a_E(\phi_P - \phi_E) \\
 (J_w - F_w \phi_P) &= a_W(\phi_W - \phi_P) \\
 (J_n - F_n \phi_P) &= a_N(\phi_P - \phi_N) \\
 (J_s - F_s \phi_P) &= a_S(\phi_S - \phi_P)
 \end{aligned}
 \tag{3.17}$$

Finalmente, se obtiene la Ecuación (3.13) en términos de coeficientes agrupados como:

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + b_P
 \tag{3.18}$$

donde:

$$\begin{aligned}
 a_E &= D_e A(|Pe_e|) + \max[-F_e, 0] \\
 a_W &= D_w A(|Pe_w|) + \max[F_w, 0] \\
 a_N &= D_n A(|Pe_n|) + \max[-F_n, 0] \\
 a_S &= D_s A(|Pe_s|) + \max[F_s, 0] \\
 a_P &= a_E + a_W + a_N + a_S + (F_e - F_w) + (F_n - F_s) + \frac{3\rho\Delta x\Delta y}{2\Delta t} - S_P\Delta x\Delta y \\
 b_P &= 2\left(\frac{\rho\Delta x\Delta y}{\Delta t}\right)\phi_P^n - \frac{1}{2}\left(\frac{\rho\Delta x\Delta y}{\Delta t}\right)\phi_P^{nn} + S_C\Delta x\Delta y
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

El término  $A(|Pe|)$  es una función que depende del esquema de aproximación. Versteeg y Malalasekera (2007) mencionan que el esquema centrado es el mejor esquema para problemas de difusión; en problemas de flujo difusivo, el nodo  $P$  es influenciado por los nodos vecinos de manera proporcional (Xamán y Gijón-Rivera, 2016); mientras que problemas de flujo convectivo, el nodo  $P$  es influenciado por el nodo vecino de donde viene la variable. Por ello es importante que el esquema a implementar para los términos convectivos sea conservativo, acotado y además debe tener transportividad. Los esquemas de interpolación se clasifican de acuerdo al orden de exactitud, se tienen los esquemas de bajo orden (LO por sus siglas en inglés), los esquemas de alto orden (HO por sus siglas en inglés) y los esquemas de alta resolución (HR por sus siglas en inglés). La ventaja de los esquemas LO es la estabilidad, mientras que la ventaja de los esquemas HO y HR es la exactitud; sin embargo, estos últimos presentan problemas de estabilidad y los esquemas HO pueden proporcionar soluciones no acotadas. Los esquemas LO para la formulación de esquema generalizado son: corriente arriba (upwind); centrado (central differencing); híbrido (hybrid); exponencial (exponential); y ley de potencia (power law). El valor de  $A(|Pe|)$  se presenta en la Tabla 3.2 en función de cada esquema de bajo orden.

Tabla 3.2: Valor de  $A(|Pe|)$  para los esquemas.

Esquema	$A( Pe )$
Upwind	1.0
Centrado	$1.0 - 0.5  Pe $
Híbrido	$\max[0.0, (1.0 - 0.5  Pe )]$
Exponencial	$\frac{ Pe }{\exp( Pe ) - 1.0}$
Ley de potencia	$\max[0.0, (1.0 - 0.1  Pe )^{5.0}]$

### 3.3. Algoritmos de acople SIMPLE y PISO

La transferencia de calor por convección es un fenómeno complejo en términos numéricos debido a la cantidad de variables que están implicadas en el fenómeno y algunas variables son dependientes de otras variables, además del espacio y tiempo. Por ello se tiene más de una ecuación para representar el comportamiento del fenómeno mencionado y, a su vez, se tiene mayor número de incógnitas que de ecuaciones. Una de las complejidades que se tiene es el acople de las ecuaciones que están implicadas en el fenómeno. Específicamente, la ecuación de momentum para la variable velocidad es por naturaleza compleja ya que es una ecuación no lineal y además requiere un campo de presión para su estimación, esto último complica aún más la situación debido a que la variable presión no tiene una ecuación exclusiva para determinar su valor aproximado. Como consecuencia de esto, se requiere un algoritmo con la capacidad numérica para sobrellevar esta complejidad. En este sentido, en la actualidad se tiene disponible diversos algoritmos para resolver las ecuaciones de masa y momentum involucradas en la transferencia de calor por convección. Algunas alternativas que se tienen son el algoritmo SIMPLE y el algoritmo PISO.

#### 3.3.1. Malla desplazada

La integración del gradiente de presión  $-\partial P/\partial x$  a partir de la Figura 3.3 da como resultado la caída de presión  $(P_w - P_e)/\Delta x$ . Sin embargo, si se considera un campo de presión tipo zig-zag en una malla uniforme, la interpolación de la presión en las interfaces del volumen de control  $P$  como se muestra en la Ecuación (3.20) dará como resultado un gradiente de presión cero, lo cual no es físicamente posible.

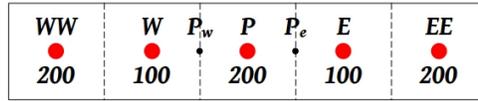


Figura 3.3: Campo de presión zig-zag.

$$\frac{P_e - P_w}{\Delta x} = \frac{P_W + P_P}{2\Delta x} - \frac{P_P + P_E}{2\Delta x} = \frac{P_W - P_E}{2\Delta x} \quad (3.20)$$

Una manera de evitar este inconveniente es el uso de mallas desplazadas como se muestra en la Figura 3.4, lo cual evita la interpolación de la presión en las ecuaciones de momentum. La malla desplazada no está en contacto con la malla principal, esto permite tener los nodos principales de la malla desplazada en las interfaces de la malla principal.

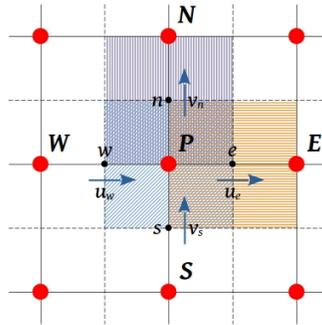
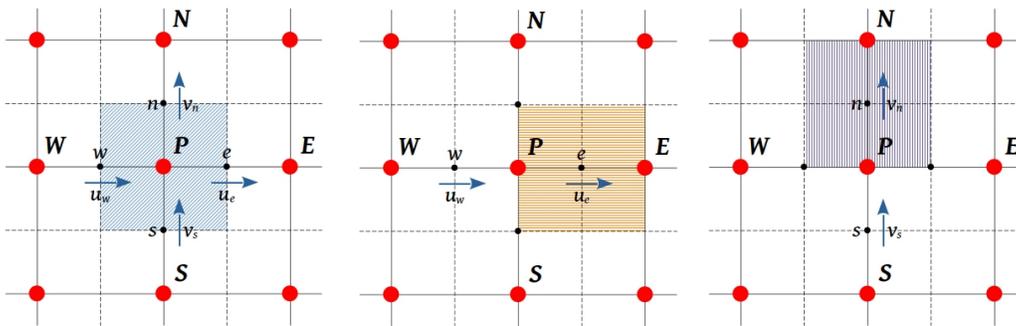


Figura 3.4: Malla desplazada.

La componente de velocidad  $u$  se almacena en la malla desplazada en  $x$  y la componente de velocidad  $v$  se almacena en la malla desplazada  $y$ . En la Figura 3.5 se muestra el arreglo de la malla principal y el arreglo de las mallas desplazadas respecto a la malla principal.



(a) Malla principal. (b) Desplazada en  $x$  para  $u$ . (c) Desplazada en  $y$  para  $v$ .

Figura 3.5: Distribución de nodos en la malla computacional.

### 3.3.2. Algoritmo SIMPLE

El punto esencial del algoritmo SIMPLE es la suposición de valores de la presión para obtener valores estimados de la velocidad y posteriormente realizar una corrección de la velocidad para satisfacer la ecuación de la continuidad. De manera general, el primer paso del algoritmo SIMPLE es la discretización de la ecuación de momentum en las direcciones  $x$  y  $y$  y la descomposición del término fuente como se muestra en la Ecuación (3.21).

$$\begin{aligned} a_e^u u_e &= \sum_{nb} a_{nb}^u u_{nb} + (P_P - P_E)A_e + b^u \\ a_n^v v_n &= \sum_{nb} a_{nb}^v v_{nb} + (P_P - P_N)A_n + b^v \end{aligned} \quad (3.21)$$

La Ecuación (3.21) en términos de una presión propuesta se tiene:

$$\begin{aligned} a_e^u u_e^* &= \sum_{nb} a_{nb}^u u_{nb}^* + (P_P^* - P_E^*)A_e + b^u \\ a_n^v v_n^* &= \sum_{nb} a_{nb}^v v_{nb}^* + (P_P^* - P_N^*)A_n + b^v \end{aligned} \quad (3.22)$$

El campo obtenido con un campo adivinado de la presión no satisface necesariamente la ecuación de continuidad, solamente si es el correcto. Así que se propone nuevamente un valor de presión a través de una corrección de presión, por lo que se tiene:

$$\begin{aligned} P &= P^* + P' \\ P' &= P - P^* \end{aligned} \quad (3.23)$$

Una corrección de presión implica una corrección de los campos de velocidad, entonces se tiene:

$$\begin{aligned} u &= u^* + u' \\ u' &= u - u^* \end{aligned} \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned} v &= v^* + v' \\ v' &= v - v^* \end{aligned} \tag{3.25}$$

Al restar la Ecuación (3.22) en la Ecuación (3.21) se tiene:

$$\begin{aligned} a_e^u u'_e &= \sum_{nb} a_{nb}^u u'_{nb} + (P'_P - P'_E) A_e \\ a_n^v v'_n &= \sum_{nb} a_{nb}^v v'_{nb} + (P'_P - P'_N) A_n \end{aligned} \tag{3.26}$$

En estas últimas ecuaciones se observa que el nodo principal depende de la presión y de las velocidades corregidas en los nodos vecinos, entonces para simplificar la relación entre las velocidades de corrección y la presión de corrección se considera la Ecuación (3.27), esta es la aproximación principal del algoritmo SIMPLE. Esto no afecta a la solución debido a que en el proceso iterativo las velocidades tienden a cero, es decir,  $u^* = u$ ,  $v^* = v$  y  $P^* = P$ .

$$\begin{aligned} \sum_{nb} a_{nb}^u u'_{nb} &= 0 \\ \sum_{nb} a_{nb}^v v'_{nb} &= 0 \end{aligned} \tag{3.27}$$

Por lo tanto, de la Ecuación 3.26 se tiene:

$$\begin{aligned} a_e^u u'_e &= d_e^u (P'_P - P'_E) \\ a_n^v v'_n &= d_n^v (P'_P - P'_N) \end{aligned} \tag{3.28}$$

donde:

$$\begin{aligned} d_e^u &= \frac{A_e}{a_e^u} \\ d_n^v &= \frac{A_n}{a_n^v} \end{aligned} \tag{3.29}$$

A partir de las ecuaciones (3.24) y (3.25) se tiene la Ecuación (3.29) de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} u_e &= u_e^* + d_e^u(P'_P - P'_E) \\ v_n &= v_n^* + d_n^v(P'_P - P'_N) \end{aligned} \quad (3.30)$$

Finalmente, se calcula la ecuación de corrección de presión a partir de la ecuación de continuidad discretizada en la malla principal:

$$\left[ \frac{3}{2}\rho_P - 2\rho_P^n + \frac{1}{2}\rho_P^{nn} \right] \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} + [(\rho u)_e - (\rho u)_w] \Delta y + [(\rho v)_n - (\rho v)_s] \Delta x = 0 \quad (3.31)$$

Al expresar esta ecuación en función de la presión de corrección con la Ecuación (3.30) se tiene:

$$a_P P'_P = a_E P'_E + a_W P'_W + a_N P'_N + a_S P'_S + b'_P \quad (3.32)$$

donde:

$$\begin{aligned} a_E &= \rho_e d_e^u \Delta y \\ a_W &= \rho_w d_w^u \Delta y \\ a_N &= \rho_n d_n^v \Delta x \\ a_S &= \rho_s d_s^v \Delta x \end{aligned} \quad (3.33)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S$$

$$b'_P = \left[ \frac{3}{2}\rho_P - 2\rho_P^n + \frac{1}{2}\rho_P^{nn} \right] \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} + [(\rho u^*)_e - (\rho u^*)_w] \Delta y + [(\rho v^*)_n - (\rho v^*)_s] \Delta x$$

### 3.3.3. Algoritmo PISO

El algoritmo PISO es una mejora del algoritmo SIMPLE, esta mejora recae en una segunda corrección de las componentes de velocidad y presión. Para implementar la segunda corrección es necesario discretizar nuevamente las ecuaciones de  $u$  y  $v$ , para ello considérese que  $u^{**}$ ,  $v^{**}$  y  $P^{**}$  son las variables con la primera corrección (SIMPLE), al

discretizar nuevamente las ecuaciones se tiene:

$$\begin{aligned} a_e^u u_e^{**} &= \sum_{nb} a_{nb}^u u_{nb}^* + (P_P^{**} - P_E^{**})A_e + b^u \\ a_n^v v_n^{**} &= \sum_{nb} a_{nb}^v v_{nb}^* + (P_P^{**} - P_N^{**})A_n + b^v \end{aligned} \quad (3.34)$$

La Ecuación (3.34) en términos de una segunda presión corregida se tiene como:

$$\begin{aligned} a_e^u u_e^{***} &= \sum_{nb} a_{nb}^u u_{nb}^{**} + (P_P^{***} - P_E^{***})A_e + b^u \\ a_n^v v_n^{***} &= \sum_{nb} a_{nb}^v v_{nb}^{**} + (P_P^{***} - P_N^{***})A_n + b^v \end{aligned} \quad (3.35)$$

La resta de la Ecuación (3.34) en la ecuación (3.35) tiene como resultado lo siguiente:

$$\begin{aligned} u_e^{***} &= u_e^{**} + \frac{\sum a_{nb}^u (u_{nb}^{**} - u_{nb}^*)}{a_P^u} + d_e^u (P_P'' - P_E'') \\ v_n^{***} &= v_n^{**} + \frac{\sum a_{nb}^v (v_{nb}^{**} - v_{nb}^*)}{a_P^v} + d_n^v (P_P'' - P_N'') \end{aligned} \quad (3.36)$$

donde  $P''$  es la segunda presión de corrección:

$$P^{***} = P^{**} + P'' \quad (3.37)$$

La ecuación de la segunda presión de corrección se obtiene al sustituir la Ecuación (3.36) en la ecuación de continuidad, en consecuencia se tiene:

$$a_P P_P = a_E P_E + a_W P_W + a_N P_N + a_S P_S + b_P \quad (3.38)$$

donde:  $a_E, a_W, a_N, a_S$  están definidos en la Ecuación (3.33) y  $b_P$  se define como:

$$\begin{aligned}
 b_P = & \left[ \frac{3}{2}\rho_P - 2\rho_P^n + \frac{1}{2}\rho_P^{nm} \right] \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} + \\
 & \left[ \left( \frac{\rho \sum a_{nb}^u (u_{nb}^{**} - u_{nb}^*)}{a_P^u} \right)_w - \left( \frac{\rho \sum a_{nb}^u (u_{nb}^{**} - u_{nb}^*)}{a_P^u} \right)_e \right] \Delta y + \\
 & \left[ \left( \frac{\rho \sum a_{nb}^v (v_{nb}^{**} - v_{nb}^*)}{a_P^v} \right)_s - \left( \frac{\rho \sum a_{nb}^v (v_{nb}^{**} - v_{nb}^*)}{a_P^v} \right)_n \right] \Delta x \quad (3.39)
 \end{aligned}$$

El orden de ejecución del algoritmo se puede resumir en los siguientes pasos (Xamán y Gijón-Rivera, 2016):

1. Suponer un campo de  $P^*$ .
2. Resolver las ecuaciones de momentum para obtener  $u^*$  y  $v^*$ .
3. Resolver la ecuación de corrección de  $P'$ .
4. Corregir el campo de presión  $P^{**}$  y de velocidades  $u^{**}$  y  $v^{**}$  con el campo de corrección de  $P'$ .
5. Resolver la ecuación de corrección  $P''$ .
6. Corregir el campo de presión  $P^{***}$  y de velocidades  $u^{***}$  y  $v^{***}$  con el campo de corrección de  $P''$ .
7. Agrupar:  $u = u^{***}$ ,  $v = v^{***}$  y  $P = P^{***}$ .
8. Resolver otras ecuaciones de conservación.
9. Aplicar criterio de convergencia, si no se cumple, entonces  $P = P^*$  y repetir desde el paso 2 hasta cumplir el criterio de convergencia.

### 3.3. Algoritmos de acople SIMPLE y PISO

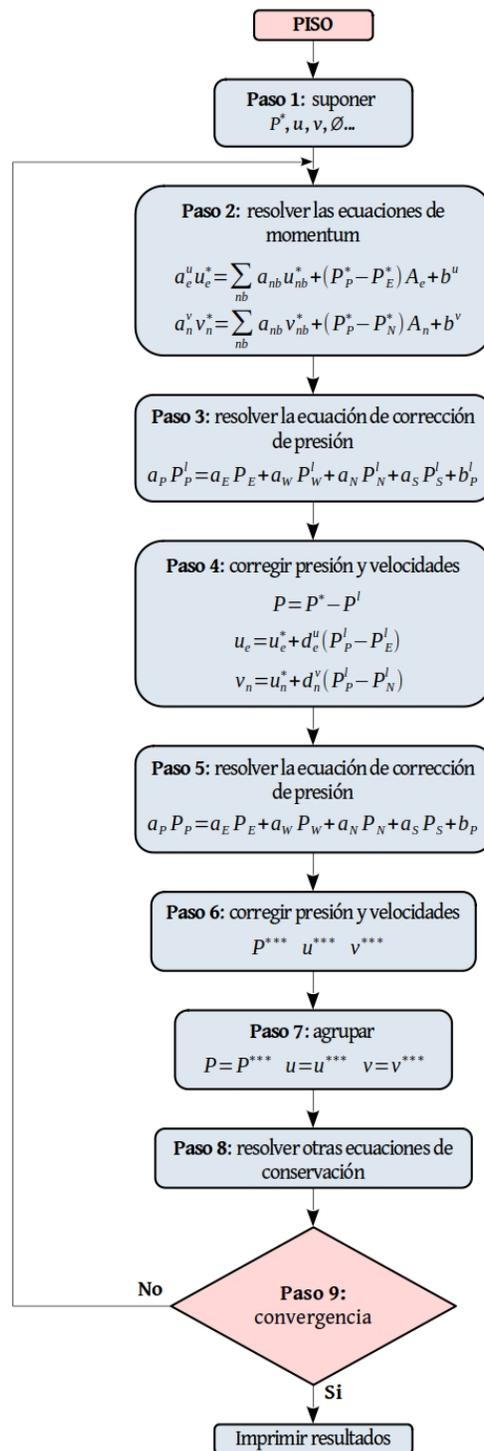


Figura 3.6: Diagrama de flujo del algoritmo PISO.

### 3.4. Condiciones de frontera

El modelo matemático solo se ha discretizado en los nodos internos del dominio computacional; sin embargo, el comportamiento del sistema depende de sus fronteras, pues estas se mantiene en contacto con el exterior del sistema. Los nodos frontera pueden ser: un punto en una dimensión; un punto en una línea en dos dimensiones; o un punto en una área en tres dimensiones. En los tres casos, para el arreglo de malla en contacto con la frontera, el nodo frontera siempre está en contacto con la interfaz del nodo adyacente y no poseen como tal un volumen o masa. Existen tres tipos de condiciones de frontera, de primera, segunda y tercera clase (Figura 3.7) también conocidas como condiciones de frontera de Dirichlet, Von Neuman y Robin, respectivamente.

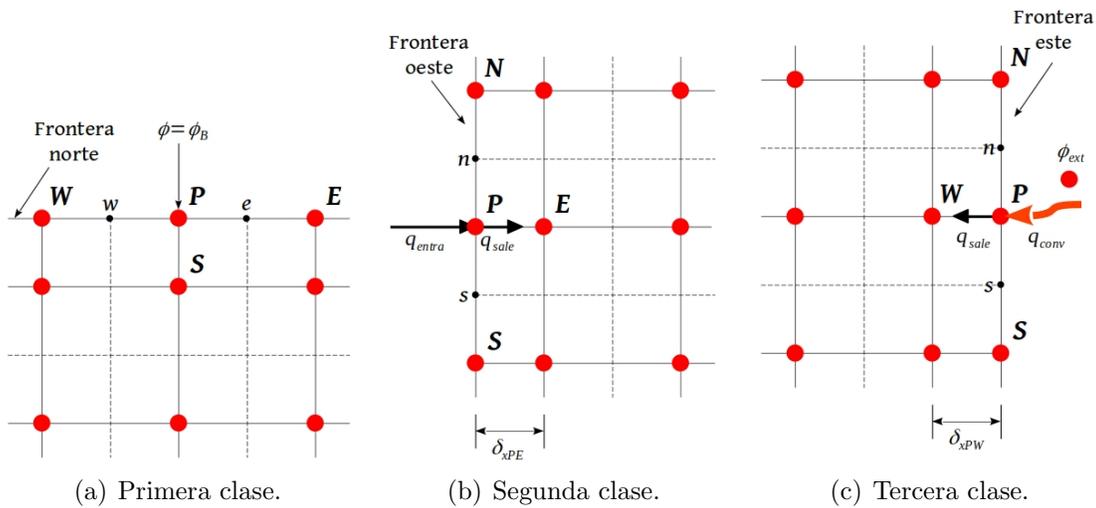


Figura 3.7: Condiciones de frontera.

#### 3.4.1. Condición de Dirichlet

Esta condición de frontera establece un valor de la variable de interés, la cual puede ser función del espacio, tiempo o un valor constante. En la Figura 3.7(a) se muestra el valor de la variable en la frontera norte en el nodo  $P$ , su valor se establece a partir de un valor constante ( $\phi_B$ ), además no depende de los nodos frontera adyacentes ( $W$  y  $E$ ), entonces al discretizar la variable en notación de coeficientes agrupados se tiene la Ecuación (3.40).

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + b_P \quad (3.40)$$

donde:

$$a_E = a_W = a_N = a_S = 0$$

$$a_P = 1 \quad (3.41)$$

$$b_P = \phi_B$$

### 3.4.2. Condición de Von Neuman

Esta condición de frontera establece un gradiente de la variable en dirección normal a la frontera. Entonces a partir de un balance en la frontera oeste de la Figura 3.7(b) se tiene:

$$q_{entra} = q_{sale}$$

$$q_{entra} = -\lambda \frac{d\phi}{dx} \quad (3.42)$$

$$\frac{q_{entra}}{-\lambda} = \frac{\phi_E - \phi_P}{\delta_{xPE}}$$

$$\phi_P = \phi_E + \frac{q_{entra}}{\lambda} \delta_{xPE}$$

Al comparar la Ecuación (3.42) con la Ecuación (3.40) se tiene que:

$$a_E = a_P = 1$$

$$a_W = a_N = a_S = 0 \quad (3.43)$$

$$b_P = \frac{q_{entra}}{\lambda} \delta_{xPE}$$

### 3.4.3. Condición de Robin

Esta condición se usa en problemas de transferencia de calor donde se tienen fronteras convectivas, y establece una ganancia o pérdida de calor entre un fluido y la superficie de interés. Al igual que la condición de segunda clase, se comienza con un balance de energía

en la frontera este de la Figura 3.7(c):

$$\begin{aligned}
 q_{sale} &= q_{conv} \\
 -\lambda \frac{d\phi}{dx} &= h_{conv} (\phi_P - \phi_{ext}) \\
 -\lambda \frac{\phi_P - \phi_W}{\delta_{xPW}} &= h_{conv} (\phi_P - \phi_{ext}) \\
 \phi_P - \phi_W &= \frac{h_{conv}}{-\lambda} \delta_{xPW} (\phi_P - \phi_{ext}) \\
 \left(1 + \frac{h_{conv}}{\lambda} \delta_{xPW}\right) \phi_P &= \phi_W + \left(\frac{h_{conv}}{\lambda} \delta_{xPW}\right) \phi_{ext}
 \end{aligned} \tag{3.44}$$

Nuevamente, al comparar la Ecuación (3.44) con la Ecuación (3.40) se tiene:

$$\begin{aligned}
 a_E &= a_N = a_S = 0 \\
 a_W &= 1 \\
 a_P &= 1 + \frac{h_{conv}}{\lambda} \delta_{xPW} \\
 b_P &= \left(\frac{h_{conv}}{\lambda} \delta_{xPW}\right) \phi_{ext}
 \end{aligned} \tag{3.45}$$

### 3.4.4. Condición de frontera para la ecuación de corrección de presión

La ecuación de corrección de presión ( $P'$ ) es una ecuación compleja, por ello, existen dos condiciones de frontera: valor de la presión conocido en la frontera (velocidad desconocida); y componente de velocidad conocida normal a la frontera. Para la primera condición, el valor de  $P'$  debe ser cero si el valor de la presión propuesta ( $P^*$ ) se arregla de tal forma que  $P^* = P_{frontera}$ . Para la segunda condición, considérese una malla arreglada de tal forma que la interfaz  $e$  del nodo  $P$  está en contacto con la frontera y se conoce el valor de  $u_e$  (ver Figura 3.8). Por lo tanto, no es necesario que el flujo a través de la frontera sea expresado en términos de  $u_e^*$ , ni su corrección correspondiente en la derivación de la ecuación de  $P'$  para el nodo  $P$ ; sin embargo, si es necesario que se exprese en términos de  $u_e$ . Entonces,  $P'_E$  no aparecerá o  $a_E$  será cero en la ecuación de  $P'$  y por ende ninguna información de  $P'_E$  será necesaria.



de coeficientes de pentadiagonal. Por ello, es necesario implementar un método de solución adecuado. De acuerdo con Xamán y Gijón-Rivera (2016), entre los métodos disponibles en la literatura se tiene los métodos de Jacobi, Gauss-Seidel y Thomas (TDMA por sus siglas en inglés). El TDMA es un método que surge para la solución de sistemas de ecuaciones algebraicas tridiagonal y es eficaz para sistemas de ecuaciones algebraicas complejas. Sin embargo, este método puede adaptarse para sistemas de ecuaciones algebraicas pentadiagonal y combinarse con el método de Gauss-Seidel para su aceleración iterativa, lo cual deriva los siguientes métodos:

- Método de línea por línea en dirección  $x$  (LBL-X).
- Método de línea por línea en dirección  $y$  (LBL-Y).
- Método de línea por línea en direcciones alternantes (LBL-ADI).
- Método de línea de Gauss-Seidel en dirección  $x$  (LGS-X).
- Método de línea de Gauss-Seidel en dirección  $y$  (LGS-Y).
- Método de línea por línea de Gauss-Seidel en direcciones alternantes (LGS-ADI).

### 3.6. Criterio de convergencia

En la sección anterior se mencionó que la solución de un sistema de ecuaciones algebraicas a través de método iterativo requiere cumplir un criterio de convergencia. El criterio de convergencia hace referencia a la aproximación de los resultados a la solución del conjunto de ecuaciones, se dice que el resultado tiende a la convergencia cuando la éste se aproxime de manera asintótica a la solución de las ecuaciones. Aunque el valor aproximado se acerca a la solución exacta, esta nunca se alcanza, pues se debe tener en cuenta que durante la deducción del modelo matemático y el proceso de discretización se ha truncado información. Por lo tanto, si la solución converge de manera adecuada, entonces su comportamiento es asintótico como se muestra en la Figura 3.9.

### 3.7. Método de Calor Específico Efectivo

---

El criterio de convergencia se establece para limitar el número de iteraciones a ejecutar, pues si la solución tiende a la convergencia la solución ya no cambia a partir de un cierto número de iteraciones, entonces es necesario detener el ciclo iterativo. Para ello, se requiere calcular el residual; entonces, para asegurar que la solución cumple con el principio de continuidad, se calcula el residual másico ( $R_m$ ) el cual debe ser menor al criterio de residual másico ( $\varepsilon_m$ ):

$$R_m = \frac{\max \left\{ [\rho_P^n - \rho_P] \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} + [(\rho u^*)_w - (\rho u^*)_e] \Delta y + [(\rho v^*)_s - (\rho v^*)_n] \Delta x \right\}}{\sum \frac{\rho_P \Delta x \Delta y}{\Delta t}} \leq \varepsilon_m \quad (3.46)$$

El residual para el resto de las ecuaciones se calcula a través de la desviación cuadrática media de la siguiente forma:

$$R_\phi = \sqrt{\sum \left[ a_P \phi_P - \left( \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b_P \right) \right]^2} \leq \varepsilon_\phi \quad (3.47)$$

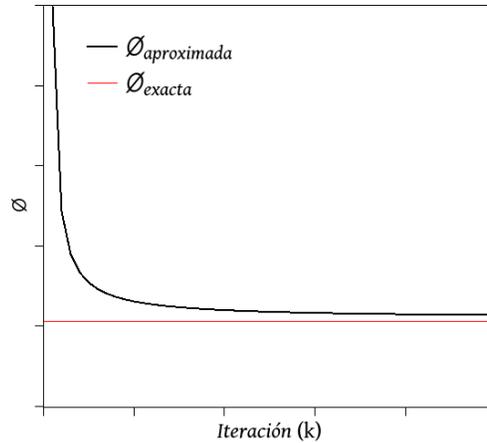


Figura 3.9: Solución aproximada a la solución exacta.

### 3.7. Método de Calor Específico Efectivo

En el capítulo anterior se mostró el modelo matemático de la conducción de calor en un material de cambio de fase, el cual tiene el término de calor específico efectivo,  $C_{P_{efec}}$ . A continuación se muestra la deducción del modelo matemático de la capa de PCM, para

lo cual considérese la ecuación que gobierna la transferencia de calor por conducción en dos dimensiones y en estado transitorio (Ecuación (3.48)).

$$\frac{\partial(\rho_p C_{P,p} T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_p \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_p \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (3.48)$$

Al aplicar la regla de la cadena en el término temporal se tiene lo siguiente:

$$\frac{\partial(\rho_p C_{P,p} T)}{\partial T} = T \frac{\partial(\rho_p C_{P,p})}{\partial t} + \rho_p C_{P,p} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.49)$$

Considerando las propiedades  $\rho$  y  $C_P$  constantes en el tiempo, el primer término del lado derecho de la igualdad de la Ecuación (3.49) se elimina y al sustituir en la Ecuación (3.48) y al agregar  $\rho h_{ls} \frac{\partial F_{pcm}}{\partial t}$ , se obtiene lo siguiente:

$$\rho_p C_{P,p} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_p h_{ls} \frac{\partial F_{pcm}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_p \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_p \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (3.50)$$

donde  $F_{pcm}$  es la fracción líquida de cambio de fase definida en la Ecuación (3.51) y donde  $m = 1.0$  si el modelo es lineal y  $0.0 \leq F_{pcm} \leq 1.0$  (Voller y Swaminathan, 1991):

$$F_{pcm} = \left( \frac{T - T_s}{T_l - T_s} \right)^m \quad (3.51)$$

Ahora, aplicando la regla de la cadena a  $\rho h_{ls} \frac{\partial F_{pcm}}{\partial t}$  se tiene:

$$\frac{\partial F_{pcm}}{\partial t} = \frac{\partial F_{pcm}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.52)$$

donde:

$$\frac{\partial F_{pcm}}{\partial T} = \frac{1}{\Delta T} = \frac{1}{T_l - T_s} \quad (3.53)$$

Finalmente, al sustituir la Ecuación (3.52) y al considerar la Ecuación (3.53) se tiene:

$$\rho_p (C_{P_{efec}}) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_p \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_p \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (3.54)$$

donde:

$$C_{P_{efec}} = C_{P,p} + \frac{h_{ls}}{\Delta T} \quad (3.55)$$

### 3.8. Variables de evaluación

Las variables a presentar para la evaluación del comportamiento térmico de las configuraciones presentadas son: el flujo de calor por unidad de área promedio de la superficie interior ( $q_{int}$ ) y exterior ( $q_{ext}$ ); la temperatura promedio de la superficie interior ( $T_{int}$ ) y exterior ( $T_{ext}$ ); la energía por unidad de área de la superficie interior ( $E$ ), ésta se calcula a través de la Ecuación (3.56):

$$E = \int_{00:00}^{24:00} |q_{int}|(t)dt \quad (3.56)$$

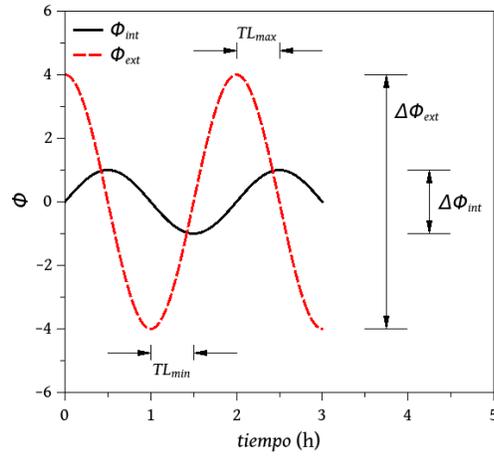
El factor de decremento ( $DF$ ), el cual se define como la disminución de la fluctuación de la curva de la temperatura de la superficie interior respecto a la fluctuación de la curva de la temperatura de la superficie exterior (Ecuación (3.57)):

$$DF = \frac{\Delta T_{int}}{\Delta T_{ext}} = \frac{T_{int-max} - T_{int-min}}{T_{ext-max} - T_{ext-min}} \quad (3.57)$$

También, el tiempo de retardo ( $TL$ ) que se define como la diferencia de tiempo en que se presenta la temperatura máxima de la superficie interior respecto al tiempo en que se presenta la temperatura máxima de la superficie exterior ( $TL_{max}$ ) y la diferencia de tiempo en que se presenta la temperatura mínima de la superficie interior respecto al tiempo en que se presenta la temperatura mínima de la superficie exterior ( $TL_{min}$ ), ambos se calculan a través de la Ecuación (3.58) y la Ecuación (3.59), respectivamente. En la Figura 3.10 se muestra la relación de  $TL$  y  $DF$ , los cuales son definidos por Kharbouch et al. (2018).

$$TL_{max} = t(T_{int-max}) - t(T_{ext-max}) \quad (3.58)$$

$$TL_{min} = t(T_{int-min}) - t(T_{ext-min}) \quad (3.59)$$


 Figura 3.10: Relación de  $DF$  y  $TL$ .

Otra variable a presentar es la energía por unidad de área mensual ( $E_{mes}$ ) y anualmente, se calcula a través de la Ecuación (3.60). También se presenta las emisiones de  $CO_2$  mensual y anualmente a partir del factor de emisiones de  $CO_2$  definido por SEMARNAT (2022).

$$E_{mes} = E^{fri} + \left[ \left( \frac{E^{fri} + E^{cal}}{2} \right) (N - 2) \right] + E^{cal} \quad (3.60)$$

$$CO_2 = 0.423E_{mes} \quad (3.61)$$

donde:  $E^{fri}$  corresponde a la energía por unidad de área del día más frío de cada mes,  $E^{cal}$  corresponde a la energía por unidad de área del día más cálido del mes y  $N$  corresponde al número de días de cada mes. Como variable adicional, se presenta la fracción líquida del PCM, esta se define como la relación de estado líquido del PCM respecto a su estado sólido. Su valor se define a través de la siguiente ecuación (Labihi et al., 2017):

$$f = \frac{T - T_s}{T_l - T_s} \quad (3.62)$$

donde: si  $f \leq 0.0$ , el PCM se encuentra en estado sólido; si  $f \geq 1.0$  entonces se encuentra en estado líquido; y si  $0.0 < f < 1.0$ , el PCM se encuentra en estado de mezcla.

Adicionalmente, la temperatura de confort ( $T_{conf}$ ) establecida por Nicol (2004) se cal-

### 3.8. Variables de evaluación

---

cula de la siguiente manera:

$$T_{conf} = 0.534T_{amb}^* + 12.9 \quad (3.63)$$

donde:  $T_{amb}^*$  es la temperatura ambiente promedio mensual.

Para asegurar que la metodología de solución está empleada correctamente, se realiza una serie de verificaciones y de ser posible también validaciones con datos experimentales reportados en la literatura; en el siguiente capítulo se describe una serie de verificaciones y una validación de los códigos desarrollados para la modelación de la transferencia de calor conjugada en las componentes de una vivienda presentadas en el Capítulo 2.

# Capítulo 4

## Verificación y validación

En este capítulo se muestra la verificación y validación de los códigos para la modelación de las diferentes configuraciones de pared y techo, además se presenta la independencia de malla temporal y espacial de la malla de block hueco con PCM. El objetivo de la verificación y de la validación es asegurar que los códigos desarrollados modelen de manera correcta los fenómenos de transferencia de calor, para ello, se reproducen casos reportados en la literatura y se comparan los resultados obtenidos respecto a los resultados reportados en la literatura. Las verificaciones más relevantes y la validación son:

1. Convección en una cavidad calentada diferencialmente.
2. Convección en una cavidad calentada diferencialmente con un sólido embebido.
3. Convección y conducción en un sólido con un fluido embebido.
4. Transferencia de calor conjugada en una pared.
5. Convección y conducción en una cavidad calentada diferencialmente con una placa de PCM acoplada (validación).

### 4.1. Cavidad calentada diferencialmente

Una de las verificaciones más relevante es la modelación de la transferencia de calor por convección en una cavidad calentada diferencialmente (Figura 4.1). Este fenómeno se

#### 4.1. Cavity heated differentially

---

reprodujo inicialmente en estado permanente y en dos dimensiones y se comparó con los resultados reportados por De Vahl Davis (1983) y Markatos y Pericleous (1984); posteriormente, se reprodujo en estado transitorio y en dos dimensiones y se comparó con los resultados reportados por Mahdi y Kinney (1990).

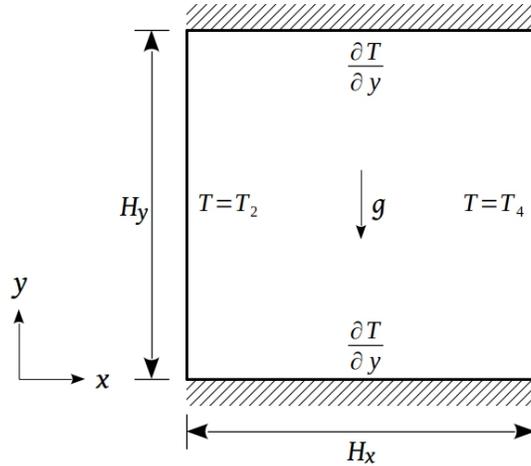


Figura 4.1: Cavity heated differentially.

Se consideró una cavidad calentada diferencialmente en dos dimensiones y en estado transitorio llena de aire con: calor específico ( $C_P$ ) de 1 004.0 J/kg°C, conductividad de  $25.6 \times 10^{-3}$  W/m°C, densidad de 1.2 kg/m<sup>3</sup> y viscosidad dinámica de  $1.8 \times 10^{-5}$  kg/ms. Se considera un coeficiente de expansión ( $\beta$ ) de  $3.4 \times 10^{-3}$  °C, un valor de Prandtl ( $Pr$ ) de 0.7. Las fronteras norte y sur de la cavidad se consideran adiabáticas, mientras que las fronteras este y oeste se consideran a temperaturas constantes de 300.0 K ( $T_4$ ) y 288.0 K ( $T_2$ ), respectivamente. Todas las fronteras se consideran constantes en el tiempo y el sistema se inicia en un estado de equilibrio a 294.0 K; solo se considera convección natural y las dimensiones ( $H_x = H_y$ ) se consideran en función de  $Ra$  ( $1.0 \times 10^3, 1.0 \times 10^4, 1.0 \times 10^5$  y  $1.0 \times 10^6$ ) a través de la Ecuación (4.1), en donde  $\nu$  es la viscosidad cinemática y  $\alpha$  es la difusividad térmica.

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TH^3}{\alpha\nu} \tag{4.1}$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

Las variables comparadas son: temperatura adimensional ( $T^*$ ), velocidades adimensionales  $u^*$  y  $v^*$  y el número de Nusselt local ( $Nu$ ), las tres variables en las posiciones adimensionales  $x^*$  y  $y^*$ , y en distintos tiempos adimensionales ( $t^*$ ). Las variables se calculan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 T^* &= \frac{T - \frac{T_2+T_4}{2}}{T_4 - T_2} \\
 u^* &= \frac{uHx}{\alpha} \frac{1}{\sqrt{Ra}} \\
 v^* &= \frac{vHx}{\alpha} \frac{1}{\sqrt{Ra}} \\
 Nu &= \frac{T_4 - T}{T_4 - T_2} \frac{H_x}{\Delta x} \\
 x^* &= \frac{x}{H_x} \\
 y^* &= \frac{y}{H_x} \\
 t^* &= \frac{t\alpha}{H_x^2}
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

La Tabla 4.1 muestra el valor de  $Nu$  promedio y las velocidades  $u^*$  y  $v^*$  máximas obtenidos en este estudio y los reportados en la literatura. También se presenta la diferencia porcentual máxima obtenida respecto a los dos valores de la literatura. La diferencia porcentual máxima obtenida en la variable  $u^*$  es de 5.4% para  $Ra=10^6$ ; en la variable  $v^*$ , la diferencia porcentual máxima es de 1.9% para  $Ra=10^6$ ; y en la variable  $Nu$ , la diferencia porcentual máxima es de 3.4% para  $Ra=10^5$ , los tres valores respecto a Markatos y Pericleous (1984).

#### 4.1. Cavidad calentada diferencialmente

---

Tabla 4.1: Comparación de  $u^*$ ,  $v^*$  y  $Nu$  en estado permanente.

Ra	Variable	De Vahl Davis (1983)	Markatos y Pericleous (1984)	Presente
$10^3$	$u^*$	3.6	3.5	3.6 (2.0)
	$v^*$	3.6	3.5	3.6 (1.8)
	$Nu$	1.1	1.1	1.0 (2.3)
$10^4$	$u^*$	16.1	16.1	16.0 (0.6)
	$v^*$	19.5	19.4	19.4 (0.3)
	$Nu$	2.2	2.2	2.2 (0.9)
$10^5$	$u^*$	34.8	35.7	34.7 (2.9)
	$v^*$	68.2	69.0	68.1 (1.4)
	$Nu$	4.5	4.4	4.5 (3.4)
$10^6$	$u^*$	65.3	68.8	65.1 (5.4)
	$v^*$	216.7	221.8	217.5 (1.9)
	$Nu$	8.7	8.7	8.8 (0.6)

Nota: (%) diferencia absoluta respecto a la literatura.

La Figura 4.2 muestra el comportamiento de  $u^*$  y  $T^*$  en dirección  $x^*$  para  $Ra=10^3$ , en diferentes tiempos  $t^*$  obtenidos en este estudio, y los presentados por Mahdi y Kinney (1990); los valores obtenidos en este estudio presentan variaciones ligeras respecto a los valores reportados por los autores. La desviación mínima de los valores obtenidos respecto a los valores disponibles en la literatura es de  $1.8 \times 10^{-3}$  para  $u^*$  y de  $1.2 \times 10^{-3}$  para  $T^*$ , mientras que la desviación máxima es de  $8.1 \times 10^{-4}$  para  $u^*$  y de  $3.8 \times 10^{-3}$  para  $T^*$ . Por su parte, en la Figura 4.3 se aprecia la variación de las mismas variables para  $Ra=10^5$  en diferentes tiempos  $t^*$ . Nuevamente, la variación es ligera en comparación a los valores disponibles en la literatura; la desviación mínima es de  $1.7 \times 10^{-3}$  para  $u^*$  y  $4.6 \times 10^{-3}$  para  $T^*$ , mientras que la desviación máxima alcanzada es de  $6.1 \times 10^{-3}$  para  $u^*$  y  $8.3 \times 10^{-3}$  para  $T^*$ . Por lo tanto, el código modela de manera correcta la transferencia de calor por convección en estado transitorio.

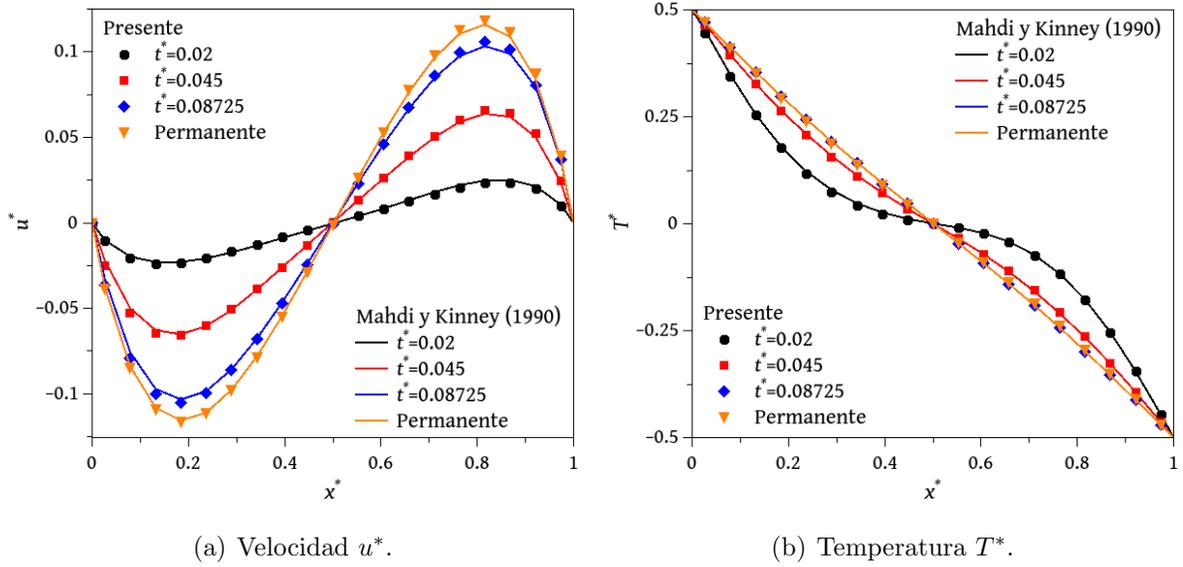


Figura 4.2: Verificación con  $Ra=10^3$ .

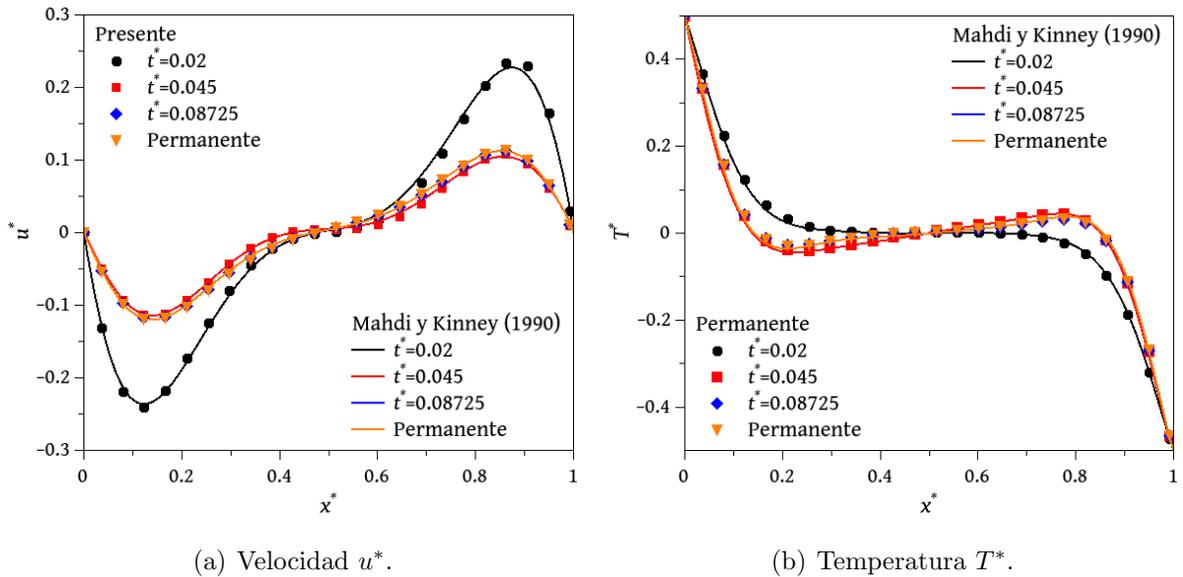


Figura 4.3: Verificación con  $Ra=10^5$ .

## 4.2. Cavity with embedded solid

The second numerical verification deals with the differentially heated cavity with an embedded solid as shown in Figure 4.4; the results obtained were compared

## 4.2. Cavity con sólido embebido

---

con valores disponibles en la literatura por House et al. (1990) y Mezrhab et al. (2006). En resumen, se consideró una cavidad cuadrada llena de aire, sus propiedades termofísicas son las misma de la verificación anterior; al interior de la cavidad se considera un sólido embebido con las mismas propiedades termofísicas del aire, excepto la conductividad térmica, misma que se determina a partir de la Ecuación (4.3); las fronteras se consideran similares a la verificación anterior y se consideran constantes en el tiempo; solo se considera convección natural en la cavidad y conducción en el sólido; las dimensiones se consideran en función de  $Ra$  (Ecuación 4.1) y las dimensiones del sólido se determina a partir de la Ecuación (4.3).

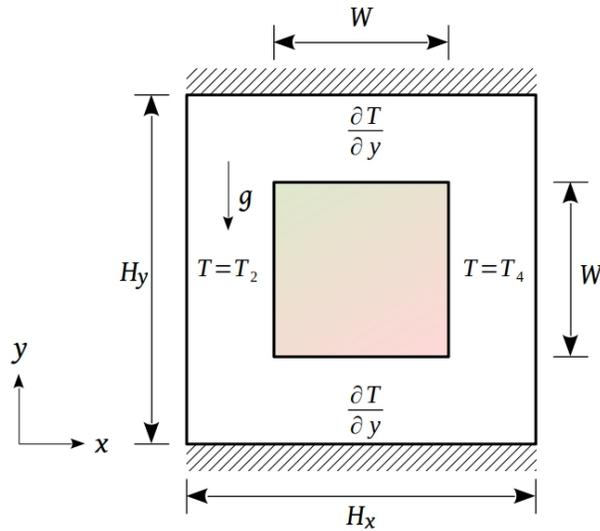


Figura 4.4: Cavity con sólido embebido.

$$\lambda^* = \frac{\lambda_s}{\lambda_f} \tag{4.3}$$

$$\zeta = \frac{W}{H_x}$$

donde  $\lambda_s$  es la conductividad térmica del sólido;  $\lambda_f$  es la conductividad térmica del fluido (aire); y  $W$  es la dimensión del sólido.

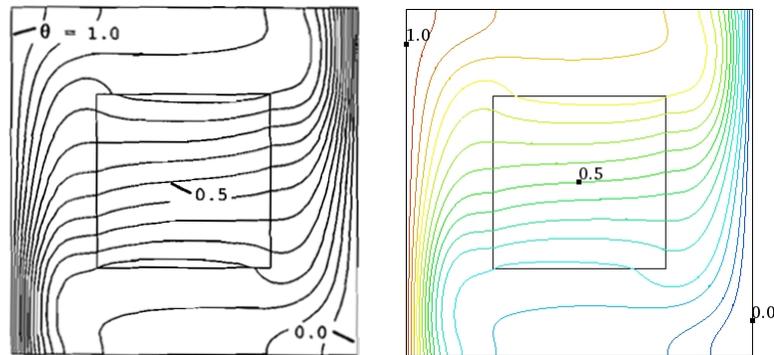
La Tabla 4.2 muestra la diferencia porcentual de  $Nu$  obtenido respecto al  $Nu$  presentado por House et al. (1990) y Mezrhab et al. (2006) para  $Ra=10^5$  variando la conductividad

térmica del sólido. La diferencia porcentual máxima es de 2.0%, el cual se obtiene para  $\lambda^*=1.0$ .

Tabla 4.2: Valor de número de  $Nu$  para  $\zeta=0.5$ .

$\lambda^*$	House et al. (1990)	House et al. (1990)	Presente
0.2	4.6	-	4.6 (0.8%)
0.5	4.3	-	4.3 (1.0%)
1.0	-	4.4	4.5 (2.0%)

En las figuras 4.4 y 4.5 se presentan las isotermas del sistema para los casos 1 y 2 de la Tabla 4.2 para  $Ra = 10^5$  y en la Figura 4.7 se presenta el valor de Nusselt para diferentes valores de  $\lambda^*$  para  $Ra=10^5$  y  $Ra=0$ ; de manera general se observa que los valores obtenidos son similares a los presentados por House et al. (1990); con estos resultados se ha determinado que el código modela de manera correcta la transferencia de calor por convección en una cavidad con un sólido embebido.



(a) House et al. (1990).

(b) Presente.

Figura 4.5: Isotermas para  $\lambda^* = 0.2$ .

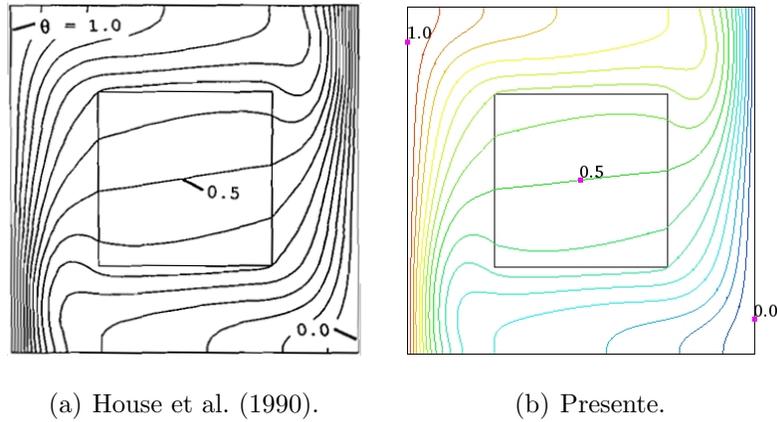


Figura 4.6: Isotermas para  $\lambda^* = 5.0$ .

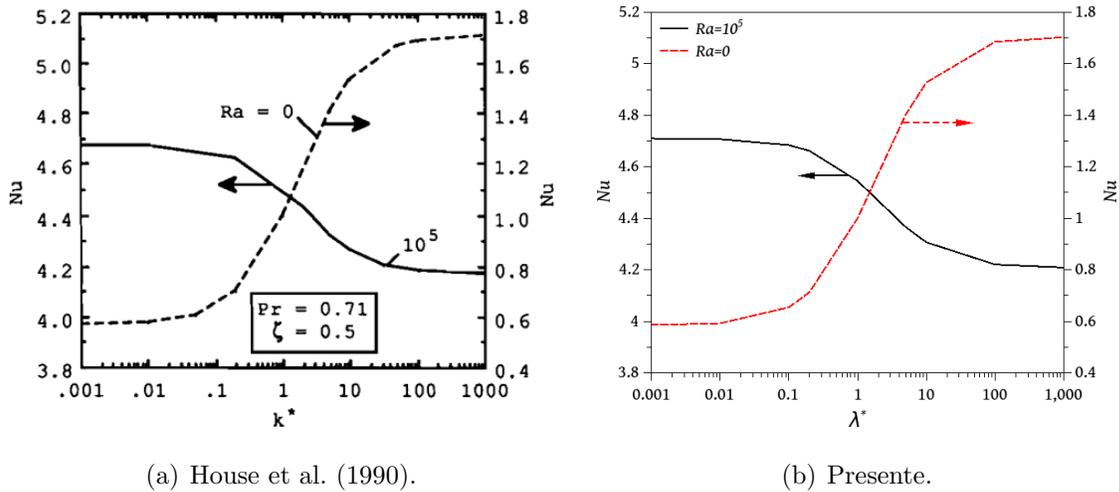


Figura 4.7: Nusselt en función de  $Ra$  y  $\lambda^*$ .

### 4.3. Sólido con fluido embebido

Otra de las verificaciones realizadas y que se considera relevante es la modelación de la transferencia de calor por conducción en un sólido con un fluido embebido en el que se considera transferencia de calor por convección (Figura 4.8). En resumen, las consideraciones son las mismas de la verificación anterior. Por lo tanto, las propiedades y condiciones de frontera son las mismas, en consecuencia, la conductividad del sólido se determina en relación con  $\lambda^*$  y sus dimensiones en relación con  $\zeta$ . Los resultados se compararon con los

valores reportados en la literatura por Zhang et al. (2007), para ello se calculó el flujo de calor adimensional a través de la Ecuación (4.4).

$$q^* = -\frac{\int_0^{H_y} \lambda^* \frac{\partial T}{\partial x} dy}{\lambda_f \frac{T_4 - T_2}{H_x} H_x} \quad (4.4)$$

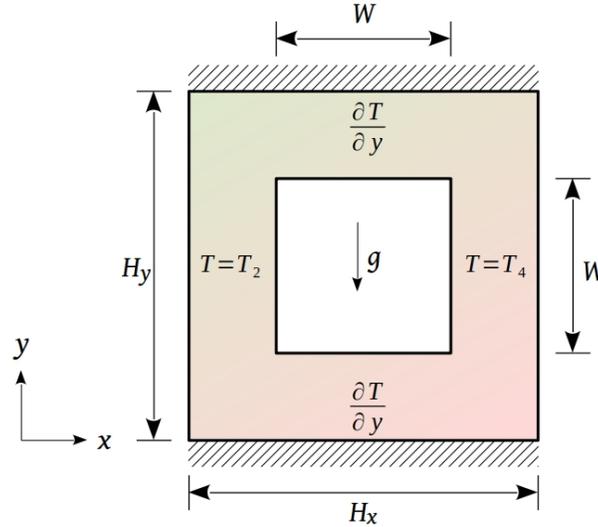


Figura 4.8: Sólido con fluido embebido.

La Tabla 4.3 muestra el flujo de calor por unidad de área sobre la pared este en función de  $Ra$ . La desviación máxima que se obtuvo es de 1.7% con  $Ra=10^6$ . Esto indica que el código se desarrolló de manera correcta.

Tabla 4.3: Flujo de calor adimensional ( $q^*$ ).

$Ra$	Zhang et al. (2007)	Presente
$10^1$	1.0	1.0 ( $8.4 \times 10^{-4}$ %)
$10^3$	1.0	1.0 (0.3 %)
$10^4$	1.4	1.4 (1.2 %)
$10^6$	2.9	2.9 (1.7 %)

## 4.4. Transferencia de calor conjugada en una pared

La siguiente verificación es la modelación de la transferencia de calor conjugada en una pared. Para ello, se considera un block hueco de dos cavidades acompañado de dos capas de revoque (Figura 4.9). Las propiedades de los materiales fueron reportadas por Uriarte-Flores et al. (2019); las fronteras este y oeste están sometidas a pérdidas y/o ganancias convectivas y radiativas, además se considera la incidencia de radiación solar en la frontera oeste; la temperatura al interior se considera constante a 25.0 °C y al exterior se considera la temperatura ambiente; las fronteras norte y sur de la pared se consideran aisladas. También, se considera aire dentro de las cavidades del block hueco; se considera la transferencia de calor por convección en las cavidades del block y por conducción en la parte sólida del block y en las capas de revoque; el block está sometido a condiciones meteorológicas de Mérida, Yucatán durante el día más cálido y el día más frío del 2015; los valores disponibles en la literatura para esta verificación son en estado permanente y en dos dimensiones.

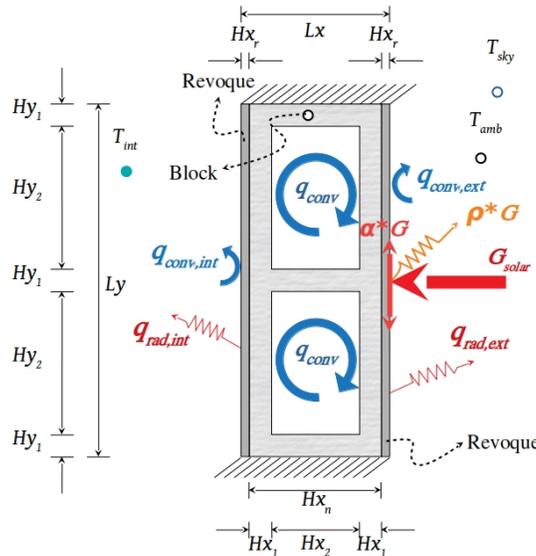


Figura 4.9: Pared de block hueco.

La Figura 4.10 muestra el comportamiento de la temperatura promedio de las superficies interior y exterior de la pared durante el día más cálido y el día más frío del año. La desviación porcentual obtenida en el día más cálido es de 0.9 y 1.2 % en la tempera-

tura promedio de la superficie interior y exterior, respectivamente. En el día más frío, la desviación máxima es de 0.8 y 2.5% en la temperatura promedio de la superficie interior y exterior, respectivamente.

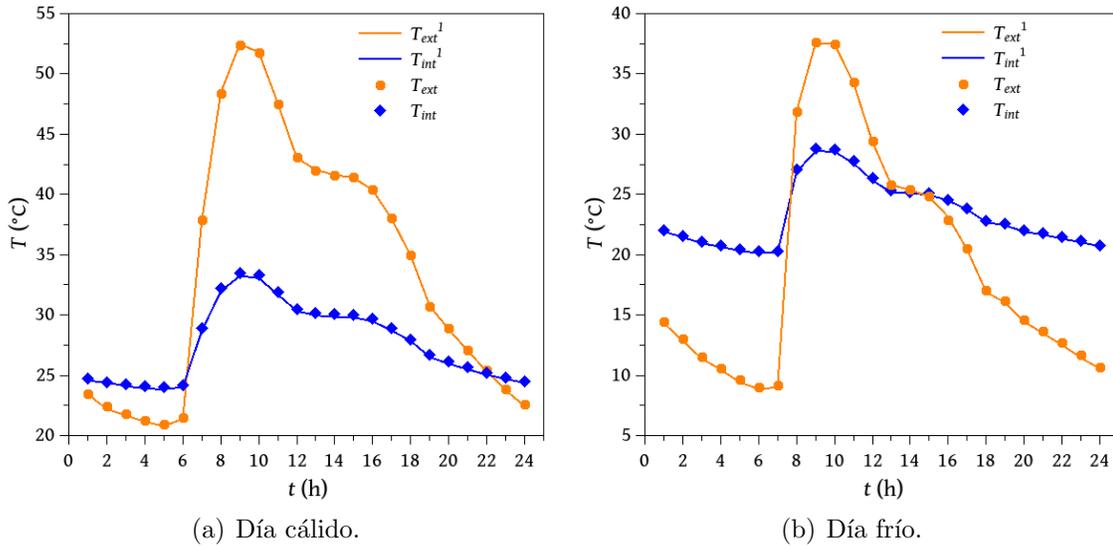


Figura 4.10: Temperatura; <sup>[1]</sup>: Uriarte-Flores et al. (2019).

La Figura 4.11 muestra el comportamiento del flujo de calor por unidad de área promedio de la superficie interior de la pared en ambos días. En este caso, la desviación porcentual máxima es de 1.2 y 3.6% durante el día más cálido y el día más frío, respectivamente. Por lo tanto, esto muestra que el código se desarrolló de manera correcta.

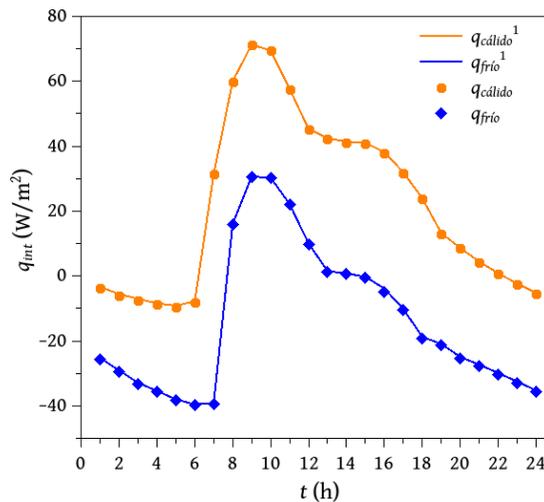


Figura 4.11: Flujo de calor; <sup>[1]</sup>: Uriarte-Flores et al. (2019).

## 4.5. Cavity acoplada a una placa de PCM

Finalmente, se realizó una validación como parte del proceso para asegurar que el código desarrollado se realizó de manera correcta. Se consideró una cavidad cuadrada llena de aire y acoplada a una placa de PCM (Figura 4.12); las propiedades termofísicas del aire y del PCM son presentadas por Labihi et al. (2017) y son constantes en el tiempo; sin embargo, las propiedades del PCM son dependientes de la temperatura. La cavidad tiene 100 mm por lado y la placa de PCM una altura 100 mm y 10 mm de espesor. En la cavidad se considera transferencia de calor por convección, mientras que en el PCM se considera por conducción; las fronteras norte y sur se consideran aisladas, mientras que la frontera oeste está sometida a una temperatura constante de  $16.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $T_2$ ) y la frontera este inicia a una temperatura de  $60.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $T_4$ ); el sistema se modeló en estado transitorio y el análisis se realiza después de todo el sistema (PCM en estado líquido) se encuentra en estado permanente y cambiar su frontera este a una frontera aislada para modelar la descarga térmica del PCM. En este caso se calculó la desviación estándar de la temperatura del centro de la cavidad con aire y de la temperatura del centro del PCM a través de la Ecuación (4.5), donde  $\phi$  es la variable de interés (temperatura) en el tiempo  $i$  y  $N$  es el número total de valores de la temperatura en 10.0 horas.

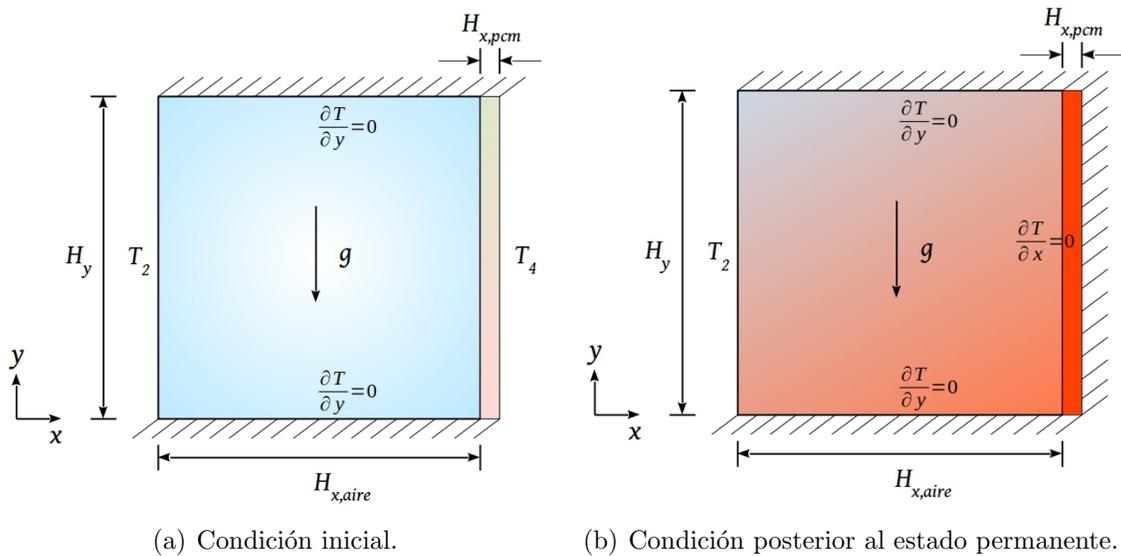


Figura 4.12: Cavity con placa de PCM

$$\sigma^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N |\phi(i)_{presente} - \phi(i)_{referencia}|^2}{N - 1}} \quad (4.5)$$

La Figura 4.13 muestra el comportamiento de la temperatura del centro de la cavidad y de centro del PCM obtenido en este estudio y comparado con los valores disponibles en la literatura. De acuerdo a la Ecuación (4.5), la desviación estándar es de 1.1 °C y 0.6 °C para la temperatura del PCM y aire, respectivamente.

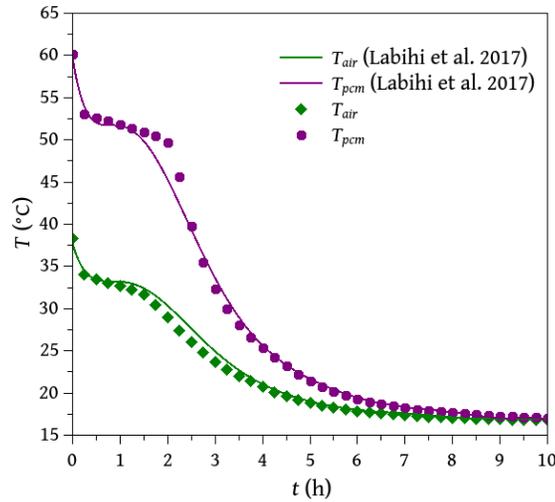


Figura 4.13: Temperatura promedio del aire y del PCM.

## 4.6. Independencia de malla

Se ha realizado la independencia de malla espacial y temporal para la pared del block hueco con la finalidad de disminuir el error numérico y el tiempo computacional a causa de una malla computacional no adecuada. Para ello, las variables de entrada para el código son la radiación solar ( $G_{solar}$ ), la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) y la velocidad del viento ( $V_{viento}$ ) dos horas antes y dos horas después del horario en el que se tiene la  $G_{solar}$  máxima del día más cálido del año de Mérida Yucatán (07 de abril del 2018). La desviación estándar se obtuvo a través de la Ecuación (4.5), donde la variable con el subíndice *presente* corresponde a la malla analizada actual y la variable con el subíndice *referencia* es la malla analizada anterior a la actual; para la independencia de malla solo se modelaron

4.0 horas y la variable se comparó cada 600 s.

El estudio de independencia de malla se ha realizado primeramente para la malla temporal y posteriormente para la malla espacial. La independencia de malla espacial se ha dividido en dos secciones, la primera sección se consideró la variación de la cantidad de nodos computacionales sobre las cavidades del bloque en ambas direcciones y, en el segunda sección, se variaron los nodos computacionales sobre la capa de PCM. Para la independencia de malla temporal se consideró una malla de 101 nodos en dirección  $x$  y 121 en dirección  $y$  en las cavidades del bloque, en la parte sólida del bloque se consideraron 21 nodos en  $x$  y en la capa de revoque se establecieron 11 nodos en  $x$ , mientras que en la capa de PCM se consideraron 81 nodos en dirección  $x$ , esto con la finalidad de anular el error numérico de la malla espacial durante la independencia de malla temporal. Los pasos de tiempo ( $\Delta t$ ) considerados son 30, 20, 10, 5 y 1 s.

### 4.6.1. Independencia de malla temporal

La Figura 4.14 muestra la variación de las variables en el tiempo para diferentes pasos de tiempo ( $\Delta t$ ). Se ha observa de manera cualitativa que la variación es despreciable y, en términos cuantitativos, en la Tabla 4.4 se observa que la magnitud de la desviación estándar para todas la variables es de aproximadamente  $345.9 \times 10^{-5}$  -  $114.2 \times 10^{-7}$  para la malla temporal de 30 s con respecto a la malla temporal de 60 s, posteriormente, la desviación disminuye conforme el paso del tiempo disminuye. Para todas las mallas, la desviación estándar es menor a uno en todas la variables, sin embargo, se ha establecido la malla temporal de 30 s, ya que con este paso de tiempo, el error numérico es despreciable y permite reducir el tiempo computacional.

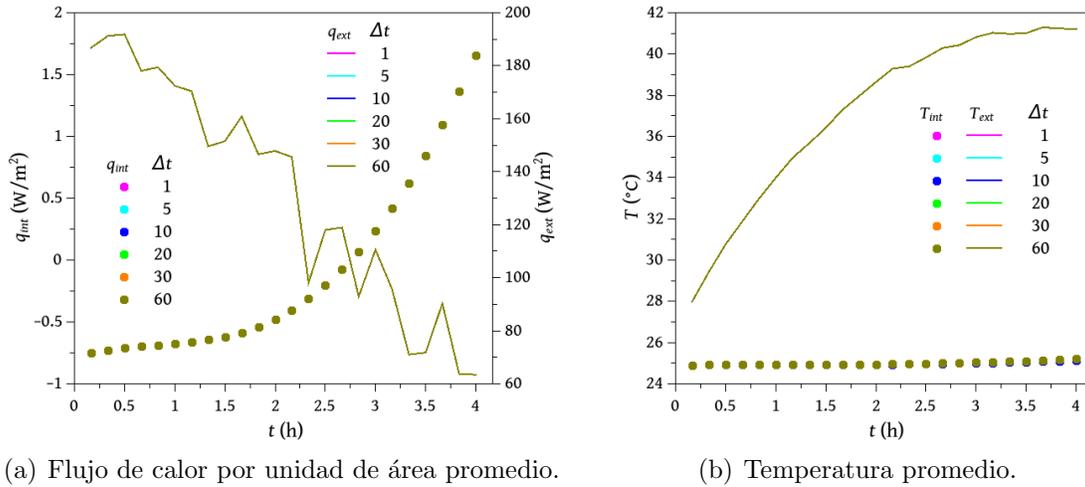


Figura 4.14: Independencia de malla temporal.

Tabla 4.4: Desviación estándar en función de la malla temporal.

$\Delta t$ (s)	$q_{int}$ (W/m <sup>2</sup> )	$q_{ext}$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_{int}$ (°C)	$T_{ext}$ (°C)
30	$84.7 \times 10^{-6}$	$345.9 \times 10^{-5}$	$114.2 \times 10^{-7}$	$231.0 \times 10^{-6}$
20	$14.5 \times 10^{-6}$	$54.0 \times 10^{-5}$	$18.2 \times 10^{-7}$	$35.3 \times 10^{-6}$
10	$12.3 \times 10^{-6}$	$30.0 \times 10^{-5}$	$19.7 \times 10^{-7}$	$19.6 \times 10^{-6}$
5	$2.9 \times 10^{-6}$	$7.1 \times 10^{-5}$	$5.9 \times 10^{-7}$	$4.5 \times 10^{-6}$
1	$1.5 \times 10^{-6}$	$2.2 \times 10^{-5}$	$5.1 \times 10^{-7}$	$1.6 \times 10^{-6}$

#### 4.6.2. Independencia de malla espacial

Se ha establecido una diferencia de 20 nodos entre la dirección  $x$  y  $y$  sobre las cavidades del block hueco e iniciando con  $Nx_2 = 11$  y  $Ny_2 = 31$  con aumento de 10 nodos en ambas direcciones finalizando con  $Nx_2 = 71$  y  $Ny_2 = 91$  para la independencia de malla espacial (Figura 4.15).

La Figura 4.16 muestra el comportamiento de las variables en función de la variación de los nodos sobre las cavidades del block hueco; en este caso, se observa que a partir de la malla de  $51 \times 71$ , la variación disminuye notablemente. De acuerdo a la Tabla 4.5, la malla de  $51 \times 71$  nodos muestra una desviación estándar del flujo de calor por unidad de

#### 4.6. Independencia de malla

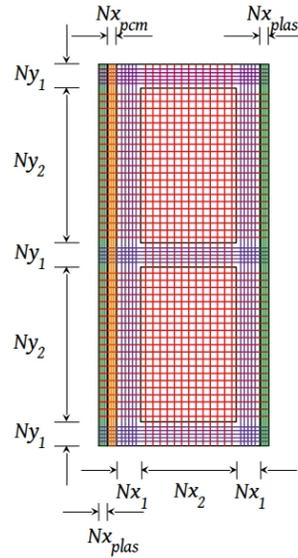
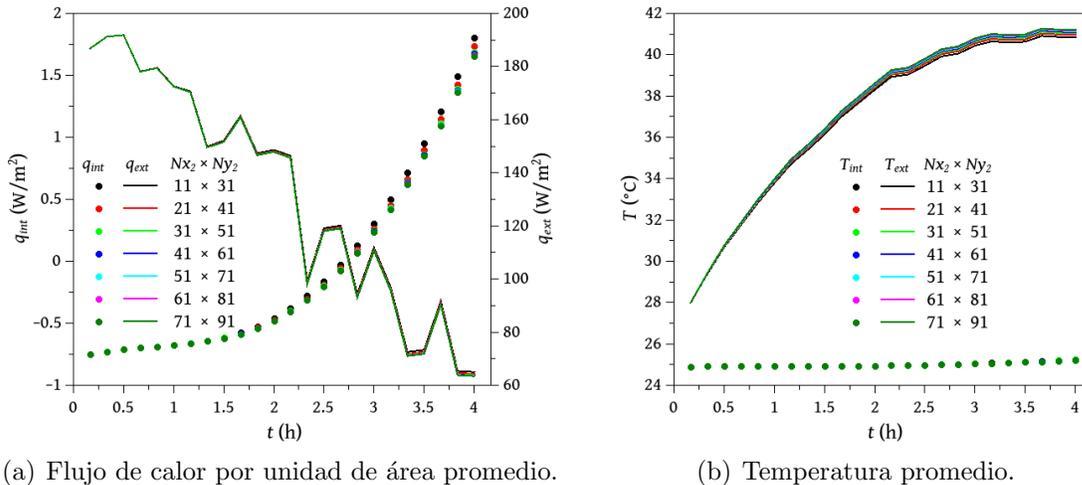


Figura 4.15: Distribución de la malla espacial.

área promedio sobre la superficie interior de  $30.3 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$  y de  $4.9 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2$  sobre la superficie exterior, mientras que la desviación estándar de la temperatura promedio de la superficie interior es de  $1.9 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$  y de la superficie exterior es de  $3.6 \times 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}$ . Con base en lo descrito, la malla sobre las cavidades se estableció de  $51 \times 71$  nodos.



(a) Flujo de calor por unidad de área promedio.

(b) Temperatura promedio.

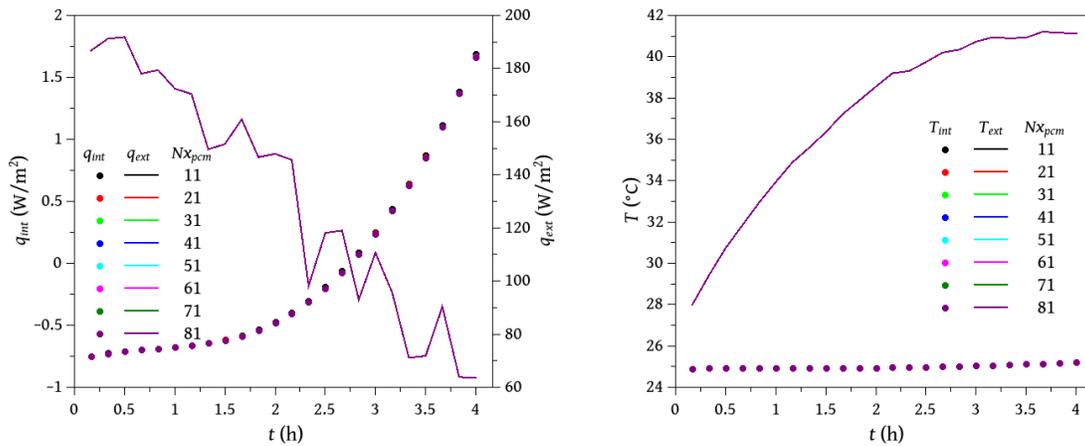
Figura 4.16: Independencia de malla espacial en función de los nodos de las cavidades.

Por último, en la Figura 4.17 se muestra la independencia de malla espacial en función de la variación de número de nodos de la capa de PCM; se observa que solo el flujo de

calor sobre la superficie interior tiene una ligera variación entre la malla de 11 y 31 nodos. Posteriormente, el flujo de calor se mantiene constante para el resto de las mallas; la máxima desviación estándar de la temperatura promedio de la superficie interior es de  $1.1 \times 10^{-3}$  °C y de la temperatura promedio de la superficie exterior es de  $2.6 \times 10^{-4}$  °C, ambas corresponden a la malla de 21 nodos respecto a la de 11 nodos, mientras que la desviación estándar con la malla de 21 nodos es de  $8.7 \times 10^{-3}$  y  $3.5 \times 10^{-3}$  W/m<sup>2</sup> para el flujo de calor de la superficie interior y exterior, respectivamente. Con base en lo descrito, cualquier malla para el PCM es adecuada; sin embargo, debido al fenómeno de cambio de fase, se recomienda implementar un malla con suficientes nodos para tener una mejor modelación cuando este fenómeno ocurre. Por ello, se estableció una malla de 61 nodos.

Tabla 4.5: Desviación estándar en función de la malla espacial ( $Nx_2 \times Ny_2$ ).

$Nx_2 \times Ny_2$	$q_{int}$ (W/m <sup>2</sup> )	$q_{ext}$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_{int}$ (°C)	$T_{ext}$ (°C)
21×41	$342.1 \times 10^{-4}$	$50.5 \times 10^{-2}$	$6.1 \times 10^{-3}$	$9.4 \times 10^{-2}$
31×51	$180.0 \times 10^{-4}$	$30.6 \times 10^{-2}$	$4.4 \times 10^{-3}$	$6.7 \times 10^{-2}$
41×61	$64.6 \times 10^{-4}$	$10.6 \times 10^{-2}$	$2.6 \times 10^{-3}$	$4.7 \times 10^{-2}$
51×71	$30.3 \times 10^{-4}$	$4.9 \times 10^{-2}$	$1.9 \times 10^{-3}$	$3.6 \times 10^{-2}$
61×81	$16.6 \times 10^{-4}$	$2.6 \times 10^{-2}$	$1.5 \times 10^{-3}$	$2.9 \times 10^{-2}$
71×91	$9.9 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-2}$	$1.2 \times 10^{-3}$	$2.5 \times 10^{-2}$



(a) Flujo de calor por unidad de área promedio.

(b) Temperatura promedio.

Figura 4.17: Independencia de malla espacial en función de los nodos del PCM.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la modelación de la transferencia de calor conjugada utilizando los códigos desarrollados y verificados. Tales resultados muestran la evaluación térmica de las componentes de pared y techo bajo condiciones meteorológicas de la ciudad de Mérida, Yucatán; así como el efecto que tiene el uso de un PCM sobre el comportamiento térmico de estas componentes.

# Capítulo 5

## Resultados

A continuación se presenta los resultados en dos secciones principales; en la primera sección se describe el comportamiento térmico de las diferentes configuraciones de paredes y en la segunda sección se describe el comportamiento térmico de las diferentes configuraciones de techos. Cada sección se divide en dos subsecciones, en la primera subsección se presenta el comportamiento térmico de las componentes constructivas típicas de México bajo condiciones meteorológicas del día más frío y del día más cálido del año. En la segunda subsección se presenta la evaluación térmica anual de la componente con mejor comportamiento térmico con la adición de un PCM.

La temperatura, el flujo de calor y la fracción líquida para cada configuración están identificados en cada figura a través de la nomenclatura mostrada en la Figura 5.1.

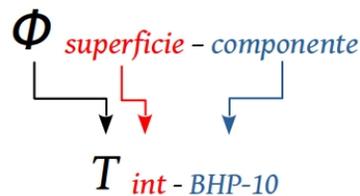


Figura 5.1: Nomenclatura para las configuraciones.

De la Figura 5.1 se define que:

- $\phi$ : es la variable de interés, temperatura ( $T$ ), flujo de calor ( $q$ ) o fracción líquida ( $f$ ).

- superficie: interior (*int*) o exterior (*ext*).
- componente: pared de ladrillo rojo (LR), block hueco (BH), y block hueco con PCM de 10 mm (BHP-10), de 15 mm (BHP-15) y de 20 mm (BHP-20); techo de bovedilla (TB) y bovedilla con PCM de 10 mm (TBP-10).

### 5.1. Pared con y sin PCM

En primer lugar, se muestra la transferencia de calor en las paredes de ladrillo rojo (LR) y block hueco (BH), ambas sin PCM para determinar la pared con mejor comportamiento térmico y, posteriormente, seleccionar la temperatura de fusión y el PCM a utilizar con base en las temperaturas obtenidas en las paredes.

#### 5.1.1. Comportamiento térmico de paredes típicas de México

Para la evaluación de LR y BH se modeló la transferencia de calor conjugada a través de ellas bajo condiciones meteorológicas del día más cálido (07 de abril) y del día más frío (12 de diciembre) del año; todas las configuraciones de paredes se consideraron orientadas hacia el sur.

La Figura 5.2 muestra el comportamiento del a) flujo de calor promedio de la superficie interior ( $q_{int}$ ) y exterior ( $q_{ext}$ ), y la radiación solar ( $G_{solar}$ ) para el día más cálido del año, así como b) la temperatura de la superficie interior ( $T_{int}$ ) y exterior ( $T_{ext}$ ) de ambas paredes, la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) y la temperatura de confort ( $T_{conf}$ ).

En general, en la Figura 5.2(a) se aprecia que la tendencia del  $q_{ext}$  de ambas paredes es similar a la tendencia de  $G_{solar}$ ; sin embargo, el  $q_{ext}$  de LR es ligeramente mayor que el  $q_{ext}$  de BH en el horario de 10:30 a 18:30 h. Además, la Figura 5.2(b) muestra que la  $T_{ext-LR}$  es más cercana a la  $T_{amb}$  que la  $T_{ext-BH}$ , esto indica que se tiene menor pérdida de energía hacia el ambiente exterior con LR. Adicionalmente, entre  $\approx 07:30$  y  $10:30$  h el  $q_{ext}$  de ambas paredes es similar a pesar de tener radiación solar incidente, esto se debe a

que en este horario las paredes comienzan a almacenar energía. En el resto del día, fuera de los horarios mencionados anteriormente, la mayor pérdida de energía hacia el exterior se presenta en LR debido a que existe mayor diferencia de temperatura entre la  $T_{ext-LR}$  y la  $T_{amb}$ , lo cual se debe a que LR tiene mayor capacidad de almacenamiento que BH, por lo tanto, en ese lapso de tiempo la  $T_{ext-LR}$  es mayor que la  $T_{ext-BH}$ . Además, la  $T_{int}$  de ambas paredes se mantiene dentro del intervalo de la  $T_{conf}$  casi por 14.0 horas del día (de 00:00 a 02:00 h y de 12:00 a 24:00 h).

La máxima  $T_{int}$  de BH es ligeramente mayor ( $\approx 0.6\%$ ) que la máxima de LR, tales valores ocurren en la tarde ( $\approx 16:30$  h) ya que en ese horario la radiación solar desciende a cero, cuando ambas paredes han almacenado energía durante el día y se disponen a disipar energía debido al descenso de  $T_{amb}$  y la ausencia de radiación solar. Por el contrario, la  $T_{int}$  mínima de LR es ligeramente mayor ( $\approx 1.1\%$ ) que la  $T_{int}$  mínima de BH, tales valores se presentan en la mañana ( $\approx 09:00-09:30$  h) cuando han transcurrido algunas horas de radiación solar y las paredes han almacenado la energía suficiente para empezar a elevar su temperatura.

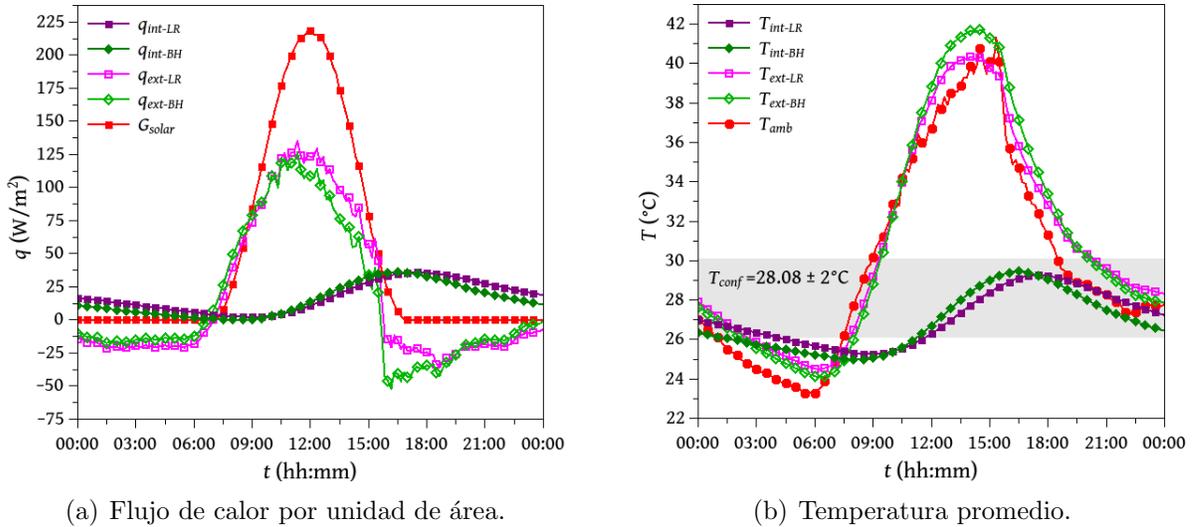


Figura 5.2: Comportamiento térmico de las paredes durante el día más cálido.

Por otra parte, se observa que el comportamiento de los  $q_{int}$  de ambas paredes son

similares. Sin embargo, la diferencia entre el pico máximo y el pico mínimo de la  $T_{int}$  de BH es mayor que la de LR, esto confirma que LR almacena mayor cantidad de energía respecto a BH. Asimismo, se aprecia que los valores máximos y mínimos de LR se presentan más tarde que los de BH. No obstante, la energía por unidad de área hacia el interior durante el día más cálido para LR es de  $420.9 \text{ Wh/m}^2$  y de  $359.5 \text{ Wh/m}^2$  para BH.

En la Figura 5.3 se presenta el comportamiento de  $q_{int}$ ,  $q_{ext}$  y  $G_{solar}$  durante el día más frío del año, así como la temperatura  $T_{int}$  y  $T_{ext}$  de ambas paredes y  $T_{amb}$ . En la Figura 5.3(a) se aprecia que en este día el  $q_{ext}$  de BH presenta menores ganancias y pérdidas de calor durante las primeras 10.0 horas del día (00:00-10:00 h) y las últimas 5.0 horas del día (19:00-24:00 h); lo anterior se debe a que en estas horas no se tiene radiación solar incidente y, de acuerdo con la Figura 5.3(b), la temperatura del ambiente se encuentra por debajo de la  $T_{ext}$  de las paredes. Además, la diferencia entre la  $T_{ext-BH}$  y la  $T_{amb}$  es menor que la diferencia entre la  $T_{ext-LR}$  y la  $T_{amb}$  (ver Figura 5.3(b)), lo cual provoca mayor pérdidas de calor para LR (ver Figura 5.3(a)). Cabe mencionar que en el horario indicado tanto  $q_{int}$  como  $T_{int}$  de ambas paredes presentan comportamientos similares, siendo ligeramente menores los valores presentados por BH. En el resto del día (10:00-17:00 h),  $q_{ext}$  presenta valores positivos indicando ganancias de calor hacia el interior sobre la superficie exterior de ambas paredes, lo cual se debe principalmente a la cantidad de radiación solar absorbida.

Por otra parte, se aprecia que cuanto mayor es el  $q_{ext}$  menor es la diferencia entre  $T_{ext}$  y  $T_{amb}$  y, por ende, menor es el flujo de calor perdido hacia el ambiente; en este sentido, en la mayor parte del periodo de tiempo mencionado (10:00-17:00 h), la LR presenta mayor  $q_{ext}$  o ganancia de calor respecto a BH. Por su parte, BH muestra valores de  $q_{int}$  y  $T_{int}$  mayores que LR en el periodo de  $\approx 09:00$  a  $\approx 18:00$  h, con una diferencia porcentual de hasta 12.4%. Adicionalmente, la energía por unidad de área es de  $406.4 \text{ Wh/m}^2$  para LR y de  $414.0 \text{ Wh/m}^2$  para BH. Además, cabe mencionar que la  $T_{int}$  de ambas paredes se mantiene dentro del intervalo de la  $T_{conf}$  cerca del 50.0% del día.

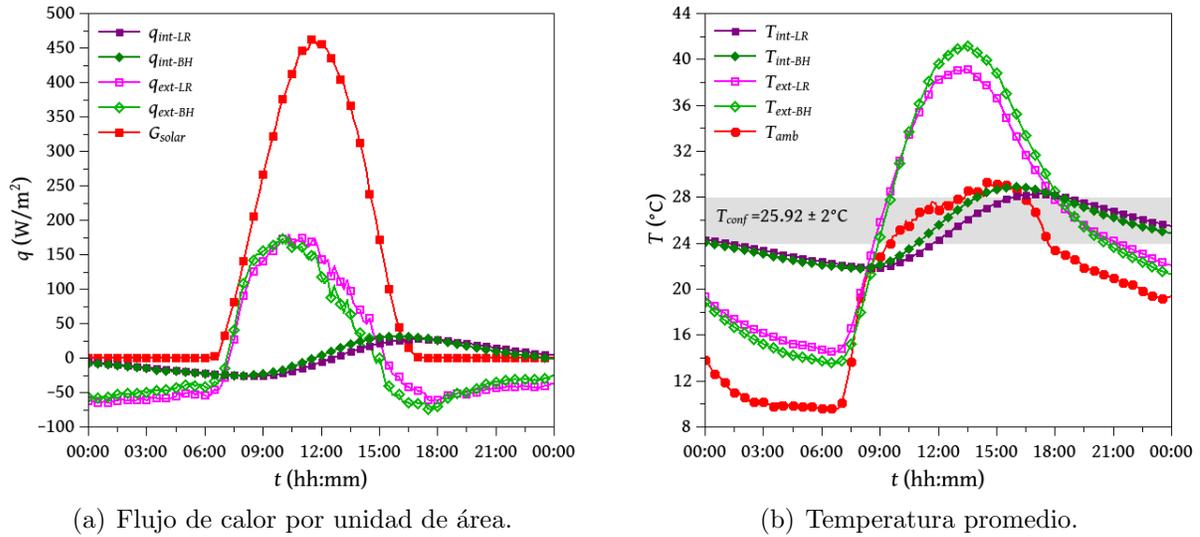


Figura 5.3: Comportamiento térmico de las paredes durante el día más frío.

En general, se observa que ambas paredes tienen un comportamiento térmico similar; sin embargo, LR retrasa los valores máximos y mínimos de temperatura y flujo de calor hasta por 2.0 horas. A pesar de esto, la energía por unidad de área en BH es 14.6% menor que LR en el día más cálido y 1.9% mayor respecto a LR en el día más frío. Este comportamiento es ocasionado por las propiedades termofísicas de ambas paredes; por una parte, la difusividad térmica de LR ( $\alpha=4.1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ) es ligeramente menor que la del mortero del BH ( $\alpha=7.6 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ), no obstante, la difusividad térmica ( $\alpha=2.1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ) del aire al interior del BH es notablemente mayor que la de LR y el aire predomina en la mayor parte del área de BH; por lo tanto, la LR difunde el calor con menor rapidez. Aunado a lo anterior, la capacidad de almacenamiento de calor por unidad de longitud de BH (63 250.0 J/mK) es menor respecto a LR (67 298.6 J/mK), por ello la LR almacena mayor cantidad de energía durante el día y presenta mayores valores de  $T_{int}$  durante las horas de disipación de la misma. Con base en lo descrito y considerando que en la ciudad de Mérida, Yucatán el problema principal de las viviendas de interés social es el alto consumo de energía para el enfriamiento en temporadas calurosas, se ha seleccionado evaluar anualmente el comportamiento térmico de la pared BH con una capa de PCM.

### 5.1.2. Evaluación térmica de una pared con PCM

El PCM se ha implementado en la configuración BH debido a su mayor capacidad para disminuir la energía por unidad de área en un día cálido respecto a la configuración LR. Por lo tanto, a continuación se presenta la evaluación del comportamiento térmico de la configuración BH con PCM; para mayor facilidad la identificación de cada configuración, las abreviaciones BHP10, BHP15 y BHP20 corresponden a la BH con 10, 15 y 20 mm de PCM, respectivamente.

La Figura 5.4 muestra el comportamiento de la temperatura promedio de la superficie interior ( $T_{int}$ ) del block hueco con y sin PCM y la fracción líquida ( $f$ ) de las tres configuraciones BHP en el día más cálido del año. En primer lugar, de la Figura 5.4(a) se observa que la temperatura de la superficie interior de la pared de block hueco sin PCM ( $T_{int-BH}$ ) oscila entre 25.0 y 29.0 °C durante el día, además, desciende en las primeras 9.0 horas, en relación con la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), se aprecia un retraso de 2.0 horas entre sus valores mínimos; también se aprecia que la pared BH ayuda a que la  $T_{int}$  no disminuya tanto como la  $T_{amb}$ , ya que sus valores mínimos son de aproximadamente 23.0 y 25.0 °C, respectivamente. Posteriormente, en el horario de radiación ( $\approx$  07:30-16:30 h) la  $T_{int-BH}$  presenta una pendiente ascendente y su valor máximo tiene un retraso de 1.5 horas respecto al valor máximo de  $T_{amb}$ , además, la pared BH presenta valores de  $T_{int}$  hasta 12.1 °C menores que la  $T_{amb}$ . Después de las 16:30 h, la  $T_{int-BH}$  nuevamente desciende hasta el final del día, acercándose a la  $T_{amb}$ , no obstante, entre las 16:30 y 19:00 h tales temperaturas presentan una diferencia de hasta 6.0 °C y de hasta 1.5 °C entre las 19:00 y 22:30 h.

Por otra parte, todos los espesores del PCM tienen una contribución positiva en el comportamiento térmico de la pared de block hueco. El valor de  $T_{int}$  con los tres espesores son similares entre las 00:00 y 11:30 h. Sin embargo, el PCM de 10 mm retrasa 4.5 horas el valor mínimo de  $T_{int}$  respecto a la  $T_{amb}$ , mientras que los otros dos espesores presentan un retraso de hasta 5.5 horas dado que los PCMs liberan ( $\approx$  00:00-10:00 h) y almacenan ( $\approx$  10:00-11:30 h) energía. Además, el PCM de 10 mm tiene menor retraso debido a que

logra liberar más energía, ya que al disminuir el espesor se tiene mayor energía concentrada en menor cantidad de masa térmica, también se aprecia que existe 2.5 horas de diferencia entre el inicio de la radiación solar (07:30 h) y el inicio de almacenamiento de energía (10:00 h) en los PCMs (Figura 5.4(b)). Otro punto importante es que la  $T_{int}$  de las tres paredes con PCM se mantiene casi constante entre las 00:00 y 11:30 h, su valor disminuye de 26.0 °C a 25.5 °C, aproximadamente, debido a la liberación de energía como lo muestra la Figura 5.4(b). En el horario de 11:30 a 20:00 h, las  $T_{int-BHP-10}$ ,  $T_{int-BHP-15}$  y  $T_{int-BHP-20}$  disminuyen hasta 1.4, 1.9 y 2.3 °C respecto a  $T_{int-BH}$ , esto a causa de que parte de este horario ( $\approx 11:30-13:30$ ) el PCM de las tres configuraciones se mantiene almacenando energía y el resto del intervalo de tiempo ( $\approx 13:30-20:00$  h) tiene suficiente energía para mantenerse en estado líquido, lo que ocasiona almacenamiento de calor sensible (aumento de temperatura). El resto del día, las tres configuraciones BHP presentan valores de temperatura similares a la configuración BH.

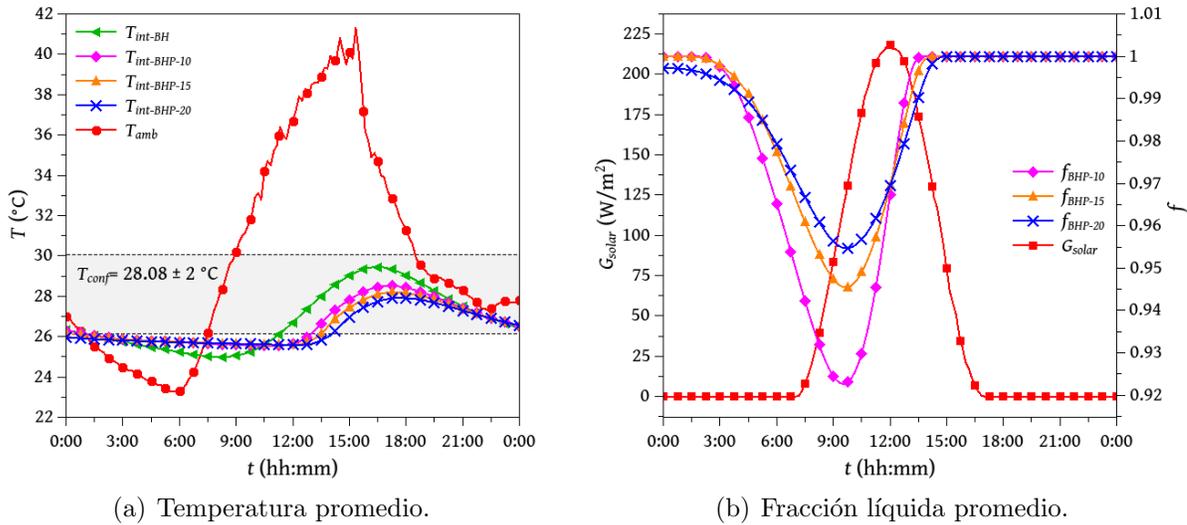


Figura 5.4: Comportamiento térmico de BH con y sin PCM durante el día más cálido.

En particular, la  $T_{int-BH}$  permanece dentro del intervalo de temperatura de confort a partir de las 11:00 h, mientras que las  $T_{int-BHP-10}$ ,  $T_{int-BHP-15}$  y  $T_{int-BHP-20}$  lo logran a partir de las 13:00, 13:30 y 14:00 h, respectivamente. Lo anterior se debe a que la pared sin PCM está transfiriendo hacia el interior la energía ganada en la superficie exterior, mientras que las paredes BHP están almacenando tal energía en el PCM hasta que cam-

bia de fase; y la diferencia de horarios entre las paredes BHP se debe al espesor del PCM, ya que a medida que incrementa el espesor aumenta la cantidad de PCM y, por ende, se requiere mayor cantidad de energía para fusionar el material. También, cabe mencionar que los efectos de la  $G_{solar}$  y de la  $T_{amb}$  sobre la superficie exterior de las paredes BHP llegan a la superficie interior 3.0 horas después con 10 mm de PCM y 4.0 horas después con 15 y 20 mm de PCM; tales efectos se aprecian por medio de los tiempos en los que se presentan los valores máximos de temperatura en el exterior e interior, respectivamente.

La Figura 5.5 muestra el comportamiento de las paredes en términos de flujo de calor promedio por unidad de área sobre la superficie interior ( $q_{int}$ ) durante el día más cálido. Es importante considerar que la radiación solar ( $G_{solar}$ ) incide sobre la paredes entre las 07:30 y 16:30 h, aproximadamente, y su valor máximo es alrededor de  $225.0 \text{ W/m}^2$  a las 12:00 h. En relación a la configuración BH, ésta tiene ganancia de calor hacia el interior de  $10.8 \text{ W/m}^2$  a las 00:00 h y disminuye hasta  $0.0 \text{ W/m}^2$  a las 08:18 h. Después, la ganancia de calor aumenta nuevamente hasta  $36.3 \text{ W/m}^2$  a las 16:30 h y, finalmente, disminuye hasta  $11.7 \text{ W/m}^2$  a las 24:00 h. Obsérvese que, a pesar de que ya no incide radiación solar a partir de las 16:30 h, aún se presenta ganancia de calor hacia el interior, lo cual se debe a la energía que logran almacenar los materiales que componen el block hueco. Esta configuración de pared logra reducir la energía ganada en la superficie exterior de tal manera que el flujo de calor sobre la superficie interior es hasta 28.8 % menor que el de la superficie exterior.

Respecto a las configuraciones BHP, se observa que al inicio del día, la configuración BHP10 tiene la misma ganancia de energía que la BH, mientras que las configuraciones BHP15 y BHP20 tienen ganancias de hasta  $9.8$  y  $7.8 \text{ W/m}^2$ , respectivamente, y estas ganancias disminuyen a  $4.6 \text{ W/m}^2$  con BHP10 a las 10:30 h y a  $4.9 \text{ W/m}^2$  con BHP15 y BHP20 a las 11:30 y 12:00 h, respectivamente; por lo tanto, son 2.3, 3.3 y 3.8 horas de diferencia respecto la valor mínimo de  $q_{int-BH}$ . Después, el  $q_{int}$  aumenta nuevamente a  $29.1 \text{ W/m}^2$  a las 17:08 h con BHP10, a  $26.6 \text{ W/m}^2$  a las 17:26 h con BHP15 y a  $24.2 \text{ W/m}^2$  a las 17:45 h con BHP20; de manera que tales valores muestran una reducción de ganancia

de energía hacia el interior hasta 19.8, 26.7 y 33.3 % respecto a BH, además, presentan diferencias de 0.7, 1.0 y 1.3 horas respecto al valor máximo de  $q_{int-BH}$ . Posteriormente, la ganancia de energía disminuye alrededor de 12.7 W/m<sup>2</sup> a las 24:00 h con las tres configuraciones BHP. En general, las paredes BHP10, BHP15 y BHP20 logran retrasar el flujo de calor máximo hacia el interior hasta 5.0, 5.5 y 5.8 horas respecto a la radiación solar máxima y solo transfieren hacia el interior hasta 23.3, 21.3 y 19.5 % de la energía ganada en la superficie exterior, respectivamente.

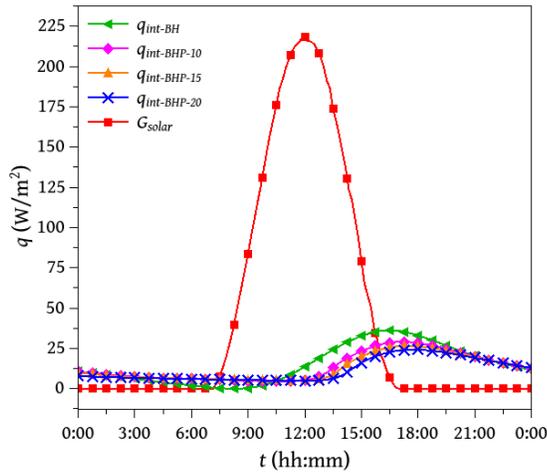


Figura 5.5: Flujo de calor por unidad de área durante el día más cálido.

El comportamiento térmico de las configuraciones del block hueco bajo condiciones del día más frío en términos de temperatura y fracción líquida se muestra en la Figura 5.6. En el día más frío, la  $T_{amb}$  tiene un valor mínimo de 9.4 °C a las 06:10 h y un valor máximo de 29.3 °C a las 14:30 y 15:10 h.

Por una parte, la  $T_{int-BH}$  oscila entre 21.8 y 28.9 °C, ésta misma desciende de 24.0 a 21.8 °C en las primeras horas del día (00:00-07:53 h) y alcanza su valor máximo a las 15:58 h, lo cual muestra que sus valores mínimo y máximo tienen un retraso de 1.7 horas y 0.8-1.5 horas, respecto a la temperatura ambiente. Finalmente, a las 24:00 h la  $T_{int-BH}$  desciende a 24.9 °C. En general, se aprecia que la configuración BH evita que la  $T_{int}$  disminuya tanto como la  $T_{amb}$ , ya que su valor mínimo es de 12.4 °C mayor que el valor mínimo de  $T_{amb}$ , además, se mantiene dentro del intervalo  $T_{conf}$  entre las 12:00 y 13:30 h y entre

## 5.1. Pared con y sin PCM

las 18:00 y 24:00 h.

Por otra parte, la  $T_{int}$  de las tres configuraciones BHP es alrededor de  $24.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  al inicio del día y disminuye a  $23.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  aproximadamente a las 10:15, 11:21 y 12:28 h con BHP-10, BHP-15 y BHP-20, respectivamente, lo cual también es mayor que el valor mínimo de  $T_{int-BH}$  hasta por  $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; además, se aprecia que la  $T_{int}$  mínima de BHP-10, BHP-15 y BHP-20 muestra un tiempo de retraso de 4.0, 5.0 y 6.3 horas respecto al valor mínimo de la  $T_{amb}$  y de 2.4, 3.5 y 4.6 horas respecto al valor mínimo de  $T_{int-BH}$ . Asimismo, el comportamiento de la fracción líquida ( $f$ ) en la Figura 5.6(b)) muestra que en estos horarios los tres PCMs están liberando parte de la energía almacenada del día anterior, lo que permite que la temperatura  $T_{int}$  se mantenga casi constante en las primeras 13.5 horas del día y, también, permite que el valor mínimo de  $T_{int}$  de las configuraciones BHP sea hasta  $14.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  mayor que el valor mínimo de  $T_{amb}$ .

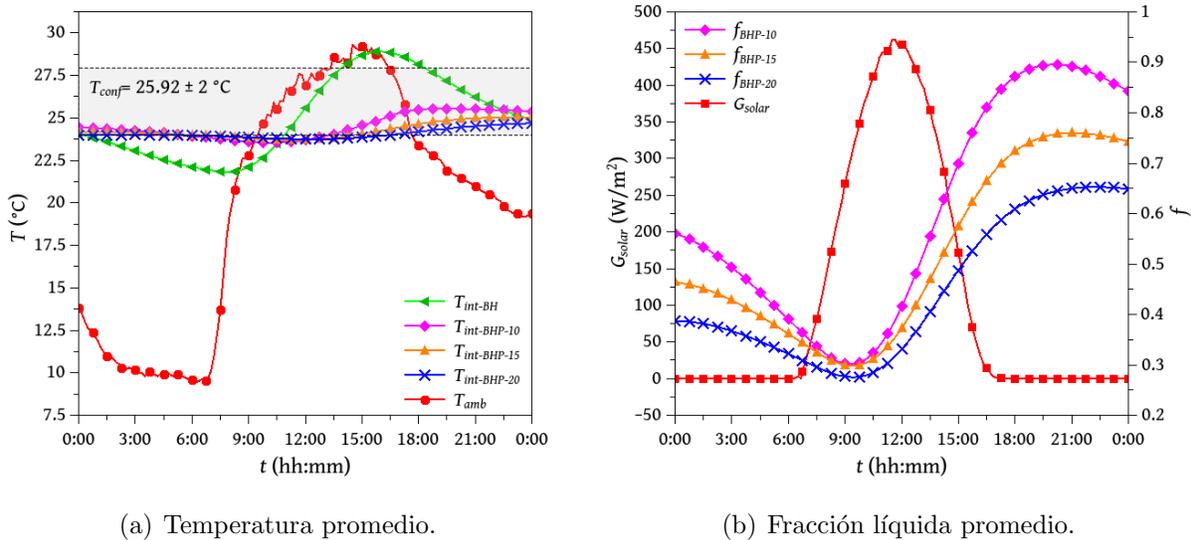


Figura 5.6: Comportamiento térmico de BH con y sin PCM durante el día más Frío.

Posteriormente, la  $T_{int-BH-10}$  aumenta hasta  $25.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  a las 19:10 h, mientras que  $T_{int-BH-15}$  alcanza hasta los  $25.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  a las 23:27 h y  $T_{int-BH-20}$  alcanza la temperatura máxima de  $24.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  a las 24:00 h. Estos valores máximos tiene un retraso de 4.7, 9.0 y 9.5 horas respecto a la  $T_{amb}$  máxima y de 3.3, 7.5 y 8.0 horas respecto al valor máximo de

$T_{int-BH}$ , además, el valor máximo de la  $T_{int}$  en la configuración BHP10, BHP15 y BHP20 es 3.8, 4.3 y 4.6 °C menor que la  $T_{amb}$  máxima, respectivamente. Las tres configuraciones mantienen la  $T_{int}$  cerca del límite inferior del intervalo de temperatura de confort y éstas presentan menores oscilaciones térmicas respecto a la configuración BH, la cual presenta una diferencia de temperatura de 7.0 °C durante el día, mientras que las configuraciones BHP10, BHP15 y BHP20 presenta una diferencia de 2.0, 1.3 y 0.9 °C, respectivamente.

La Figura 5.6(b) muestra que la fracción líquida promedio se encuentra por debajo de 0.9, esto es ocasionado principalmente por la  $T_{amb}$  ya que su valor máximo es de 29.3 °C y desciende notablemente durante la tarde, entonces, gran parte de la energía que almacenan los materiales del block hueco cerca de la superficie exterior hasta las 16:30 h se transfiere hacia el exterior, por lo que la energía que llega al PCM es en menor proporción en comparación con el día más cálido, en donde la fracción líquida logra permanecer en uno hasta el final de día. El valor mínimo de  $f$  para las tres configuraciones se presenta aproximadamente a las 09:30 h del día; por lo tanto, se observa una diferencia de tiempo de 0.8, 1.8 y 3.0 horas entre el valor mínimo de  $f$  y el valor mínimo de la  $T_{int}$  de BHP10, BHP15 y BHP20, respectivamente, esta diferencia es el tiempo que tarda en responder la superficie interior después de que la fracción líquida comienza a aumentar.

La Figura 5.7 muestra el comportamiento del flujo de calor promedio sobre la superficie interior durante el día más frío del año. En primer lugar, en este día el periodo de radiación es  $\approx$  06:00-17:00 h y su valor máximo es de aproximadamente 460.0 W/m<sup>2</sup>. Por otra parte, observa que la configuración BH presenta pérdidas de energía hacia el exterior de hasta 7.6 W/m<sup>2</sup> a las 00:00 h y tal pérdida de energía aumenta hasta 25.4 W/m<sup>2</sup> a las 07:53 h. Posteriormente, esta misma configuración presenta máxima ganancia de energía hacia el interior de hasta 31.6 W/m<sup>2</sup> a las 16:00 h y termina el día con ligera pérdida de energía de 0.9 W/m<sup>2</sup> hacia el exterior.

Por su parte, las configuraciones BHP presentan menor pérdida y ganancia de energía.

Al inicio del día, las configuraciones BHP10, BHP15 y BHP20 muestran pérdidas hacia el exterior con valores de 4.6, 6.9 y 8.6 W/m<sup>2</sup> y tales pérdidas solo aumentan a 11.6 W/m<sup>2</sup> a las 10:20 h, a 10.6 W/m<sup>2</sup> a las 11:25 h y a 10.3 W/m<sup>2</sup> a las 12:31 h, respectivamente. Además, se aprecia que la máxima pérdida de energía con la configuración BH se reduce hasta 54.2% con BHP10, 58.1% con BHP15 y 59.5% con BHP20. Por otra parte, se observa que las configuraciones BHP10 y BHP15 presentan ligeras ganancias de energía hacia el interior de hasta 4.0 W/m<sup>2</sup> a las 19:48 h y 0.1 W/m<sup>2</sup> a las 23:49, respectivamente, mientras que la configuración BHP20 se mantiene con pérdida de energía hacia el exterior las 24.0 horas del día. No obstante, la energía perdida en BHP20 disminuye a 2.8 W/m<sup>2</sup> a las 24:00 h. Por lo tanto, la configuración BHP10 disminuye la ganancia de energía hacia el interior hasta 87.4% y la configuración BHP15 disminuye la ganancia hasta 99.8%, ambas respecto a la configuración BH. Por último, las configuraciones BH, BHP10, BHP15 y BHP20 reducen hasta 48.1, 76.4, 78.6 y 79.2% la pérdida de energía sobre la superficie interior respecto a la superficie exterior.

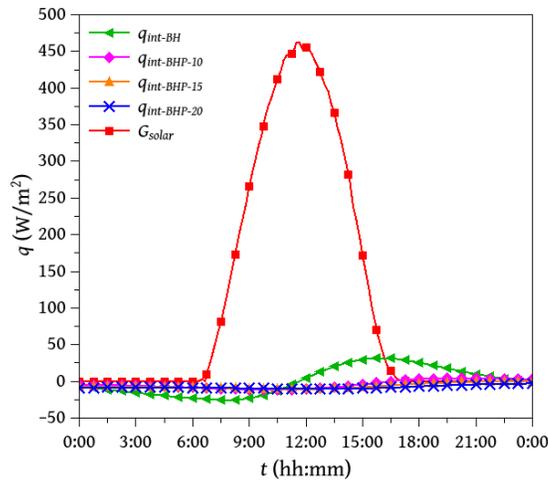


Figura 5.7: Flujo de calor por unidad de área durante el día más frío.

### 5.1.3. Evaluación anual

La evaluación anual muestra, en resumen, el comportamiento térmico de cada configuración de pared de block hueco bajo las condiciones meteorológicas del día más cálido y del día más frío de cada mes. Se presenta la energía por unidad de área ( $E$ ) en la Tabla

5.1 para el día más cálido de cada mes. En primer lugar, se observa que la configuración BH muestra el  $E$  mínimo en mayo y junio, con un valor de hasta  $257.2 \text{ Wh/m}^2$ , por el contrario, en enero, febrero, marzo, octubre, noviembre y diciembre se presenta la mayor ganancia de calor de hasta  $414.6 \text{ Wh/m}^2$ . Lo anterior se debe a que la radiación solar es mayor en los meses de la temporada de invierno, incluso en los meses cercanos a éstos.

Por otra parte, las configuraciones BHP presentan disminución en la energía por unidad de área respecto a la configuración BH en todos los meses. La configuración BHP10 tiene un  $E$  mínimo de  $182.6 \text{ Wh/m}^2$  en enero y éste corresponde al mes con el mayor porcentaje de reducción ( $48.7\%$ ), mientras que el valor máximo de  $E$  es de  $368.4 \text{ Wh/m}^2$  en noviembre y solo muestra una reducción de  $9.1\%$ . Sin embargo, el mes con menor porcentaje de reducción es junio con solo  $6.9\%$ . El mínimo  $E$  con la configuración BHP15 es de  $119.1 \text{ Wh/m}^2$  en enero, lo que equivale a  $66.5\%$  menor que el de BH y la energía por unidad de área máximo es de  $349.1 \text{ Wh/m}^2$  en noviembre, lo cual representa solo  $13.9\%$  de reducción respecto a BH. Sin embargo, el porcentaje mínimo es de  $10.0\%$  en junio. La configuración BHP20 permite reducir la energía por unidad de área hasta  $70.4\%$  respecto a la configuración BH en enero, además, el  $E$  es de hasta  $328.8 \text{ Wh/m}^2$  en noviembre, lo que representa una reducción de tan solo un  $18.9\%$ . El porcentaje mínimo alcanzado con esta configuración es de  $12.8\%$  en junio.

En general, se observa que las configuraciones BHP tienen mayor porcentaje de reducción de energía por unidad de área en los meses de la temporada de invierno y en los meses cercanos tal temporada. Además, se aprecia que junio es el mes en el que se tiene menor porcentaje de reducción de energía por unidad de área con las tres configuraciones BHP, y enero es el mes en el que se tiene mayor porcentaje con las tres configuraciones. En el día más cálido (abril), se aprecia una reducción de  $10.4$ ,  $16.1$  y  $23.1\%$  con las configuraciones BHP10, BHP15 y BHP20, respectivamente. Esto muestra que, el factor principal que afecta el comportamiento del PCM es la radiación, ya que el día cálido en abril es el más cálido del año; sin embargo, no es el día en el que se tiene la mayor radiación. Por

## 5.1. Pared con y sin PCM

último, se observa que la suma de energía por unidad de área del día más cálido de los 12 meses es de 4 210.8 Wh/m<sup>2</sup> con la configuración BH y se reduce un 13.6, 19.8 y 26.3% con la configuración BHP10, BHP15 y BHP20, respectivamente.

Tabla 5.1: Energía por unidad de área en el día cálido de cada mes.

Mes	$E$ (Wh/m <sup>2</sup> )			
	BH	BHP10	BHP15	BHP20
Enero	355.7	182.6 (48.7)	119.1 (66.5)	105.4 (70.4)
Febrero	414.6	361.0 (12.9)	339.2 (18.2)	314.7 (24.1)
Marzo	395.4	355.3 (10.1)	334.0 (15.5)	310.2 (21.5)
Abril	359.5	322.1 (10.4)	301.7 (16.1)	276.3 (23.1)
Mayo	263.4	241.1 (8.5)	230.8 (12.4)	221.5 (15.9)
Junio	257.2	239.6 (6.9)	231.5 (10.0)	224.1 (12.8)
Julio	343.6	310.0 (9.8)	295.6 (14.0)	282.8 (17.7)
Agosto	289.3	261.2 (9.7)	248.5 (14.1)	236.9 (18.1)
Septiembre	349.9	312.8 (10.6)	288.7 (17.5)	242.6 (30.7)
Octubre	395.5	349.9 (11.5)	326.9 (17.3)	293.0 (25.9)
Noviembre	405.4	368.4 (9.1)	349.1 (13.9)	328.8 (18.9)
Diciembre	381.4	335.1 (12.1)	311.6 (18.3)	267.9 (29.8)
$\sum_{i=enero}^{diciembre} E_i$	4 210.8	3 639.0 (13.6)	3 376.7 (19.8)	3 104.1 (26.3)

Nota: ( ) diferencia absoluta respecto a BH.

La Tabla 5.2 muestra la energía por unidad de área del día más frío de cada mes. Se aprecia que la configuración BH muestra un  $E$  máximo de 414.0 Wh/m<sup>2</sup> en diciembre y un  $E$  mínimo de 186.8 Wh/m<sup>2</sup> en mayo, además se observa nuevamente que en los meses de invierno (diciembre-marzo) y los meses cercanos a esta temporada (octubre-noviembre) se tiene los valores máximos de  $E$ .

El  $E$  con BHP10 es de hasta 355.7 Wh/m<sup>2</sup> en octubre, lo que indica que solo reduce 12.0% en este mes. Sin embargo, el porcentaje máximo alcanzado con esta configuración

de pared es de 65.6 % en marzo con  $E$  de 106.7 Wh/m<sup>2</sup>, mientras que el valor mínimo de energía por unidad de área es de 83.4 Wh/m<sup>2</sup> en abril, lo que indica que se reduce 59.2 % en este mes. Finalmente, el porcentaje mínimo alcanzado es de 9.7 % en julio con 220.0 Wh/m<sup>2</sup>.

Tabla 5.2: Energía por unidad de área en el día frío de cada mes.

Mes	$E$ (Wh/m <sup>2</sup> )			
	BH	BHP10	BHP15	BHP20
Enero	368.4	132.9 (63.9)	111.4 (69.8)	136.6 (62.9)
Febrero	390.0	297.4 (23.7)	258.3 (33.8)	178.2 (54.3)
Marzo	310.1	106.7 (65.6)	82.3 (73.5)	101.6 (67.2)
Abril	204.2	83.4 (59.2)	102.8 (49.6)	150.8 (26.1)
Mayo	186.8	145.3 (22.2)	140.8 (24.6)	137.5 (26.4)
Junio	193.4	173.4 (10.4)	164.6 (14.9)	156.3 (19.2)
Julio	243.6	220.0 (9.7)	209.2 (14.2)	199.2 (18.3)
Agosto	232.7	183.4 (21.2)	152.0 (34.7)	112.5 (51.7)
Septiembre	281.2	198.5 (29.4)	127.3 (54.7)	58.6 (79.2)
Octubre	404.2	355.7 (12.0)	313.0 (22.6)	223.6 (44.7)
Noviembre	318.2	125.5 (60.6)	95.1 (70.1)	111.0 (65.1)
Diciembre	414.0	151.4 (63.4)	152.9 (63.1)	189.0 (54.3)
$\sum_{i=enero}^{diciembre} E_i$	3 546.8	2 173.4 (38.7)	1 909.5 (46.2)	1 754.8 (50.5)

Nota: ( ) diferencia absoluta respecto a BH.

La configuración BHP15 alcanza hasta 313.0 Wh/m<sup>2</sup> en octubre con un 22.6 % de reducción respecto a la configuración BH. Sin embargo, su porcentaje de reducción máximo es de 73.5 % en marzo, donde presenta el  $E$  mínimo de 82.3 Wh/m<sup>2</sup>. El porcentaje mínimo alcanzado con esta configuración es de 14.2 % en julio, donde se obtuvo un valor de 209.2 Wh/m<sup>2</sup>.

Por su parte, la configuración BHP20 modifica la tendencia de tener el porcentaje de

reducción máximo en marzo, ya que el porcentaje máximo es de 79.2 % en septiembre con un valor de  $E$  de 58.6 Wh/m<sup>2</sup> y este valor corresponde al valor mínimo de  $E$ , mientras que el porcentaje mínimo alcanzado es de 18.3 % en julio.

En resumen, se observa que julio es el mes con menor porcentaje de reducción de  $E$ . Se aprecia que en el día más frío (diciembre), la configuración BH tiene un  $E$  de 414.0 Wh/m<sup>2</sup> y se reduce 63.4, 63.1 y 54.3 % con las configuraciones BHP10, BHP15 y BHP20, respectivamente. Además, se aprecia que la configuración BHP20 muestra un aumento en la energía por unidad de área en enero, marzo, abril y noviembre respecto a la configuración BH15. Finalmente, se observa que la suma de energía por unidad de área del día más frío de los 12 meses es de 3 546.8 Wh/m<sup>2</sup> con la configuración BH y se reduce 38.7, 46.2 y 50.5 % con las configuraciones BHP10, BHP15 y BHP20, respectivamente.

En la Tabla 5.3 se muestra la energía por unidad de área mensual ( $E_{mes}$ ) y las emisiones de  $CO_2$  equivalentes en toneladas anual. En primer lugar se aprecia que la configuración BH tiene  $E_{mes}$  máximo y mínimo de 12.5 y 7.0 kWh/m<sup>2</sup> en febrero y junio, respectivamente, y al año se tiene un energía por unidad de área de 120.2 kWh/m<sup>2</sup>, esto equivale a 0.051 tCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>.

Por otra parte, la configuraciones BHP ayudan a reducir el  $E_{mes}$  notablemente en enero, ya que su valor mínimo es de 4.9, 3.6 y 3.8 kWh/m<sup>2</sup> con BHP10, BHP15 y BHP20, tales valores representan una reducción de 56.4, 68.2 y 66.6 % respecto a BH. El valor mínimo de  $E_{mes}$  se obtuvo en octubre y es de 10.9 kWh/m<sup>2</sup> con BHP10, 9.9 kWh/m<sup>2</sup> con BHP15 y 8.0 kWh/m<sup>2</sup> con BHP20, lo que representa una reducción de 11.8, 20.0 y 35.4 % respecto a BH. Sin embargo, el porcentaje mínimo alcanzado es en junio de 8.4 % con BHP10, 12.1 % con BHP15 y 15.6 % con BHP20.

En general, los meses con mayor energía por unidad de área mensual con las cuatro configuraciones se presentan en los meses de invierno (diciembre-marzo) y otoño (octubre-

noviembre); además, las mayores reducciones se presentan principalmente en estos meses. Adicionalmente, la energía por unidad de área al año (120.2 kWh/m<sup>2</sup>) y las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes (0.051 tCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>) presentados con la configuración BH se reduce 25.1 % con BHP10, 31.9 % con BHP15 y 37.4 % con BHP20.

Tabla 5.3: Energía por unidad de área mensual y emisiones de CO<sub>2</sub> al año.

Mes	$E_{mes}$ (Wh/m <sup>2</sup> )			
	BH	BHP10	BHP15	BHP20
Enero	11.2	4.9 (56.4)	3.6 (68.2)	3.8 (66.6)
Febrero	12.5	10.2 (18.2)	9.3 (25.8)	7.6 (38.7)
Marzo	10.9	7.2 (34.5)	6.5 (41.0)	6.4 (41.6)
Abril	8.7	6.3 (28.1)	6.3 (28.2)	6.6 (24.2)
Mayo	7.0	6.0 (14.2)	5.8 (17.4)	5.6 (20.3)
Junio	7.0	6.4 (8.4)	6.1 (12.1)	5.9 (15.6)
Julio	9.1	8.2 (9.8)	7.8 (14.0)	7.5 (17.9)
Agosto	8.1	6.9 (14.8)	6.2 (23.3)	5.4 (33.1)
Septiembre	9.8	7.9 (19.0)	6.5 (34.1)	4.7 (52.3)
Octubre	12.4	10.9 (11.8)	9.9 (20.0)	8.0 (35.4)
Noviembre	11.2	7.7 (31.8)	6.9 (38.6)	6.8 (39.2)
Diciembre	12.3	7.5 (38.8)	7.2 (41.6)	7.1 (42.6)
$\sum_{i=enero}^{diciembre} E_{mes,i}$	120.2	90.1 (25.1)	81.9 (31.9)	75.3 (37.4)
CO <sub>2</sub> (tCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup> )	0.051	0.038 (25.1)	0.035 (31.9)	0.032 (37.4)

Nota: ( ) diferencia absoluta respecto a BH.

## 5.2. Techo con y sin PCM

Se muestra el comportamiento térmico de un techo típico de bovedilla (TB) y un techo de bovedilla con una capa de PCM (TBP). En primer lugar, se evalúa el comportamiento de ambos techos durante el día más cálido y el día más frío del año, posteriormente se

muestra una evaluación anual de ambas paredes en términos de energía por unidad de área y emisiones de  $CO_2$ , mensual y anualmente.

### 5.2.1. Comportamiento térmico de un techo con PCM

Se modeló la transferencia de calor conjugada en las configuraciones TB y TBP durante el día más cálido y el día más frío del año para analizar el comportamiento térmico de ambos techos; el día más cálido corresponde a 07 de abril y el día más frío corresponde a 12 de diciembre.

La Figura 5.8 muestra el comportamiento térmico de ambas configuraciones de techos durante el día cálido. En primer lugar, se observa en la Figura 5.8(a) que la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) mínima es de 23.3 °C y la máxima es de 41.3 °C, y la temperatura mínima y máxima de la superficie exterior ( $T_{ext}$ ) de ambas configuraciones es de 21.8 y 59.8 °C, respectivamente; la  $T_{ext}$  mínima de ambas configuraciones está por debajo de la  $T_{amb}$  mínima debido a las pérdidas de calor hacia el exterior que se presentan en las primeras seis horas del día (ver Figura 5.8(b)); mientras que la  $T_{ext}$  máxima de ambas configuraciones está por encima de la  $T_{amb}$  máxima debido a la ganancia de calor por la incidencia de radiación solar ( $G_{solar}$ ) durante el día.

Particularmente, la temperatura de la superficie interior de la configuración TB ( $T_{int-TB}$ ) presenta una oscilación de 24.7-30.4 °C durante el día; los valores mínimo y máximo se presentan a las 07:50 y 17:17 h, respectivamente. Desde las 01:30 hasta las 11:00 h y entre las 16:30 y 18:00 h, la  $T_{int-TB}$  se mantiene por debajo del intervalo de la temperatura de confort ( $T_{conf}$ ), el resto del día se mantiene dentro del intervalo de la  $T_{conf}$ . Por su parte, la temperatura interior de la configuración TBP ( $T_{int-TBP-10}$ ) presenta un comportamiento menos oscilatorio (25.9-27.3 °C) en comparación con  $T_{int-TB}$  y se mantiene dentro del intervalo de  $T_{conf}$  alrededor de 16.0 horas, además, su valor máximo está 2.8 °C por debajo del límite superior de  $T_{conf}$  y se presenta a las 19:50 h, esto representa un tiempo de retraso de 2.5 horas respecto a la  $T_{int-TB}$  máxima.

A diferencia de la  $T_{ext}$  de ambas configuraciones, el flujo de calor de la superficie exterior ( $q_{ext}$ ) de ambas configuraciones mostrado en la Figura 5.8(b) tiene una diferencia notable. El  $q_{ext-TB}$  muestra mayor pérdida de calor hacia el exterior en las primeras 6.0 horas y en las últimas 8.0 horas respecto a  $q_{ext-TBP-10}$ , asimismo, la ganancia de calor hacia el interior es mayor con la configuración TB en el resto del día. Esto indica que el gradiente de temperatura en dirección perpendicular a la superficie es menor con la configuración TBP. A pesar de que se tiene radiación solar entre las 15:30 y 18:00 h, se tiene pérdidas de calor hacia el exterior debido a las pérdidas convectivas y radiativas con el medio ambiente, también se observa en general que las pérdidas convectivas y radiativas reducen la ganancia de calor sobre la superficie exterior, ya que la energía ganada es de hasta 64.1% menos que la  $G_{solar}$  con la configuración TB y 72.3% menos con la configuración TBP.

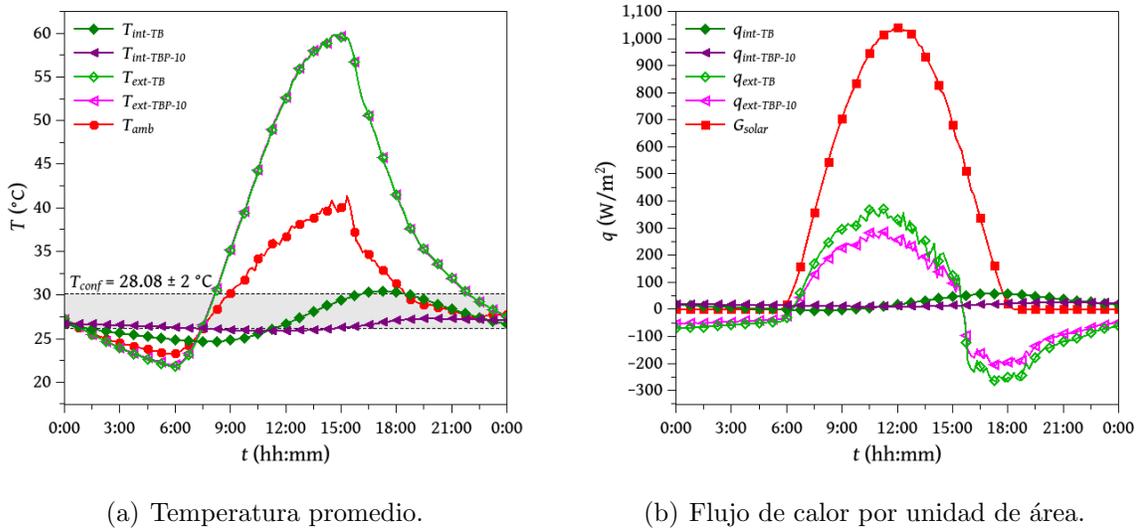


Figura 5.8: Comportamiento térmico de los techos durante el día más cálido.

Por su parte, el flujo de calor de la superficie interior ( $q_{int}$ ) de ambas configuraciones es notablemente menor respecto a  $q_{ext}$ ; ambas configuraciones comienzan el día transfiriendo energía hacia el interior y sus valores son similares, ya que la configuración TB presenta ganancia de calor de 17.9  $\text{W}/\text{m}^2$ , mientras que la configuración TBP presenta ganancia de calor de 18.6  $\text{W}/\text{m}^2$ . En el caso de la configuración TB, el  $q_{int}$  disminuye hasta presentar pérdida de energía de 4.4  $\text{W}/\text{m}^2$  a las 07:50 h, mientras que en la configuración TBP se mantiene la ganancia y solo disminuye a su valor mínimo de 10.0  $\text{W}/\text{m}^2$  a las 11:32 h.

Posteriormente, se observa que la configuración TB alcanza su ganancia máxima de  $57.7 \text{ W/m}^2$  a las 17:23 h, mientras que la configuración TBP alcanza su máxima ganancia de  $24.6 \text{ W/m}^2$  a las 20:30 h, esto representa una reducción de hasta 57.4 % y un retraso de 3.0 horas con la implementación de un PCM. A las 24:00 h, el  $q_{int-TB}$  presenta ganancia de energía de  $17.8 \text{ W/m}^2$  y el  $q_{int-TBP-10}$  presenta ganancia de energía de  $23.2 \text{ W/m}^2$ ; la configuración TBP presenta mayor ganancia debido a la liberación de energía por parte del PCM.

La Figura 5.9 muestra el comportamiento térmico de las configuraciones durante el día más frío del año; de acuerdo con la Figura 5.9(a), la  $T_{amb}$  oscila entre  $9.4$  y  $29.3 \text{ }^\circ\text{C}$ , mientras que la  $T_{ext}$  de ambas configuraciones oscila entre  $9.2$  y  $43.1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Es importante señalar que al ser el día más frío, se debe tener en cuenta el pico mínimo de temperatura que se alcanza, en ese sentido, se observa que el valor mínimo de  $T_{ext}$  de ambas configuraciones se mantiene cerca de la  $T_{amb}$  mínima y no disminuye por debajo de esta última, en tanto que el valor máximo de  $T_{ext}$  de ambas configuraciones es  $13.8 \text{ }^\circ\text{C}$  mayor que la  $T_{amb}$  máxima debido a la radiación solar. Al final del día, la  $T_{ext}$  de ambas configuraciones es similar a la  $T_{amb}$ .

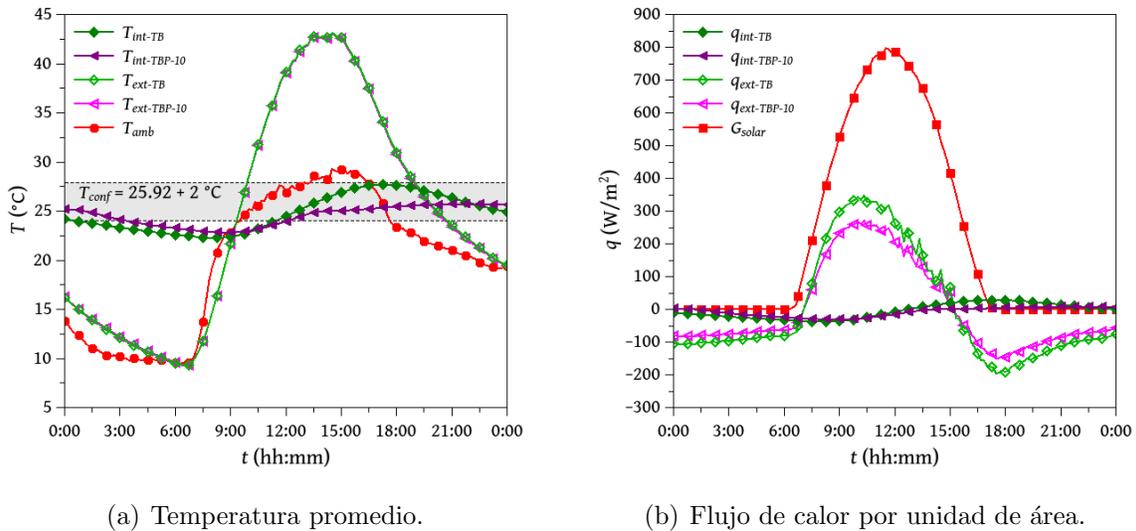


Figura 5.9: Comportamiento térmico de los techos durante el día más frío.

Por su parte, al comparar la  $T_{int}$  de ambas configuraciones, se observa que la con-

figuración TB presenta una tendencia más oscilatoria respecto a TBP10; a las 00:00 h, la temperatura es de 24.2 y 25.2 °C con TB y TBP10, respectivamente. La liberación de energía almacenada el día anterior por el PCM permite que la configuración TBP10 mantenga la  $T_{int}$  mayor que la configuración TB hasta las 10:30 h. La temperatura mínima alcanzada con la configuración TB es de 22.3 °C a las 08:11 h y con la configuración TBP10 es de 22.8 °C a las 08:46 h, esto representa un retraso de 0.5 horas, mientras que la temperatura máxima alcanzada con TB es de 27.7 °C a las 17:22 h y con TBP10 es de 25.7 °C a las 21:44 h, lo que representa un retraso de 4.4 horas. La razón por la cual el tiempo de retraso de la temperatura mínima ( $TL_{min}$ ) es menor que el tiempo de retraso de la temperatura máxima ( $TL_{max}$ ) es que aproximadamente partir de las 02:00 h del día el PCM liberó por completo la energía almacenada el día anterior, por lo cual, la configuración TBP comenzó a tener un comportamiento similar a la de la configuración TB a partir de ese horario. El tiempo de retraso de la temperatura máxima es debido a que en el horario de 02:00 - 13:30 h, el PCM almacena energía en forma de calor sensible ( $T_{int-TBP-10}$  aumenta constantemente) y después comienza almacenar energía en forma de calor latente en el horario de 13:30 h a 18:00 h, esto ocasiona que la temperatura se mantenga casi constante en este horario. En general,  $T_{int-TBP-10}$  se mantiene dentro del intervalo de  $T_{conf}$  por 15.0 horas del día, aproximadamente, mientras que  $T_{int-TB}$  se mantiene por debajo del límite inferior de  $T_{conf}$  entre las 00:53 y 11:21 h y se mantiene dentro del intervalo de confort el resto del día.

Por otro lado, en la Figura 5.9(b) se aprecia que el flujo de calor sobre la superficie exterior ( $q_{ext}$ ) de ambos techos tiene un comportamiento similar al del día más cálido, mientras que la radiación solar ( $G_{solar}$ ) es menor respecto al día más cálido por aproximadamente 200.0 W/m<sup>2</sup>. Nuevamente, al comparar el flujo de calor sobre la superficie interior ( $q_{int}$ ) de ambas configuraciones, se observa que la configuración TBP-10 muestra un mejor comportamiento; a las 00:00 h, el  $q_{int-TB}$  presenta pérdidas de energía hacia el exterior de 11.6 W/m<sup>2</sup> y esta pérdida aumenta a 37.3 W/m<sup>2</sup> a las 08:10 h, mientras que el  $q_{int-TBP-10}$  presenta ganancias de calor hacia el interior de 2.2 W/m<sup>2</sup> a las 00:00 h y se convierte en

pérdidas hacia el exterior de  $31.0 \text{ W/m}^2$  a las 08:46 h; la configuración TBP-10 reduce hasta 16.9% las pérdidas de calor máximas alcanzadas con TB. El flujo de calor máximo que se alcanza durante el día es de  $28.2 \text{ W/m}^2$  a las 17:27 h con la configuración TB y de  $7.2 \text{ W/m}^2$  a las 22:09 h con la configuración TBP-10, esto representa una reducción de 74.4%. Por último, a las 24:00 h, el  $q_{int-TB}$  es de  $1.3 \text{ W/m}^2$  como pérdida hacia el exterior, mientras que el  $q_{int-TBP-10}$  es de  $6.7 \text{ W/m}^2$  como ganancia hacia el interior.

### 5.2.2. Evaluación anual

El comportamiento térmico de ambas configuraciones descrito en la subsección anterior corresponde a los días extremos del año; cabe mencionar que el comportamiento térmico de ambas configuraciones en el resto de los meses puede diferir. Por ello, a manera de resumen, la Tabla 5.4 muestra la energía por unidad de área sobre la superficie interior ( $E$ ) de ambas configuraciones en el día más cálido y más frío de cada mes. Por un lado, se observa que la energía por unidad de área es de  $1\ 105.5 \text{ Wh/m}^2$  con TB y se reduce a  $798.3 \text{ Wh/m}^2$  con TBP-10 en el día más cálido del año (abril), esto representa una reducción del 27.8%, adicionalmente, mayo, junio y julio son los meses con mayor energía por unidad de área, entre  $1\ 100.4$  y  $1\ 293.8 \text{ Wh/m}^2$  y al implementar la capa de PCM estos flujos de calor total disminuyen entre  $798.3$  y  $1\ 138.9 \text{ Wh/m}^2$ , lo que representa una reducción de 6.8 - 27.8%; el día más cálido de julio presenta la mayor energía por unidad de área de  $1293.8 \text{ Wh/m}^2$  con configuración TB y solo se reduce 12.0% al implementar el PCM.

Por otro lado, la energía por unidad de área en el día más frío del año (diciembre) es de  $1\ 004.9 \text{ Wh/m}^2$  con TB y disminuye a  $579.2 \text{ Wh/m}^2$  con TBP-10, esto representa una reducción de energía por unidad de área de 42.4%. Los meses de marzo a septiembre presentan un flujo de calor mayor a  $1\ 000.0 \text{ Wh/m}^2$  con TB y se disminuyen entre 22.9% (julio) y 65.3% (marzo); en este caso, el más frío con mayor flujo de calor con TB corresponde a julio y solo disminuye 22.9% al implementar el PCM.

En general, se observa que julio presenta el mayor flujo de energía en el día más frío

y en el día más cálido con la configuración TB; sin embargo, en enero se tiene la mayor reducción de energía por unidad de área (68.7%) para el día más cálido y en marzo se tiene la mayor reducción de energía (65.3%) para el día más frío. Por su parte, la suma de energía por unidad de área de los días cálidos es de 11 835.6 Wh/m<sup>2</sup> con TB y desciende a 8 366.6 Wh/m<sup>2</sup> con TBP-10, esto representa una reducción de 29.3%, mientras que la suma de energía por unidad de área de los día fríos es de 12 048.6 Wh/m<sup>2</sup> con TB y se reduce 44.2% al implementar el PCM. Por último, se tiene mayor porcentaje de reducción para los días fríos, ya que el porcentaje mínimo es de 22.9% en el mes de julio y el porcentaje mínimo en los días cálidos se presenta en el mes de junio de solo 6.8%.

Tabla 5.4: Energía por unidad de área.

Mes	$E$ (Wh/m <sup>2</sup> )			
	Día cálido		Día frío	
	TB	TBP-10	TB	TBP-10
Enero	810.2	253.9 (68.7)	886.9	386.9 (56.4)
Febrero	958.2	583.9 (39.1)	919.2	500.1 (45.6)
Marzo	990.8	704.0 (28.9)	1 016.0	352.4 (65.3)
Abril	1 105.5	798.3 (27.8)	1 018.7	406.4 (60.1)
Mayo	1 107.9	967.7 (12.7)	1 110.5	791.6 (28.7)
Junio	1 100.4	1 025.9 (6.8)	1 161.8	821.0 (29.3)
Julio	1 293.8	1 138.9 (12.0)	1 167.3	900.4 (22.9)
Agosto	1 006.5	729.4 (27.5)	1 050.1	627.8 (40.2)
Septiembre	954.0	612.9 (35.8)	1 015.0	482.8 (52.4)
Octubre	986.9	608.8 (38.3)	937.4	594.3 (36.6)
Noviembre	405.4	368.4 (9.1)	760.9	274.7 (63.9)
Diciembre	800.6	524.5 (34.5)	1 004.9	579.2 (42.4)
$\sum_{i=enero}^{diciembre} E_i$	11 835.6	8 366.6 (29.3)	12 048.6	6 717.6 (44.2)

Nota: ( ) diferencia absoluta respecto a TB.

La Tabla 5.5 muestra la energía por unidad de área mensual ( $E_{mes}$ ) y las emisiones de

## 5.2. Techo con y sin PCM

$CO_2$  equivalentes en toneladas anual. El  $E_{mes}$  máximo que se alcanza es de 38.1 kWh/m<sup>2</sup> en julio con la configuración TB y al implementar el PCM disminuye un 17.1 %, mientras que el  $E_{mes}$  mínimo es de 23.4 kWh/m<sup>2</sup> con TB y disminuye un 23.4 % con TBP. La menor reducción con la configuración TBP-10 que se alcanza es de 15.6 % en junio, mientras que la máxima reducción con TBP-10 se logra en enero con 62.2 %.

Tabla 5.5: Energía por unidad de área mensual y emisiones de  $CO_2$  al año.

Mes	$E_{mes}$ (kWh/m <sup>2</sup> )	
	TB	TBP-10
Enero	26.3	9.9 (62.2)
Febrero	26.3	16.8 (36.1)
Marzo	31.1	16.4 (47.4)
Abril	31.9	18.7 (41.4)
Mayo	34.4	27.3 (20.7)
Junio	33.9	28.6 (15.6)
Julio	38.1	31.6 (17.1)
Agosto	31.9	21.0 (34.0)
Septiembre	29.5	17.0 (42.5)
Octubre	29.8	18.6 (37.5)
Noviembre	23.4	12.4 (47.1)
Diciembre	26.7	15.5 (42.2)
$\sum_{i=enero}^{diciembre} E_{mes,i}$	363.4	233.8 (35.7)
$CO_2$ (tCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup> )	0.154	0.099 (35.7)

Nota: ( ) diferencia absoluta respecto a TB.

Anualmente, se tiene un energía por unidad de área de 363.4 kWh/m<sup>2</sup> y una emisión de  $CO_2$  de 0.154 tCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup> con la configuración TB y con la configuración TBP-10 se reduce ambos valores un 35.7%. En general, en los meses de marzo a agosto se presentan los mayores flujos de energía con ambas configuraciones; aunque en el día más cálido de junio,

julio y noviembre se tiene reducción de  $E$  menor a 15.0% (Tabla 5.4), mensualmente, la menor reducción que se obtiene es de 15.6%.

Por último, en el siguiente capítulo se describe las conclusiones acerca de los resultados presentados anteriormente, también se describe las recomendaciones más relevantes para la continuación de este estudio.

# Capítulo 6

## Conclusiones

A continuación se presenta las conclusiones de los resultados de las configuraciones de la pared y del techo. Para facilitar la lectura de tales conclusiones, éstas se presentan de manera separada. Posteriormente, se presenta las sugerencias para trabajos futuros.

### 6.1. Conclusiones acerca de las paredes con y sin PCM

En conclusión, la pared de ladrillo retrasa hasta 2.0 horas la temperatura máxima y mínima en la superficie interior respecto a la superficie exterior; sin embargo, la pared de block hueco reduce la transferencia de calor en el día más cálido del año respecto a la pared de ladrillo, mientras que aumenta ligeramente la transferencia de calor en el día más frío del año; la energía por unidad de área hacia el interior de BH es 14.6 % menor que LR en el día más cálido y 1.9 % mayor respecto a LR en el día más frío. Por consiguiente, se concluye que la BH presentó menor transferencia de energía hacia el interior; por lo tanto, se seleccionó esta pared para estudiar el efecto de la adicción de una capa de PCM sobre su comportamiento térmico.

En el día más cálido, se encontró que la temperatura máxima de la superficie interior en el caso de BH fue de hasta 12.1 °C menor respecto a la temperatura ambiente, mientras que en las configuraciones BHP10, BHP15 y BHP20 fue de hasta 13.5, 14.0 y 14.4 °C

menor. Asimismo, la configuración BH produjo un retraso en la temperatura máxima de la superficie interior de hasta 1.5 horas respecto a la temperatura máxima del ambiente, mientras que la configuración BHP10 aumentó ese retraso a 4.5 horas y las configuraciones BHP15 y BHP20 aumentaron el retraso a 5.5 horas. En el día más frío, la temperatura mínima de la superficie interior fue mayor que la temperatura mínima del ambiente por 12.4 °C en BH y por 14.2 °C en las configuraciones BHP. El tiempo de retraso en BH fue de 1.7 horas y aumentó a 4.0, 5.0 y 6.3 horas en BHP10, BHP15 y BHP20, respectivamente.

También se observó que el PCM redujo el flujo de calor en mayor medida en los días más fríos que en los días más cálidos. Esto fue ocasionado porque el PCM se mantiene en estado líquido cerca del 50.0% del día más cálido del año, provocando que la energía ganada en la superficie exterior se transfiera hacia el interior de la vivienda, mientras que durante el día más frío se mantiene en estado de mezcla, permitiendo que el PCM almacene la energía ganada en la superficie exterior y, al mismo tiempo, evitando que se transfiera hacia el interior. Además, la reducción máxima de flujo de calor respecto a la pared BH fue de 48.7, 66.5 y 70.4% en BHP10, BHP15 y BHP20, respectivamente, y corresponde al día más frío de diciembre. Anualmente, la configuración BH presentó emisiones de  $CO_2$  de 0.051 t $CO_2$ e/m<sup>2</sup> y una energía por unidad de área de 120.2 kWh/m<sup>2</sup>, las cuales se redujeron hasta 25.1, 31.9 y 37.4% en las configuraciones BHP10, BHP15 y BHP20, respectivamente.

Adicionalmente, se concluye que conforme aumentó el espesor del PCM, el flujo de calor y la oscilación de la temperatura en la superficie interior disminuyeron; asimismo, la configuración BHP20 duplicó el porcentaje de reducción de flujo de calor respecto a la configuración BHP10 en todos los meses excepto enero para los días cálidos, no obstante, la configuración BHP20 aumentó el flujo de calor respecto a la configuración BHP10 y BHP15 en enero, marzo, abril y noviembre para el día frío de cada mes. En general, se concluye que no se debe implementar un espesor de PCM mayor que 15 mm debido a que el PCM de 20 mm aumenta su volumen 100.0% y disminuye el flujo de energía solamente 12.3% respecto al de 10 mm, mientras que aumenta su volumen un 33.0% y disminuye el

flujo de energía solamente un 5.5 % respecto a BHP15.

## 6.2. Conclusiones acerca del techo con y sin PCM

En conclusión, se observó que la temperatura de la superficie exterior de ambos techos alcanzan temperaturas máximas de hasta 60.0 °C en el día más cálido del año y temperaturas mínimas de hasta 10.0 °C en el día más frío del año, asimismo, como era de esperarse se observaron mayores ganancias y pérdidas de calor en la superficie exterior debido a la condiciones meteorológicas. No obstante, la temperatura de confort requerida al interior de la vivienda oscila entre 23.0 y 27.0 °C a lo largo del año, lo cual muestra una diferencia de temperatura considerable entre la superficie exterior del techo y la temperatura al interior de la vivienda. En consecuencia, un mal diseño térmico del techo puede ocasionar una mayor ganancia o pérdida de calor y una temperatura fuera del intervalo de confort al interior de la vivienda y, a su vez, una alta demanda de energía eléctrica para el acondicionamiento térmico del espacio interior.

Por otra parte, aunque la bovedilla tiene huecos con aire, mismo que tiene baja conductiva térmica, no asegura el aislamiento térmico adecuado para obtener confort térmico al interior de una vivienda, ya que el intervalo de temperatura sobre la superficie interior de TB osciló entre 24.7 y 30.4 °C en el día más cálido del año y fue hasta 1.45 °C menor que la temperatura mínima de confort durante la primera mitad del día, mientras que en el día más frío, la temperatura osciló entre 22.3 y 27.7 °C y se mantuvo dentro del intervalo de temperatura de confort por más tiempo.

Respecto a TBP, se observó que una capa de PCM de 10 mm en la bovedilla mejora su comportamiento térmico ya que la variación de la temperatura de la superficie interior disminuye y ésta se encuentra entre 25.9 y 27.3 °C en el día más cálido del año, además se mantiene dentro del intervalo de confort por 16.0 horas, es decir, aproximadamente 3.0 horas más respecto a TB. Por su parte, en el día más frío del año, la temperatura de la

superficie interior se mantiene dentro del intervalo de la temperatura de confort en las primeras 3.5 horas del día y en las últimas 12.0 horas y su fluctuación fue de 3.0 °C.

En términos de energía, se encontró que la energía por unidad de área mensual es mayor entre los meses de abril y agosto con ambas configuraciones de techo, ya que se obtuvieron valores entre 31.9 y 38.1 kWh/m<sup>2</sup> con TB y entre 18.7 y 31.6 kWh/m<sup>2</sup> con TBP. Particularmente, la configuración TBP logró reducir la energía por unidad de área mensual hasta 62.2% en el mes de enero y al menos 15.0% en el mes de junio respecto a la configuración TB. Además, se observó mayor disminución de flujo de energía mensual en la temporada de otoño e invierno. No obstante, durante la temporada cálida (mayo-julio) no se obtuvo un beneficio notable con la adición del PCM, por lo tanto se recomienda estudiar un PCM con mayor temperatura de fusión o aumentar su espesor. Por último, en cuanto al impacto ambiental, se determinó que la TB emitió 0.154 tCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup> al año, la cual disminuyó un 35.7% cuando se implementó el PCM.

Con base en los resultados obtenidos, se concluye que los objetivos de este tema de tesis se cumplieron satisfactoriamente. En general, también se concluye que los PCMs seleccionados se pueden considerar como una alternativa para disminuir la transferencia de calor hacia o desde el interior de una vivienda bajo condiciones meteorológicas similares a las de Mérida, Yucatán. Además, estos PCMs permiten mantener la temperatura de la superficie interior de las componentes (BHP y TBP) dentro el intervalo de temperatura de confort por al menos 12.0 horas del día. Cabe destacar que la ubicación del PCM considerada en este estudio permite reducir el consumo de energía eléctrica destinada al acondicionamiento térmico de viviendas tanto en planeación como en funcionamiento.

### **6.3. Sugerencias para trabajos futuros**

Para dar continuidad al estudio presentado se sugieren los siguientes trabajos futuros:

- Analizar el comportamiento térmico de las componentes con PCM en otros tipos de

### 6.3. Sugerencias para trabajos futuros

---

climas disponibles en México.

- Considerar el aire al interior del block hueco como medio participante.
- Analizar el comportamiento térmico de las paredes con PCM en otras orientaciones (norte, este y oeste).
- Modelar la transferencia de calor conjugada en una habitación acoplada a la pared y al techo con PCM.
- Analizar y comparar el comportamiento térmico de las paredes y del techo con PCM y aislante.

# Referencias

- Ait-Taleb T., Abdelbaki A. y Zrikem Z., Simulation of coupled heat transfers in a hollow tile with two vertical and three horizontal uniform rectangular cavities heated from below or above, *Energy and Buildings*, vol. 84, págs. 628–632, 2014.
- Aketouane Z., Bruneau D., Bah A., Michel B., Asbik M. y Ansari O., Energy savings potential by integrating phase change material into hollow bricks: The case of moroccan buildings, *Building Simulation*, vol. 11, págs. 1109–1122, 2018.
- Al-Hazmy M.M., Analysis of coupled natural convection–conduction effects on the heat transport through hollow building blocks, *Energy and Buildings*, vol. 38(5), págs. 515–521, 2006.
- Al-Khameis M., Mahmoud M., Ben-Nakhi A., Mahmoud A.M. y Ben-Nakhi A., Coupled heat transfer modes for calculation of cooling load through hollow concrete building walls, *Journal of Building Performance Simulation*, vol. 4(2), págs. 125–140, 2011.
- Al-Yasiri Q. y Szabó M., Experimental evaluation of the optimal position of a macroencapsulated phase change material incorporated composite roof under hot climate conditions, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 45, págs. 101121, 2021.
- Alawadhi E.M., Thermal analysis of a building brick containing phase change material, *Energy and Buildings*, vol. 40(3), págs. 351–357, 2008.
- Alawadhi E.M. y Alqallaf H.J., Building roof with conical holes containing pcm to reduce the cooling load: Numerical study, *Energy Conversion and Management*, vol. 52(8), págs. 2958–2964, 2011.

- Alhazmy M.M., Numerical investigation on using inclined partitions to reduce natural convection inside the cavities of hollow bricks, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 49(11), págs. 2201–2210, 2010.
- Alqallaf H.J. y Alawadhi E.M., Concrete roof with cylindrical holes containing pcm to reduce the heat gain, *Energy and Buildings*, vol. 61, págs. 73–80, 2013.
- Antar M.A., Thermal radiation role in conjugate heat transfer across a multiple-cavity building block, *Energy*, vol. 35(8), págs. 3508–3516, 2010.
- Antar M.A. y Baig H., Conjugate conduction-natural convection heat transfer in a hollow building block, *Applied Thermal Engineering*, vol. 29(17), págs. 3716–3720, 2009.
- Arici M., Yilmaz B. y Karabay H., Investigation of heat insulation performance of hollow clay bricks filled with perlite, *Acta Physica Polonica, A.*, vol. 130(1), págs. 266–268, 2016.
- Arunkumar D., Ramu M., Murugan R., Kannan S., Arun S. y Baskar S., Investigation of heat transfer of wall with and without using phase change material, *Materials Today: Proceedings*, vol. 33, págs. 2646–2650, 2020, international Conference on Nanotechnology: Ideas, Innovation and Industries.
- Arici M., Bilgin F., Nizetić S. y Karabay H., Pcm integrated to external building walls: An optimization study on maximum activation of latent heat, *Applied Thermal Engineering*, vol. 165, pág. 114560, 2020.
- Barrios G., Huelsz G., Rechtman R. y Rojas J., Wall/roof thermal performance differences between air-conditioned and non air-conditioned rooms, *Energy and Buildings*, vol. 43(1), págs. 219–223, 2011.
- Beemkumar N., Yuvarajan D., Arulprakasajothi M., Ganesan S., Elangovan K. y Senthilkumar G., Experimental investigation and numerical modeling of room temperature control in buildings by the implementation of phase change material in the roof, *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 142(1), 2019.

- Bhamare D.K., Rathod M.K. y Banerjee J., Numerical model for evaluating thermal performance of residential building roof integrated with inclined phase change material (pcm) layer, *Journal of Building Engineering*, vol. 28, pág. 101018, 2020.
- Bilgin F. y Arici M., Effect of phase change materials on time lag, decrement factor and heat-saving, *Acta Physica Polonica A*, vol. 132(3), págs. 1102–1105, 2017.
- Byrne A., Byrne G. y Robinson A., Compact facility for testing steady and transient thermal performance of building walls, *Energy and Buildings*, vol. 152, págs. 602–614, 2017.
- Castell A., Martorell I., Medrano M., Pérez G. y Cabeza L., Experimental study of using pcm in brick constructive solutions for passive cooling, *Energy and Buildings*, vol. 42(4), págs. 534–540, 2010.
- Chang S.J., Wi S., Cho H.M., Jeong S.G. y Kim S., Numerical analysis of phase change materials/wood–plastic composite roof module system for improving thermal performance, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 82, págs. 413–423, 2020.
- Chen C., Guo H., Liu Y., Yue H. y Wang C., A new kind of phase change material (pcm) for energy-storing wallboard, *Energy and Buildings*, vol. 40(5), págs. 882–890, 2008.
- Chihab Y., Essaleh L., Bouferra R. y Bouchehema A., Numerical study for energy performance optimization of hollow concrete blocks for roofing in a hot climate of morocco, *Energy Conversion and Management: X*, vol. 12, pág. 100113, 2021.
- Chung M.H. y Park J.C., Development of pcm cool roof system to control urban heat island considering temperate climatic conditions, *Energy and Buildings*, vol. 116, págs. 341–348, 2016.
- Chung M.H. y Park J.C., An experimental study on the thermal performance of phase-change material and wood-plastic composites for building roofs, *Energies*, vol. 10(2), 2017.

- Daouas N., Impact of external longwave radiation on optimum insulation thickness in tunisian building roofs based on a dynamic analytical model, *Applied Energy*, vol. 177, págs. 136–148, 2016.
- Darwish M. y Moukalled F., *The finite volume method in computational fluid dynamics: an advanced introduction with OpenFOAM<sup>®</sup> and Matlab<sup>®</sup>*, Springer, 2016.
- De Vahl Davis G., Natural convection of air in a square cavity: A bench mark numerical solution, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 3(3), págs. 249–264, 1983.
- del Coz Díaz J., García Nieto P., Betegón Biempica C. y Prendes Gero M., Analysis and optimization of the heat-insulating light concrete hollow brick walls design by the finite element method, *Applied Thermal Engineering*, vol. 27(8), págs. 1445–1456, 2007.
- del Coz Díaz J., García Nieto P., Díaz Pérez L. y Riesgo Fernández P., Nonlinear thermal analysis of multi-holed lightweight concrete blocks used in external and non-habitable floors by fem, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 54(1), págs. 533–548, 2011.
- dos Santos G.H. y Mendes N., Heat, air and moisture transfer through hollow porous blocks, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52(9), págs. 2390–2398, 2009.
- Elnajjar E., Using pcm embedded in building material for thermal management: Performance assessment study, *Energy and Buildings*, vol. 151, págs. 28–34, 2017.
- Gao Y., He F., Meng X., Wang Z., Zhang M., Yu H. y Gao W., Thermal behavior analysis of hollow bricks filled with phase-change material (pcm), *Journal of Building Engineering*, vol. 31, pág. 101447, 2020.
- Hanchi N., Hamza H., Idmoussa R., Lahjomri J. y Oubarra A., Influence of thermal insulation 's and phase change material 's insertion within a partition wall on the energy

- consumption of a conditioned room under adjacent local periodical temperature effect, *MATEC Web Conf.*, vol. 307, pág. 01024, 2020.
- Hasan M.I., Basher H.O. y Shdhan A.O., Experimental investigation of phase change materials for insulation of residential buildings, *Sustainable Cities and Society*, vol. 36, págs. 42–58, 2018.
- Hernández-Pérez I., Influence of traditional and solar reflective coatings on the heat transfer of building roofs in Mexico, *Applied Sciences*, vol. 11(7), 2021.
- Hernández-Pérez I., Xamán J., Macías-Melo E., Aguilar-Castro K., Zavala-Guillén I., Hernández-López I. y Simá E., Experimental thermal evaluation of building roofs with conventional and reflective coatings, *Energy and Buildings*, vol. 158, págs. 569–579, 2018.
- Hichem N., Noureddine S., Nadia S. y Djamilia D., Experimental and numerical study of a usual brick filled with pcm to improve the thermal inertia of buildings, *Energy Procedia*, vol. 36, págs. 766–775, 2013, *terraGreen 13 International Conference 2013 - Advancements in Renewable Energy and Clean Environment*.
- House J.M., Beckermann C. y Smith T.F., Effect of a centered conducting body on natural convection heat transfer in an enclosure, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, vol. 18(2), págs. 213–225, 1990.
- Hu J. y Yu X.B., Adaptive building roof by coupling thermochromic material and phase change material: Energy performance under different climate conditions, *Construction and Building Materials*, vol. 262, pág. 120481, 2020.
- Huelsz G., Barrios G. y Rojas J., Equivalent-homogeneous-layers-set method for time-dependent heat transfer through hollow-block walls, *Applied Thermal Engineering*, vol. 102, págs. 1019–1023, 2016.
- Huelsz G., Barrios G. y Rojas J., Evaluation of heat transfer models for hollow blocks in whole-building energy simulations, *Energy and Buildings*, vol. 202, pág. 109338, 2019.

- IEA, Key World Energy Statistics 2021, Reporte estadístico, International Energy Agency, Francia, 2021.
- Jamal B., Boukendil M., El moutaouakil L., Abdelbaki A. y Zrikem Z., Numerical investigation of combined heat transfer through hollow brick walls, *The European Physical Journal Plus*, vol. 135, pág. 813, 2020.
- Kaşka Ö. y Yumrutaş R., Comparison of experimental and theoretical results for the transient heat flow through multilayer walls and flat roofs, *Energy*, vol. 33(12), págs. 1816–1823, 2008.
- Kharbouch Y., Ouhaine L., Mimet A. y El Ganaoui M., Thermal performance investigation of a pcm-enhanced wall/roof in northern morocco, *Building Simulation*, vol. 11, págs. 1083–1093, 2018.
- Kisilewicz T., Fedorczak-Cisak M. y Barkanyi T., Active thermal insulation as an element limiting heat loss through external walls, *Energy and Buildings*, vol. 205, pág. 109541, 2019.
- Kong X., Lu S., Li Y., Huang J. y Liu S., Numerical study on the thermal performance of building wall and roof incorporating phase change material panel for passive cooling application, *Energy and Buildings*, vol. 81, págs. 404–415, 2014.
- Kumar S., Prakash S.A., Pandiyarajan V., Geetha N., Raj V.A.A. y Velraj R., Effect of phase change material integration in clay hollow brick composite in building envelope for thermal management of energy efficient buildings, *Journal of Building Physics*, vol. 43(4), págs. 351–364, 2020.
- Kus H., Özkan E., Özgür Göcer y Edis E., Hot box measurements of pumice aggregate concrete hollow block walls, *Construction and Building Materials*, vol. 38, págs. 837–845, 2013.
- Kuznik F. y Virgone J., Experimental assessment of a phase change material for wall building use, *Applied Energy*, vol. 86(10), págs. 2038–2046, 2009.

- Labihi A., Aitlahbib F., Chehouani H., Benhamou B., Ouikhalfan M., Croitoru C. y Nastase I., Effect of phase change material wall on natural convection heat transfer inside an air filled enclosure, *Applied Thermal Engineering*, vol. 126, págs. 305–314, 2017.
- Lee K.O., Medina M.A., Sun X. y Jin X., Thermal performance of phase change materials (pcm)-enhanced cellulose insulation in passive solar residential building walls, *Solar Energy*, vol. 163, págs. 113–121, 2018.
- Li D., Zheng Y., Liu C. y Wu G., Numerical analysis on thermal performance of roof contained pcm of a single residential building, *Energy Conversion and Management*, vol. 100, págs. 147–156, 2015.
- Li H., Li J., Xi C., Chen W. y Kong X., Experimental and numerical study on the thermal performance of ventilated roof composed with multiple phase change material (vrmpcm), *Energy Conversion and Management*, vol. 213, pág. 112836, 2020.
- Li Z., Al-Rashed A.A., Rostamzadeh M., Kalbasi R., Shahsavari A. y Afrand M., Heat transfer reduction in buildings by embedding phase change material in multi-layer walls: Effects of repositioning, thermophysical properties and thickness of pcm, *Energy Conversion and Management*, vol. 195, págs. 43–56, 2019.
- Lucero-Álvarez J. y Martín-Domínguez I.R., Effects of solar reflectance and infrared emissivity of rooftops on the thermal comfort of single-family homes in Mexico, *Building Simulation*, vol. 10, págs. 297–308, 2017.
- Lucero-Álvarez J. y Martín-Domínguez I.R., The effect of solar reflectance, infrared emissivity, and thermal insulation of roofs on the annual energy consumption of single-family households in Mexico, *Indoor and Built Environment*, vol. 28(1), págs. 17–33, 2019.
- Lucero-Álvarez J., Rodríguez-Muñoz N.A. y Martín-Domínguez I.R., The effects of roof and wall insulation on the energy costs of low income housing in Mexico, *Sustainability*, vol. 8(7), 2016.

- Mahdi H.S. y Kinney R.B., Time-dependent natural convection in a square cavity: Application of a new finite volume method, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 11(1), 1990.
- Mahmoud S. y Ismaeel W.S., Developing sustainable design guidelines for roof design in a hot arid climate, *Architectural Science Review*, vol. 62(6), págs. 507–519, 2019.
- Mannivannan A. y Jaffarsathiq Ali M.T., Simulation and experimental study of thermal performance of a building roof with a phase change material (pcm), *Sadhana*, vol. 40, págs. 2381–2388, 2015.
- Markatos N. y Pericleous K., Laminar and turbulent natural convection in an enclosed cavity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 27(5), págs. 755–772, 1984.
- Mezrhab A., Bouali H., Amaoui H. y Bouzidi M., Computation of combined natural-convection and radiation heat-transfer in a cavity having a square body at its center, *Applied Energy*, vol. 83(9), págs. 1004–1023, 2006.
- Mi X., Liu R., Cui H., Memon S.A., Xing F. y Lo Y., Energy and economic analysis of building integrated with pcm in different cities of china, *Applied Energy*, vol. 175, págs. 324–336, 2016.
- ming Lai C. y ming Chiang C., How phase change materials affect thermal performance: hollow bricks, *Building Research & Information*, vol. 34(2), págs. 118–130, 2006.
- Moreles E., Huelsz G. y Barrios G., Hysteresis effects on the thermal performance of building envelope pcm-walls, *Building Simulation*, vol. 11, págs. 519–531, 2018.
- Nicol F., Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics, *Energy and Buildings*, vol. 36(7), págs. 628–637, 2004.
- Pasupathy A., Athanasius L., Velraj R. y Seeniraj R., Experimental investigation and numerical simulation analysis on the thermal performance of a building roof incorporating phase change material (pcm) for thermal management, *Applied Thermal Engineering*, vol. 28(5), págs. 556–565, 2008.

- Patankar S., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation, Taylor & Francis Group, 1980.
- Piselli C., Castaldo V.L. y Pisello A.L., How to enhance thermal energy storage effect of pcm in roofs with varying solar reflectance: Experimental and numerical assessment of a new roof system for passive cooling in different climate conditions, Solar Energy, vol. 192, págs. 106–119, 2019a.
- Piselli C., Pisello A.L., Saffari M., de Gracia A., Cotana F. y Cabeza L.F., Cool roof impact on building energy need: The role of thermal insulation with varying climate conditions, Energies, vol. 12(17), 2019b.
- Pluss®, 2022, URL [https://pluss.co.in/wp-content/uploads/2022/03/Doc-172\\_PCM\\_0M29\\_TDS.pdf](https://pluss.co.in/wp-content/uploads/2022/03/Doc-172_PCM_0M29_TDS.pdf).
- Principi P. y Fioretti R., Thermal analysis of the application of pcm and low emissivity coating in hollow bricks, Energy and Buildings, vol. 51, págs. 131–142, 2012.
- Rathore P.K.S. y Shukla S.K., An experimental evaluation of thermal behavior of the building envelope using macroencapsulated pcm for energy savings, Renewable Energy, vol. 149, págs. 1300–1313, 2020.
- Reddy K.S., Mudgal V. y Mallick T.K., Thermal performance analysis of multi-phase change material layer-integrated building roofs for energy efficiency in built-environment, Energies, vol. 10(9), 2017.
- Rosti B., Omidvar A. y Monghasemi N., Optimal insulation thickness of common classic and modern exterior walls in different climate zones of iran, Journal of Building Engineering, vol. 27, pág. 100954, 2020.
- Rubitherm®, 2020, URL [https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata\\_-RT25HC\\_EN\\_09102020.PDF](https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_-RT25HC_EN_09102020.PDF).

- Saafi K. y Daouas N., A life-cycle cost analysis for an optimum combination of cool coating and thermal insulation of residential building roofs in tunisia, *Energy*, vol. 152, págs. 925–938, 2018.
- SEMARNAT, Emission Factor OF The National Electrical System 2021, Inf. téc., Environmental and Natural Resources Secretary, 2022.
- SENER, Balance Nacional de Energía 2020, Reporte estadístico, Secretaria de Energía, México, 2020.
- Shaik S. y Babu A., Investigation of unsteady diurnal thermal behaviour of building walls exposed to periodic solar thermal excitation, *Journal of Renewable Energy Science, Technology and Economics*, vol. 1, págs. 1–11, 2015.
- Shao B., Du X. y Ren Q., Numerical investigation of energy saving characteristic in building roof coupled with pcm using lattice boltzmann method with economic analysis, *Applied Sciences*, vol. 8(10), 2018.
- Silva T., Vicente R., Soares N. y Ferreira V., Experimental testing and numerical modelling of masonry wall solution with pcm incorporation: A passive construction solution, *Energy and Buildings*, vol. 49, págs. 235–245, 2012.
- Srinivasan P.S.S. y Ravikumar M., Heat transfer analysis in pcm-filled rcc roof for thermal management, *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 28, págs. 1073–1078, 2014.
- Sun X., Zhang Q., Medina M.A. y Lee K.O., Energy and economic analysis of a building enclosure outfitted with a phase change material board (pcmb), *Energy Conversion and Management*, vol. 83, págs. 73–78, 2014.
- Tang D.L., Li L.P., Song C.F., Tao W.Q. y He Y.L., Numerical thermal analysis of applying insulation material to holes in hollow brick walls by the finite-volume method, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, vol. 68(5), págs. 526–547, 2015.

- Thattoth A.M. y Daniel J., Heat transfer analysis of building brick filled with microencapsulated phase change material, *AIP Conference Proceedings*, vol. 2236(1), 2020.
- Uriarte-Flores J., Xamán J., Chávez Y., Hernández-López I., Moraga N.O. y Aguilar J., Thermal performance of walls with passive cooling techniques using traditional materials available in the mexican market, *Applied Thermal Engineering*, vol. 149, págs. 1154–1169, 2019.
- Versteeg H.K. y Malalasekera W., *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*, Pearson education, 2007.
- Voller V.R. y Swaminathan C.R., Eral source-based method for solidification phase change, *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, vol. 19(2), págs. 175–189, 1991.
- Wang J., Li S., Guo S., Ma C., Wang J. y Sun J., Analysis of heat transfer properties of hollow block wall filled by different materials in solar greenhouse, *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, vol. 10(1), págs. 31–38, 2017.
- WHO, *Ambient air pollution: a globah assessment of exposure and burden of disease.*, Reporte estadístico, World Health Organization, Suiza, 2016.
- WHO, *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.*, Reporte estadístico, World Health Organization, Suiza, 2021.
- Xamán J., Cisneros-Carreño J., Hernández-Pérez I., Hernández-López I., Aguilar-Castro K. y Macias-Melo E., Thermal performance of a hollow block with/without insulating and reflective materials for roofing in mexico, *Applied Thermal Engineering*, vol. 123, págs. 243–255, 2017.
- Xamán J. y Gijón-Rivera M., *Dinámica de fluidos computacional para ingenieros*, Palibrio, 2016.

- Xamán J., Rodríguez-Ake A., Zavala-Guillén I., Hernández-Pérez I., Arce J. y Saucedo D., Thermal performance analysis of a roof with a pcm-layer under mexican weather conditions, *Renewable Energy*, vol. 149, págs. 773–785, 2020.
- Xu C., Li S. y Zou K., Study of heat and moisture transfer in internal and external wall insulation configurations, *Journal of Building Engineering*, vol. 24, pág. 100724, 2019.
- Yu J., Yang Q., Ye H., Huang J., Liu Y. y Tao J., The optimum phase transition temperature for building roof with outer layer pcm in different climate regions of china, *Energy Procedia*, vol. 158, págs. 3045–3051, 2019, innovative Solutions for Energy Transitions.
- Yu J., Yang Q., Ye H., Luo Y., Huang J., Xu X., Gang W. y Wang J., Thermal performance evaluation and optimal design of building roof with outer-layer shape-stabilized pcm, *Renewable Energy*, vol. 145, págs. 2538–2549, 2020.
- Zhang D., Fung A.S. y Siddiqui O., Numerical studies of integrated concrete with a solid-solid phase change material, en 2nd Canadian Solar Buildings Conference Calgary, Citeseer, 2007.
- Zhang Y., Du K., He J., Yang L., Li Y. y Li S., Impact factors analysis on the thermal performance of hollow block wall, *Energy and Buildings*, vol. 75, págs. 330–341, 2014.
- Zhang Y., Zhuang S., Wang Q. y He J., Experimental research on the thermal performance of composite pcm hollow block walls and validation of phase transition heat transfer models, *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2016, págs. 837–845, 2016.
- Zhou G., Yang Y., Wang X. y Cheng J., Thermal characteristics of shape-stabilized phase change material wallboard with periodical outside temperature waves, *Applied Energy*, vol. 87(8), págs. 2666–2672, 2010.
- Zingre K.T., Wan M.P., Tong S., Li H., Chang V.W.C., Wong S.K., Thian Toh W.B. y Leng Lee I.Y., Modeling of cool roof heat transfer in tropical climate, *Renewable Energy*, vol. 75, págs. 210–223, 2015.

Zwanzig S.D., Lian Y. y Brehob E.G., Numerical simulation of phase change material composite wallboard in a multi-layered building envelope, *Energy Conversion and Management*, vol. 69, págs. 27–40, 2013.

# Apéndice A

## Pared de ladrillo

### A.1. Modelo físico

Las consideraciones para el modelo físico de la pared de ladrillo son: dos capas de revoque y una capa de ladrillo; temperatura constante de la habitación ( $T_{hab}$ ) de 25.0 °C y temperatura ambiente al exterior ( $T_{amb}$ ); radiación solar incidente ( $G_{solar}$ ) sobre la superficie exterior; pérdidas y ganancias de calor por convección y radiación en las superficies izquierda y derecha; superficies superior e inferior aisladas; las superficies izquierda y derecha se consideran con recubrimiento blanco y gris, respectivamente. En la Figura A.1 se muestra el modelo físico de la pared de ladrillo (LR).

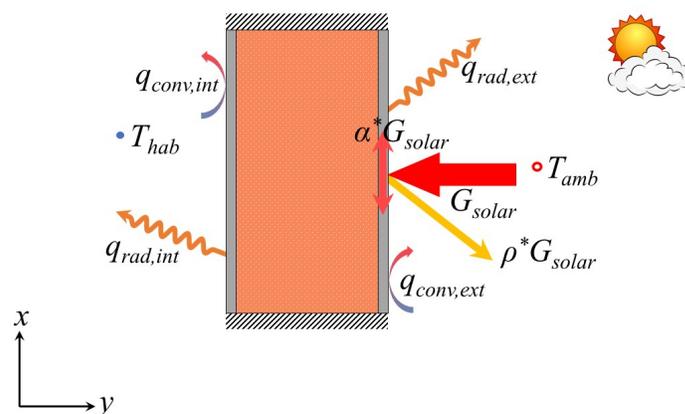


Figura A.1: Modelo físico de LR.

## A.2. Modelo matemático

Las consideraciones para deducir el modelo matemático de la configuración LR son: transferencia de calor por conducción en todas las capas de la configuración; estudio en estado transitorio y en dos dimensiones en dirección  $x$  y  $y$ ; y propiedades termofísicas constantes. A partir de estas consideraciones se deduce el modelo matemático de la Ecuación (A.1); esta ecuación aplica para cada capa de la pared.

$$\frac{\partial(\rho C_P T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (\text{A.1})$$

### A.2.1. Condiciones de frontera y de interfaz

Las condiciones de frontera termodinámicas se muestran en la Figura A.2. En la superficie izquierda ( $x = 0$ ) se considera pérdidas y ganancias de calor por convección y radiación, esta condición de frontera se muestra en la Ecuación (A.2). Sobre la superficie derecha ( $x = L_x$ ) se considera nuevamente pérdidas y ganancias de calor por convección y radiación, además se considera la incidencia de radiación solar y debido a las propiedades del recubrimiento, parte de la radiación solar se refleja ( $\rho^* G_{solar}$ ) hacia el medio ambiente, mientras que el resto se absorbe ( $\alpha^* G_{solar}$ ). A partir de estas consideraciones, se tiene la condición de frontera de la Ecuación (A.3). Estas dos condiciones de frontera son válidas en el límite  $0 \leq y \leq L_y$ . Las superficies inferior ( $y = 0$ ) y superior ( $y = L_y$ ) se consideran adiabáticas, la condición de frontera para ambas superficies se muestra en la Ecuación (A.4) y es válida en  $0 < x < L_x$  para ambas superficies.

$$-\lambda_r \frac{\partial T_r}{\partial x_r} = h_{int}(T_{int} - T_r) + \epsilon \sigma (T_{int}^4 - T_r^4) \quad (\text{A.2})$$

$$-\lambda_r \frac{\partial T_r}{\partial x_r} + \alpha^* G_{solar} = h_{ext}(T_r - T_{amb}) + \epsilon \sigma (T_r^4 - T_{amb}^4) \quad (\text{A.3})$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (\text{A.4})$$

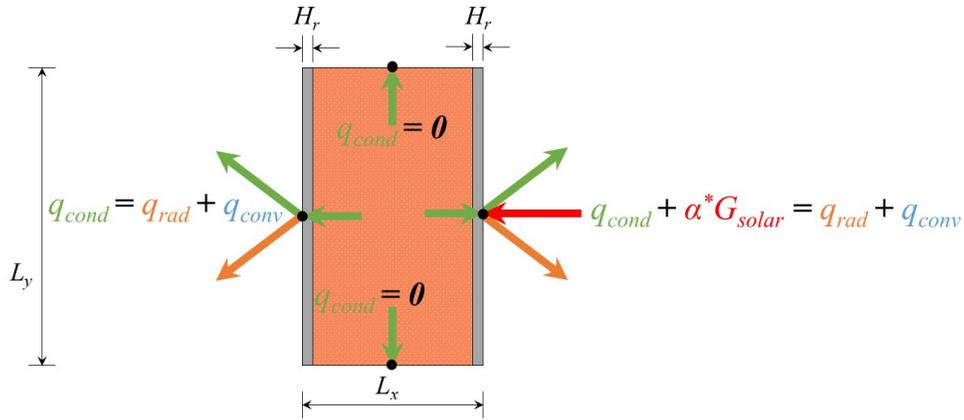


Figura A.2: Condiciones termodinámicas de la configuración LR.

Adicionalmente, se tiene dos balances de energía como condiciones de interfaz (Figura A.3), el primero en  $x = H_r$  y el segundo en  $x = L_x - H_r$ . Los dos balances son válidos en el límite  $0 < y < L_y$ , estos balances se representan a través de las ecuaciones (A.5)-(A.6), respectivamente.

$$\lambda_r \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda_{lad} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (A.5)$$

$$\lambda_{lad} \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda_r \frac{\partial T}{\partial x} \quad (A.6)$$

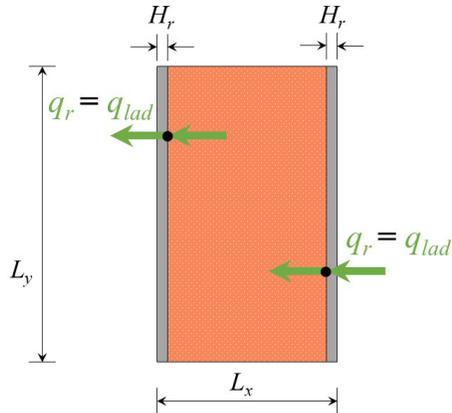


Figura A.3: Condiciones de interfaz de la configuración LR.

# Anexo A

## Estancia doctoral

Se realizó una estancia de investigación del 14 de febrero del 2022 al 20 de diciembre del 2022 en el Laboratorio de Energías Renovables del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) en Ensenada, Baja California. Durante la estancia, se realizaron actividades relacionadas con el estudio de la transferencia de calor conjugada en paredes y techos. A continuación se presenta los documentos que respaldan la información descrita.



**GOBIERNO DE  
MÉXICO**



**CONACYT**  
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



Ensenada, Baja California; a 09 de febrero de 2022

**Dra. Yvonne Chávez Chena**  
**Profesor-Investigador del**  
**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico**  
**CENIDET**  
**PRESENTE**

Estimada Dra. Yvonne Chávez Chena, agradezco la oportunidad de colaboración que involucra a uno de sus alumnos de doctorado del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), el M.C. Daniel García Pérez, y le informo que me complace recibir al M.C. García en el Laboratorio de Energías Renovables del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) para desarrollar actividades relacionadas con el estudio de transferencia de calor conjugada en elementos constructivos.

Como una actividad relacionada con su proyecto de tesis doctoral titulado: "Estudio dinámico de elementos típicos constructivos de México incluyendo un material de cambio de fase", el M.C. García Pérez podrá realizar una estancia de aproximadamente 11 meses, del 14 de febrero al 20 de diciembre de 2022. Asimismo, cabe mencionar que el alumno debe seguir las indicaciones del Plan para el Retorno Seguro a las Actividades del CICESE y las medidas indicadas por la Comisión de Seguridad durante su estancia en CICESE.

Sin más por el momento, le envío un cordial saludo.

Atentamente

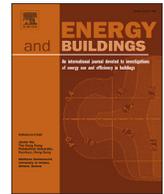


**Dra. Ivett Zavala Guillén**  
Investigadora del Laboratorio de Energías Renovables.  
Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones  
División de Física Aplicada  
Email: [ivett@cicese.mx](mailto:ivett@cicese.mx)

# Anexo B

## Publicación de artículo

Durante la modelación de la transferencia de calor conjugada en una pared de block hueco se obtuvieron resultados preliminares; de ello derivó la evaluación de una pared de block hueco con y sin PCM bajo condiciones meteorológicas de Mérida, Yucatán, lo cual permitió la publicación de un artículo titulado: *Annual evaluation of a modified wall with PCM to reduce energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions in Southeast Mexico* en la revista *Energy & Buildings*, a continuación se muestra la portada de dicha publicación.



# Annual evaluation of a modified wall with PCM to reduce energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions in Southeast Mexico

D. García-Pérez<sup>a,\*</sup>, J. Xamán<sup>a,1</sup>, I. Zavala-Guillén<sup>b</sup>, Y. Chávez-Chena<sup>a</sup>, E. Simá<sup>a</sup>, J. Arce<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico CENIDET-TecNM-SEP, Prol. Av. Palmira S/N. Col. Palmira. Cuernavaca, Morelos, CP 62490, Mexico

<sup>b</sup> Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Carretera Ensenada-Tijuana No. 3918, Ensenada, Baja California, CP 22860, Mexico

## ARTICLE INFO

### Keywords:

CFD  
Phase change material  
Thermal comfort  
Red brick  
Hollow block

## ABSTRACT

This research shows the numerical thermal evaluation of walls commonly used in Mexico under Merida, Yucatan weather conditions. At first, the thermal behavior of the hollow block wall (HB) was compared with the red brick wall (RB) for the warmest and coldest days of the year. Afterward, the annual thermal evaluation of an HB with and without a PCM layer (HBP) was carried out. The PCM layer was a 10 mm thick layer of RT25HC, located between the HB and the plaster facing the indoor. The results showed that the HB reduces the heat flow by 14.6% during the warmest day and increases it by 1.9% during the coldest day, compared to the RB wall. Besides, the HBP reduced the heat flux up to 48.7% regarding HB and showed a time lag in the maximum temperature of up to 3.86 h during the warmest day. Also, the PCM layer reduced the monthly CO<sub>2</sub> emissions of the HB up to 56.4%. Therefore, incorporating a PCM layer on HB is highly recommended for buildings in Merida and similar climatic regions to reduce their energy demand and carbon footprint.

## 1. Introduction

The building sector is strongly related to climate change due to CO<sub>2</sub> emissions by electrical energy consumption. According to International Energy Agency (IEA), 80.9% of energy in 2019 was generated by hydrocarbons consumption, besides the building sector was responsible directly and indirectly for around one-third of global energy- and process-related to CO<sub>2</sub> emissions. Xiang et al. [1] mentioned that the residential sector represents 17% of global CO<sub>2</sub> emissions. Natural gas consumption increased by 15%, coal consumption remained relatively constant from 2000 to 2010, and electricity increased by 39% this decade [2]. In 2021, electricity accounted for nearly 35% of building energy use which was 5% more than in 2010. Besides, space cooling showed the most significant increase in demand across all buildings' end uses, an increase of over 6.5% concerning 2020. Unfortunately, in 2021 at least 35% of entire buildings' energy demand worldwide was still met by fossil fuels. In 2018, buildings demand accounted for 24% of total final energy consumption in Central and South America and 21% of total process-related CO<sub>2</sub> emissions [3]. Besides, the operational energy consumption in Mexico accounted for 18% of the total final energy

[4], and according to He et al. [5], Mexico is the 12th biggest emitter of CO<sub>2</sub> globally, accounting for 1% of global pollution. In consequence, the carbon emissions from building operations must be reduced by a half to achieve the Net Zero Scenario milestones by 2030. Improved building envelopes that reduce thermal energy demand and maintain thermal comfort contribute significantly to that scenario [6].

As a result of international scientific efforts, different alternatives are available to reduce the energy consumption in buildings, such as the use of reflective coatings on walls [7], the addition of varying insulation materials [8–10], air cavities on their structure [11], and recently the use of phase change materials (PCM) in different walls configurations [12]. The effect of air cavities on the wall's thermal behavior has been studied over the last years by varying the holes quantity and their size inside them.

Another way to improve the walls thermal behavior is by modifying their physical structure using hollows in blocks and bricks. This behavior has been studied over the last years by varying the cavities quantity and their size inside them. Similar studies carried out by del Coz Díaz et al. [13] showed that increasing the number of holes inside the brick and reducing the thermal conductivity of the mortar improves

\* Corresponding author.

E-mail addresses: [daniel.garcia17ma@cenidet.edu.mx](mailto:daniel.garcia17ma@cenidet.edu.mx) (D. García-Pérez), [jesus.xv@cenidet.tecnm.mx](mailto:jesus.xv@cenidet.tecnm.mx) (J. Xamán), [ivett@cicese.mx](mailto:ivett@cicese.mx) (I. Zavala-Guillén), [yvonne.cc@cenidet.tecnm.mx](mailto:yvonne.cc@cenidet.tecnm.mx) (Y. Chávez-Chena), [efrain.sm@cenidet.tecnm.mx](mailto:efrain.sm@cenidet.tecnm.mx) (E. Simá), [jesus.al@cenidet.tecnm.mx](mailto:jesus.al@cenidet.tecnm.mx) (J. Arce).

<sup>1</sup> Dedicated to the memory of professor Jesús Perfecto Xamán Villaseñor, whose contributions were far-reaching for science.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113129>

Received 23 February 2023; Received in revised form 26 April 2023; Accepted 27 April 2023

Available online 5 May 2023

0378-7788/© 2023 Elsevier B.V. All rights reserved.

# Anexo C

## Conferencias y cursos

En Noviembre del 2021, se impartió un taller titulado: *Conducción de calor en una o dos dimensiones con matlab* en el Congreso Internacional de Ingenierías 2021 del Instituto Tecnológico Superior de Misantla (ITSM). Durante la estancia en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), se impartió la plática titulada: *Alternativas de paredes para el confort térmico y ahorro de energía* el 3 de octubre del 2022 en la Semana de Ingeniería Electrónica y Mecatrónica del Tecnológico Nacional de México Campus Ensenada (TecNM-Campus Ensenada). Posteriormente, el 5 de octubre del 2022 se realizó una exposición titulada: *Modelado de sistemas pasivos para la climatización y ahorro de energía en edificaciones* en el Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones del CICESE. Por último, se participó como presentador en el Laboratorio de Energías Renovables del CICESE durante el evento “Casa Abierta” en mayo del 2023. A continuación se presenta los documentos que respaldan las platicas y taller descritos.



18, 19 y 20 de Noviembre  
**ECONOMÍA CREATIVA**  
 PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

# CONSTANCIA COMO TALLERISTA

EL INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA OTORGA ESTE RECONOCIMIENTO A:

**MC. DANIEL GARCÍA PÉREZ**

POR IMPARTIR EL TALLER:

## CONDUCCIÓN DE CALOR EN UNA O DOS DIMENSIONES CON MATLAB

EN EL MARCO DEL CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍAS 2021 "ECONOMÍA CREATIVA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE" LOS DÍAS 18, 19 Y 20 DE NOVIEMBRE DE 2021, CON UNA DURACIÓN DE 8 HORAS EN MODALIDAD VIRTUAL.

MISANTLA, VER. A 19 DE NOVIEMBRE DE 2021.



DIRECCIÓN  
30EIT0002T

Dr. Daniel Vázquez Vázquez  
 Director General Instituto Tecnológico Superior de Misantla



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN VERACRUZ



VERACRUZ  
GOBIERNO  
DEL ESTADO



SEV  
SECRETARÍA  
DE EDUCACIÓN



SEMSYS  
Subsecretaría de Educación  
Media Superior y Superior



DET  
Zona de Educación  
Tecnológica del Estado  
Veracruz



SOYTEC MISANTLA  
CONGRESO INTERNACIONAL  
DE INGENIERÍAS 2021



**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO**  
**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ENSENADA**

OTORGAN EL PRESENTE  
**RECONOCIMIENTO**

A

**M.C. Daniel García Pérez**

Por impartir la plática:

**Alternativas de paredes para el confort térmico  
y ahorro de energía**

Como parte de la Semana de Ingeniería Electrónica y Mecatrónica,  
en el marco del XXV Aniversario del  
Instituto Tecnológico de Ensenada del TecNM.

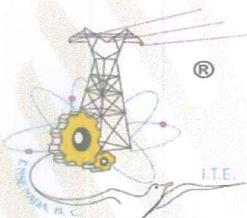
ATENTAMENTE

*EXCELENCIA EN EDUCACIÓN TECNOLÓGICA®  
POR LA TECNOLOGÍA DE HOY Y DEL FUTURO®*

**VALENTÍN ARQUÍMEDES SÁNCHEZ BELTRÁN**  
DIRECTOR



Ensenada, Baja California, a 03 de octubre de 2022



No. Folio: CYD-R/128/2022





EL DEPARTAMENTO DE ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES

*Otorga el presente:*

## RECONOCIMIENTO

*M. en C. Daniel García Pérez*

Por su valiosa participación dentro del ciclo de Seminarios y Conferencias con su exposición titulada:  
**"Modelado de sistemas pasivos para climatización y ahorro de energía en edificaciones"**

Ensenada, Baja California México, a 05 de octubre de 2022.

**Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada**

*2022 "Año de Ricardo Flores Magón"  
Pionero de la Revolución Mexicana"*

**2022 Flores  
Magón**  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES



**Dr. Jassiel Rolando Rodríguez Barreras**  
Coordinador de Seminarios Eyt

**Dr. Luis Alejandro Márquez Martínez**  
Jefe del Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones



Centro de Investigación Científica y de Educación  
Superior de Ensenada, Baja California

## División de Física Aplicada

Otorga la presente

**CONSTANCIA A:**

# Daniel García Pérez

Por su participación activa como presentador en el **Laboratorio de Energías Renovables** durante el evento "Casa Abierta", llevado a cabo del 16 al 18 de mayo del 2023, invirtiendo 5 horas.

---

Dr. Eugenio Méndez Méndez  
Director de la División de Física Aplicada  
CICESE