



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

# UNIVERSIDAD DE SONORA

---

## DIVISIÓN DE INGENIERÍA

### POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

#### ANÁLISIS DINÁMICO DE UN SISTEMA SOLAR PASIVO DE MURO TROMBE CON UN MATERIAL DE CAMBIO DE FASE BAJO CONDICIONES CLIMÁTICAS DE MÉXICO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

PRESENTA:

ING. LUIS FERNANDO APARICIO MERCADO

DIRECTOR: DR. IRVING OSIRIS HERNÁNDEZ LÓPEZ

Hermsillo, Sonora

agosto, 2021

# Repositorio Institucional UNISON



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



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

# UNIVERSIDAD DE SONORA

## APROBACION DEL JURADO

de la tesis presentada por:

**Luis Fernando Aparicio Mercado**

Esta tesis ha sido revisada por cada uno de los miembros del Jurado y por mayoría de votos la han encontrado satisfactoria.

1/09/'21  
Fecha

  
\_\_\_\_\_  
HERNANDEZ LOPEZ IRVING OSIRIS  
Presidente

1/09/'21  
Fecha

  
\_\_\_\_\_  
PIÑA ORTIZ ARMANDO  
Secretario

1/09/'21  
Fecha

  
\_\_\_\_\_  
HINOJOSA PALAFOX JESUS FERNANDO  
Vocal

1/09/'21  
Fecha

  
\_\_\_\_\_  
ZAVALA GUILLEN IVETT  
Sinodal Externo



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

# UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ingeniería

**Posgrado en Ciencias de la Ingeniería: Ingeniería Química**

## AUTORIZACIÓN DEL EXAMEN DE GRADO

31 de Agosto de 2021.

Por medio de la presente se hace constar que el estudiante **LUIS FERNANDO APARICIO MERCADO**, ha cumplido satisfactoriamente con los requisitos académicos correspondientes para la realización del Examen de grado del programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería.

*Abraham Rogelio Martín García*

**DR. ABRAHAM ROGELIO MÁRTIN GARCÍA**

**COORDINADOR DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA:  
INGENIERÍA QUÍMICA**

## RESUMEN

Se presenta la evaluación térmica de un sistema de muro Trombe con un material de cambio de fase (PCM-TW) bajo las condiciones climáticas de dos ciudades de clima generalmente frío: Tulancingo, Hidalgo y Tacubaya, Ciudad de México. Se consideró la incorporación del sistema PCM-TW a una habitación con temperatura de confort térmico de 24 °C. Para realizar la predicción numérica del sistema PCM-TW, por un lado, se implementó un modelo matemático basado en el método de balances globales (BG) para la conducción en el vidrio colector y la convección y radiación en el canal de aire; mientras que para la difusión térmica en el muro masivo con PCM, se utilizó el método de volumen finito (MVF). El acoplamiento de los modelos produjo un sistema de ecuaciones algebraicas que se resolvió mediante un código numérico en desarrollado en Fortran. En una primera etapa del trabajo, se realizó un estudio para determinar el PCM con el punto de fusión óptimo para el calentamiento pasivo. Se encontró que el PCM con punto de fusión de 29 °C presenta el mejor rendimiento térmico en términos de almacenamiento de energía y de energía suministrada por la noche con respecto a PCMs con puntos de fusión de 37, 48 y 60 °C. En la segunda etapa del estudio, se realizó la evaluación anual del sistema PCM-TW usando el PCM con punto de fusión de 29 (P29-TW). El desempeño de este sistema se comparó contra un muro Trombe de concreto (C-TW). Se observó que, para los días más fríos del año en ambas ciudades, el sistema C-TW presentó un mejor desempeño en el periodo diurno, mientras que el P29-TW mostró un mejor desempeño en el suministro de energía por la noche. Para Tulancingo, la energía suministrada en el día por el P29-TW fue 29.6 % inferior al C-TW, mientras que la energía suministrada en la noche por el P29-TW fue 84.1 % superior al C-TW. Por otro lado, para la alcaldía de Tacubaya, la energía suministrada en el día por el P29-TW fue 27.9 % inferior al C-TW, mientras que la energía suministrada en la noche por el P29-TW fue 125 % superior al C-TW. Con base en los resultados de la evaluación anual, es posible afirmar que el sistema C-TW es recomendable para una edificación con un uso exclusivamente diurno; mientras que, si el propósito de la edificación es un uso puramente nocturno, el sistema P29-TW es la mejor alternativa para el calentamiento pasivo.

## ABSTRACT

The thermal evaluation of a Trombe wall system with a phase change material (PCM-TW) is presented under the climatic conditions of two cities with a generally cold climate: Tulancingo, Hidalgo and Tacubaya, Mexico City. The incorporation of the PCM-TW system into a room with a thermal comfort temperature of 24 °C was considered. To carry out the numerical prediction of the PCM-TW system, on the one hand, a mathematical model based on the global balance method (BG) was implemented for conduction in the collecting glass and convection and radiation in the air channel; while for the thermal diffusion in the massive wall with PCM, the finite volume method (MVF) was used. The coupling of the models produced a system of algebraic equations that was solved by a numerical code developed using Fortran. In a first stage of the work, a study was carried out to determine the PCM with the optimum melting point for passive heating. It was found that PCM with a melting point of 29 °C has the best thermal performance in terms of energy storage and energy supplied at night with respect to PCMs with melting points of 37, 48 and 60 °C. In the second stage of the study, the annual evaluation of the PCM-TW system was carried out using the PCM with a melting point of 29 (P29-TW). The performance of this system was compared against a concrete Trombe wall (C-TW). It was found that, for the coldest days of the year in both cities, the C-TW system presented a better performance in the daytime period, while the P29-TW showed a better performance in the power supply at night. For Tulancingo, the energy supplied during the day by the P29-TW was 29.6% lower than the C-TW, while the energy supplied at night by the P29-TW was 84.1% higher than the C-TW. On the other hand, for the municipality of Tacubaya, the energy supplied during the day by the P29-TW was 27.9% lower than the C-TW, while the energy supplied at night by the P29-TW was 125% higher than the C-TW. Based on the results of the annual evaluation, it is possible to affirm that the C-TW system is recommended for a building with exclusively daytime use; while, if the purpose of the building is a purely night use, the P29-TW system is the best alternative for passive heating.



---

---

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN .....</b>	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>V</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE TABLAS.....</b>	<b>XIII</b>
<b>NOMENCLATURA .....</b>	<b>XIV</b>
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Justificación.....</b>	<b>8</b>
<b>1.3. Objetivo General.....</b>	<b>8</b>
<b>1.4. Objetivos Específicos .....</b>	<b>9</b>
<b>1.5. Alcance.....</b>	<b>9</b>
<b>1.6. Estructura de la Tesis .....</b>	<b>10</b>
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>11</b>
<b>ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1. Estudios de TW sin PCM .....</b>	<b>11</b>



---

<b>2.2. Estudios de TW con PCM .....</b>	<b>15</b>
<b>2.3. Conclusión de la Revisión Bibliográfica .....</b>	<b>20</b>
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>21</b>
<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>21</b>
<b>3.1. Modelo Físico.....</b>	<b>21</b>
<b>3.2. Modelo Matemático del PCM-TW .....</b>	<b>25</b>
<b>3.3. Metodología de Solución .....</b>	<b>29</b>
3.3.1. Desarrollo de balances globales .....	29
3.3.2. Implementación del método de volumen finito en el sistema de muro-PCM .....	40
3.3.3. Metodología del calor específico efectivo .....	45
3.3.4. Residuales del proceso iterativo.....	48
3.3.5. Bajo-relajación del proceso iterativo.....	49
3.3.6. Procedimiento general de solución del modelo matemático .....	50
<b>3.4. Verificación del Código Numérico .....</b>	<b>53</b>
3.4.1. Actividades de verificación para el modelo difusivo del método de volumen finito (MVF) 55	
3.4.2. Actividades de verificación para el modelo de Balances Globales De Energía (BG).....	70
3.4.3. Validación del modelo conductivo en una losa de concreto .....	75
3.4.4. Estudio de independencia de malla e independencia de paso de tiempo.....	78
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>82</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>82</b>
<b>4.1. Parámetros de Estudio .....</b>	<b>82</b>

---

<b>4.2. Estudio Paramétrico del Sistema: Efecto del Punto de Fusión del PCM .....</b>	<b>84</b>
<b>4.3. Evaluación Anual del PCM-TW .....</b>	<b>97</b>
4.3.1. Tulancingo, Hidalgo (Cwa/Cwb) .....	98
4.3.2. Tacubaya, Ciudad de México (Cwb) .....	108
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>118</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>118</b>
<b>5.1. Conclusiones .....</b>	<b>118</b>
<b>5.2. Recomendaciones Para Trabajos Futuros.....</b>	<b>120</b>
<b>CAPÍTULO 6 .....</b>	<b>122</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>122</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>127</b>
<b>Anexo A: Datos climáticos del día más frío.....</b>	<b>127</b>

---

---

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> Diseño del muro Trombe de Morse (1881).....	3
<b>Figura 1.2.</b> Modos de operación del sistema de muro Trombe de Morse. ....	4
<b>Figura 1.3.</b> Clasificación de los materiales de cambio de fase .....	7
<b>Figura 3.1.</b> Sección de TW en casa solar pasiva en Font-Romeu, Francia.....	23
<b>Figura 3.2.</b> Modelo físico del muro Trombe-PCM.....	24
<b>Figura 3.3.</b> Diagrama térmico resistivo del sistema TW-PCM .....	26
<b>Figura 3.4.</b> Modelo físico del sistema muro masivo.....	28
<b>Figura 3.5.</b> Nodo representativo de una malla arbitraria. ....	41
<b>Figura 3.6.</b> Diagrama de flujo del código desarrollado. ....	52
<b>Figura 3.7.</b> Descripción de la metodología realizada .....	54
<b>Figura 3.8.</b> Modelo físico de una losa convencional unidimensional con condiciones de tipo Dirichlet. ....	55
<b>Figura 3.9.</b> Comparación entre la solución analítica y la solución MVF con 51 nodos computacionales.....	56
<b>Figura 3.10.</b> Modelo físico de una losa convencional unidimensional con condiciones de frontera de primera clase.....	57
<b>Figura 3.11.</b> Comparación entre la solución analítica y la solución obtenida por el MVF. ....	58
<b>Figura 3.12.</b> Modelo físico del sistema de losa compuesta de ladrillo, concreto y adobe .....	59
<b>Figura 3.13.</b> Comparación del perfil de temperatura entre la solución analítica y la solución.....	60
<b>Figura 3.14.</b> Modelo físico de una losa uniforme con condiciones de frontera de primera clase. ....	61
<b>Figura 3.15.</b> Comparación del perfil de temperatura del concreto y plomo entre la solución analítica y la solución del MVF para distintos instantes de tiempos. ....	62

---

<b>Figura 3.16.</b> Modelo Físico de una losa de concreto con condiciones de Frontera de Robin y Dirichlet .....	63
<b>Figura 3.17.</b> Modelo físico de losa-PCM.....	65
<b>Figura 3.18.</b> Comparación de la distribución obtenida por el presente estudio con la solución exacta Solomon (1979) y fracción líquida Arici et al (2018).....	66
<b>Figura 3.19.</b> Modelo físico de losa compuesta concreto-PCM.....	67
<b>Figura 3.20.</b> Distribución de temperaturas para un sistema losa concreto-PCM en tres instantes de tiempo.....	69
<b>Figura 3.21.</b> Modelo físico del sistema canal. ....	71
<b>Figura 3.22.</b> Modelo físico del sistema colector-canal. ....	73
<b>Figura 3.23.</b> Datos meteorológicos para la validación: (a) $G_{sol}$ , (b) $T_{amb}$ , $V_{wind}$ .....	75
<b>Figura 3.24.</b> Comparación de la Temperatura exterior de la losa de concreto. ....	77
<b>Figura 4.1.</b> Efecto del punto de fusión sobre la temperatura de la pared semitransparente. ....	86
<b>Figura 4.2.</b> Efecto del punto de fusión sobre la temperatura del fluido en el canal. ....	88
<b>Figura 4.3.</b> Efecto del punto de fusión sobre la temperatura de la superficie absorbidora. ....	88
<b>Figura 4.4.</b> Efecto del punto de fusión sobre la energía almacenada en el muro. ....	90
<b>Figura 4.5.</b> Efecto del punto de fusión sobre la fracción líquida media. ....	90
<b>Figura 4.6</b> Efecto del punto de fusión sobre el flujo de calor del muro masivo.....	93
<b>Figura 4.7.</b> Efecto del punto de fusión en el calor útil suministrado al canal.....	94
<b>Figura 4.8.</b> Efecto del punto de fusión en el flujo de calor al interior de la edificación. 94	
<b>Figura 4.9.</b> Comportamiento de las temperaturas $T_{abs}$ , $T_{wall}$ y $T_{amb}$ : Tulancingo. ....	99
<b>Figura 4.10.</b> Comportamiento de $T_{f,out}$ para un P29-TW y un C-TW: Tulancingo.....	101
<b>Figura 4.11.</b> Perfiles de temperatura para el muro masivo: Tulancingo.....	102
<b>Figura 4.12.</b> Comportamiento de los flujos de calor hacia la habitación: Tulancingo. 104	
<b>Figura 4.13.</b> Evaluación térmica anual de la energía almacenada/suministrada: Tulancingo. ....	107

---

<b>Figura 4.14.</b> Comportamiento de las temperaturas $T_{abs}$ , $T_{wall}$ y $T_{amb}$ : Tacubaya. ....	109
<b>Figura 4.15.</b> Comportamiento de $T_{f,out}$ para un P29-TW y un C-TW: Tacubaya. ....	110
<b>Figura 4.16.</b> Perfiles de temperatura para el muro masivo: Tacubaya. ....	112
<b>Figura 4.17.</b> Comportamiento de los flujos de calor hacia la habitación: Tacubaya....	113
<b>Figura 4.18.</b> Evaluación térmica anual de la energía almacenada/suministrada: Tacubaya. .....	117

---

---

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.1.</b> Requerimientos termofísicos, cinéticos, químicos, económicos y ambientales de los PCM.....	6
<b>Tabla 1.2.</b> Comparación de diferentes tipos de PCM's .....	7
<b>Tabla 3.1.</b> Comparación de la solución analítica contra el MVF.....	61
<b>Tabla 3.2.</b> Comparación de la solución analítica contra el MVF del Ejercicio 1. ....	64
<b>Tabla 3.3.</b> Comparación entre la solución numérica contra la solución exacta de Solomon (1979) y fracción líquida de Arici et al (2018). ....	66
<b>Tabla 3.4.</b> Energía almacenada en el sistema a diferentes instantes. ....	69
<b>Tabla 3.5.</b> Flujo de calor obtenidos para el sistema canal mediante balances globales..	71
<b>Tabla 3.6.</b> Resultados obtenidos por medio del método de BG y conservación de energía. ....	72
<b>Tabla 3.7</b> Valores de flujo de calor obtenido mediante balances globales. ....	74
<b>Tabla 3.8.</b> Resultados obtenidos por medio del método de BG y conservación de energía. ....	74
<b>Tabla 3.9.</b> Propiedades radiativas y termofísicas físicas del concreto. ....	76
<b>Tabla 3.10.</b> Diferencia porcentual de la temperatura exterior. ....	78
<b>Tabla 3.11.</b> Análisis de independencia de malla. Datos para las 9 P.M. ....	79
<b>Tabla 3.12.</b> Análisis de independencia de paso de tiempo. Datos para las 9 P.M. ....	81
<b>Tabla 4.1.</b> Propiedades termofísicas de los PCM. ....	85
<b>Tabla 4.2.</b> Efecto del material sobre la energía almacenada y energía suministrada a la edificación (en MJ/m <sup>2</sup> ).....	95
<b>Tabla 4.3.</b> Evaluación anual de energía suministrada en kWh/m <sup>2</sup> .....	106
<b>Tabla 4.4.</b> Evaluación anual de energía suministrada en kWh/m <sup>2</sup> .....	116

---

## NOMENCLATURA

$A$	Área superficial del muro [ $m^2$ ]
$A_v$	Área transversal de las ventilas [ $m^2$ ]
$C$	Calor específico efectivo [ $J/kgK$ ]
$C_p$	Calor específico a presión constante [ $J/kgK$ ]
$F$	Factor de vista entre superficies
$f$	Fracción líquida
$G_{sol}$	Radiación solar incidente [ $W/m^2$ ]
$g$	Constante de gravedad [ $m/s^2$ ]
$H$	Altura de la habitación [ $m$ ]
$H_v$	Longitud de las ventilas [ $m$ ]
$h^{conv}$	Coefficiente convectivo [ $W/m^2K$ ]
$h_{fs}$	Calor latente de fusión [ $J/kgK$ ]
$L$	Longitud [ $m$ ]
$\dot{m}$	Flujo masico [ $kg/m^3$ ]
$q_c^*$	Calor útil normalizado ( $q_c^* = q_c A_c / A$ ) [ $W/m^2$ ]
$q$	Flujo de calor por unidad de superficie [ $W/m^2$ ]
$R_{BG}$	Residual del BG
$R_{MVF}$	Residual del MVF
$T$	Campo de temperatura en el muro almacenador [ $^{\circ}C$ ]
$T_{abs}$	Temperatura del absorbedor [ $^{\circ}C$ ]
$T_{amb}$	Temperatura ambiente [ $^{\circ}C$ ]
$T_f$	Temperatura del fluido en el canal [ $^{\circ}C$ ]
$T_{g1}$	Temperatura de la superficie del vidrio expuesta al exterior [ $^{\circ}C$ ]
$T_{g2}$	Temperatura del vidrio [ $^{\circ}C$ ]
$T_{g3}$	Temperatura de la superficie del vidrio al interior del canal [ $^{\circ}C$ ]
$T_{room}$	Temperatura de la habitación [ $^{\circ}C$ ]
$T_{sky}$	Temperatura de cielo [ $^{\circ}C$ ]
$\bar{V}$	Velocidad media del aire a través del canal [ $m/s$ ]
$W$	Ancho del muro [ $m$ ]

### Números adimensionales

Nu	Número de Nusselt
----	-------------------

---

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

### Símbolos griegos

$\alpha^*$	Absortancia
$\beta$	Coefficiente de expansión volumétrica [K <sup>-1</sup> ]
$\Delta x$	Espesor del volumen de control [m]
$\delta x$	Separación entre nodos [m]
$\varepsilon^*$	Emitancia
$\lambda$	Conductividad térmica [W/mK]
$\mu$	Viscosidad dinámica [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$\nu$	Viscosidad cinemática [m <sup>2</sup> /s]
$\rho^*$	Reflectancia
$\rho$	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann [W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]
$\tau^*$	Transmitancia

### Subíndices

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



---

## AGRADECIMIENTO

opcional

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

### 1.1. Introducción

Desde el surgimiento de las primeras civilizaciones, el ser humano aprendió a trabajar como una sociedad para satisfacer una serie de necesidades esenciales para su propia supervivencia. Entre estas necesidades se encuentran la alimentación, vestimenta, protección contra condiciones climáticas extremas y refugio ante posibles depredadores. En un principio, estos problemas se solucionaron cuando el ser humano aprendió a modificar y adaptar su entorno. Satisfacer estas necesidades a diferencia de otros seres vivos llevo al ser humano a manipular la naturaleza por medio de la ciencia. Con ello, le ha sido posible diseñar, construir e incluso mejorar dispositivos y/o máquinas para obtener bienes y servicios con los cuales logra satisfacer nuevas y distintas necesidades, ya no sólo las prioritarias. Sin embargo, la solución de estas necesidades en la actualidad ha permitido o un crecimiento excesivo de la población, lo que conlleva a un problema mayor. La sobrepoblación a nivel mundial. Solamente en el año 2015, se registró 7,300 millones de habitantes y las proyecciones sugieren que para el año 2050 se llegara a 11 mil millones de habitantes. Mientras tanto en México el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020) reportó en 2020, una población de 126 millones de habitantes.

Este incremento de población implica cubrir la demanda de más servicios y necesidades, lo que conduce a un problema de alto consumo energético y producción insostenible incluso para los recursos naturales del planeta Tierra. De esta manera, es factible argumentar que el actual modo en que se producen los bienes y servicios conlleva un alto costo.

Ante cada nueva problemática la ciencia y su comunidad entra en escena proponiendo el uso de fuentes de energía que excluya la combustión de hidrocarburos. Dando inicio al

uso de fuentes de energía renovables, tales como la solar fotovoltaica, solar fototérmica, mareomotriz, hidráulica, eólica y geotérmica. Particularmente la energía solar, además de ser una fuente de energía renovable, es una energía limpia y es tan abundante que se considera como una fuente inagotable de energía, siendo esto último clave para su aprovechamiento.

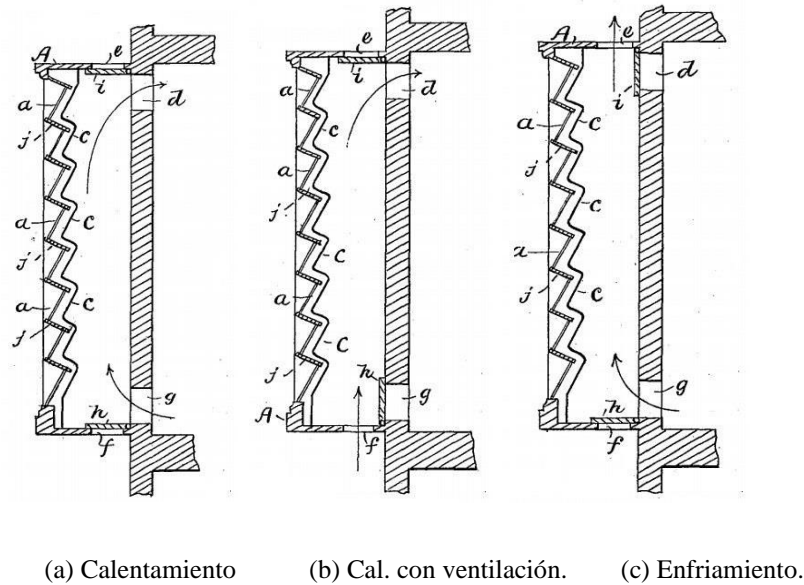
En este punto, cabe mencionar que actualmente existen tecnologías tradicionales como los equipos de aire acondicionado o calentadores que ayudan a mantener en condiciones térmicamente agradables en las edificaciones. Estos, son lugares donde pasamos la mayor parte de nuestro tiempo. En ellas desarrollamos nuestras actividades diarias. Sin embargo, la constante búsqueda del uso y mejora de estas condiciones de confort térmico conlleva a una constante demanda de recursos energéticos en las edificaciones. Esto contradice la filosofía del Desarrollo Sustentable concepto que surgió ante de la necesidad de obtener y producir nuestros bienes y servicios sin comprometer lo propio para las futuras generaciones.

Esto último se contextualiza con el hecho de que aproximadamente el 70 % de la energía eléctrica (fuente de alimentación de los A.A. y calefactores) producida en México proviene de la quema de combustibles fósiles (SENER, 2019). Esto incrementa de manera directa los gases de efecto invernadero, gases que provocan el calentamiento global. Así, el confort térmico en edificaciones ha ido convirtiéndose en unos de los grandes problemas a los que se enfrenta la sociedad contemporánea y representa un reto para la gestión energética.

El consumo global de energía en edificaciones se incrementó 14% en la última década (Nejat, 2015). Por ello, las edificaciones son responsables de una tercera parte de la emisión de gases de efecto invernadero. En este sentido, es imperativo encontrar alternativas para reducir el consumo de energía. Una de ellas es reducir la ganancia de energía solar en la envolvente de la edificación y, por otro lado, integrar sistemas solares pasivos eficientes para alcanzar condiciones de confort. En particular, para propósitos de calentamiento pasivo, el sistema de muro Trombe (TW) es una tecnología ideal. Este

---





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

Este sistema se compone básicamente de 5 elementos:

- 1) Colector: El colector solar está compuesto por un vidrio semitransparente o traslucido y tiene la función de recolectar la mayor cantidad de energía proveniente del sol y transmitirla con el fin de elevar la temperatura de un fluido.
- 2) Absorbedor: Es una superficie sólida, preferentemente de color negro. Esta es expuesta a la irradiación solar que ha sido transmitida a través del colector para su conversión en energía térmica.
- 3) Almacenador: El componente de almacenamiento está constituido por un material o materiales que posean una gran capacidad de almacenamiento de energía térmica para posteriormente utilizar dicha energía. El absorbedor y el almacén por lo

general son el mismo. La diferencia entra ambos es que al absorbedor es una superficie expuesta mientras que el almacenador es el material debajo de dicha superficie.

- 4) El Medio de Distribución: Método por el cual se entrega la energía recibida y/o almacenada a la habitación. Un buen diseño solar pasivo contempla los mecanismos de radiación, convección y conducción de transferencia de calor para este fin.
  
- 5) El Sistema de Control: Regula la pérdida y/o ganancia de calor en los sistemas solares pasivos de acuerdo con las condiciones en las que se opera.

Sin embargo, la incorporación de Materiales de Cambio de Fase (PCM) al muro incrementa su capacidad de almacenamiento y con ello el desempeño térmico del sistema sin la necesidad de emplear muros gruesos.

Un material de cambio de fase ideal debe cumplir con ciertas características tales como: Uniformidad durante el cambio de fase, alta conductividad térmica, larga vida útil bajo varios ciclos de cambio de fase, temperatura de cambio de fase adecuada al proceso, elevada calor latente.

En general, las características adecuadas en los PCM de acuerdo Konstantinidis (2010) para su uso en edificaciones son presentadas en la Tabla 1.1. La mayoría de los PCM's utilizados para almacenar el calor latente en edificaciones no cumplen con todos los requisitos enlistados en la Tabla 1.1. Por lo tanto, se deben elegir el PCM con las mejores características y diseñar el sistema de acuerdo con la aplicación específica.

Por lo tanto, para realizar la mejor selección del PCM a utilizar, la Figura 1.3 muestra la clasificación de los PCM y la Tabla 1.2 resume las ventajas y desventajas de los diferentes PCM.

**Tabla 1.1.** Requerimientos termofísicos, cinéticos, químicos, económicos y ambientales de los PCM.

<b>Requerimientos termofísicos</b>	<b>Requerimientos cinéticos</b>	<b>Requerimientos químicos</b>	<b>Requerimientos económicos y ambientales</b>
-Temperatura apropiada de fusión en el rango de temperaturas requerido	-Alta velocidad de nucleación para evitar el sobre enfriamiento de la fase líquida.	- Estabilidad química a largo plazo del PCM.	- Precio bajo y rentable.
-Alta calor latente de fusión	- Alta tasa de cristalización para satisfacer las demandas	- No se degrada después de los ciclos de congelación / fusión.	- Disponibilidad
-Alto calor específico	de recuperación de calor del sistema de almacenamiento.	- Ciclo completo de congelación / derretido reversible.	-No contaminante.
-Alta conductividad térmica de fases sólidas y líquidas		- Sin corrosividad.	- Medioambiental bajo impacto.
-Presión de vapor pequeña.		-Materiales no inflamables, no tóxicos y no explosivos para mayor seguridad.	- Buena reciclabilidad.
-Pequeños cambios de volumen			- Energía incorporada baja.
-Poco o ningún subenfriamiento durante la congelación			- Facilidad de separación de otros materiales.
-Sin segregación			
-Estabilidad cíclica.			



**Figura 1.3.** Clasificación de los materiales de cambio de fase

**Tabla 1.2.** Comparación de diferentes tipos de PCM's

Clasificación	Ventajas	Desventajas
Orgánicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>No corrosivos</li> <li>Estabilidad térmica y química</li> <li>Subenfriamiento nulo</li> <li>Disponible en un intervalo amplio de temperaturas</li> <li>Compatibles con materiales de construcción convencionales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cambio de volumen relativo</li> <li>Baja conductividad térmica</li> <li>Flamables</li> </ul>
Inorgánicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Elevado calor latente</li> <li>Disponibles a bajo costo</li> <li>Alta conductividad térmica</li> <li>Pequeños cambios de volumen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Subenfriamiento considerable</li> <li>Segregación de fase</li> <li>Corrosivos</li> </ul>
Eutéticos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperatura de fusión aguda</li> <li>Alta densidad de almacenamiento térmico volumétrico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Falta de disponibilidad de datos de propiedades termofísicas</li> </ul>



Por consiguiente, se prevé que el uso de un PCM adecuado en el TW mejore su desempeño. Sin embargo, un PCM para edificaciones debe cumplir requerimientos como no ser tóxico, ser ignífugo, tener cambios de volumen pequeños e intervalo de temperatura de cambio de fase apropiados al clima aplicado, entre otros. Esto, aunado con la diversidad de climas, complica la tarea de selección del PCM. Así, el propósito de este proyecto es realizar un análisis dinámico de un sistema PCM-TW para climas de México.

## **1.2. Justificación**

De acuerdo con lo anterior, para el calentamiento pasivo mediante TW, existe la necesidad de construir muros suficientemente gruesos (entre 20 y 30 cm) como para almacenar energía y extender el calentamiento pasivo un par de horas después de la puesta del sol mediante la liberación de energía a través de los mecanismos de convección y radiación. Sin embargo, se prevé que la incorporación de Materiales de Cambio de Fase (PCM) al muro incrementará su capacidad de almacenamiento y con ello el desempeño térmico del sistema sin la necesidad de emplear muros gruesos. Así, el propósito de este proyecto es realizar un análisis dinámico de un sistema PCM-TW con un muro de 11 cm para climas de México. Se analizará la energía almacenada y suministrada en periodos diurnos y nocturnos para determinar el mejor desempeño entre un sistema convencional (C-TW) y uno con PCM (PCM-TW).

## **1.3. Objetivo General**

Realizar un estudio numérico de la transferencia de calor en un sistema solar pasivo de muro Trombe con la incorporación de un material de cambio de fase apropiado y analizar su impacto en el ahorro de energía de edificaciones bajo condiciones climáticas de México.

### 1.4. Objetivos Específicos

- Resolver de manera numérica la transferencia de calor conjugada de un sistema de muro Trombe con y sin un material de cambio de fase como componente de una edificación para evaluar su desempeño térmico.
- Validar el código numérico desarrollado con datos de un prototipo experimental reportado con un trabajo reportado en la literatura.
- Seleccionar un clima de México generalmente frío para la evaluación del sistema.
- Elegir el material de cambio de fase apropiado para el clima seleccionado.
- Realizar una evaluación térmica del sistema considerando el día más frío del año en una ciudad representativa del clima seleccionado.
- Comparar el desempeño térmico del sistema de muro Trombe con PCM con respecto a un muro Trombe convencional.

### 1.5. Alcance

Desarrollar un código numérico para predecir el desempeño térmico de un sistema solar de calentamiento pasivo de muro Trombe al resolver la ecuación de conservación de la energía. Se modelará el sistema de muro Trombe con PCM considerando la transferencia de calor conjugada en estado transitorio usando datos de radiación solar, velocidad del viento y temperatura ambiente de una ciudad mexicana con clima generalmente frío.

## **1.6. Estructura de la Tesis**

La tesis está formada por un total de seis capítulos, a continuación, se presenta una breve descripción del contenido de los capítulos.

Capítulo 2. En este Capítulo se presentan los antecedentes bibliográficos consultados, estos fueron divididos en estudios de TW con y sin PCM.

Capítulo 3. En este Capítulo se describe el modelo físico y matemático del sistema de muro Trombe con PCM, se desarrolla la metodología para la solución del modelo matemático, se presentan las consideraciones y suposiciones que se establecieron en el presente trabajo de investigación, adicionalmente se presenta la verificación del código numérico desarrollado para dar solución al modelo matemático del TW-PCM, junto a un estudio de independencia de malla y selección de paso de tiempo.

Capítulo 4. En este Capítulo se muestran los resultados obtenidos de la evaluación térmica del TW-PCM considerando los días más fríos de cada mes durante un año para dos ciudades de la República Mexicana: Tacubaya, CDMX y Tulancingo, Hidalgo. Adicionalmente se muestran los resultados de una comparación del desempeño térmico del TW-PCM con respecto a un TW-Convencional.

Capítulo 5. En este Capítulo después de haber analizado los resultados presentados en el Capítulo 4, se describen las conclusiones obtenidas del presente estudio y se enlistan las recomendaciones para trabajos futuros.

Capítulo 6. Finalmente, se presenta la bibliografía consultada, así como los anexos añadidos.

## CAPÍTULO 2

### ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

A continuación, se presenta la revisión bibliográfica relacionada con el estudio de TW y su implementación en edificaciones. De acuerdo con la literatura revisada, se encontró que se han estudiado bastante sobre el desempeño térmico del TW convencionales bajo diferentes condiciones climáticas, sin embargo, la implementación de PCM son relativamente recientes, debido a esto fue necesario realizar la siguiente clasificación:

#### 2.1. Estudios de TW sin PCM

Balcomb et al. (1977), los autores realizaron el análisis teórico de edificios pasivos para calefacción solar, los autores desarrollaron un modelo de simulación dinámica mediante el método de balances globales en una dimensión. Se consideraron tres espesores de muro: 15.24, 30.48 y 60.96 cm, para intervalos de modelación de una hora y se utilizaron datos meteorológicos de Los Álamos, Nuevo México. De los resultados, los autores encontraron que, el espesor de 15 cm es muy sensible a los cambios de radiación solar, por lo tanto, con un vidrio doble y el muro de 60.96 cm de espesor, se obtuvo el mejor desempeño. Los autores concluyeron que, para una misma área de vidriado, el rendimiento es comparable al de un sistema de colector convencional de aire o líquido refrigerado, esto se puede alcanzar con un sistema de calentamiento solar pasivo de diseño optimizado.

Ohanessian y Charters (1978), evaluaron el desempeño térmico del modelo de muro Trombe usado por Felix Trombe y Jaques Michel. Este sistema fue empleado para un modelo de casa convencional de Melbourne, Australia. Consideraron una losa de concreto como el muro absorbedor, mismo que fue pintado de color negro para aumentar la absorción de energía solar. Los datos de radiación solar se obtuvieron experimentalmente para Melbourne, considerando un período de 28 días (18 de julio de 1974 -14 de agosto

de 1974). Establecieron correlaciones empíricas para evaluar la contribución del calor convectivo. Adicionalmente establecieron diferentes casos de estudio, como variar el espesor del muro almacenador, la pared de vidrio simple, vidrio doble con y sin calefacción auxiliar. Los autores concluyeron que el espesor del muro almacenador de 25 cm es óptimo con el apoyo de una calefacción auxiliar y la ventaja térmica del vidrio doble es mínima siendo no recomendado para zonas de clima moderado. Compararon estos resultados con un modelo convencional de pared de vidrio. Finalmente, los autores explicaron que es posible obtener ahorros de energía de aproximadamente 40%.

Utzinger et al. (1980), realizaron un estudio teórico de un muro Trombe mediante el método de balances globales. Con el propósito de reducir la complejidad del modelo teórico y a su vez, el tiempo de cómputo, en este estudio se propuso un modelo unidimensional alimentado con información de un perfil de velocidades bidimensional. Los autores compararon los resultados del desempeño de un sistema de muro Trombe obtenidos por un modelo unidimensional, un modelo bidimensional y un modelo unidimensional con perfil exponencial. Encontraron que, el modelo propuesto reproduce satisfactoriamente los resultados obtenidos con el modelo bidimensional.

Akbarzadeh et al. (1982), trabajaron de manera experimental las características de la circulación del muro Trombe, los autores variaron para diferentes tamaños el espesor del canal y configuraciones de ventilas, de esta manera determinaron el de flujo a través del canal. Con base en los resultados, los autores reportaron que el rendimiento de la circulación es mejor para un espesor de 25 cm del canal mientras que es la diferencia es mínima en el rendimiento de la circulación cuando se usan alturas de ventilación de 17 cm y 9.5 cm. sugieren que las pérdidas de ventilación no son significativas cuando se comparan con el conducto y otras pérdidas de flujo. Los autores, hallaron que el flujo, presenta un régimen turbulento a lo largo de toda la altura del canal. Este se origina por la diferencia de áreas entre las ventilas frente al área del canal. Los autores sugirieron que los procesos de transferencia de calor en el canal se pueden modelar como un problema

de convección natural turbulenta entre dos placas planas isotérmicas verticales independientes.

Cuevas (2008), realizó un estudio numérico de la transferencia de calor conjugada en un sistema solar pasivo de muro Trombe. El sistema consistió en una habitación con una pared semitransparente, un muro masivo formando un canal con aperturas en la parte superior e inferior hacia la habitación. El autor consideró, flujo en régimen laminar, transferencia de calor por conducción, convección, un flujo radiativo incidente sobre el muro, pérdidas convectivas y radiativas al exterior de la pared semitransparente. La solución fue a través del método de volumen finito para ello consideró: flujo incompresible, aproximación de Boussinesq, fluido newtoniano, difusión viscosa despreciable y fluido no-participante. Considerando el tipo de material del muro Trombe, el concreto resulto ser el más efectivo, analizando los espesores del muro se encontró que, el calor transferido a la habitación es inversamente proporcional al espesor de muro, El autor concluyó que, el sistema de muro Trombe de concreto y con un espesor de 1/30 de la longitud de la habitación con un canal de 1/15 de la longitud de la habitación es óptimo para aprovechar la energía solar.

Hami et al. (2012), realizaron un estudio numérico bidimensional en estado transitorio para determinar el desempeño de un muro solar. El estudio se realizó con datos de la ciudad de Bechar, Argelia. Para el acople de las ecuaciones gobernantes utilizaron el algoritmo SIMPLE y el esquema de interpolación Power-Law. Con base en los resultados los autores hallaron que, la temperatura de la habitación aumenta por efecto de la circulación, la inercia térmica del muro desempeña la tarea de almacenamiento para calentar la habitación en la noche. En invierno las temperaturas en la habitación se encuentran entre 18 °C a 24°C. Los autores concluyeron que un factor determinante en el desempeño térmico es el tipo de material con que esté construido el muro. El uso rejillas como ventilación pueden suministrar un importante mecanismo de control tanto para calentar como para enfriar el edificio. La eficiencia del sistema puede alcanzar hasta el 48%.

Krüger et al. (2013), estudiaron el potencial experimentalmente de un sistema de muro Trombe en una zona subtropical de Brasil para enfriamiento y calefacción. Los autores construyeron, dos células una de control y de otra de prueba, utilizaron doble acristalamiento, un vidrio exterior de 4 mm y otro vidrio interno de 5 mm de espesor. Los autores encontraron que, para invierno el modo de operación de calefacción con ventilación presenta las condiciones más favorables en términos de mantener el interior más cálido durante el día y reducir la oscilación de la temperatura diurna en el interior. Los autores concluyeron que, particularmente para las ubicaciones subtropicales analizadas, el sistema se comportó razonablemente bien debido a la alta elevación solar en verano, lo que no requiere la necesidad de dispositivos de sombreado. La comparación con celda de control produjo un alto potencial de enfriamiento y calentamiento del espacio interior, lo que es consistente con las estimaciones de la literatura de alrededor del 30% anual en la reducción del consumo de energía.

A pesar de que no se considera un PCM, el único estudio sobre un sistema de muro Trombe bajo condiciones climáticas de México es el de Hernández-López et al. (2016), los autores determinaron que la capacidad la energía máxima almacenada por un TW de concreto es de aproximadamente 109 MJ durante un día frío en la ciudad de Huitzilac, Morelos. Adicionalmente, estimaron que las pérdidas de energía térmica a través de la pared semitransparente son aproximadamente del 60%. Sin embargo, el sistema almacena suficiente energía para mantener el aire dentro de la habitación con una temperatura de hasta 35 ° C.

Adicionalmente Hernández-López. (2016) con base a un estudio paramétrico determino las dimensiones óptimas para la configuración de calentamiento y de ventilación. El autor determino que el incremento en muros mayores a 30 cm la temperatura en el interior disminuye ocasionando perdidas al exterior. De manera similar el incremento en el ancho del canal provoca un aumento en la temperatura del interior, así como las pérdidas a través del vidrio. Determino que para un ancho de canal igual o superior a 20 cm el efecto es mínimo. Con respecto al material del muro, el concreto logra una temperatura mayor en

la habitación, así como una mayor capacidad de almacenamiento de energía, presentando un mejor desempeño térmico respecto al adobe y ladrillo.

## **2.2. Estudios de TW con PCM**

En la literatura existen varios estudios sobre la aplicación de PCM en edificaciones. Sin embargo, estudios en donde se analice el efecto de la incorporación de PCM a muros Trombe son relativamente pocos. Entre los más trabajos representativos están los siguientes:

Ghoneim et al. (1991), quienes reportaron un estudio numérico de un muro Trombe con diferentes materiales de almacenamiento: concreto, sal de Glauber, parafina medicinal y cera P116. Su análisis numérico mostró que en general, los PCM presentan mejor desempeño térmico que el concreto tradicional en materia de almacenamiento de energía y entre ellos, el mejor fue la sal de Glauber. Los autores indicaron la importancia que tiene la selección de los contenedores del PCM, ya que es necesario garantizar compatibilidad química con el PCM para alargar su vida útil.

Más tarde, Onishi et al. (2001) estudiaron mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) el comportamiento térmico de un muro Trombe considerando tres hipotéticos PCM y comparándolos con concreto. Se estudió el efecto del intervalo de temperatura de fusión 30-31, 35-36, 20-21 °C para las condiciones climáticas de frío extremo en Sapporo, Japón. Encontraron que los tres PCM presentan mejor desempeño en horas nocturnas en comparación con el concreto. Sin embargo, para la ciudad de Sapporo resultó mejor el uso del PCM con intervalo de 20-21 °C. Los autores finalizaron con la indicación de que el proceso de selección de un PCM idóneo para otra ciudad es imperativo realizar un estudio más detallado, ya que el PCM idóneo para Sapporo podría no serlo para otras condiciones climáticas.



Posteriormente Fiorito (2012), realizó una investigación para evaluar el comportamiento térmico de muros Trombe integrados en construcciones ligeras. Utilizando materiales de cambio de fase, en sustitución de las pesadas masas de almacenamiento térmico, con el fin para mejorar el rendimiento energético del sistema. Consideraron cinco ciudades australianas de cinco zonas climáticas diferentes. Además, tomaron en cuenta las variaciones de la posición del PCM en las caras expuestas del muro y de las temperaturas del punto de fusión para definir la tecnología más adecuada para cada zona climática. El PCM más beneficioso fue el RT 27 el principal efecto positivo es una reducción constante de la variabilidad de la temperatura superficial tanto en las superficies externa como en la interna a la habitación. La integración de PCM en la superficie interna a la habitación es casi irrelevante para el patrón de distribución de las temperaturas.

Rabani et al. (2013) realizaron la predicción numérica del tiempo de calentamiento de una edificación en periodos nocturnos mediante el almacenamiento de energía en un muro Trombe para el clima de Yazd, Iran. Se consideraron paredes de concreto, ladrillo común, sal hidratada y cera de parafina. Se encontró que la cera de parafina alcanzó hasta 9 h de calentamiento, mientras que el concreto y el ladrillo calentaron durante 7 y 8 h, respectivamente.

Al-Saadi et al.(2015), desarrollaron y validaron un nuevo tipo de módulo de TRNSYS para simular paredes mejoradas con PCM. Usando el módulo validado, encontraron que la mejor configuración de PCM es cuando se coloca en contacto directo con el ambiente interior controlado. Además, se simuló una amplia gama de propiedades térmicas de PCM en climas típicos de Estados Unidos para evaluar el rendimiento térmico e identificar las propiedades térmicas óptimas. Los resultados mostraron que se logra un ahorro máximo del 0.8 al 15.8% en el gasto de refrigeración anual dependiendo del clima. Para climas dominados por la calefacción, el ahorro en el gasto por calefacción anual es insignificante y es inferior al 4%. Se encontró que el ahorro en las cargas pico muestra más potencial que las cargas anuales para algunos climas.

Iten et al. (2016), revisaron la aplicación de los estudios y tecnologías de PCM para el enfriamiento y calefacción gratuita de edificios. En esta revisión se discuten las tecnologías de almacenamiento de energía térmica en general y se detallan las ventajas y desventajas de cada uno. Los rendimientos térmicos de estos sistemas se investigaron mediante enfoques experimentales por ejemplo el uso de PCM en la envolvente del edificio presenta dificultades para intercambiar una alta tasa de calor y, por lo tanto, no es adecuado para climas extremos. Por lo tanto, se adoptan métodos activos para climas extremos para satisfacer la demanda. En general, cuando se aplica el método correcto, los sistemas de PCM han demostrado proporcionar de manera efectiva enfriamiento y calefacción gratuitos de los edificios a través de fuentes auxiliares.

Souayfane et al. (2016), presentaron una revisión general de las diferentes aplicaciones de PCM en edificaciones para reducir las cargas de refrigeración en diferentes condiciones climáticas y los factores que afectan el uso exitoso y eficaz del PCM. Se encontró que muchos inconvenientes en las aplicaciones PCM, principalmente donde el impacto de las condiciones climáticas es intenso como en verano afectan el rendimiento del PCM, dificultando principalmente lograr su completa solidificación durante la noche y, por lo tanto, limitando su efectividad durante el día. Proponen varias soluciones, entre ellas el uso de una estrategia de control adecuada, ventilación forzada para aumentar la transferencia de calor por convección. Además, el uso de aletas, cilindros y esferas para encapsular el PCM podría mejorar la eficiencia en el uso del PCM y aumentar los coeficientes de transferencia de calor por convección. Se encontró que la temperatura de fusión es el parámetro más influyente, algunos autores aprueban que las altas temperaturas de fusión de PCM parecen más efectivas para climas más cálidos, mientras que bajas temperaturas de fusión de PCM podrían ser más eficientes en climas fríos.

Leang et al. (2017), compararon los resultados experimentales y los resultados obtenidos a partir de un modelo numérico de un muro Trombe compuesto que incorpora un muro de almacenamiento de concreto con la ayuda del software Dymola / Modelica. La validación del modelo se realizó a partir de la comparación entre el flujo de calor simulado y medido,

las temperaturas de la superficie externa e interna y las temperaturas del fluido en una capa de aire ventilado. Luego, el modelo numérico se utilizó para simular un TW donde el muro de almacenamiento de concreto se reemplaza por un mortero mezclado con material de cambio de fase (PCM). Los resultados obtenidos muestran particularmente una gran capacidad de recuperación de calor por el TW-PCM (más del 50% en comparación con la pared de almacenamiento de concreto). Estos resultados obtenidos con un TW-PCM de 4 cm muestran un retardo de tiempo casi 4 veces menor que el obtenido con un muro de almacenamiento de concreto de 15 cm.

Wei et al. (2017), analizaron la literatura para evaluar los principios de selección de los PCM y compararon las opciones de software de selección de materiales disponibles. Propusieron varias técnicas de transferencia de calor para la mejora del rendimiento como posibles métodos alternativos para superar la mala conductividad térmica cuando se usa sal fundida a alta temperatura como PCM. Compararon y resumieron métodos comunes de medición de propiedades termofísicas utilizados en la literatura. Algunas de sus conclusiones fueron que los principios de selección de los PCM deben satisfacer los requisitos termodinámicos, cinéticos, químicos y económicos, no existen métodos estándares internacionales para probar PCM, los PCM y los sistemas de almacenamiento de energía con PCM se han investigado durante décadas, pero desafortunadamente, no se ha comercializado ninguna tecnología PCM de alta temperatura.

Xie et al. (2018), realizaron el análisis de rendimiento térmico de tableros de PCM durante un año para aplicaciones de construcción a través de simulaciones. El sistema consistió en una habitación con aire acondicionado en Beijing, China. Los autores variaron cinco tableros de PCM para el análisis del rendimiento térmico en diferentes zonas climáticas. La solución del modelo matemático se realizó a través del método de diferencias finitas. Los autores encontraron, efecto del cambio de fase en el rendimiento térmico durante un año mostrando en marzo y mayo que la relación de calor de los cinco tableros PCM es muy estrecha, lo que significa que el cambio de fase tiene poco efecto, y el rendimiento térmico de la placa PCM no puede mejorarse considerablemente al cambiar el calor

latente, sin embargo, en junio y septiembre, la relación máxima de calor es 0.08 más alta que el mínimo, lo que significa que el cambio de fase tiene un efecto significativo y el rendimiento térmico del tablero de PCM se puede mejorar considerablemente al cambiar el calor latente y la temperatura de cambio de fase.

Más recientemente, Liu et al. (2018) reportaron un estudio numérico de un sistema doble de PCM en un TW para propósitos de ventilación en el clima de Changsha, China. Los autores demostraron que el uso del PCM en su sistema es efectivo para mantener una temperatura de confort en condiciones severas de verano en comparación de un muro Trombe convencional. Así, concluyeron que, el consumo anual de energía de enfriamiento se reduce en un 20.8 % cuando la temperatura establecida en el aire interior es de 24 °C

Abdeen et al. (2019) a partir de una validación experimental, desarrollaron un modelo basado en balances globales termodinámicos para estudiar matemática y numéricamente la transferencia de calor en un sistema TW para condiciones invernales en la ciudad de Alejandría, Egipto. Los autores determinaron que un muro Trombe de 1.7 m de altura con un espesor de pared de 30 cm y un ancho de canal de 22 cm proporciona una mejora del 38% en el establecimiento del confort térmico para las condiciones de Alejandría.

Duan et al. (2021) los autores investigaron el rendimiento de calefacción de un TW-PCM con el objetivo principal de obtener la combinación óptima de temperatura de fusión de PCM y espesor de capa en Beijing, Jiuquan y Shenyang, que se encuentran en tres zonas de distribución de energía solar distintas. El modelo del TW-PCM que desarrollaron considera la transferencia de calor bidimensional de la capa PCM. El modelo fue validado por resultados experimentales. Los resultados experimentales y numéricos muestran que la capacidad de calefacción del TW-PCM tiene una influencia notable en la temperatura del aire interior. Encontraron que a partir de los resultados simulados la combinación óptima de temperatura de fusión de PCM y espesor de capa son 23 °C y 5 cm para Beijing y Jiuquan, 21 °C y 5 cm para Shenyang. Adicionalmente, este estudio obtuvo que los espesores efectivos de la capa de PCM correspondientes a diferentes temperaturas de fusión de PCM eran iguales o menores que los espesores de capa de PCM.

### **2.3. Conclusión de la Revisión Bibliográfica**

De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada, se distingue que se han trabajado con diversos estudios tanto teóricos, experimentales y teóricos-experimentales para distintas clases de muro Trombe y bajo diversas condiciones climáticas. Se fue variando aspectos como el tipo de material, el uso de vidrios dobles, los patrones de flujo, gestión de ventilas, entre otros. Sin embargo, para la implementación de materiales de cambio de fase, característica esencial del presente trabajo. De acuerdo con la literatura, el uso de PCM incorporados a un TW mejora su desempeño térmico. Sin embargo, si bien existen estudios sobre el desempeño de estos sistemas, aún no se han reportado resultados para las condiciones climáticas típicas de México usando un sistema PCM-TW. Además, existe el problema de la selección del PCM; éste debe cumplir con ciertos requisitos para tener un buen desempeño. En este sentido, la modelación numérica ofrece una solución para esta tarea, ya que permitirá evaluar a estos sistemas de manera económica (desarrollando códigos propios) y permitirá analizar el efecto de cada PCM que se desee estudiar. Adicionalmente, los resultados de este proyecto de investigación ayudarán a la selección del PCM apropiado a los climas de México, lo que impactará en el consumo de energía del país a largo plazo

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGIA

#### 3.1. Modelo Físico

Cuando se estudia un problema de la naturaleza o del medio que nos rodea una parte fundamental para poder comprender el fenómeno de mejor manera es el uso de los modelos físicos. Este nos brinda una representación simplificada del sistema en cuestión, en el cual se ven involucrados uno o más fenómenos físicos con el propósito de reproducirlos lo más cercano a la realidad en función de las consideraciones establecidas para el estudio.

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

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

A continuación, se describe el sistema de muro Trombe-PCM constituido por los siguientes elementos: 1) una pared semitransparente (colector) de espesor  $L_g$ ; 2) un muro

masivo con PCM encapsulado por dos losas de concreto de espesor  $L_{cr}$  cada una. El muro tiene una altura de  $H_w$ , un espesor en conjunto de  $L_w$ , con espesor de PCM de  $L_{PCM}$ , siendo  $L_w=2L_{cr}+L_{PCM}$ ; 3) un canal de aire formado por la pared semitransparente y el muro masivo; 4) un canal con un ancho de  $L_c$ . El sistema cuenta con ventilas en la parte superior e inferior que funcionan para establecer un lazo convectivo entre el canal y la habitación. Cada ventila tiene una longitud de apertura  $H_v$  igual al ancho del canal ( $H_v=L_c$ ). El sistema tiene una profundidad  $W$  y una altura  $H$ . El sistema PCM-TW se considera con una orientación hacia el sur con el fin de garantizar la mayor incidencia de radiación solar sobre el absorbedor a lo largo del día.

El proceso inicia cuando la radiación solar incide sobre el vidrio, debido a las propiedades ópticas de la pared semitransparente una parte de la energía se refleja de regreso al exterior, otra es absorbida y convertida en energía sensible, la restante se transmite, esta radiación transmitida son componentes de onda corta de la radiación solar, la cual al presentar una mayor cantidad de energía logra atravesar la pared semitransparente, sin embargo su influencia térmica en el fluido del canal es nula debido a que se consideró un fluido no participante.

Posteriormente, esta energía proveniente del exterior incide sobre el absorbedor donde se transforma en energía térmica, siendo transmitida por difusión al muro masivo en el cual tanto el PCM como el material de dicho muro funciona como almacenador. El almacenamiento de esta energía provoca un aumento en la temperatura del muro masivo, de manera similar la porción de energía que fue adsorbida por la pared semitransparente provoca un incremento de calor sensible, para ambas partes este aumento se percibe como un crecimiento en su valor de temperatura, este aumento provoca una emisión de radiación de estas zonas en el infrarrojo lejano comprendida aproximadamente de 50 a 1000  $\mu\text{m}$ .

Esta energía queda contenida en la sección del canal debido a que el infrarrojo lejano la pared semitransparente actúa como un medio opaco. Esto genera un efecto invernadero haciendo que el aire en el canal eleve su temperatura, donde este aumento provoca que la densidad del fluido disminuya a lo largo de todo el canal creando así un efecto chimenea

mientras que en la parte inferior del canal se promueve un efecto de succión a través de la ventila inferior. De esta manera, el sistema de muro Trombe-PCM suministra de manera pasiva energía a la habitación ayudando a establecer una condición de confort térmico.

Para delimitar el alcance del modelo físico del presente trabajo en la Figura 3.1 se muestra un conjunto de tres edificaciones donde se aplicó tecnología de calentamiento pasivo a través de la instalación de muros Trombe tradicionales, se puede observar varias columnas a lo largo de la edificación donde se encuentra instalado el sistema de TW. Resaltado de color rojo se encuentra una sección transversal que se analizara a continuación.



**Figura 3.1.** Sección de TW en casa solar pasiva en Font-Romeu, Francia.



Para ello en la Figura 3.2, se presenta el modelo Físico del sistema de muro Trombe-PCM con el fin de describir los mecanismos de transferencia de calor considerados para una sección transversal.

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

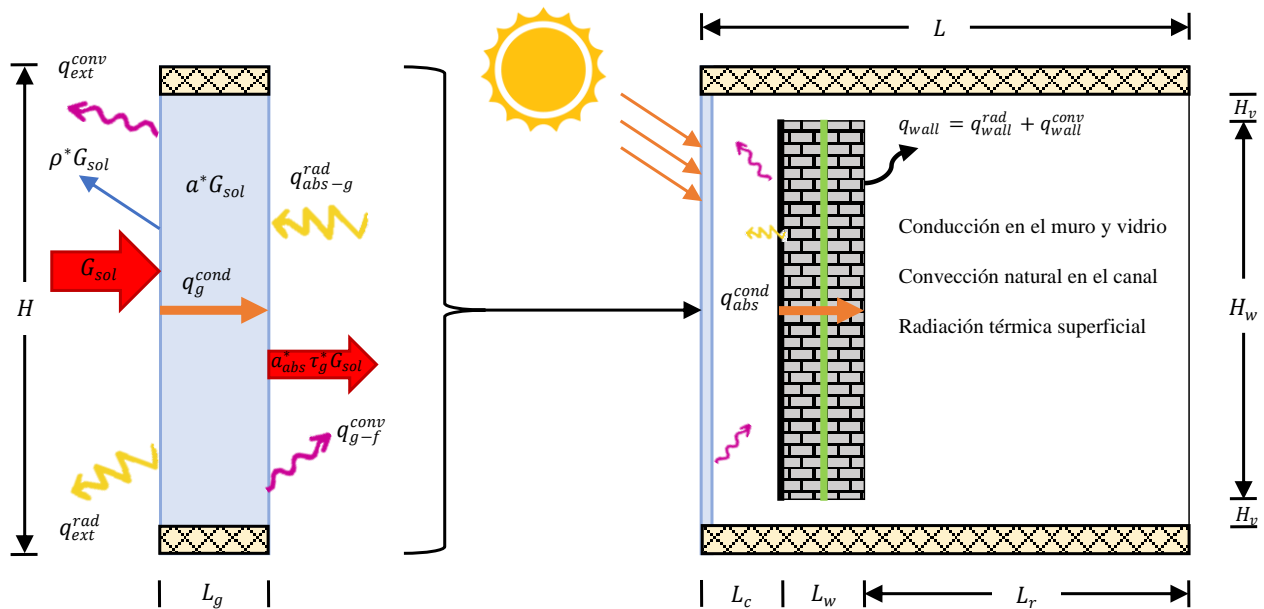


Figura 3.2. Modelo físico del muro Trombe-PCM.

### 3.2. Modelo Matemático del PCM-TW

Dado que el sistema de muro Trombe este compuesto por distintos componentes (vidrio, canal, muro masivo, PCM etc.), este se dividió en dos sistemas principales con el fin de reducir la complejidad del modelo matemático.

El primer sistema es el vidrio-canal este agrupa la pared semitransparente, el fluido y el canal. Aquí ocurren tres mecanismos de transferencia de calor: conducción en el vidrio, convección en el aire y radiación térmica con las superficies que lo componen. Para resolver las ecuaciones gobernantes de dicho sistema se implementó el método de balances globales de energía (BG). Por otro lado, el segundo sistema corresponde al muro masivo con PCM. En este se lleva a cabo el fenómeno de difusión térmica a través de todo el dominio. Para el sistema de muro-PCM se eligió el método de volumen finito (MVF).

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

Para modelar la transferencia de calor en el sistema de vidrio-canal se decidió utilizar 5 nodos con la finalidad conocer lo que sucede en todo el sistema de muro Trombe-PCM. A partir de la Figura 3.2, se obtuvo un diagrama térmico resistivo del muro Trombe, esto permite simplificar los mecanismos de transferencia que considera el sistema.

La Figura 3.3 muestra la disposición de los puntos nodales en el sistema, 3 se colocaron en el vidrio ( $T_{g1}, T_{g2}, T_{g3}$ ), uno en el canal ( $T_f$ ) y otro en la frontera del muro masivo este último con el fin de ser el nodo enlace que brinde la información necesaria para el acoplamiento con el otro sistema de muro-PCM.

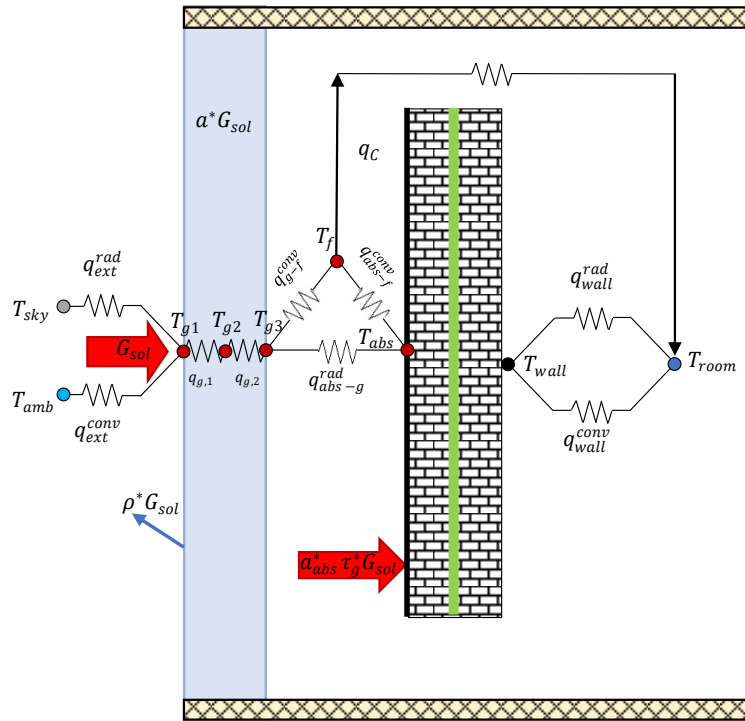


Figura 3.3. Diagrama térmico resistivo del sistema TW-PCM

El modelo matemático de transferencia de calor conjugado en el sistema vidrio-canal se encuentra descrito por las Ecs. (3.1) - (3.5):

Sistema vidrio:

Empleando un balance en el Nodo  $T_{g1}$ :

$$\alpha_g^* G_{sol} = h_{ext}^{conv} [T_{g,1} - T_{amb}] + \varepsilon_g^* \sigma [T_{g,1}^4 - T_{sky}^4] + \lambda_g \frac{T_{g,1} - T_{g,2}}{L_g / 2} \quad (3.1)$$

En Nodo  $T_{g2}$ :

$$\lambda_g \frac{T_{g,1} - T_{g,2}}{L_g / 2} - \lambda_g \frac{T_{g,2} - T_{g,3}}{L_g / 2} = \rho_g C_{p,g} L_g \frac{T_{g,2} - T_{g,2}^o}{\Delta t} \quad (3.2)$$

En Nodo  $T_{g3}$ :

$$\lambda_g \frac{T_{g,2} - T_{g,3}}{L_g / 2} + \varepsilon_{g-abs}^* \sigma [T_{abs}^4 - T_{g,3}^4] = h_{g-f}^{conv} (T_{g,3} - T_f) \quad (3.3)$$

Similar para el canal se realizaron los balances correspondientes para:

Nodo  $T_f$ :

$$h_{g-f}^{conv} (T_{g,3} - T_f) + h_{abs-f}^{conv} (T_{abs} - T_f) - q_c A_t = \rho_f C_{p,f} L_c \frac{T_f - T_f^\circ}{\Delta t} \quad (3.4)$$

Nodo  $T_{abs}$ :

$$\alpha_{abs}^* \tau_g^* G_{sol} = \varepsilon^* \sigma [T_{abs}^4 - T_{g,3}^4] + h_{abs-f}^{conv} (T_{abs} - T_f) + q_{abs}^{cond} \quad (3.5)$$

Donde las condiciones iniciales son:

$$T_{g1}(0) = T_{room} \quad (3.6a)$$

$$T_{g2}(0) = T_{room} \quad (3.6b)$$

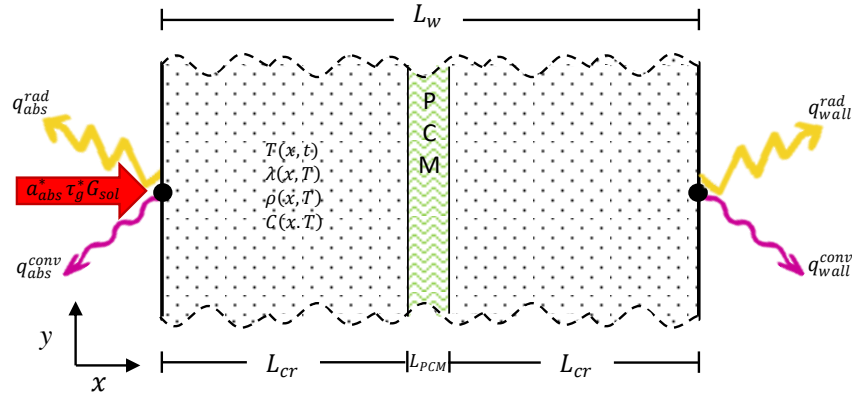
$$T_{g3}(0) = T_{room} \quad (3.6c)$$

$$T_f(0) = T_{room} \quad (3.6d)$$

$$T_{abs}(0) = T_{room} \quad (3.6e)$$

Modelo conductivo del muro almacenador.

En la Figura 3.4 se observa el sistema físico del muro con PCM el cual se trabajó bajo el método de volumen finito.



**Figura 3.4.** Modelo físico del sistema muro masivo.

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

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.7)$$

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

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

$$1) \text{ En } x = x_w = L_g + L_c, \quad t > 0$$

$$\alpha_{abs}^* \tau_g^* G_{sol} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_w} + h_{abs-f}^{conv} [T(x_w) - T_f] + \varepsilon_{abs-g}^* \sigma [T^4(x_w) - T_{g,3}^4] \quad (3.8)$$

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

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x_r} = h_{w-room}^{conv} [T(x_r) - T_{room}] + \varepsilon_r^* \sigma [T^4(x_r) - T_{room}^4] \quad (3.9)$$

Cuyas condiciones iniciales son:

$$T(x, 0) = T_{room}, \quad \forall x_w \leq x \leq x_r \quad (3.10)$$

### 3.3. Metodología de Solución

El siguiente paso es describir los métodos de resolución de las ecuaciones gobernantes elegidos para el sistema de muro Trombe-PCM. En un principio se muestra el método de balances globales de energía el cual se eligió para resolver el sistema vidrio-canal. Posteriormente se presenta el método de volumen finito el cual resuelve el sistema de muro con PCM. Aquí se presenta el proceso de discretización del modelo matemático para ambos métodos.

#### 3.3.1. Desarrollo de balances globales

El modelo de balance global se basa en la Primera Ley de la Termodinámica, a partir de ahí esta se aplica a cada nodo del sistema vidrio-canal. Despreciando cualquier generación de energía (Transporte de energía por trabajo) quedando solamente un balance de flujos de calor de entrada menos flujos de calor de salida esto igual a la aportación del término transitorio que proporciona la variación de la temperatura a través del tiempo donde el termino transitorio se considera que sea de propiedades constantes, siendo válido para un volumen de control la siguiente ecuación:

$$Q_{in} - Q_{out} = \rho C_p V \frac{dT}{dt} \quad (3.11)$$

Donde el volumen de control de los nodos donde se realiza los balances de energía puede escribirse como:  $V = A\delta x$ , siendo  $A$  y  $\delta x$  el área transversal y el espesor del volumen de control, respectivamente. Sustituyendo en  $V$  en la Ec. (3.11), se obtiene:

$$Q_{in} - Q_{out} = \rho C_p A \delta x \frac{dT}{dt} \quad (3.12)$$

Para la discretización del término transitorio Patankar (1980) recomienda aplicar el método de esquema completamente implícito, por ser particularmente estable al momento de resolver el sistema de ecuaciones algebraicas

$$Q_{in} - Q_{out} = \rho C_p A \delta x \frac{T - T^o}{\Delta t} \quad (3.13)$$

No obstante, el termino de volumen se elimina en nodos de interfase debido a que el espesor del volumen de control  $\delta x$  es cero en los mismos, anulando la contribución del término transitorio. De esta forma se obtuvo, la discretización del término transitorio del Modelo matemático, para la realización de los balances de energía global en estado transitorio.

A continuación, a partir de la Ec. (3.13) se aplica a cada uno de los elementos del sistema vidrio-canal, para obtener los balances de energía en estado transitorio.

Pared semitransparente (vidrio):

El modelo de la pared semitransparente se determina a partir de un balance global de energía sustentada por la Primera Ley de la Termodinámica sobre todos los nodos que lo componen.

Balance para el nodo  $g_1$ :

$$G_{sol}A - \left( q_{ext}^{conv} A + q_{ext}^{rad} A + q_{g,1} A \right) = \frac{\rho_g C_{p,g} A \delta x_{g1}}{\Delta t} \left[ T_{g,1} - T_{g,1}^o \right] \quad (3.14)$$

Debido a que el espesor del volumen de control en la frontera es cero ( $\delta x_{g1} = 0$ ), el término de acumulación de energía se colapsa:

$$G_{sol}A - \left( q_{ext}^{conv} A + q_{ext}^{rad} A + q_{g,1} A \right) = 0 \quad (3.15)$$

Aplicando leyes particulares:

$$\alpha_g^* G_{sol} - h_{ext}^{conv} \left[ T_{g,1} - T_{amb} \right] - \varepsilon_g^* \sigma \left[ T_{g,1}^4 - T_{sky}^4 \right] - \lambda_g \frac{T_{g,1} - T_{g,2}}{L_g / 2} = 0 \quad (3.16)$$

Desarrollando y factorizando:

$$\left( \frac{2\lambda_g}{L_g} + h_{ext}^{conv} \right) T_{g,1} - \frac{2\lambda_g}{L_g} T_{g,2} = h_{ext}^{conv} T_{amb} - \varepsilon_g^* \sigma \left[ T_{g,1}^{*4} - T_{sky}^{*4} \right] + \alpha_g^* G_{sol} \quad (3.17)$$

Esta ecuación contempla tanto el intercambio convectivo con el medio exterior como la radiación solar que incide sobre la superficie expuesta de la pared semitransparente, así el flujo de calor solar que recibe y la transferencia de calor a través de difusión térmica.



Balance global sobre nodo  $g_2$ :

$$q_{g,1}A - q_{g,2}A = \rho_g C_{p,g} L_g A \frac{dT_{g,2}}{dt} \quad (3.18)$$

Aplicando leyes particulares:

$$\lambda_g \frac{T_{g,1} - T_{g,2}}{L_g / 2} - \lambda_g \frac{T_{g,2} - T_{g,3}}{L_g / 2} = \rho_g C_{p,g} L_g \frac{T_{g,2} - T_{g,2}^o}{\Delta t} \quad (3.19)$$

Desarrollando y factorizando:

$$\left( \frac{4\lambda_g}{L_g} + \frac{\rho_g C_{p,g} L_g}{\Delta t} \right) T_{g,2} - \frac{2\lambda_g}{L_g} T_{g,3} - \frac{2\lambda_g}{L_g} T_{g,1} = \frac{\rho_g C_{p,g} L_g T_{g,2}^o}{\Delta t} \quad (3.20)$$

Esta ecuación contempla exclusivamente el mecanismo de flujo de calor difusivo, así como la contribución del término transitorio.

Balance global sobre nodo  $g_3$ :

$$q_{g,2}A + q_{abs-g}^{rad} A - q_{g-f}^{conv} A = 0 \quad (3.21)$$

Aplicando leyes particulares:

$$\lambda_g \frac{T_{g,2} - T_{g,3}}{L_g} A + \varepsilon^* \sigma [T_{abs}^4 - T_{g,3}^4] A - h_{g-f}^{conv} (T_{g,3} - T_f) A = 0 \quad (3.22)$$

Desarrollando y factorizando:

$$\left( \frac{2\lambda_g}{L_g} + h_{g-f}^{conv} \right) T_{g,3} - \frac{2\lambda_g}{L_g} T_{g,2} - h_{g-f}^{conv} T_f = \varepsilon^* \sigma [T_{abs}^4 - T_{g,3}^4] \quad (3.23)$$

Esta ecuación contempla la aportación de calor debido al intercambio radiativo superficial entre el absorbedor y la pared semitransparente, el calor conductivo de la pared semitransparente y el intercambio convectivo con el fluido del canal.

Canal:

Balance global sobre nodo  $f$ :

$$\left( q_{g-f}^{conv} A + q_{abs-f}^{conv} A \right) - q_c A_c = \rho_f C_{p,f} L_c A \frac{T_f - T_f^o}{\Delta t} \quad (3.24)$$

Se aplica leyes particulares:

$$h_{g-f}^{conv} A (T_{g,3} - T_f) + h_{abs-f}^{conv} (T_{abs} - T_f) A - q_c A_c = \rho_f C_{p,f} L_c A \frac{T_f - T_f^o}{\Delta t} \quad (3.25)$$

Para la determinación de  $q_c$  se utiliza la siguiente ecuación:

$$q_c = h_f (T_f - T_{room}) \quad (3.26)$$

donde el coeficiente convectivo  $h_f$  se define, de acuerdo con Vázquez-Beltrán (2019) y Hirunlabh (1999) como:

$$h_f = \frac{\rho_f C_{p,f} \bar{V}}{0.75WH_w} \quad (3.27)$$

Sustituyendo Ecs. (3.26) y (3.27) en (3.25), posteriormente desarrollando y factorizando:

$$\left( h_{g-f}^{conv} + h_{abs-f}^{conv} + \frac{\rho_f C_{p,f} L_c}{\Delta t} + h_f \frac{L_c}{H_w} \right) T_f - h_{g-f}^{conv} T_{g,3} - h_{abs-f}^{conv} T_{abs} = h_f \frac{L_c}{H_w} T_{in} + \frac{\rho_f C_{p,f} L_c}{\Delta t} T_f^o \quad (3.28)$$

Esta ecuación contempla el intercambio convectivo entre las superficies de la pared semitransparente y el absorbedor además del calor útil que es transferido al fluido en estado transitorio.

Balance global sobre nodo *abs*:

Se aplica ley general:

$$\alpha_{abs}^* \tau_g^* G_{sol} A - (q_{abs-g}^{rad} + q_{abs}^{cond} + q_{abs-f}^{conv}) A = 0 \quad (3.29)$$

Se aplica leyes particulares:

$$\alpha_{abs}^* \tau_g^* G_{sol} A - \varepsilon^* \sigma [T_{abs}^4 - T_{g,3}^4] A - h_{abs-f}^{conv} (T_{abs} - T_f) A - q_{abs}^{cond} A = 0 \quad (3.30)$$

Desarrollando y factorizando:

$$h_{abs-f}^{conv} T_{abs} - h_{abs-f}^{conv} T_f = -\varepsilon^* \sigma [T_{abs}^4 - T_{g,3}^4] + \alpha_{abs}^* \tau_g^* G_{sol} - q_{abs}^{cond} \quad (3.31)$$

Por último, la Ec. (3.29) contempla la salida del calor radiativo de superficie del absorbedor con la pared semitransparente, el intercambio convectivo con el flujo del canal, asimismo una parte del flujo solar que logro ser transmitida a través de la pared

semitransparente hacia el muro absorbedor y finalmente la transferencia de calor por conducción del muro absorbedor.

Una vez realizado los balances de energía para cada uno de los nodos que conforman el sistema colector-canal acomodando en ecuaciones de forma agrupada, se obtiene una matriz tridiagonal de 5x5:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} a_P^{g1} & -a_E^{g1} & 0 & 0 & 0 \\ -a_W^{g2} & a_P^{g2} & -a_E^{g2} & 0 & 0 \\ 0 & -a_W^{g3} & a_P^{g3} & -a_E^{g3} & 0 \\ 0 & 0 & -a_W^f & a_P^f & -a_E^f \\ 0 & 0 & 0 & -a_W^{abs} & a_P^{abs} \end{bmatrix}}_{\text{Matriz de coeficientes}} \underbrace{\begin{bmatrix} T_{g1} \\ T_{g2} \\ T_{g3} \\ T_f \\ T_{abs} \end{bmatrix}}_{\text{Vector Incognita}} = \underbrace{\begin{bmatrix} b_P^{g1} \\ b_P^{g2} \\ b_P^{g3} \\ b_P^f \\ b_P^{abs} \end{bmatrix}}_{\text{Vector Termino Independiente}} \quad (3.32)$$

Donde los coeficientes son:

$$a_P^{g1} = \frac{2\lambda_g}{L_g} + h_{ext}^{conv} \quad (3.33a)$$

$$a_E^{g1} = \frac{2\lambda_g}{L_g} \quad (3.33b)$$

$$b_P^{g1} = h_{ext}^{conv} T_{amb} - \varepsilon_g^* \sigma [T_{g,1}^4 - T_{sky}^4] + \alpha_g^* G_{sol} \quad (3.33c)$$

$$a_P^{g2} = \frac{4\lambda_g}{L_g} + \frac{\rho_g C_{p,g} L_g}{\Delta t} \quad (3.34a)$$

$$a_E^{g2} = \frac{2\lambda_g}{L_g} \quad (3.34b)$$

$$a_W^{g2} = \frac{2\lambda_g}{L_g} \quad (3.34c)$$

$$b_P^{g2} = \frac{\rho_g C_{p,g} L_g T_{g,2}^o}{\Delta t} \quad (3.34d)$$

$$a_P^{g3} = h_{g-f}^{conv} + \frac{2\lambda_g}{L_g} \quad (3.35a)$$

$$a_E^{g3} = h_{g-f}^{conv} \quad (3.35b)$$

$$a_W^{g3} = \frac{2\lambda_g}{L_g} \quad (3.35c)$$

$$b_P^{g3} = \varepsilon^* \sigma [T_{abs}^4 - T_{g,3}^4] \quad (3.35d)$$

$$a_P^f = h_{g-f}^{conv} + h_{abs-f}^{conv} + \frac{\rho_f C_{p,f} L_c}{\Delta t} + h_f \frac{L_c}{H_w} \quad (3.36a)$$

$$a_E^f = h_{abs-f}^{conv} \quad (3.36b)$$

$$a_W^f = h_{g-f}^{conv} \quad (3.36c)$$

$$b_P^f = \frac{\rho_f C_{p,f} L_c}{\Delta t} T_f^o + h_f \frac{L_c}{H_w} T_{in} \quad (3.36d)$$

$$a_P^{abs} = h_{abs-f}^{conv} \quad (3.37a)$$

$$a_W^{abs} = h_{abs-f}^{conv}, \quad (3.37b)$$

$$b_P^{abs} = -\varepsilon^* \sigma [T_{abs}^4 - T_{g,3}^4] + \alpha_{abs}^* \tau_g^* G_{sol} - q_{abs}^{cond} \quad (3.37c)$$

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

$$q_{abs-g}^{rad} = \frac{\sigma [T_{abs}^4 - T_g^4]}{\frac{1 - \varepsilon_{abs}^*}{\varepsilon_{abs}^*} + \frac{1 - \varepsilon_g^*}{\varepsilon_g^*} - \frac{1}{F_{g,abs}}} \quad (3.38)$$

El área de las paredes que forman nuestro sistema canal es equivalente por lo que:

$$A_g = A_{abs} = A \quad (3.39)$$

$$F_{g,abs} = 1 \quad (3.40)$$

Sustituyendo la Ec. (3.39) y (3.40) en Ec. (3.38):

$$q_{abs-g}^{rad} = \varepsilon^* \sigma [T_{abs}^4 - T_{g,3}^4] \quad (3.41)$$

Donde la emisividad aparente equivale a:

$$\varepsilon^* = \left(1/\varepsilon_{abs}^* + 1/\varepsilon_g^*\right)^{-1} \quad (3.42)$$

Por otra parte, los coeficientes de transferencia de calor por convección natural entre las superficies que conforma el canal vertical se determinan de la siguiente manera:

Coefficiente convectivo entre la pared semitransparente y el fluido:

$$h_{g-f}^{conv} = \frac{Nu_{g-f} \lambda_f}{H_w} \quad (3.43)$$

Coefficiente convectivo entre el absorbedor y el fluido:

$$h_{abs-f}^{conv} = \frac{Nu_{abs-f}^{conv} \lambda_f}{H_w} \quad (3.44)$$

Donde  $Nu_{abs-f}$  y  $Nu_{g-f}$  son los números de Nusselt que representan la transferencia de calor entre el flujo y el absorbedor y entre el flujo y el colector con una temperatura promedio de película definida como:

Para la pared semitransparente y el fluido:

$$T_{m,g} = \frac{T_g + T_f}{2} \quad (3.45)$$

Para el absorbedor y el fluido:

$$T_{m,abs} = \frac{T_{abs} + T_f}{2} \quad (3.46)$$

La correlación para el coeficiente convectivo por convección natural es presentada por Churchill y Chu (1975) para flujo laminar ( $Ra < 10^9$ ):

$$Nu_{g-f} = 0.68 + \frac{(0.67Ra^{1/4})}{\left[1 + (0.492/Pr)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad (3.47)$$

Y para flujo turbulento ( $10^9 < Ra$ ):

$$Nu_{g-f} = \left\{ 0.825 + \frac{(0.387Ra^{1/6})}{\left[1 + (0.492/Pr)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3.48)$$

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

$$Pr = \frac{C_{p,f}\mu_f}{\lambda_f} \quad (3.49)$$

El número de Reynolds (Ra) se define como:

$$Ra = Gr Pr \quad (3.50)$$

El número de Grashof (Gr) se define como:

$$Gr = \left[ \frac{g\beta_f(T_g - T_f)L_j^3}{\nu_f^2} \right] \quad (3.51)$$

Donde

$$\beta_f = 1/T_{m,g} \quad (3.52)$$

Análogamente, se determinó el coeficiente convectivo entre la superficie del absorbedor y el fluido ( $h_{abs-f}^{conv}$ ) con la temperatura de película de la Ec. (3.45) y aplicando las Ecs. (3.46) -(3.51).

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

$$\bar{V} = \left[ \frac{2gH_w}{C_1(A_c/A_v)^2 + C_2} \frac{T_f - T_{in}}{T_f} \right]^{0.5} \quad (3.53)$$

Donde el termino:

$$C_1(A_c/A_v)^2 + C_2$$

Representa la caída de presión en el canal y las ventilas,  $C_1$  y  $C_2$  son constantes empíricas adimensionales evaluadas en 8.0 y 2.0 respectivamente por Utzinger (1980).

Cálculo de flujo masico:

$$\dot{m} = \bar{V} \rho_f A_c \quad (3.54)$$

Se asume que las propiedades termofisicas del fluido varían linealmente. Las correlaciones fueron basadas en datos tabulados de Incropera y DeWitt (2002). Para un intervalo de 250 a 400 K. Para evaluar las propiedades del fluido se utilizan la temperatura media de película, donde:

Viscosidad cinemática:

$$\mu_f = \left[ 2.2078(T_m^{0.7756}) \right] \times 10^{-7} \quad (3.55)$$

Densidad:

$$\rho_f = \frac{351.9}{T_m} \quad (3.56)$$



Conductividad térmica:

$$\lambda_f = \left[ 0.1723 (T_m^{0.8812}) \right] \times 10^{-3} \quad (3.57)$$

Calor específico:

$$C_{P,f} = \left[ 0.9125 (T_m^{0.0174}) \right] \times 10^3 \quad (3.58)$$

Donde  $T_m$  está en kelvin y pudiendo ser  $T_{m,g}$  o  $T_{m,abs}$  según corresponda.

### 3.3.2. Implementación del método de volumen finito en el sistema de muro-PCM

Para este sistema de muro-PCM se utilizó el método de volumen finito (MVF). A continuación, se da una explicación del método.

El MVF permite discretizar y resolver numéricamente las ecuaciones diferenciales gobernantes del sistema, siendo un método alternativo al de elementos y diferencias finitos. Primeramente, se considera una malla del dominio del sistema, en torno a cada punto de esta malla se construyen múltiples volúmenes de control que no se traslapan entre ellos. La ecuación gobernante para resolver se integra sobre cada volumen de control, lo cual da como resultado una versión discretizada de dicha ecuación. El MVF es adecuado para cualquier tipo de malla y, por lo tanto, puede ser aplicado en geometrías complejas.

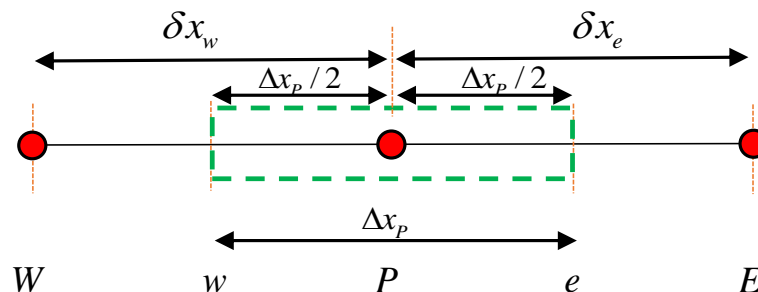
De acuerdo con Xamán y Gijón-Rivera, 2016, el MVF consiste en los siguientes pasos:

- 1) El dominio físico se representa por un conjunto de puntos discretos en donde se resuelve el problema. A este dominio se le da nombre de malla que es el lugar en el que se colocan los puntos en donde se resuelven las ecuaciones.

- 2) Integración de las ecuaciones gobernantes sobre todos los volúmenes de control del dominio de solución.
- 3) Discretización al sustituir una variedad de aproximaciones finitas para los términos en las ecuaciones integradas, los cuales representa procesos, tales como convección, difusión y fuentes. Esto convierte las ecuaciones integrales en un sistema de ecuaciones algebraicas.
- 4) Solución de las ecuaciones algebraicas por un método iterativo.

Para comenzar el dominio se divide en pequeños volúmenes de control discretos, donde existirán cierto número de puntos nodales.

En la Figura 3.5 se observa como el nodo principal  $P$  estará en el centro de los VC, de modo que las interfases entre nodos estarán en medio de la distancia entre un nodo y otro (punto  $e$  y  $w$ ), se debe agregar que también para el caso de VC adyacentes a las fronteras físicas del dominio, se pueden tener dos arreglos: (a) No contacto con la frontera: aquí la interfase del VC inmediato a la frontera no coincide con la frontera del dominio físico por lo tanto el nodo frontera tendrá un espesor y (b) Contacto con la frontera: Aquí la interfase del VC adyacente a la frontera física coincide con la frontera del dominio físico, en este casi el nodo frontera tendrá un espesor nulo. Se optó por utilizar un arreglo de contacto con la frontera de tal forma que los límites físicos coincidan con los límites del volumen de control.



**Figura 3.5.** Nodo representativo de una malla arbitraria.

El fundamento clave del método de volumen finito es la integración de la ecuación gobernante sobre el volumen de control para generar una ecuación discretizada en un nodo “P”.

La ecuación gobernante de energía considerando difusión unidimensional en “x” estado transitorio está dada por la Ec. (3.7):

Para obtener la ecuación discretizada, es necesario realizar la integración espacial sobre el VC, así como también la integración en el tiempo desde el tiempo  $t=0$  a  $t + \Delta t$ . Esto es:

$$\int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \left( \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \right) dt dx = \int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) dt dx \quad (3.59)$$

Considerando un problema unidimensional, por lo tanto, el área transversal ha sido omitida.

En la Ec. (3.59) la integración del lado izquierdo, se considera que el valor de  $\rho C$  prevalecer en todo el VC, por lo tanto:

$$\int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \left( \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \right) dt dx = \int_t^{t+\Delta t} \left( \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \right) dt dx = \rho_P C_P (T_P - T_P^0) \Delta x \quad (3.60)$$

La integración espacial de lado derecho se realiza aplicando la regla del medio punto de esta forma:

$$\int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) dt dx = \int_t^{t+\Delta t} \left[ \lambda_e \frac{T_E - T_P}{\delta x_e} - \lambda_w \frac{T_P - T_W}{\delta x_w} \right] dt \quad (3.61)$$

La Ec. (3.61) todavía no se ha integrado en el tiempo, debido a que se debe tomar en cuenta la variación de las  $T$ 's con el tiempo desde  $t=0$  a  $t + t_0$ , para lograr esto es necesario hacer una nueva consideración acerca de cómo varían en el intervalo de tiempo. Existen distintas consideraciones para ello, sin embargo, la más relevante puede representarse mediante la siguiente expresión:

$$\int_t^{t+\Delta t} [T] dt = [f T + (1-f) T^0] \Delta t \quad (3.62)$$

Donde  $f$  representa un factor de peso que varía entre 0 y 1. La Ec. (3.62) se integró de acuerdo con Patankar (1980) quien recomienda utilizar un esquema totalmente implícito, el esquema se obtiene al considerar  $f=1$  por lo tanto:

$$\int_t^{t+\Delta t} \left[ \lambda_e \frac{T_E - T_P}{\delta x_e} - \lambda_w \frac{T_P - T_W}{\delta x_w} \right] dt = \left[ \lambda_e \frac{T_E - T_P}{\delta x_e} - \lambda_w \frac{T_P - T_W}{\delta x_w} \right] \Delta t \quad (3.63)$$

Finalmente sustituyendo las Ecs. (3.60) y (3.63) en la Ec. (3.59) y arreglando términos en la forma de coeficientes agrupados  $a_p T_p = a_E T_E + a_W T_W + b$ , se llega a:

$$a_p = \frac{\lambda_e}{\delta x_e} + \frac{\lambda_w}{\delta x_w} + \rho_p C_p \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (3.64a)$$

$$a_p^0 = \rho_p C_p \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (3.64b)$$

$$a_w = \frac{\lambda_w}{\delta x_w} \quad (3.64c)$$

$$a_E = \frac{\lambda_e}{\delta x_e} \quad (3.64d)$$

$$b = a_p^0 T_p^0 \quad (3.64e)$$

A continuación, se discretizan los tres tipos de condiciones de frontera que maneja el sistema. Las condiciones de Dirichlet establecen que  $T = f(x)$ , es decir, el valor de la temperatura en la frontera es conocida en la frontera. Entonces es posible afirmar lo siguiente:

$$T = T_{bound} \quad (3.65)$$

Comparando esta ecuación con la de los coeficientes agrupados:

$$a_p = 1 \quad (3.66a)$$

$$a_E = a_W = 0 \quad (3.66b)$$

$$b = T_{bound} \quad (3.66c)$$

Para la condición de Neumann es necesario aproximar a la derivada mediante un esquema centrado. Por ejemplo, si se realiza sobre la frontera Este:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \approx \frac{T_p - T_w}{\delta x_w}$$

Así, para el caso de un flujo de calor impuesto:

$$\left[ \frac{\lambda}{\delta x_w} \right] T_p = \left[ \frac{\lambda}{\delta x_w} \right] T_w + q \quad (3.67)$$

Por lo tanto:

$$a_p = a_w = \frac{\lambda}{\delta x_w} \quad (3.68a)$$

$$a_E = 0 \quad (3.68b)$$

$$b = q \quad (3.68c)$$

Finalmente, para la condición de Robin, es decir para el caso de una pérdida convectiva-radiativa se tiene:

$$\left[ \frac{\lambda}{\delta x_w} + h \right] T_P = \left[ \frac{\lambda}{\delta x_w} \right] T_w + hT_{ext} - q_{rad} \quad (3.69)$$

Lo que conduce a:

$$a_P = \frac{\lambda}{\delta x_w} + h \quad (3.70a)$$

$$a_W = \frac{\lambda}{\delta x_w} \quad (3.70b)$$

$$a_E = 0 \quad (3.70c)$$

$$b = hT_{ext} - q_{rad} \quad (3.70d)$$

### 3.3.3. Metodología del calor específico efectivo

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

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.71)$$

La Ec. (3.71) es válida para toda temperatura debajo de la temperatura crítica en un PCM es decir sin llegar al cambio de fase. Sin embargo, durante el proceso de cambio de fase (fusión o solidificación) de un PCM, la Ec. (3.71) se debe trabajar en términos de entalpia:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.72)$$

Donde:

$$\text{No hay cambio de fase: } h = C_p T \quad (3.73)$$

$$\text{Si hay cambio de fase: } h = C_p T + h_{ls} f_{pc,l} \quad (3.74)$$

Se sabe que  $C_p T$  representa la energía sensible, es decir un cambio de temperaturas sin cambio de fase, por otro lado, el termino  $h_{ls} f_{pc,l}$  representa a la energía latente. Por lo tanto, cuando existe cambio de fase la entalpia contendrá los efectos de la energía sensible tanto como de la energía latente tal como se muestra la Ec (2.73).

$$\rho \left( \underbrace{C_p \frac{\partial T}{\partial t}}_{\text{Cambio en E. Sensible}} + \underbrace{h_{ls} \frac{\partial f_{pc,l}}{\partial t}}_{\text{Cambio en E. Latente}} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.75)$$

Donde  $h_{ls}$  es el calor latente de fusión del PCM. Éste representa la energía necesaria para fundir una unidad de masa de una sustancia,  $f_{pc,l}$  es la fracción líquida de cambio de fase del PCM. Ésta es la relación entre la cantidad de líquido comparado con la cantidad total de la masa de la sustancia. Ésta dada por la Ec. (3.76).

$$f_{pc,l} = \left( \frac{T - T_s}{T_l - T_s} \right)^m \quad (3.76)$$

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

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

$$f_{pc,l} = \left( \frac{T - T_s}{\Delta T_{ls}} \right)^1 \quad (3.77)$$

Entonces:

$$\frac{\partial f_{pc,l}}{\partial t} = \frac{1}{\Delta T_{ls}} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.78)$$

Sustituyendo la Ec. (3.78) en la Ec. (3.75):

$$\rho \left( C_p + \frac{h_{ls}}{\Delta T_{ls}} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.79)$$

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

$$C = C_p + \frac{h_{ls}}{\Delta T_{ls}} \quad (3.80)$$

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

$$\rho(T) = \begin{cases} \rho_s, & T \leq T_s \\ f \rho_l + (1-f) \rho_s, & T_s < T < T_l \\ \rho_l, & T \geq T_l \end{cases} \quad (3.81)$$



$$\lambda(T) = \begin{cases} \lambda_s, & T \leq T_s \\ f\lambda_l + (1-f)\lambda_s, & T_s < T < T_l \\ \lambda_l, & T \geq T_l \end{cases} \quad (3.82)$$

$$C(T) = \begin{cases} C_{P,s}, & T \leq T_s \\ fC_{P,l} + (1-f)C_{P,s} + \frac{h_s}{\Delta T_{ls}}, & T_s < T < T_l \\ C_{P,l}, & T \geq T_l \end{cases} \quad (3.83)$$

### 3.3.4. Residuales del proceso iterativo

Cuando se utilizan métodos iterativos para resolver sistemas de ecuaciones algebraicas siempre existe de manera implícita un error numérico, debido su misma naturaleza.

Dado que el presente trabajo empleo dos métodos para resolver varios sistemas de ecuaciones algebraicas, es necesario establecer un criterio para el cual la solución obtenida es numéricamente aceptable. Este criterio es comúnmente llamado criterio de convergencia.

El primer criterio de convergencia utilizado es para el método de balances globales, método que se utilizó para resolver el sistema vidrio-canal, este criterio se presenta primeramente en forma de sistema de ecuaciones:

$$a_P^{g1}T_{g1} = a_E^{g1}T_{g2} + b_P^{g1} \quad (3.84a)$$

$$a_P^{g2}T_{g2} = a_E^{g2}T_{g3} + a_W^{g2}T_{g1} + b_P^{g2} \quad (3.84b)$$

$$a_P^{g3}T_{g3} = a_E^{g3}T_f + a_W^{g3}T_{g2} + b_P^{g3} \quad (3.84c)$$

$$a_P^fT_f = a_E^fT_{abs} + a_W^fT_{g3} + b_P^f \quad (3.84d)$$

$$a_P^{abs}T_{abs} = a_W^{abs}T_f + b_P^{abs} \quad (3.84e)$$

Reordenando el sistema se obtiene la matriz tridiagonal de la Ec. (3.32), posteriormente se suman las ecuaciones 3.84 y se renombran:

$$a_1 T_{g1} + a_2 T_{g2} + a_3 T_{g3} + a_4 T_f + a_5 T_{abs} = b \quad (3.85)$$

Donde cada coeficiente equivale a:

$$a_1 = a_p^{g1} - a_w^{g2} \quad (3.86a)$$

$$a_2 = a_p^{g2} - a_E^{g1} - a_w^{g3} \quad (3.86b)$$

$$a_3 = a_p^{g3} - a_E^{g2} - a_w^f \quad (3.86c)$$

$$a_4 = a_p^f - a_E^{g3} - a_w^{abs} \quad (3.86d)$$

$$a_5 = a_p^{abs} - a_E^f \quad (3.86e)$$

$$b = b_p^{g1} + b_p^{g2} + b_p^{g3} + b_p^f + b_p^{abs} \quad (3.86f)$$

Finalmente, el criterio de convergencia para el método de balances globales se presenta en la Ec. (3.87):

$$R_{BG} = |a_1 T_{g1} + a_2 T_{g2} + a_3 T_{g3} + a_4 T_f + a_5 T_{abs} - b| \quad (3.87)$$

Por otro lado, el criterio utilizado para el transporte de energía del sistema muro-PCM se define mediante la desviación cuadrática media mostrada en la Ec. (2.84)

$$R_{MVF} = \sqrt{\sum [a_p T_p - (\sum a_{nb} T_{nb} + b)]^2} \quad (3.88)$$

### 3.3.5. Bajo-relajación del proceso iterativo

La naturaleza no lineal de los modelos, así como su fuerte acoplamiento, demanda limitar la evolución de la variable de iteración a iteración debido a que un cambio fuerte en esa variable puede provocar cambios bruscos en los coeficientes de otras variables y de esta manera llevar a una divergencia.

La relajación de la solución numérica es una opción para optimizar y/o alcanzar la convergencia numérica. Esta técnica se usa en el proceso de solución del modelo matemático. La bajo relajación se implementó en el solver de la siguiente manera:

$$T = T_p^* + \alpha(T_p - T_p^*) \quad (3.89)$$

Y en los coeficientes de la variable  $T$  de acuerdo con Ferziger y Peric (2002):

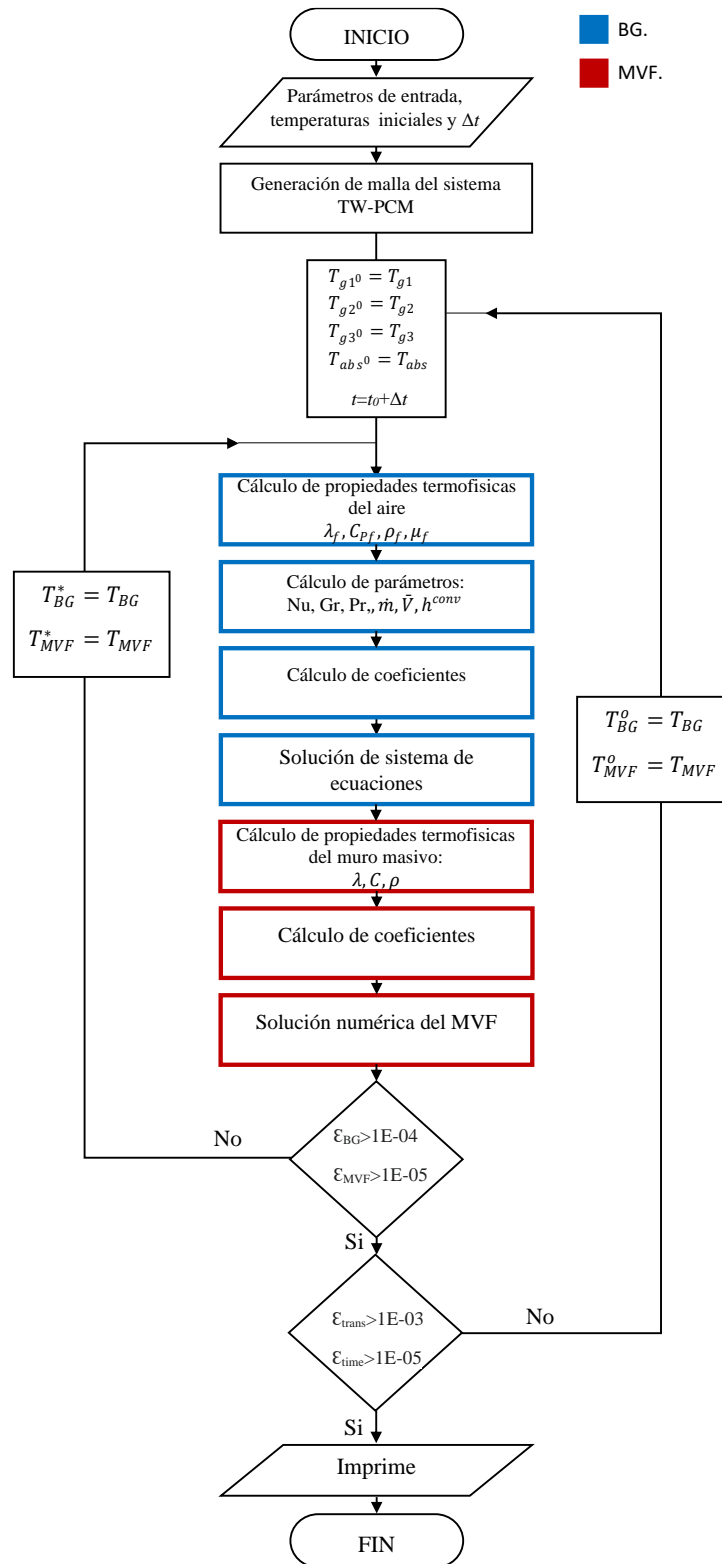
$$a_p^* = \frac{a_p}{\alpha_T} T_p \quad b_p^* = b_p + \frac{(1-\alpha_T)}{\alpha_T} \alpha_p T_p^o \quad (3.90)$$

### 3.3.6. Procedimiento general de solución del modelo matemático

El diagrama de flujo presentado en la Figura 3.6 muestra el procedimiento general. Los pasos son enlistados a continuación:

1. Se introducen los datos conocidos, se declaran los parámetros constantes, se establecen las condiciones iniciales y se elige un paso de tiempo  $\Delta t$ .
2. Generación de la malla espacial computacional. Se construye el espacio discreto en el cual se resolverá el modelo matemático.
3. Se establece un criterio de convergencia temporal para el proceso iterativo: Contador de paso de tiempo.
4. Se calculan propiedades termofísicas del aire. Debido a que las temperaturas iniciales en el sistema se desconocen, las propiedades se calculan en cada iteración.
5. Resolución del sistema vidrio-canal por medio del método de balances globales. Determinación del campo de temperatura en el canal.
6. Se calcula las propiedades termofísicas del muro-PCM. Debido al comportamiento de material de cambio de fase, se utiliza el método de calor específico efectivo.

7. Método de volumen finito. Resolución del modelo conductivo del muro almacenador para determinar su campo de temperatura.
8. Se establece un criterio de convergencia para ambos métodos de solución del sistema.
9. Repetir desde el punto cuatro hasta cumplir los criterios de convergencia.
10. Finalmente, una vez que se haya cumplido los criterios de convergencia para los métodos de solución, se verifica con el criterio de convergencia temporal, si aún no se ha cumplido el tiempo de modelación, este condicional hace que el proceso iterativo se repita a partir del paso tres con el nuevo tiempo, de lo contrario imprime y termina.



**Figura 3.6.** Diagrama de flujo del código desarrollado.

### 3.4. Verificación del Código Numérico

La metodología consistió en la descomposición del problema final en 9 subproblemas, empezando con problemas básicos como la conducción de calor unidimensional en estado permanente, hasta ir incrementando gradualmente la complejidad de éstos.

Se verificaron mediante la reproducción de resultados reportados en la literatura y se concluye con la validación de un modelo conductivo en una losa de concreto del estudio reportado por Chagolla-Aranda, (2017). Esta metodología esta resumida en la Figura 3.7.

El primer problema se trata de la conducción de calor en estado permanente con condiciones de frontera de primera clase. El problema dos trata con el mismo caso del problema uno, pero con conductividad térmica variable. Posteriormente para el problema tres se resuelve la transferencia de calor por conducción en un medio compuesto de tres losas en estado permanente con condiciones de frontera de primera clase. El problema 4 consiste en la versión transitoria del problema dos, pero con conductividad térmica constante. El problema cinco trata sobre la conducción de calor de una losa con condiciones de frontera de tercera clase. El problema seis involucra la resolución de la difusión térmica en un material de cambio de fase en estado transitorio. El problema 7 trata la configuración del sistema del problema tres, pero la losa del centro es un PCM con condiciones de frontera de segunda clase. El problema ocho consiste en la convección natural en un canal vertical utilizando el método de balances globales. El problema nueve es resolver el problema ocho acoplado a una pared semitransparente. Finalmente, el acoplamiento del problema siete con el problema nueve nos lleva al problema final de tesis.

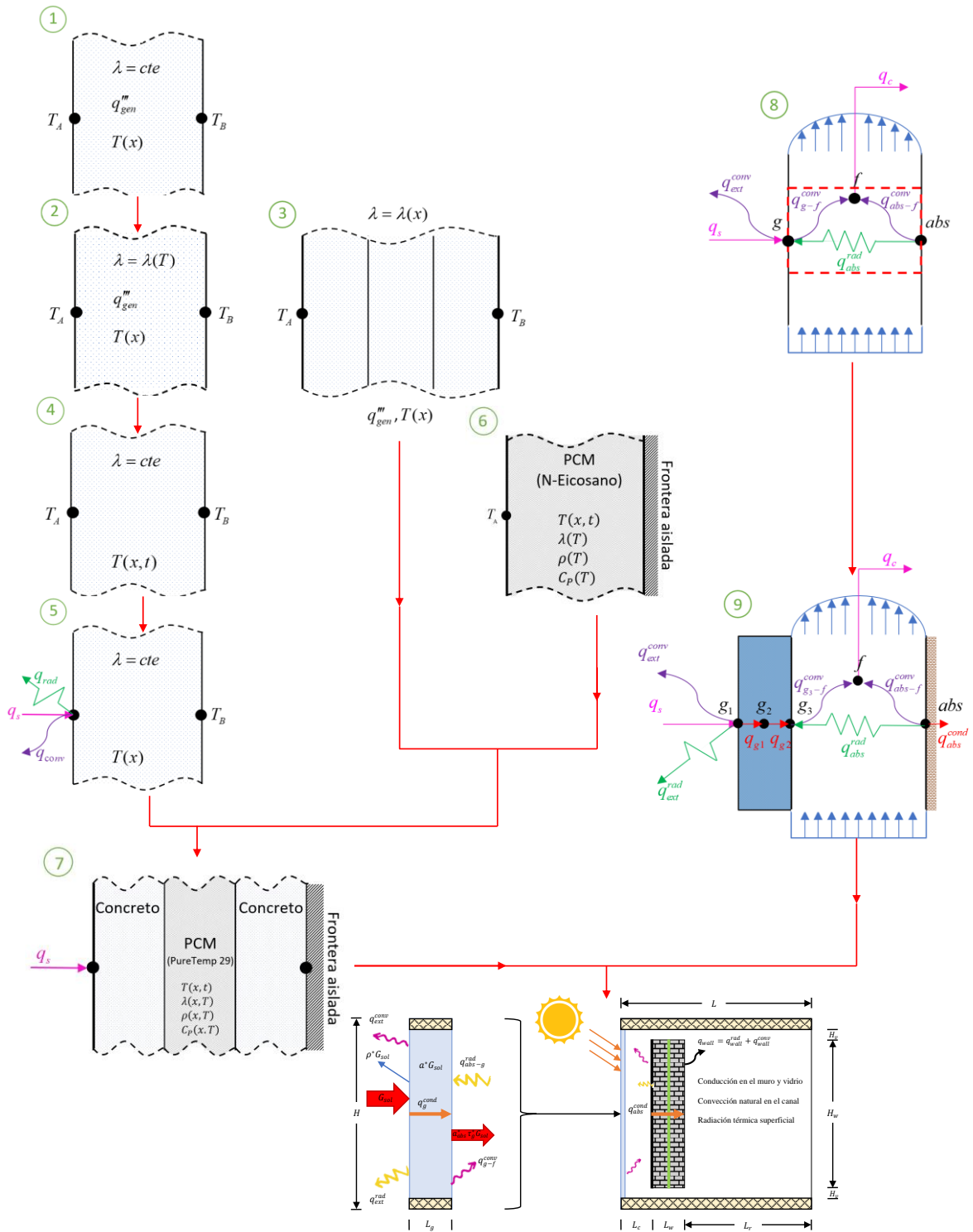


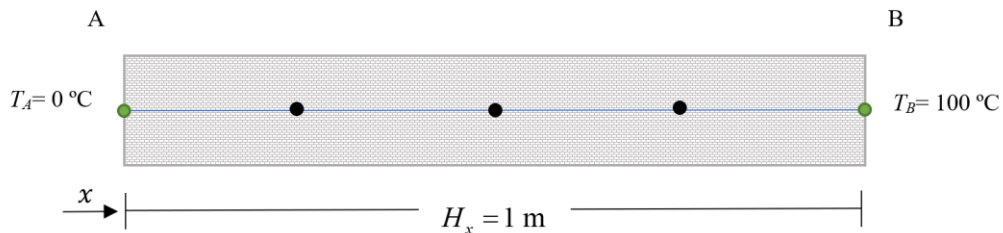
Figura 3.7. Descripción de la metodología realizada

### 3.4.1. Actividades de verificación para el modelo difusivo del método de volumen finito (MVF)

Inicialmente se resuelve la transferencia de calor unidimensional en estado permanente. Posteriormente el modelo va presentando propiedades termofísicas variables tanto de temperatura como de espacio, se empieza a trabajar con modelos de transferencia de calor en estados transitorios, se discretizan distintos tipos de condiciones de frontera y se le da un tratamiento especial al material de cambio de fase, todo bajo un enfoque diferencial, metodología por el cual el dominio de estudio es subdividido en un número finito de volúmenes de control contiguos, donde las ecuaciones de conservación son discretizadas para cada VC.

#### *Conducción unidimensional en estado permanente con fronteras de tipo Dirichlet*

En la Figura 3.8. se muestra el modelo físico de este problema. Consiste en la conducción de calor en una dimensión en una losa convencional, espesor de  $H_x = 1 \text{ m}$ . Con propiedades termofísicas constantes.



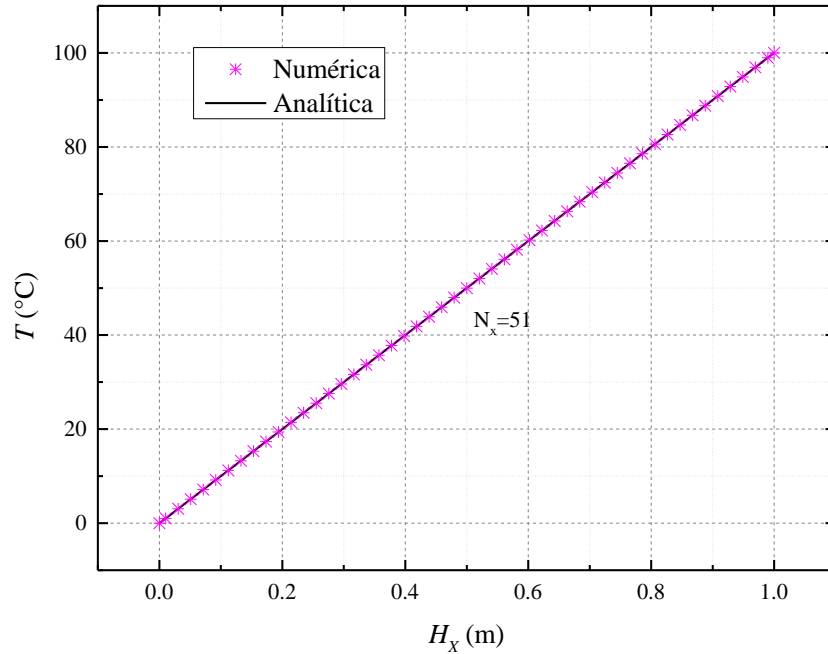
**Figura 3.8.** Modelo físico de una losa convencional unidimensional con condiciones de tipo Dirichlet.

Para la determinación del perfil de temperaturas se utilizó el MVF y los resultados se verificaron con la solución analítica dada por la Ec. (3.91).

$$T^*(x) = \left( \frac{T_B - T_A}{H_x} \right) x + T_A \quad (3.91)$$



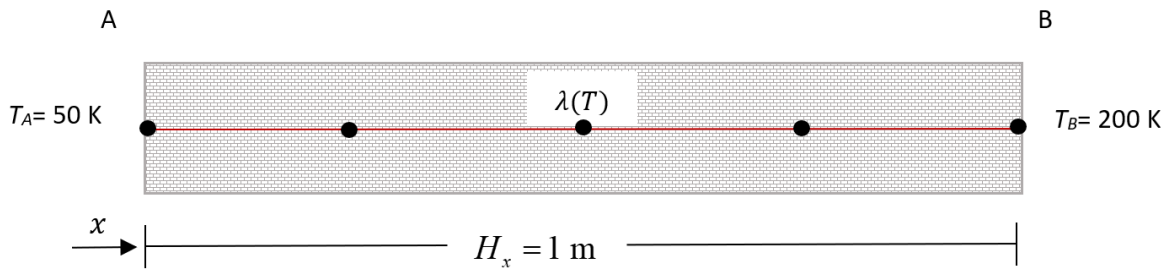
En la Figura 3.9. se presenta la comparación de los resultados obtenidos con la solución analítica donde se observa que la solución numérica obtenida por MVF corresponde de manera exacta con la analítica.



**Figura 3.9.** Comparación entre la solución analítica y la solución MVF con 51 nodos computacionales

### ***Conducción unidimensional con conductividad térmica variable y generación de energía***

Este problema se muestra en el modelo físico (Figura 3.10) consiste en una losa convencional con conductividad térmica variable y con una generación volumétrica de calor  $q_s = 50000 \text{ W/m}^2$ , cuenta con un espesor es de  $H_x = 1 \text{ m}$ , El sistema se encuentra sometido a condiciones de frontera de Dirichlet.



**Figura 3.10.** Modelo físico de una losa convencional unidimensional con condiciones de frontera de primera clase

Se considera que la conductividad térmica varía linealmente con la temperatura de acuerdo con la siguiente relación:

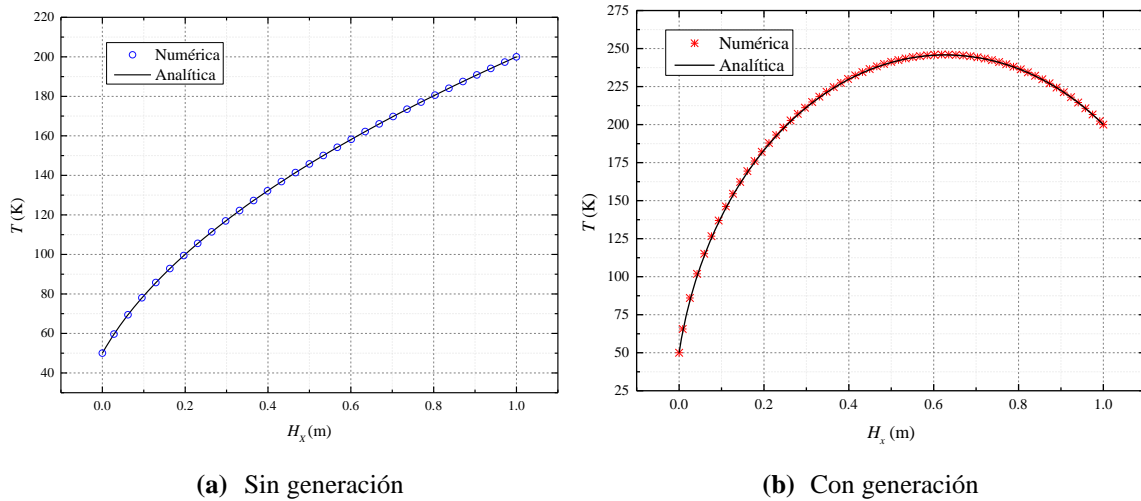
$$\lambda(T) = \lambda_0 T \quad (3.92)$$

donde  $\lambda_0 = 0.34 \text{ W/mK}$  y  $T$  es la temperatura en Kelvin.

Para propósitos de verificación se compara los resultados con la solución analítica del problema para esto, se desarrolló la Ec. (3.93):

$$T^*(x) = \left[ \frac{q'''}{\lambda_0} (H_x - x)x + \left( \frac{T_B^2 - T_A^2}{H_x} \right) x + T_A^2 \right]^{0.5} \quad (3.93)$$

En la Figura 3.11 se presentan los perfiles de temperatura con y sin generación obtenidos mediante MVF y los de la solución analítica. Se puede observar que los resultados obtenidos concuerdan de manera correcta con respecto a la solución analítica.

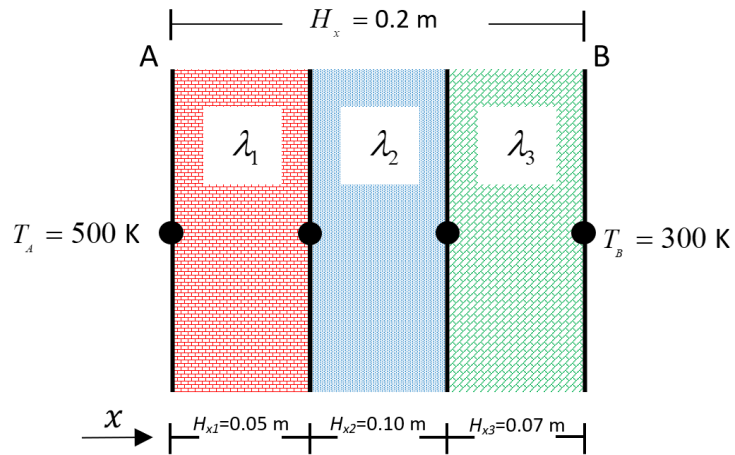


**Figura 3.11.** Comparación entre la solución analítica y la solución obtenida por el MVF.

### *Conducción de calor unidimensional en un medio compuesto*

El problema consiste en la transferencia de calor unidimensional con conductividad térmica dependiente de espacio, en estado permanente, sin generación, bajo condiciones de frontera de Dirichlet.

La configuración del problema se presenta en la Figura 3.12. Ésta consiste en una losa multimaterial compuesta por los siguientes espesores y materiales: 1)  $H_{x1} = 0.05$  m ladrillo;  $H_{x2} = 0.10$  m concreto;  $H_{x3} = 0.07$  m adobe, la frontera en  $x = 0$  m está sujeta a una temperatura  $T_A = 500$  K y la frontera en  $x = 0.2$  m permanece a una temperatura constante de  $T_B = 300$  K.



**Figura 3.12.** Modelo físico del sistema de losa compuesta de ladrillo, concreto y adobe

Para propósitos de verificación, se utilizó la solución analítica del sistema dada por las Ec. (3.94) -(3.98).

$$T(x) = \left\{ \begin{array}{ll} \left( \frac{T_1 - T_A}{H_{x1}} \right) x + T_A & , 0 < x < H_{x1} \\ \left( \frac{T_2 - T_1}{H_{x2}} \right) x + T_2 - \left( \frac{H_{x1} + H_{x2}}{H_{x2}} \right) (T_2 - T_1) & , H_{x1} < x < H_{x1} + H_{x2} \\ \left( \frac{T_B - T_2}{H_{x3}} \right) x + T_B - \left( \frac{H_x}{H_{x3}} \right) (T_B - T_2) & , H_{x1} + H_{x2} < x < H_x \end{array} \right. \quad (3.94)$$

donde  $T_1$  y  $T_2$  son las temperaturas en la interfase y están dadas por:

$$T_1 = \frac{[K_1(K_2 + K_3)]T_A + [K_2K_3]T_B}{(K_1 + K_2)(K_2 + K_3) - K_2^2} \quad (3.95)$$

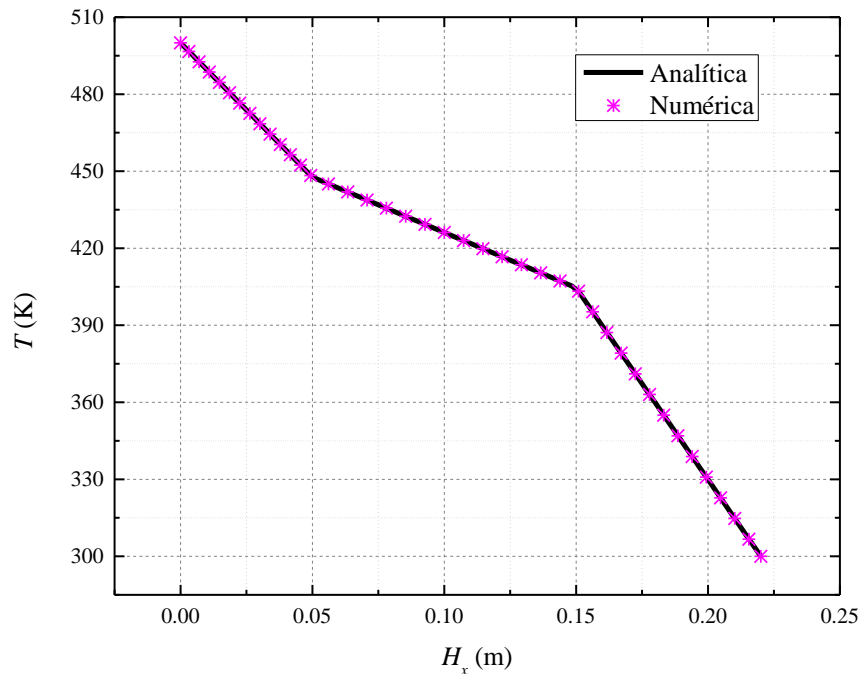
$$T_2 = \frac{[K_1K_2]T_A + [K_3(K_1 + K_2)]T_B}{(K_1 + K_2)(K_2 + K_3) - K_2^2} \quad (3.96)$$

$$K_1 = \frac{\lambda_1}{H_{x1}}, K_2 = \frac{\lambda_2}{H_{x2}}, K_3 = \frac{\lambda_3}{H_{x3}} \quad (3.97)$$

El flux de calor en la interfase del ladrillo y concreto está dada por la Ec. (3.98):

$$q_{1,2} = -\lambda_2 \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=H_{x1}} = -\frac{\lambda_2}{H_{x2}} (T_2 - T_1) \quad (3.98)$$

La Figura 3.13 muestra una perfecta concordancia entre los resultados numéricos y los resultados analíticos y esto se confirma en la Tabla 3.1 en la cual para los parámetros estudiados se encontraron errores relativos porcentuales del 0.00% lo cual indica que la técnica numérica resuelve de manera correcta este modelo.



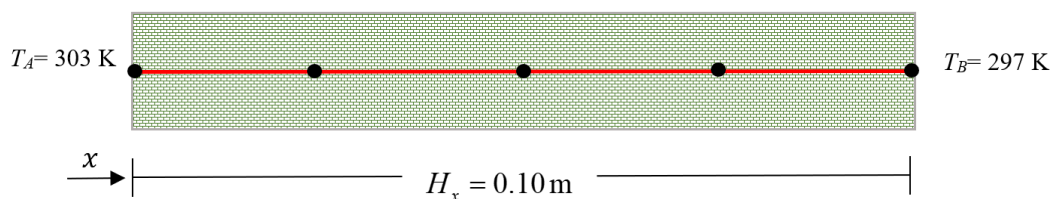
**Figura 3.13.** Comparación del perfil de temperatura entre la solución analítica y la solución.

**Tabla 3.1.** Comparación de la solución analítica contra el MVF.

Parámetro	Solución Analítica	Solución Numérica	Dif. [%]
$T_1$ [K]	447.69	447.69	0.00
$T_2$ [K]	404.61	404.61	0.00
$q_{1,2}$ [W/m <sup>2</sup> ]	732.30	732.30	0.00

### Conducción unidimensional en estado transitorio

La Figura 3.14 muestra el Modelo físico para un ejercicio de conducción unidimensional en una losa con un espesor de  $H_x = 0.10$  m, sin generación de calor, en estado transitorio  $T(x,t)$ . La condición inicial para este problema es de  $T_0 = 313$  K mientras que las siguientes condiciones de frontera son  $T_A = 303$  K y  $T_B = 297$  K. El estudio se realizó para dos distintos materiales con propiedades constantes: concreto y plomo.

**Figura 3.14.** Modelo físico de una losa uniforme con condiciones de frontera de primera clase.

La solución del MVF se verificó mediante la solución analítica obtenida por Ozisik (1976), la cual está dada por las Ec. (3.99) -(3.101),

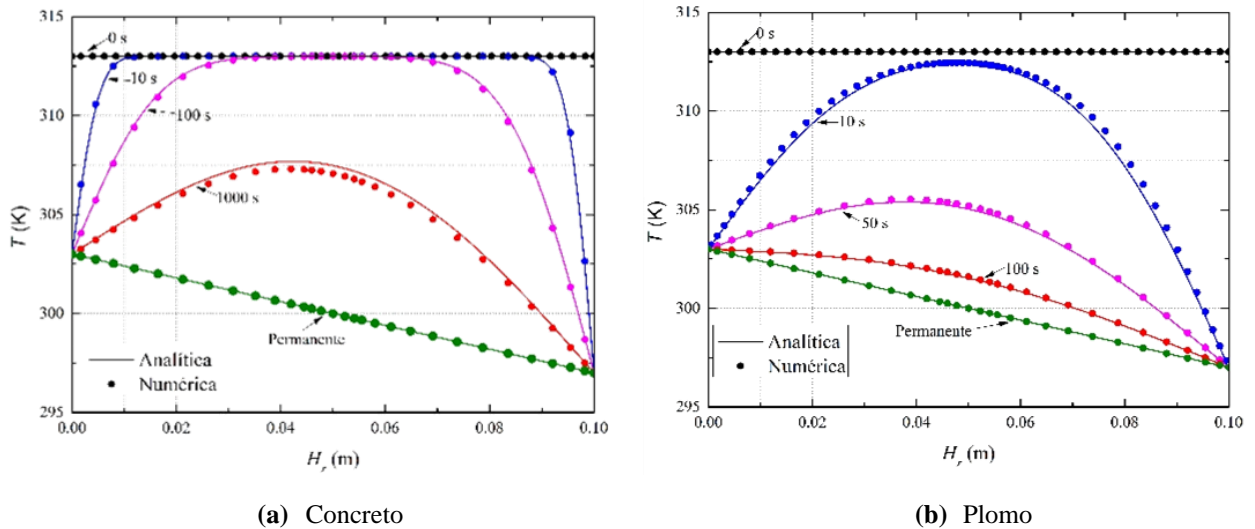
$$T(x,t) = T_A + \left( \frac{T_B - T_A}{H_x} \right) x + \frac{2}{H_x} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ e^{-\alpha \beta_m^2 t} \cdot \text{sen}(\beta_m x) \cdot \left[ \frac{T_o - T_A}{\beta_m} [1 - (-1)^m] + \frac{T_B - T_A}{\beta_m} (-1)^m \right] \right\} \quad (3.99)$$

donde:

$$\beta_m = m\pi / L \quad (3.100)$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (3.101)$$

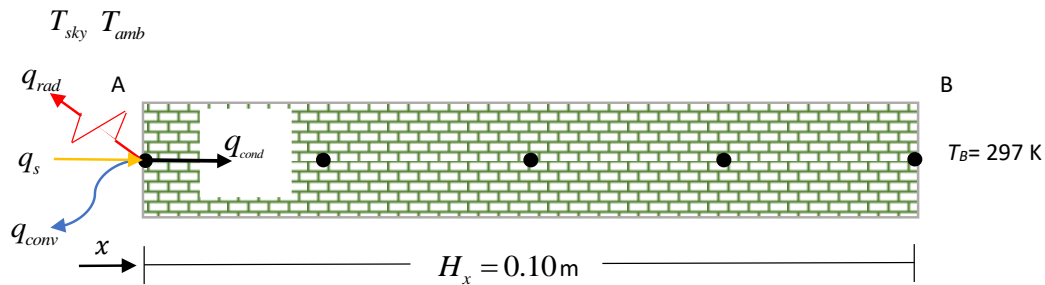
En las Figura 3.15 se presentan los perfiles de temperatura obtenidos para el concreto y plomo por medio de la solución numérica, así como los perfiles obtenidos mediante la solución analítica. Los resultados corresponden a 5 diferentes instantes de tiempo hasta alcanzar el estado permanente. Como se puede observar el modelo numérico resuelve de manera correcta el modelo matemático de la transferencia de calor en estado transitorio.



**Figura 3.15.** Comparación del perfil de temperatura del concreto y plomo entre la solución analítica y la solución del MVF para distintos instantes de tiempos.

### *Conducción de calor unidimensional con condiciones de frontera de segunda y tercera clase*

El problema consiste en la conducción de calor unidimensional en estado permanente en una losa de concreto con conductividad térmica constante ( $\lambda = 1.70 \text{ W/m K}$ ). Este sistema está sometido a distintas condiciones de frontera, para  $x = 0 \text{ m}$  se encuentra una condición de Robin (No lineal) y para  $x = H_x$  esta bajo una condición de Dirichlet. La representación gráfica del problema se muestra en la Figura 3.16. El sistema consiste en una losa homogénea de espesor  $H_x = 0.1 \text{ m}$ , sometida a un flujo de calor  $q_s = 750 \text{ W/m}^2$  en  $x=0 \text{ m}$ . Se consideran pérdidas por radiación y convección a un medio exterior. Por otro lado, en  $x = H_x$  se encuentra una temperatura constante  $T_B = 297 \text{ K}$ . Adicionalmente se consideraron los siguientes parámetros:  $h = 6 \text{ W/m}^2$ ,  $\varepsilon = 0.90$ ,  $T_{amb} = 303 \text{ K}$  y  $A = 1 \text{ m}^2$ .



**Figura 3.16.** Modelo Físico de una losa de concreto con condiciones de Frontera de Robin y Dirichlet

Para verificar la solución numérica, se desarrolló una solución analítica del problema. Ésta está dada por la Ec. (3.102).

$$T(x) = C_1(x) + C_2 \quad (3.102)$$

donde las constantes  $C_1$  y  $C_2$  se determinan mediante las Ec. (3.103) y (3.104):



$$C_1 = \frac{T_B - C_2}{L} \quad (3.103)$$

$$(\varepsilon^* \sigma L)C_2^4 + (\lambda + hL)C_2 + \left[ -(\varepsilon^* \sigma L T_{sky}^4 + hL T_{Amb} + q_s L + \lambda T_B) \right] = 0 \quad (3.104)$$

En la Tabla 3.2 se muestran los valores de la temperatura para diferentes posiciones, obtenidas mediante la solución analítica y la solución numérica. Se observa que los resultados cuantitativos obtenidos para ambas soluciones son idénticos. Así, se puede concluir que el método tratamiento para distintas condiciones de frontera y su implementación en el MVF es correcto.

**Tabla 3.2.** Comparación de la solución analítica contra el MVF del Ejercicio 1.

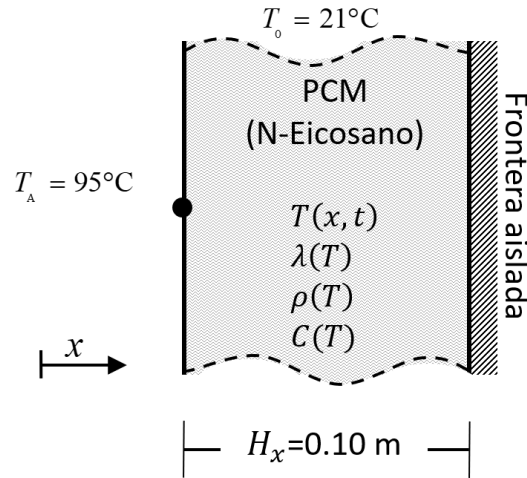
<b>Posición</b>	<b>Solución analítica</b>	<b>Solución numérica</b>	<b>Dif.</b>
<b><math>x</math> (m)</b>	<b><math>T</math> (K)</b>	<b><math>T</math>(K)</b>	<b>[%]</b>
0.000	325.09	325.09	0.00
0.025	318.07	318.07	0.00
0.050	311.05	311.05	0.00
0.075	304.02	304.02	0.00
0.100	297.00	297.00	0.00

### ***Transferencia de calor por difusión en un material de cambio de fase***

Para verificar la metodología para resolver transferencia de calor en un material de cambio de fase se reprodujeron los resultados analíticos reportados por (Solomon, 1979) y los resultados numéricos de (Arıcı et al;2018).

La representación gráfica del problema se presenta en la Figura 3.17. El sistema consiste en una losa de espesor de 0.10 m de N-Eicosano. Se considero una temperatura inicial de

21 °C, la frontera en  $x=H_x$  m se mantiene aislada y en  $x=0$  a una temperatura constante de 95 °C.



**Figura 3.17.** Modelo físico de losa-PCM

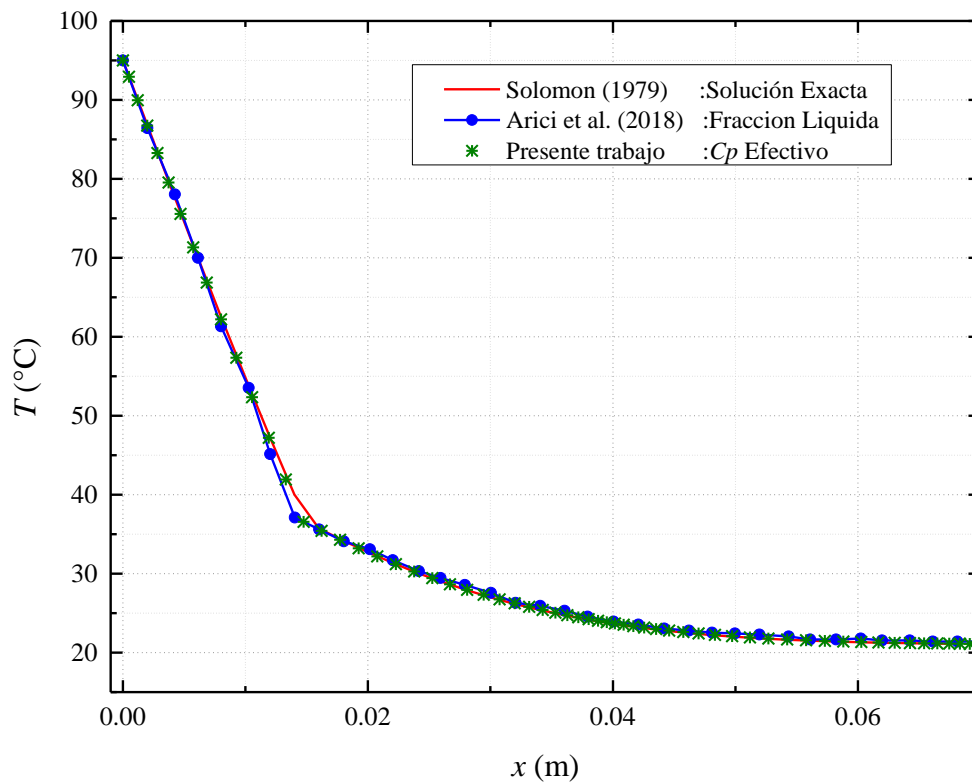
En la Figura 3.18 se presenta una comparación del perfil de temperaturas para  $0 \leq x \leq 0.68$  m. Se muestra el perfil de la temperatura en la losa en  $t=3600$  s con la solución analítica reportada por Solomon (1979).

Como se puede ver en la figura, el comportamiento de los resultados es muy similar. Adicionalmente, también existe correspondencia con los resultados reportados por Arici et al. (2018). mediante el método de fracción líquida. Se observa que los resultados obtenidos cualitativamente son satisfactorios.

Por otro lado, en la Tabla 3.3 se compara los resultados contra los reportados por la literatura, encontrándose un error relativo porcentual máximo de 0.47% en  $x = 0.008$  m respecto a la analítica, se concluye que el modelo reproduce satisfactoriamente los resultados de la solución analítica.

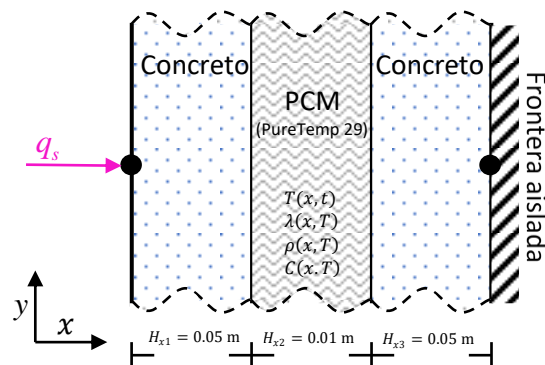
**Tabla 3.3.** Comparación entre la solución numérica contra la solución exacta de Solomon (1979) y fracción líquida de Arici et al (2018).

$x$ (m)	$T$ (°C) Solomon, 1979 (Exacta)	$T$ (°C) Arici et al. 2018 Fracción líquida	$T$ (°C) Presente estudio $C_p$ efectivo	% Error
0.000	95.00	95.00	95.00	0.00
0.008	62.58	61.32	62.29	0.47
0.018	34.18	34.09	34.10	0.23
0.028	27.95	28.57	28.04	0.32
0.038	24.17	24.55	24.24	0.29
0.048	22.23	22.53	22.29	0.27
0.058	21.41	21.67	21.44	0.14
0.068	21.12	21.40	21.12	0.00

**Figura 3.18.** Comparación de la distribución obtenida por el presente estudio con la solución exacta Solomon (1979) y fracción líquida Arici et al (2018).

### *Difusión de calor unidimensional en un sistema de losa concreto-PCM (PureTemp 29)*

El Modelo físico del problema propuesto se muestra en la Figura 3.19. Éste consiste en una losa compuesta por concreto y un PCM (PureTemp29). El PCM tiene un espesor de 0.01 m, se ubica entre dos secciones idénticas de concreto de 0.05 m de espesor, en la Frontera  $x=0$  incide un flujo de calor  $q_s = 750 \text{ w/m}^2$  sobre  $A=1 \text{ m}^2$  y la Frontera  $x = H_x$  se encuentra aislada.



**Figura 3.19.** Modelo físico de losa compuesta concreto-PCM

El modelo matemático se resuelve con el método de calor específico efectivo descrito con anterioridad en la Sección 2. Dado que no se encontraron soluciones de referencia para este problema en particular, se propuso verificar el código numérico comparando la energía almacenada de todo el sistema por medio de dos enfoques distintos: global y diferencial.

Partiendo de un enfoque global, un balance de energía sobre el sistema está dado por:

$$\frac{dE_{sto}^{BG}}{dt} = q_s A \quad (3.105)$$

Integrando en el tiempo se obtiene la energía total almacenada en ese periodo. Por otro lado, a partir de un enfoque diferencial, también es posible obtener la energía almacenada si se integra el término de acumulación de energía en cada volumen de control para cada

instante de tiempo. Así, las Ecuaciones (3.106a) y (3.106b) proporcionan la energía almacenada desde el enfoque global y enfoque diferencial, respectivamente:

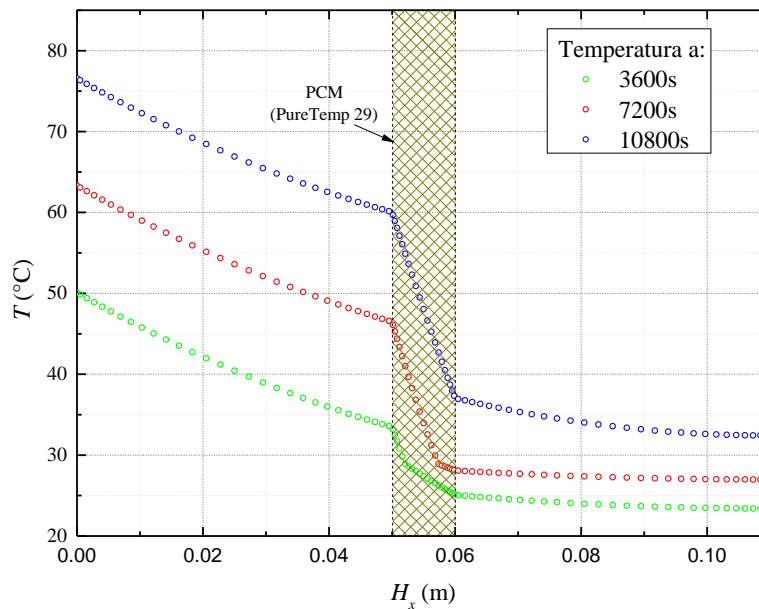
$$\Delta E_{sto}^{BG} = A q_s t_f \quad (3.106a)$$

$$\Delta E_{sto}^{dif} = A \int_0^{t_f} \int_0^{H_x} \left( \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \right) dx dt \quad (3.106b)$$

donde se considera  $A=1 \text{ m}^2$

La Ec. (3.106) representa el cambio de energía total del sistema en un el tiempo. Esta ecuación se fundamenta en la Primera Ley de la Termodinámica y puede considerarse como una solución analítica para la energía almacenada. De hecho, la Ec. (3.106) es equivalente a la Ec. (3.7), la cual se obtuvo a partir de un enfoque diferencial.

Se obtuvo la distribución de temperaturas para tres tiempos de modelación, 3600 s, 7200 y 10800 s. Éstos se presentan en la Figura 3.20. Se observa el comportamiento de los perfiles de temperatura son parecidos para las secciones de concreto. Por el contrario, en la sección de PCM se puede observar como el gradiente de temperatura tiene un comportamiento más pronunciado respecto al concreto.



**Figura 3.20.** Distribución de temperaturas para un sistema losa concreto-PCM en tres instantes de tiempo.

La Tabla 3.4 muestra los valores de energía almacenada en los tres diferentes instantes de tiempo. Se observa una desviación máxima de 0.24 % a los 10800 s. Esto confirma que la solución numérica reproduce satisfactoriamente a la solución analítica de este problema, lo cual da certeza de la implementación del algoritmo.

**Tabla 3.4.** Energía almacenada (MJ) en el sistema a diferentes instantes.

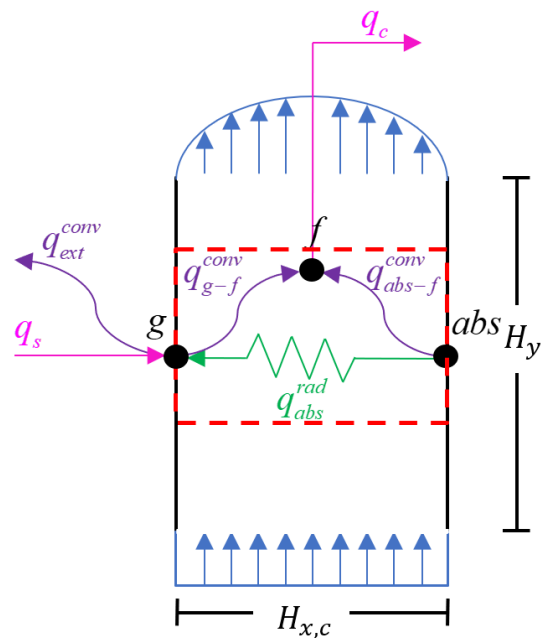
$t$ (s)	$\Delta E_{sto}^{BG}$	$\Delta E_{sto}^{dif}$	$\epsilon\%$
3600	2.70	2.70	0.00
7200	5.40	5.41	0.18
10800	8.10	8.12	0.24

### 3.4.2. Actividades de verificación para el modelo de Balances Globales De Energía (BG)

En relación con la solución del sistema muro Trombe-PCM se plantearon problemas con balances globales para resolver la fenomenología en el sistema colector-canal. Esto debido a que el método de BG en un sistema cerrado donde solo evoluciona de un estado inicial a uno final a través de un proceso no adiabático, la variación de energía debe ser la misma, esto nos permite cuantificar la cantidad de energía que es intercambiada y acumulada en el sistema por medio de la variación de temperatura desde un punto de vista macroscópico.

#### *Transferencia de calor unidimensional en un sistema canal con BG en estado permanente*

El Modelo físico del problema se muestra en la Figura 3.21. Consiste en la transferencia de calor por convección natural y radiación en un sistema de canal de aire de  $H_{x,c} = 0.20$  m de espesor. En la frontera  $x=0$  incide un flujo de calor  $q_s$  y se tiene una pérdida al exterior por el mecanismo de convección, por otro lado, en el interior del canal se establece intercambio radiativo superficial entre las fronteras, así transferencia de calor por convección natural. Se considera un régimen laminar e incomprensible.



**Figura 3.21.** Modelo físico del sistema canal.

Se asume que las propiedades termofísicas del fluido varían linealmente con la temperatura.

En la Tabla 3.5 se muestran los valores de flujo de calor obtenidos para el sistema canal en estado estacionario.

**Tabla 3.5.** Flujo de calor obtenidos para el sistema canal mediante balances globales.

$q_s$	750.00
$q_{abs-g}^{rad}$	-20.25
$q_{abs-f}^{conv}$	186.70
$q_{ext}$	531.00
$q_c^*$	385.43

Con el propósito de verificar que la solución implementada es la correcta, se recurre a un balance de energía en todo el sistema buscando que se respete el principio de conservación de energía.



El balance resultante en el sistema canal es:

$$q_s = q_{ext}^{conv} + q_c^* - q_{abs-g}^{rad} + q_{abs-g}^{conv} \quad (3.107)$$

En la Tabla 3.6 se muestran la comparación entre el flujo de calor  $q_s$  y el balance de la Ec. (3.107).

**Tabla 3.6.** Resultados obtenidos por medio del método de BG y conservación de energía.

$q_s$ (W/m <sup>2</sup> )	$\Sigma q$ (W/m <sup>2</sup> )	$\varepsilon\%$
750.00	749.89	0.01

Se observa que los resultados mediante BG fueron satisfactorios en cuanto a la verificación de este problema.

### ***Transferencia de calor unidimensional en un sistema de colector-canal con BG en estado transitorio***

El Modelo físico propuesto se muestra en la Figura 3.22. Consiste en la transferencia de calor por difusión, convección natural y radiación en un sistema de vidrio de espesor de 4 mm y canal de aire de  $L_c = 0.20$  m de espesor. En la frontera  $x=0$  incide sobre la pared semitransparente un flujo de calor  $G_{sol}$  y se tiene pérdidas radiativas y convectivas al exterior, en el vidrio solamente hay difusión de calor, por otro lado, en el interior del canal se establece intercambio radiativo superficial entre el absorbedor y el vidrio, así transferencia de calor convección natural.

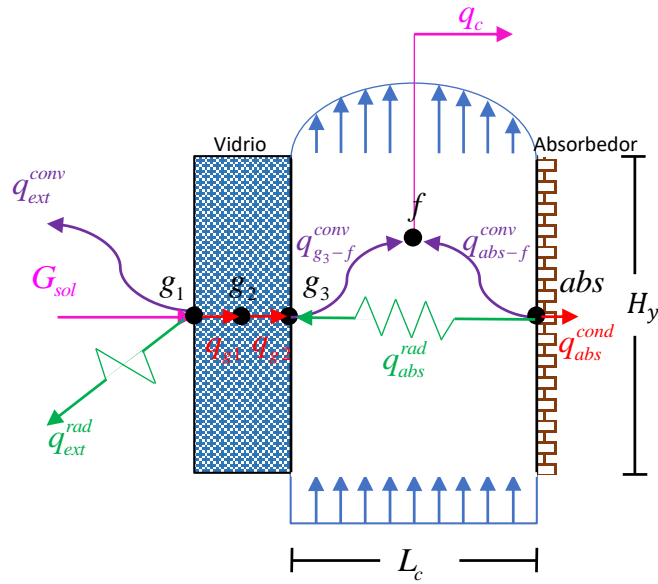


Figura 3.22. Modelo físico del sistema colector-canal.

La determinación de parámetros y propiedades para el Modelo convectivo en el canal se determinó en el Ccapítulo 2. Con el fin de verificar que el código implementado para la solución numérica de BG es la correcta se propone realizar tres balances que respeten el principio de conservación de energía, uno sobre la pared semitransparente, otro sobre el canal y por último sobre todo el sistema colector-canal.

Balance resultante en la pared semitransparente:

$$G_{sol} + q_{abs}^{rad} = q_{g-f}^{conv} + \tau_g^* G_{sol} + \rho_g^* G_{sol} + q_{ext}^{rad} + q_{ext}^{conv} \quad (3.108)$$

Balance resultante en el canal del fluido:

$$\alpha_{abs}^* \tau_g^* G_{sol} + q_{g2} = q_c + q_{abs}^{cond} \quad (3.109)$$

Balance resultante en todo el sistema colector-canal

$$\alpha_g^* G_{sol} A + \alpha_{abs}^* \tau_g^* G_{sol} A = q_{ext}^{conv} A + q_{ext}^{rad} A + q_c A_c + q_{abs}^{cond} A \quad (3.110)$$

donde la sumatoria de los flujos de calor es:

$$G_{sol} = \frac{q_{ext}^{conv} + q_{ext}^{rad} + q_c^* + q_{abs}^{cond}}{(\alpha_g^* + \alpha_{abs}^* \tau_g^*)} = \Sigma q \quad (3.111)$$

La Tabla 3.7 se muestran los valores de flujo de calor obtenidos por medio de BG.

**Tabla 3.7** Valores de flujo de calor obtenido mediante balances globales.

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

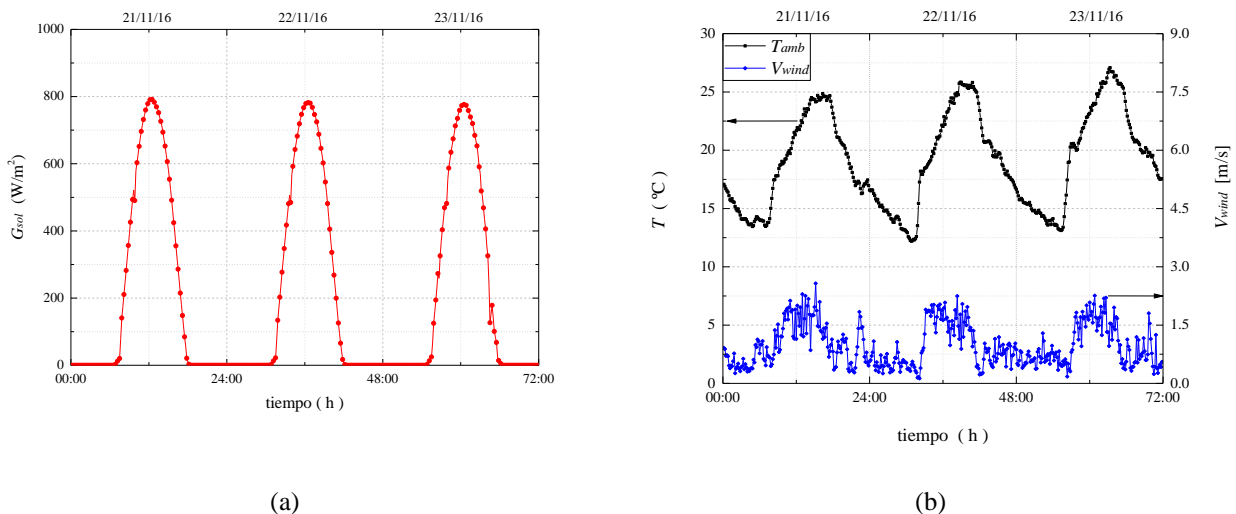
Como se ve, en la Tabla 3.8 los resultados de los balances resultantes de la conservación de energía tanto para los subsistemas como para el sistema colector-canal son idénticos a los resultados obtenidos por el método de BG, con lo cual se puede concluir que el algoritmo implementado fue el correcto.

**Tabla 3.8.** Resultados obtenidos por medio del método de BG y conservación de energía.

Sección	$G_{sol}$ (W/m <sup>2</sup> )	$\Sigma q$ (W/m <sup>2</sup> )	$\varepsilon\%$
Sistema colector-canal	750.00	749.97	0.003

### 3.4.3. Validación del modelo conductivo en una losa de concreto

Una vez se desarrolló y verifico el código numérico para el sistema colector-canal con BG y el sistema del muro Trombe PCM con MVF, el siguiente paso fue acoplar ambos modelos numéricos. De este modo, se propuso realizar una validación del modelo reproduciendo los datos experimentales de la tesis doctoral de Chagolla-Aranda, (2017) y publicados por Chagolla-Aranda et al. (2017) en la revista *Energy and Buildings*. Los datos experimentales corresponden a mediciones realizadas del 21 al 23 de noviembre de 2016 en la ciudad de Cuernavaca, Morelos. En la Figura 3.23 se muestran las variables meteorológicas de temperatura, velocidad del viento y radiación solar global utilizadas en la simulación. La temperatura ambiente promedio durante este periodo fue de  $19.1^{\circ}\text{C}$  con un máximo de  $27.1^{\circ}\text{C}$  y un mínimo de  $12.2^{\circ}\text{C}$ . La radiación solar máxima fue de alrededor  $780 \text{ W/m}^2$ . La velocidad del viento registró valores menores a  $2 \text{ m/s}$ , la mayor parte del tiempo. Se observó que la velocidad del viento aumentaba durante el día y disminuía durante la noche.



**Figura 3.23.** Datos meteorológicos para la validación: (a)  $G_{sol}$ , (b)  $T_{amb}$ ,  $V_{wind}$

En la Tabla 3.9 se muestran los parámetros de las propiedades radiativas y termofísicas que se utilizaron en el trabajo reportado por Chagolla-Aranda (2017), con el cual se hace la validación. En la segunda y tercera columna se muestran los valores correspondientes a las propiedades radiativas de absorptancia ( $\rho^*_c$ ) y emitancia ( $\varepsilon^*_c$ ), respectivamente. Las propiedades termofísicas correspondientes a la conductividad térmica ( $\lambda$ ), densidad ( $\rho$ ) y calor específico ( $c_p$ ) se muestran entre las columnas cuarta a sexta, respectivamente. La séptima columna corresponde al espesor de la losa.

**Tabla 3.9.** Propiedades radiativas y termofísicas físicas del concreto.

Componente	Propiedades radiativas		Propiedades termofísicas			Espesor
	$\rho^*$	$\varepsilon^*$	$\lambda$ (W/mK)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (J/kgK)	$L_w$ (m)
Losa	0.4	0.82	1.74	2300	840	0.1

El cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección al exterior se obtiene con la correlación (Duffie y Beckman, 1980) siguiente:

$$h_{ext} = 2.8 + 3V_{wind} \quad (3.112)$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección al interior se considera de 6.13 W/m<sup>2</sup>K cuando el flujo de calor va hacia el interior y 9.26 W/m<sup>2</sup>K cuando va hacia el exterior (ASHRAE, 2001).

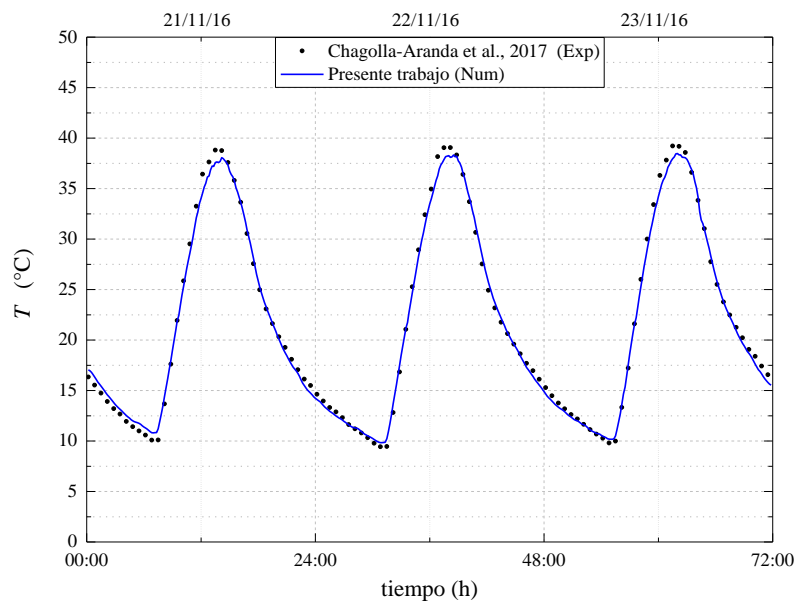
Para determinar la temperatura de la bóveda celeste  $T_{sky}$  se consideró la relación de Swinbank (Duffie y Beckman, 1980):

$$T_{sky} = 0.0552T_{amb}^{1.5} \quad (3.113)$$

Para realizar la simulación, se realizó un ajuste de funciones para la radiación solar y la temperatura ambiente. Por otro lado, debido al comportamiento variable de la velocidad

del viento, sus valores fueron introducidos al código en intervalos de 1 hr y fueron interpolados con una relación lineal. Posteriormente, con estas funciones se alimentó el código numérico que resuelve el modelo conductivo en el muro, así como con los parámetros proporcionados por Chagolla-Aranda (2017).

En la Figura 3.24 se muestra la temperatura de la superficie exterior del techo de concreto experimental y la obtenida mediante el modelo matemático. La diferencia máxima encontrada fue de 1.9 °C, presentándose el día 22 de noviembre. La Tabla 3.10 muestra la diferencia porcentual y promedio para cada día, donde la diferencia porcentual máxima encontrada fue de 12%, lo cual puede atribuirse a la combinación del error numérico y del ajuste de la función de radiación solar y temperatura ambiente. Adicionalmente, se observó que el 90% de los valores calculados se acercan significativamente a las mediciones experimentales con una diferencia menor al 10% durante todo el período analizado. Por lo que se observa que el modelo se ajusta a los datos experimentales de forma satisfactoria.



**Figura 3.24.** Comparación de la Temperatura exterior de la losa de concreto.

**Tabla 3.10.** Diferencia porcentual de la temperatura exterior.

Día	% Diferencia máxima	% Diferencia promedio
21/11/2016	11.14	3.41
22/11/2016	12.04	2.73
23/11/2016	7.99	2.29

### 3.4.4. Estudio de independencia de malla e independencia de paso de tiempo

Una vez que se concluyó el código numérico que resuelve el problema de la transferencia de calor conjugada en un sistema de muro Trombe con un material de cambio de fase (PCM-TW) se procedió a realizar el estudio de independencia de malla e independencia de paso de tiempo. En esta sección se presenta un estudio de la independencia de malla e independencia de paso de tiempo. El propósito del primero es establecer el tamaño de malla para el cual la solución del problema consigue independencia del número de nodos. Por otro lado, el segundo es establecer el paso de tiempo óptimo hasta donde la solución alcanza un comportamiento dinámico constante en el tiempo.

#### *Independencia de malla espacial*

El estudio se realiza con las condiciones climatológicas del día más frío del mes de enero (18 de enero de 2014) para la ciudad de Tulancingo. Estas condiciones son las siguientes:  $G_{sol} = 750 \text{ W/m}^2$ ,  $T_{amb} = 14 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $V_{wind} = 1 \text{ m/s}$ , considerando un canal de  $L_c = 20 \text{ cm}$ ,  $H_v = 20 \text{ cm}$  y un muro de concreto-PCM (PureTemp 29) con  $H_{x,1} = H_{x,3} = 5 \text{ cm}$  y  $H_{x,2} = 1 \text{ cm}$ . Los parámetros para la evaluación fueron la energía almacenada ( $E_{sto}$ ), fracción líquida ( $f_{ave}$ ), flujo de calor útil del canal ( $q_c$ ) y el flujo de calor del muro a la habitación ( $q_{wall}$ ). Se emplearon mallas fijando el número de nodos para la sección de PCM desde 11 hasta 51 nodos en incrementos de 10 nodos, mientras que para cada sección de concreto se utilizaron 31, 41 y 51 nodos con un paso de tiempo de  $\Delta t = 0.5 \text{ s}$ .

En la Tabla 3.11, se presentan los resultados resumidos de todas las corridas realizadas para el estudio de independencia de malla espacial. Donde se muestra el error relativo porcentual para cada uno de los diferentes parámetros evaluados. Se considero un criterio para el cambio de variable menor al 0.5%.

**Tabla 3.11.** Análisis de independencia de malla. Datos para las 9 P.M.

Numero de nodos en PCM	Numero de nodos en concreto	$E_{sto}$ (MJ)	$f_{ave}$	$q_c$ (W/m <sup>2</sup> )	$q_{wall}$ (W/m <sup>2</sup> )	$\Delta(\%)$
11	62	2.33 (---)	0.809 (---)	-431.55 (---)	53.16 (---)	---
	82	2.32 (0.61)	0.809 (0.00)	-431.55 (0.00)	53.16 (0.00)	
	<b>102</b>	<b>2.32 (0.01)</b>	<b>0.809 (0.01)</b>	<b>-431.55 (0.00)</b>	<b>53.16 (0.00)</b>	
21	62	2.33 (---)	0.808 (---)	-430.98 (---)	53.18 (---)	0.64
	<b>82</b>	<b>2.33 (0.12)</b>	<b>0.808 (0.00)</b>	<b>-430.98 (0.00)</b>	<b>53.18 (0.00)</b>	
	102	2.32 (0.56)	0.808 (0.00)	-430.98 (0.00)	53.18 (0.00)	
31	<b>62</b>	<b>2.31 (---)</b>	<b>0.807 (---)</b>	<b>-430.86 (---)</b>	<b>53.21 (---)</b>	1.02
	82	2.31 (0.14)	0.807 (0.00)	-430.87 (0.00)	53.21 (0.00)	
	102	2.31 (0.02)	0.807 (0.00)	-430.87 (0.00)	53.21 (0.00)	
41	<b>62</b>	<b>2.30 (---)</b>	<b>0.807 (---)</b>	<b>-430.82 (---)</b>	<b>53.22 (---)</b>	<b>0.43</b>
	82	2.30 (0.02)	0.807 (0.00)	-430.82 (0.00)	53.22 (0.00)	
	102	2.30 (0.01)	0.807 (0.00)	-430.82 (0.00)	53.22 (0.00)	
51	<b>62</b>	<b>2.29 (---)</b>	<b>0.807 (---)</b>	<b>-430.79 (---)</b>	<b>53.22 (---)</b>	0.04
	82	2.30 (0.01)	0.807 (0.00)	-430.80 (0.00)	53.22 (0.00)	
	102	2.30 (0.00)	0.807 (0.00)	-430.80 (0.00)	53.22 (0.00)	

\* Los valores en ( ) corresponden al error relativo porcentual.



En la tabla se observa que el número de nodos que se encuentra debajo del criterio elegido para todos los parámetros, donde los resultados en rojo indican el mejor valor para cada estudio, de ahí se calculó el mejor error relativo porcentual de los mejores casos, resultando el mejor valor a partir de la malla de 41 nodos en PCM y 62 nodos para el concreto. Con base en ello, esta densidad de malla se eligió para realizar el estudio del presente trabajo.

### ***Independencia de paso de tiempo***

Una vez establecido el número de nodos para la densidad de malla, se procede a realizar el estudio sobre la dependencia temporal.

El modelo matemático tiene la particularidad de ser condicionalmente estable, pero puede tener errores de truncamiento de primer orden con respecto al tiempo, debido a esto, se requiere pasos de tiempo pequeños para asegurar la exactitud de los resultados (Patankar, 1980).

Para el análisis de la independencia de paso de tiempo se establecieron los parámetros óptimos obtenidos en el estudio de independencia de malla: 41 nodos en PCM y 62 nodos para el concreto.

En la Tabla 3.12 se presentan los resultados para los distintos parámetros. Se observa que la mayoría de los parámetros de análisis tienen una dependencia relativamente muy débil respecto a los cambios flujos de calor y de fracción líquida media. Sin embargo, el almacenamiento de energía sí presenta cambios significativos, se considera que para un paso de tiempo de 1 s el código produce resultados independientes del  $\Delta t$ . Así, se eligió un paso de tiempo de 1 s para el estudio del presente trabajo.

**Tabla 3.12.** Análisis de independencia de paso de tiempo. Datos para las 9 P.M.

$\Delta t$ (s)	$E_{sto}$ (MJ)	$f_{ave}$	$q_c$ (W/m <sup>2</sup> )	$q_{wall}$ (W/m <sup>2</sup> )
10.0	2.30 (---)	0.810 (---)	-430.82 (---)	53.22 (---)
5.0	2.29 (0.04)	0.810 (0.00)	-430.81 (0.01)	53.22 (0.02)
4.0	2.29 (0.06)	0.810 (0.01)	-430.81 (0.01)	53.22 (0.01)
3.0	2.29 (0.11)	0.810 (0.01)	-430.80 (0.00)	53.22 (0.00)
2.0	2.29 (0.16)	0.810 (0.00)	-430.79 (0.00)	53.22 (0.00)
<b>1.0</b>	<b>2.29 (0.07)</b>	<b>0.810 (0.00)</b>	<b>-430.78 (0.00)</b>	<b>53.22 (0.00)</b>
0.5	2.28 (0.07)	0.810 (0.00)	-430.76 (0.00)	53.22 (0.00)

\* Los valores en ( ) corresponden al error relativo porcentual.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados del sistema PCM-TW en la configuración de calentamiento. Para el estudio, se consideraron dos ciudades de la República Mexicana con clima generalmente frío: Tulancingo, Hidalgo y Tacubaya, Ciudad de México. El análisis térmico se realizó utilizando datos climáticos ( $G_{sol}$ ,  $T_{amb}$  y  $V_{wind}$ ) del día más frío de cada mes de todo un año.

Este capítulo está compuesto por cuatro secciones. En primer lugar, se definen los parámetros de estudio. Posteriormente, se continúa con el estudio paramétrico del sistema en función del efecto del punto de fusión del PCM y finalmente se presenta la evaluación térmica anual del PCM-TW para las dos ciudades seleccionadas.

#### 4.1. Parámetros de Estudio

Como se mencionó anteriormente, para el estudio se eligieron dos ciudades con clima generalmente frío durante todo un año. Las ciudades escogidas fueron Tulancingo, Hidalgo y la alcaldía de Tacubaya en la Ciudad de México. El análisis térmico se efectuó durante un lapso de 24 horas a partir de la primera hora de radiación solar (7:00 AM). Se consideró que el PCM-TW está al Sur. Esto es debido a que, en el hemisferio norte, esta orientación presenta la máxima exposición solar a lo largo del año. Los datos climáticos utilizados para cada ciudad fueron proporcionados por la Comisión Nacional del Agua y el Servicio Meteorológico Nacional (CONAGUA-SMN). Esta información se presenta en el Anexo A.

Con relación a las dimensiones del PCM-TW, de acuerdo con Hernández-López (2016), las dimensiones del ancho de canal y de las ventilas que proporcionan el mejor desempeño de un TW en una habitación de 3 m de altura son  $L_c=20$  cm,  $H_v=20$  cm. En ese sentido,

estas dimensiones fueron consideradas para el presente trabajo. El espesor del muro almacenador es de 11 cm. 1 cm corresponde al PCM el cual se encuentra entre dos losas de concreto, cada una con un espesor de 5 cm. Por otro lado, la temperatura de la habitación es constante y se estableció a un valor de 24 °C (297 K).

Como parámetros de análisis se emplean temperaturas en el sistema y conceptos tales como la fracción líquida media ( $f_{ave}$ ), flujos de calor, y la energía almacenada/suministrada por el sistema. Tanto los flujos de calor como la energía se definen por unidad de superficie expuesta al Sol ( $H_w W$ ).

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

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

donde  $f(T)$  es la fracción líquida local. Ésta está definida, de acuerdo con la consideración de comportamiento lineal (Capítulo 2) como:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## 4.2. Estudio Paramétrico del Sistema: Efecto del Punto de Fusión del PCM

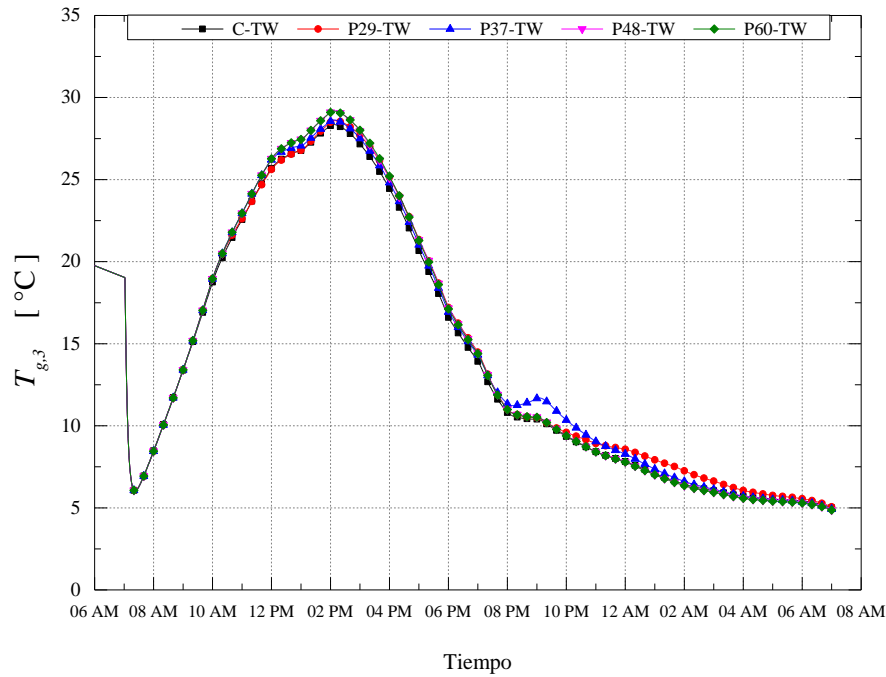
Para realizar este estudio, se consideró el día más frío de todo el año (18 de enero) en la ciudad de Tulancingo, Hidalgo. Este análisis tiene el propósito de determinar el PCM cuyo punto de fusión proporcione el mejor desempeño del PCM-TW. Así, se evaluaron cuatro PCM con distinto punto de fusión: 1) 29 °C (P29-TW), 2) 37 °C (P37-TW), 3) de 48 °C

(P48-TW) y 4) de 60 °C (P60-TW). Las propiedades termofísicas del concreto se mostraron en la Tabla 3.9, mientras que las propiedades de los distintos PCM se muestran en la Tabla 4.1.

En la Figura 4.1 se presenta la evolución de la temperatura de la superficie de la pared semitransparente expuesta al canal ( $T_{g,3}$ ) para los distintos casos. Se puede observar que el comportamiento es muy similar para los cuatro materiales. Al inicio del día (7:00 AM), la temperatura de  $T_{g,3}$  presenta valores de 6 °C para todos los casos. Se observa que, en general, el material del muro tiene poco efecto sobre la temperatura del vidrio. A lo largo del día,  $T_{g,3}$  tiene el mismo comportamiento para todos los casos. Sin embargo, entre las 11:00 AM y las 4:00 PM los casos P48-TW y P60-TW presentan los mayores valores de temperatura estando hasta 1 °C por encima de los otros casos a las 2:00 PM. En lo que resta del día,  $T_{g,3}$  tiene un comportamiento similar en todos los casos. No obstante, para P37-TW existe un pequeño repunte a las 8:00 PM mismo que alcanza su máximo a las 9:00 PM. Después de esta hora, la temperatura disminuye a valores similares al resto de los casos.

**Tabla 4.1.** Propiedades termofísicas del PCM (PureTemp, 2021).

Material PCM	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )		Conductividad Térmica (W/mK)		Calor especifico (J/kgK)		Entalpía de fusión (J/kg)	Punto de fusión (°C)
	$\rho_l$	$\rho_s$	$\lambda_l$	$\lambda_s$	$C_{P,l}$	$C_{P,s}$	$h_{ls}$	$T_{PCM}$
P-29	850	940	0.15	0.25	1940	1770	202000	29
P-37	840	920	0.15	0.25	2630	2210	210000	37
P-48	820	900	0.15	0.25	2270	2100	230000	48
P-60	870	960	0.15	0.25	2380	2040	220000	60



**Figura 4.1.** Efecto del punto de fusión sobre la temperatura de la pared semitransparente.

En la Figura 4.2 se presenta el comportamiento de la temperatura del fluido en el canal ( $T_f$ ). Antes de las 11:00 AM, su comportamiento es prácticamente el mismo para todos los materiales. Pero desde ese momento en adelante, la temperatura empieza a diferenciarse entre los diferentes casos  $T_f$  alcanza un máximo de 27.7 °C para P60-TW y de 27.6 °C para P48-TW cerca de las 3:00 PM. Mientras que para P37-TW, P29-TW y C-TW el valor máximo es de 27.5 °C, 27.6 °C y 27.2 °C, respectivamente.

Posteriormente,  $T_f$  disminuye para todos los materiales. Es a partir de las 7:00 PM cuando el sistema de TW deja de recibir radiación solar de modo que el decremento de la temperatura se vuelve menos pronunciado. La causa de ello es que el muro absorbedor empieza a liberar la energía almacenada a sus alrededores, de nuevo es el momento en el cual los PCM que alcanzaron a almacenar la mayor energía tardan más en bajar su temperatura.

En la Figura 4.3 se muestra el comportamiento de la temperatura del absorbedor. Al inicio del día se presentan valores de temperatura de 22.6 °C. Similar a las temperaturas anteriores, es a las 11:00 AM cuando empiezan a notarse diferencias en la del absorbedor.

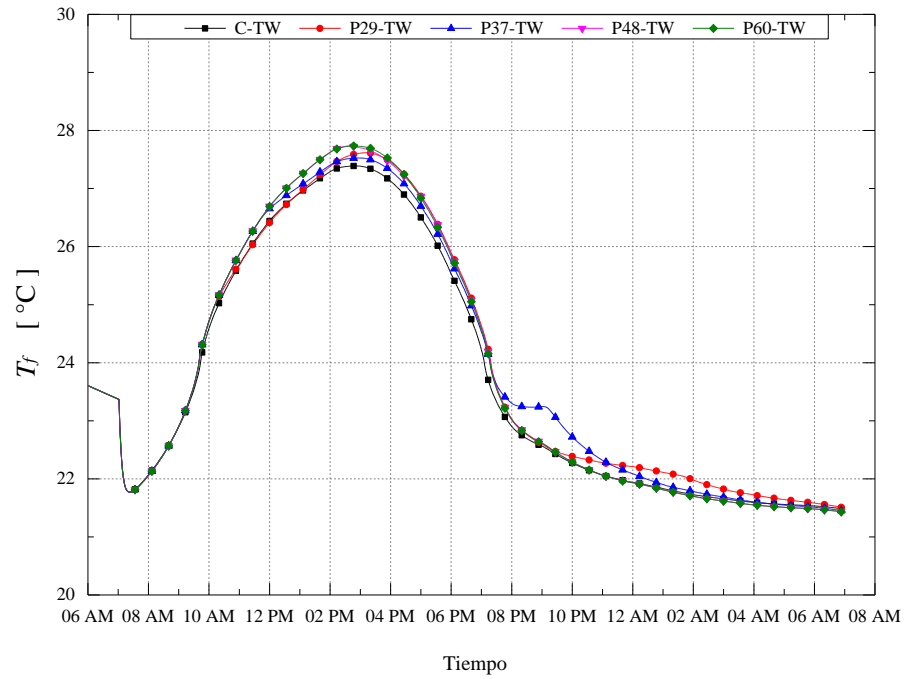
Estás diferencias son de 4° C entre el P48-TW/P60-TW y C-TW a las 3:00 PM, de 5° C entre el P37-TW y el resto a las 9:00 PM, y de 5° C entre el P29-TW y C-TW/P48-TW/P60-TW a las 2:00 AM. Este comportamiento debe estar relacionado con el proceso de almacenamiento y liberación de energía en el muro.

Una vez que el absorbedor deja de recibir la radiación solar (7:00 PM), éste empieza a disminuir su temperatura, aquí es cuando los PCM que hayan logrado cambiar de fase comenzarán a suministrar energía térmica durante más tiempo en la noche a la edificación.

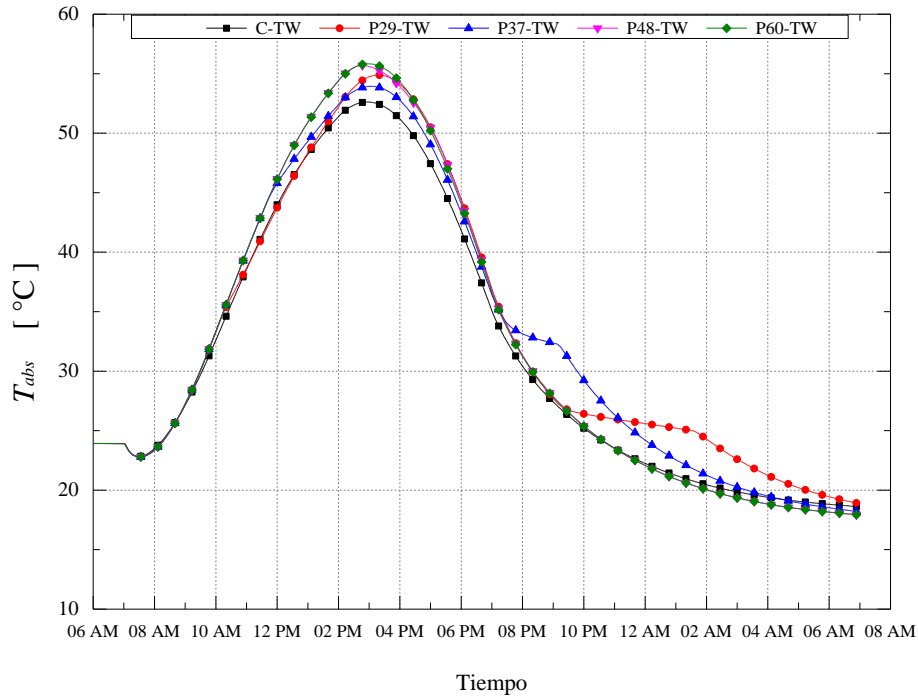
Esta energía que liberan al volver a cambiar de fase puede notarse en el cambio de la velocidad de decremento en la temperatura del absorbedor. Así, los cambios suaves que se presentan entre las 7:00 AM y las 10:00 PM para el P37-TW y entre las 9:00 PM y las 2:00 AM para el P29-TW, apuntan a que lo propicia el proceso de liberación de energía por el PCM. Sin embargo, la ausencia de este comportamiento en los Casos C-TW, P48-TW y P60-TW, sugiere que éstos no liberan energía por cambio de fase (obvio en el caso del concreto).

Una vez que se discute el comportamiento de los perfiles de temperatura de los principales elementos que conforman al TW, podemos comenzar con el análisis de la energía almacenada en el muro y los distintos flux de calor que se obtuvieron en el estudio.





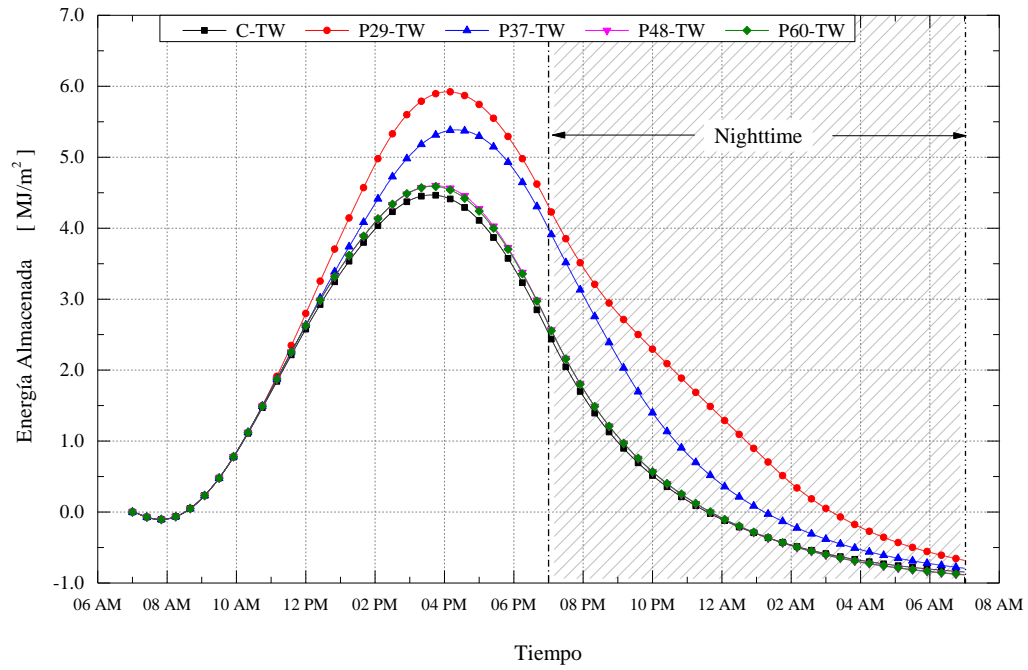
**Figura 4.2.** Efecto del punto de fusión sobre la temperatura del fluido en el canal.



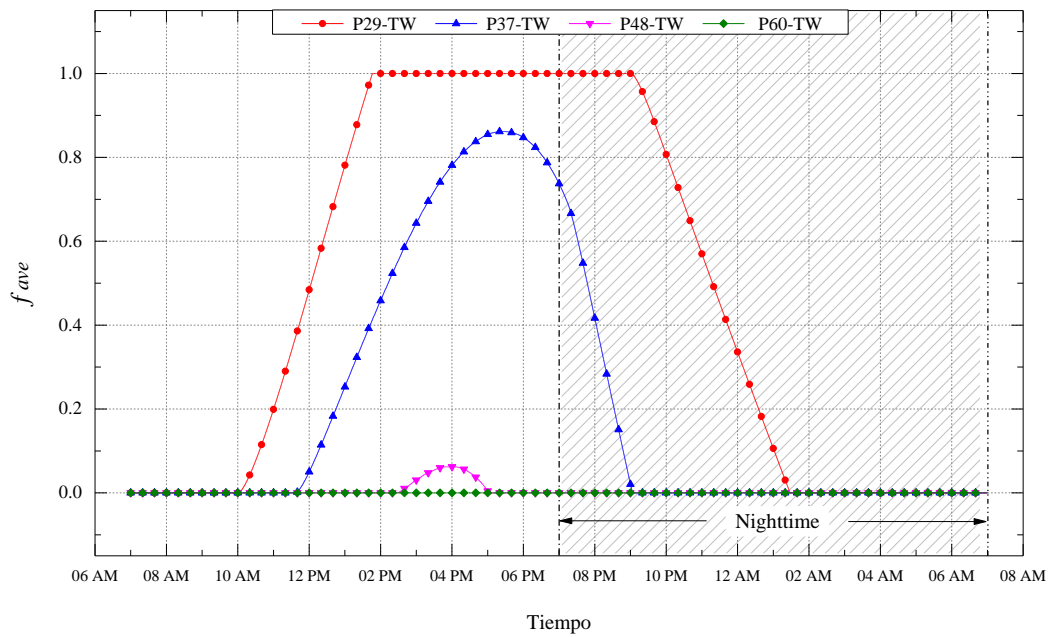
**Figura 4.3.** Efecto del punto de fusión sobre la temperatura de la superficie absorbadora.

En la Figura 4.4 se presenta la comparación de la energía almacenada durante el día ( $E_{sto,d}$ ) para cada material estudiado. El efecto del punto de fusión de los PCM se ve reflejado de mejor manera en esta figura. Empezando con C-TW se observa que la energía almacenada es la menor de todas. Esto se debe a que el concreto sólo puede almacenar energía en forma de energía sensible ( $C_p$ ). Se aprecia que los sistemas con los PCM de mayor punto de fusión P48-TW y P60-TW tienen un comportamiento bastante similar al C-TW. Con el apoyo de la Figura 4.3, se puede deducir que para P48-TW la temperatura de la superficie absorbidora apenas y logró alcanzar la temperatura de fusión de dicho PCM durante un breve periodo de tiempo. En cambio, para P60-TW, no alcanzó su punto de fusión. Esta observación refuerza más la idea de que el PCM en estos sistemas no cambian de fase, siendo ésta la razón de que sean incapaces de almacenar suficiente energía latente durante el día, como en el caso de P29-TW y P37-TW. En todos los casos, durante el periodo nocturno la energía sensible almacenada disminuye de manera acelerada, excepto para P29-TW, caso en el que la energía almacenada disminuye no tan severamente. Así, está claro que para P29-TW y P37-TW por causa de tener un punto de fusión menor, consiguen fundirse y así almacenar energía de manera latente. Por lo tanto, es en el periodo nocturno cuando se observa la ventaja de utilizar PCM con puntos de fusión bajos, ventajas como una mejor retención de la energía almacenada durante más tiempo, de manera que el tiempo de suministro de energía a la habitación es mayor.

En la Figura 4.5 se muestra la evolución de la fracción líquida media para todos los casos. Por medio de esta figura es posible observar si el PCM en el muro se funde en su totalidad ( $f = 1.0$ ) o no ( $0.0 < f < 1.0$ ). Así, la Figura 4.5 permite comprobar que para en los Casos P48-TW y P60-TW el proceso de fusión no ocurre mientras que para P29-TW y P37-TW sí. Sin embargo, sólo P29-TW consigue fundirse completamente y mantenerse en fase líquida desde las 2:00 PM hasta las 9:00 PM. Esta es la razón por la que este PCM consigue almacenar más energía que el resto de los casos.



**Figura 4.4.** Efecto del punto de fusión sobre la energía almacenada en el muro.



**Figura 4.5.** Efecto del punto de fusión sobre la fracción líquida media.

Así pues, para los materiales como el P29-TW y P37-TW pueden utilizar una parte del flujo de energía solar recibida para lograr el cambio de fase. El resultado es una menor capacidad de suministro de energía durante el mismo periodo. No obstante, su ventaja es que, en el transcurso de la noche, estos materiales se desempeñan mejor al liberar la energía latente retenida por su cambio de fase, esto se puede observar claramente en las Figuras 4.5 y 4.6. Para el caso especial del P37-TW, material que no alcanzo a derretirse por completo, el periodo de tiempo en el cual mantiene un flujo de calor  $q_{wall}$  casi constante es desde las 7:00 PM hasta las 9:00 PM.

La Figura 4.6 muestra el comportamiento del flujo de calor por unidad de superficie que suministra el muro hacia la habitación ( $q_{wall}$ ). A diferencia de lo que se observó en la Figura 4.4, aquí los flujos de calor son mayores para los materiales que almacenaron la menor cantidad de energía durante el día, es decir para C-TW, P48-TW y P60-TW. Esto se debe a que, al no ser capaces de fundirse, el muro se satura de energía térmica sensible y por lo tanto el suministro de energía a través del muro es mayor, siendo así muy buenos para suministrar energía durante periodos diurnos. Esto se puede notar desde pasadas las 9:00 AM hasta las 7:00 PM, momento en que el muro deja de recibir la radiación solar. De este modo, el efecto de haber liberado toda la energía sensible almacenada es una rápida disminución del flux de calor que libera el muro y un comportamiento cualitativo de manera similar en los Casos C-TW, P48-TW y P60-TW.

En cambio, si se observa la evolución de la fracción líquida que tuvo el P29-TW en la Figura 4.5, este material sí logró el cambio de fase en su totalidad desde las 2:00 PM manteniéndose así hasta las 9:00 PM. A partir de aquí empieza el proceso de solidificación del PCM, proceso que logra durar hasta las 2:00 AM. Por otro lado, para el caso del P37-TW, el flujo de calor suministrado por el muro es mayor que el correspondiente para P29-TW durante el día. Sin embargo, una vez que el P37-TW se solidifica (9:00 PM),  $q_{wall}$  disminuye rápidamente, mientras que para P29-TW la disminución es paulatina, lo que indica que el suministro es por mayor tiempo (hasta las 4:00 AM). Finalmente, una vez

que el PCM ha terminado de liberar toda la energía latente acumulada, su comportamiento se vuelve igual al de los demás materiales.

La Figura 4.7 muestra el flujo de calor útil suministrado al canal. Se observa que la energía proporcionada por el canal  $q_c^*$  es negativa para las primeras tres horas del día. Esto se debe a que la temperatura del fluido en el canal es menor a la de la edificación. Una vez que son las 10:00 AM, el flujo de calor se invierte, empezando a suministrar energía y alcanzando valores máximos de  $98 \text{ W/m}^2$  para el C-TW y de  $115 \text{ W/m}^2$  para el P48-TW y P60-TW sobre las 3:00 PM.

Después de este tiempo, se presenta una caída muy pronunciada debido a que la radiación solar incidente en el absorbedor va disminuyendo. Este comportamiento de  $q_c^*$  continua hasta las 7:00 PM. A partir de esta hora en adelante el fluido vuelve a extraer energía de la edificación y la empieza a ceder al exterior a través de la pared semitransparente. Llegando a un mínimo a las 7:00 AM del día siguiente iniciando un nuevo ciclo.

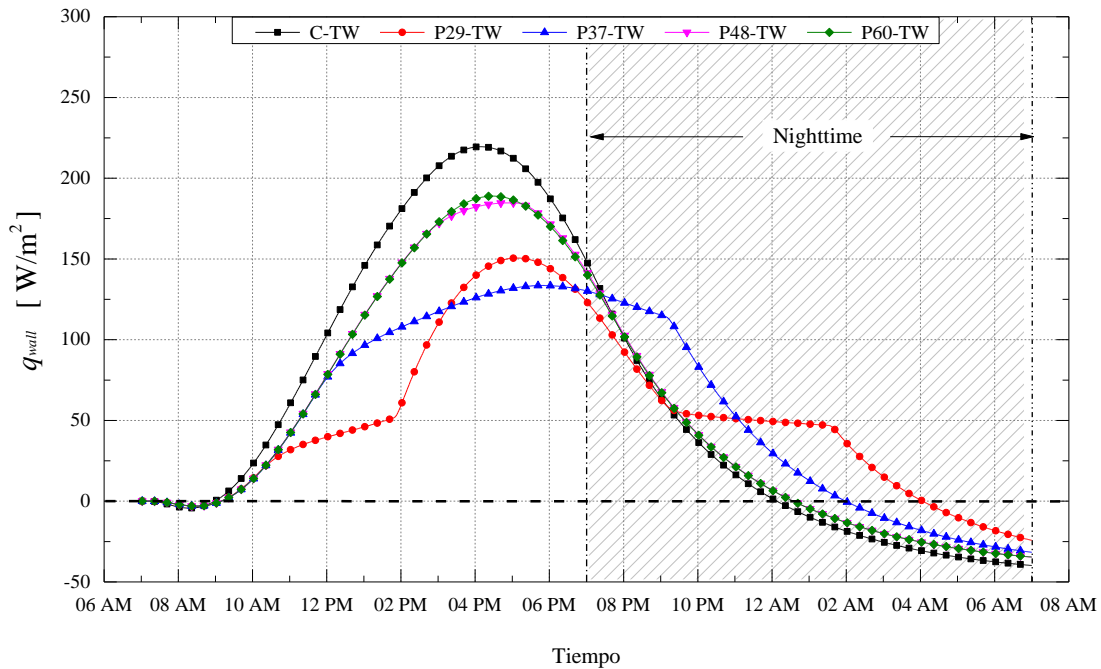
Si bien durante gran parte del día,  $q_c^*$  es positivo, durante la noche comienza a extraer energía de la edificación. Esto indica una fuerte dependencia de  $q_c^*$  en la radiación solar  $G_{sol}$ . De este modo, estudios futuros deben considerar utilizar ventilas de control para inhibir pérdidas debidas a  $q_c^*$  y con ello, mejorar el desempeño del sistema.

Por otro lado, el punto de fusión es la razón principal por la que durante el día los materiales que no almacenaron energía latente suministran un flujo de calor útil mayor al fluido del canal. Del mismo modo, durante la noche, estos materiales tienen una razón de pérdida mayor a diferencia de los PCM que sí almacenaron energía latente.

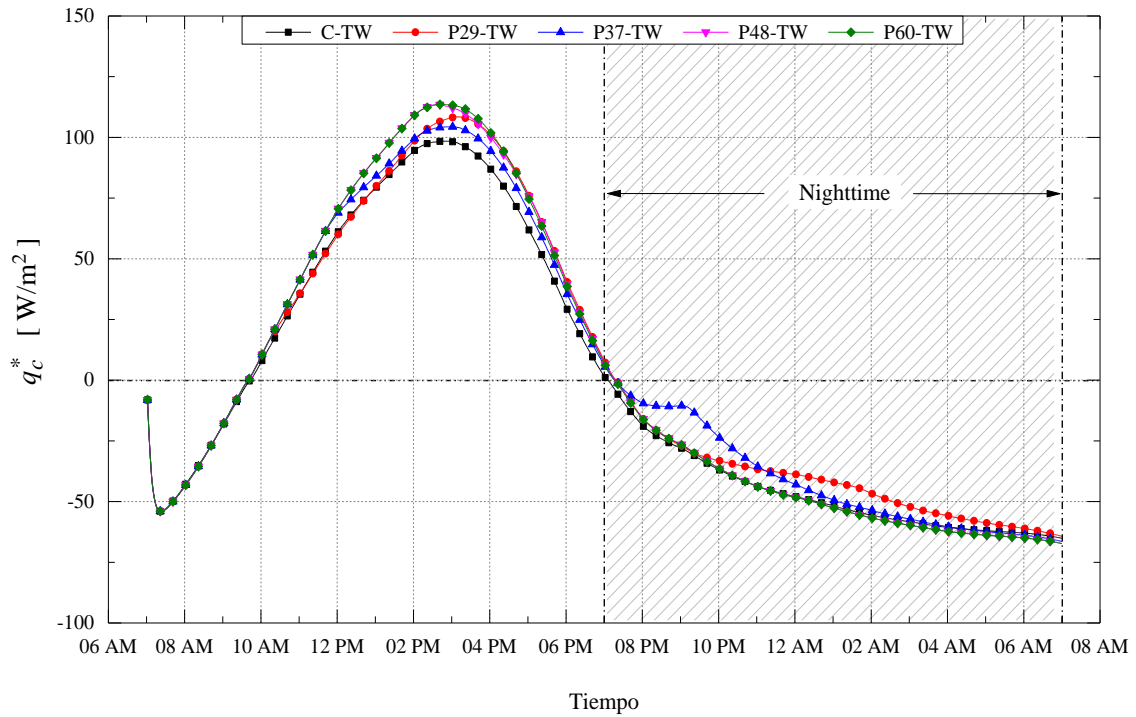
Por último, se analiza la Figura 4.8 la cual muestra el comportamiento del flujo de calor total  $q_{int}$ . Se puede observar cómo  $q_c^*$  tiene influencia durante el periodo diurno, sin embargo, es gracias a  $q_{wall}$  quien permite amortiguar el descenso en el suministro de

energía por el flujo del fluido. Esto termina ayudando a mantener durante un mayor tiempo el suministro de energía a la edificación.

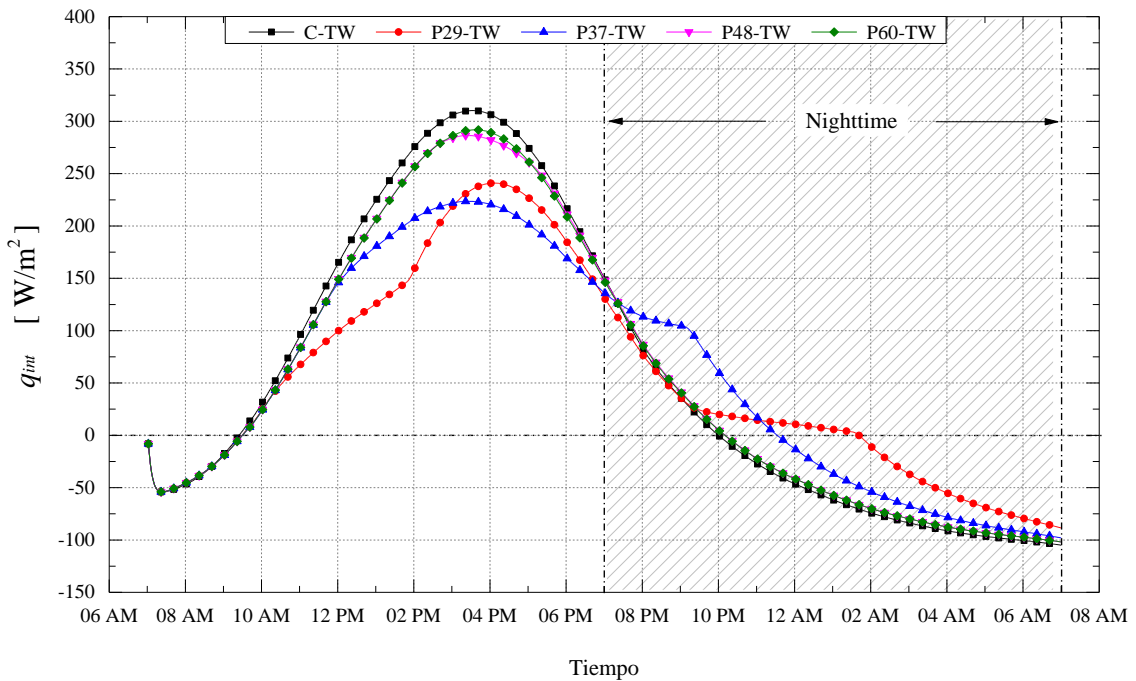
Teniendo en cuenta estas observaciones, sería conveniente bloquear las ventilas durante la noche para evitar las pérdidas del suministro de energía a la edificación durante ese periodo. De igual manera las principales variaciones en los comportamientos del flujo de calor total al interior de la habitación en los PCM y el concreto, radican en su capacidad de almacenamiento de energía de manera latente durante el día y su liberación por la noche. Entre mayor sea la energía almacenada durante el día y menores sean las perdidas por el flujo de calor útil del fluido, mejor comportamiento tendrá el sistema de TW durante la noche.



**Figura 4.6** Efecto del punto de fusión sobre el flujo de calor del muro masivo



**Figura 4.7.** Efecto del punto de fusión en el calor útil suministrado al canal.



**Figura 4.8.** Efecto del punto de fusión en el flujo de calor al interior de la edificación.

La Tabla 4.2 muestra de manera cuantitativa la energía almacenada hasta las 7:00 PM, es decir, durante las horas de exposición solar. También se presenta la energía suministrada a la edificación. Cabe mencionar que, de acuerdo con lo observado en las Figuras 4.4-4.8, es conveniente separar a la energía suministrada ( $E_{int}$ ) en dos periodos: el diurno ( $E_{int,d}$ ) y el nocturno ( $E_{int,n}$ ).

Si se analiza detalladamente a la energía almacenada durante el día ( $E_{sto,d}$ ), se puede encontrar el material que logra retener la mayor cantidad de energía, en todos los casos es el P29-TW. Este PCM conserva de una manera más eficaz la energía con una diferencia del 70.63 % respecto al C-TW. De cerca le sigue el P37-TW que logra almacenar más de la mitad de energía comparado con el concreto. En cambio, los PCM con mayor punto de fusión no logran funcionar de manera adecuada, ya que almacenan cantidades muy similares al C-TW.

**Tabla 4.2.** Efecto del material sobre la energía almacenada y energía suministrada a la edificación (en MJ/m<sup>2</sup>).

SISTEMA	$E_{sto,d}$	$E_{int,d}$	$E_{int,n}$	$E_{int}$	$t_{supply}$
<b>C-TW</b>	2.52	6.80	-1.60	5.20	3 h 05 min
<b>P29-TW</b>	4.30	4.80	-0.25	4.55	6 h 40 min
<b>P37-TW</b>	3.99	5.17	-0.41	4.76	4 h 29 min
<b>P48-TW</b>	2.64	6.29	-1.42	4.87	3 h 05 min
<b>P60-TW</b>	2.63	6.32	-1.43	4.89	3 h 06 min

Ahora bien, de acuerdo con la energía total suministrada  $E_{int}$ , se observa que el sistema que suministra más energía durante el periodo de estudio es el C-TW (5.20 MJ/m<sup>2</sup>), mientras que el P29-TW es el que suministra menos (4.55 MJ/m<sup>2</sup>). En vista de esto, se podría pensar que la mejor alternativa de material para el TW es utilizar un muro convencional de puro concreto y prescindir del uso de PCM. Sin embargo, es necesario



realizar un análisis más detallado antes de emitir esta conclusión. Por esta razón se decidió separar la energía suministrada en dos lapsos de tiempo.

Analizando la energía total suministrada en periodo diurno ( $E_{int,d}$ ), se encuentra que el C-TW con  $6.80 \text{ MJ/m}^2$  presenta mejor desempeño. Le siguen de cerca P48-TW y P60-TW con una diferencia del 7.5 y 7.0 %. Posteriormente está P37-TW con  $5.17 \text{ MJ/m}^2$  y finalmente P29-TW con apenas  $4.17 \text{ MJ/m}^2$ , lo cual se traduce en diferencias de 23 y 29 %, respectivamente. Es evidente que estos dos últimos materiales ofrecen el peor desempeño en términos de suministro diurno. Sin embargo, en el caso de suministro en periodo nocturno ( $E_{int,n}$ ), son estos materiales los que presentan mejor desempeño.

Para todos los casos, la cantidad de energía suministra entre 7:00 PM y 7:00 AM ( $E_{int,n}$ ) es negativa. Esto indica que, a pesar de la cantidad de energía almacenada en el muro, ésta terminó transfiriéndose hacia la habitación y también existieron pérdidas hacia el exterior en este periodo. Para elegir cual material se desempeñó mejor, es evidente que es aquel cuya energía suministrada en este periodo sea más positiva (siendo todas negativas, será aquella que esté más cerca de cero). Así, el mejor desempeño nocturno lo presenta el sistema P29-TW, seguido de P37-TW con una diferencia de 64 %. Posteriormente están P48-TW y P60-TW con valores prácticamente iguales. Finalmente, contrario al periodo diurno, el peor desempeño nocturno lo presenta C-TW.

Es importante notar que el comportamiento de  $E_{int,d}$  y  $E_{int,n}$  puede entenderse con el apoyo de la Figura 4.8. En ella se aprecia que P29-TW, a pesar ser el sistema que menos suministra energía durante el día, tiende a dosificar el suministro durante la noche extendiendo el proceso de liberación de energía hasta por 6 horas y 40 minutos; 2 horas y 10 minutos más que P37-TW y más del doble de tiempo que C-TW, P48-TW y P60-TW.

A la vista de la evidencia, si bien se puede notar que los materiales que mejor suministran energía a la edificación son aquellos que son peores para almacenarla, son los peores para

suministro nocturno. En este sentido, es importante saber la utilidad que tendrá la edificación a calentar. Si la edificación será para uso diurno, como un aula de clases o una sala de recreación, es recomendable optar por un sistema convencional C-TW y prescindir de PCM. Por el contrario, si la edificación será para uso nocturno, como un dormitorio, se recomienda utilizar el sistema P29-TW.

### **4.3. Evaluación Anual del PCM-TW**

El sistema PCM-TW fue evaluado térmicamente y comparado con un C-TW para las condiciones climáticas de dos ciudades que cuentan con un clima generalmente frío durante todo el año. Estas ciudades son:

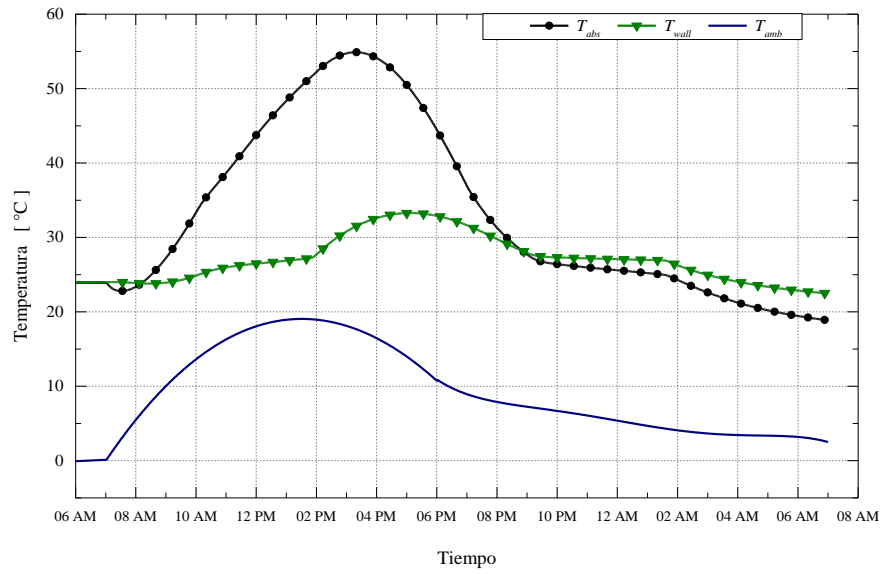
1. Tulancingo, Hidalgo. De acuerdo con CONABIO (2019), esta ciudad cuenta con una clasificación climática de Köppen de Cwa/Cwb. Sin embargo, cabe mencionar que parte de su extensión municipal presenta un clima Bsk, el cual es un clima semiárido frío donde los inviernos suelen ser fríos o muy fríos y los veranos pueden ser templados o cálidos. Sin embargo, este estudio se concentra en el comportamiento climático de la cabecera municipal, es decir, la ciudad de Tulancingo, misma que está en clasificación Cwa/Cwb. Este tipo de clima se caracteriza por inviernos de templados a fríos y por veranos frescos. Viéndose parcialmente afectado por la cercanía de la zona climática Bsk.
2. Alcaldía de Tacubaya, Ciudad de México; cuenta con una clasificación climática de Köppen Cwb. Este tipo de clima es generalmente templado con inviernos secos. Se diferencia de la ciudad de Tulancingo en el hecho de que, esta última se encuentra cerca de una zona climática Bsk, mientras que Tacubaya está rodeada completamente por regiones tipo Cwb, el cual es un clima característico del Valle de México.

Para ambas ciudades se consideró el día más frío de cada mes para realizar la evaluación anual. En principio se presenta una comparación entre el sistema PCM-TW y C-TW para el día más frío de todo el año. Esto se hace analizando el comportamiento térmico del absorbedor, el muro masivo y de la temperatura ambiente. Además se discute la temperatura del fluido en la salida de canal ( $T_{f,out}$ ), los perfiles de temperatura del muro obtenidos para tres distintos instantes de tiempo, se comparan los flujos de calor que recibe la edificación. Posteriormente se compara y finalmente se analiza la energía total anual suministrada tanto por el P29-TW como por el C-TW. Para esto último se utiliza el día más frío de cada mes.

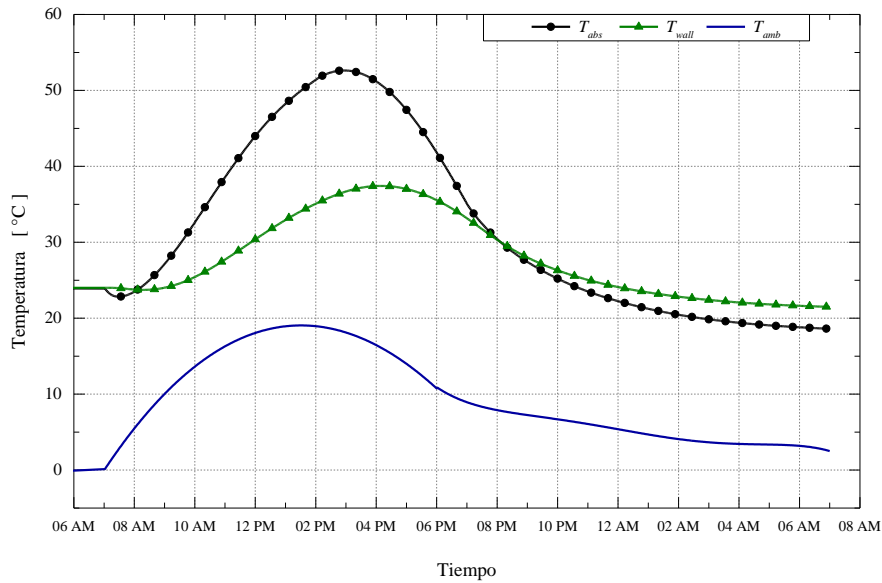
#### 4.3.1. Tulancingo, Hidalgo (Cwa/Cwb)

Día representativo del año.

La Figura 4.9 muestra el comportamiento de la temperatura del absorbedor ( $T_{abs}$ ), de la superficie del muro expuesta a la habitación ( $T_{wall}$ ) y la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ). El día empieza con  $T_{amb} = 0\text{ °C}$  a las 7:00 AM. Conforme el día avanza, la radiación solar se intensifica provocando un aumento en la temperatura ambiente hasta un máximo de  $19\text{ °C}$  a la 1:30 PM disminuyendo a partir de ese momento. El absorbedor del P29-TW hace lo propio comenzando en una temperatura de  $23.9\text{ °C}$  alcanzando valores máximos de  $54.9\text{ °C}$  cerca de las 3:30 PM. Posteriormente, esta temperatura empieza a descender durante el resto del día, esto debido a los cambios de la radiación solar durante el día. Por otro lado, la  $T_{wall}$  del P29-TW inicia a la misma temperatura que  $T_{abs}$ , logrando un máximo de  $33.2\text{ °C}$  a las 5:00 PM. Sin embargo, el aumento en su temperatura es lento y amortiguado, puesto que la inercia térmica del muro proporciona al material la capacidad de almacenar calor de manera más eficiente ocasionando que las oscilaciones de temperatura sean menores a lo largo del día. Inclusive, después de las 7:00 PM, hora en que la radiación solar es nula,  $T_{wall}$ , se mantiene prácticamente constante entre 8:00 PM y 2:00 AM, periodo en el cual la energía almacenada durante el día se libera. Puede observarse que aun después de este periodo de descarga,  $T_{wall}$  se mantiene por encima de  $T_{abs}$ , y  $T_{amb}$ .



(a) P29-TW



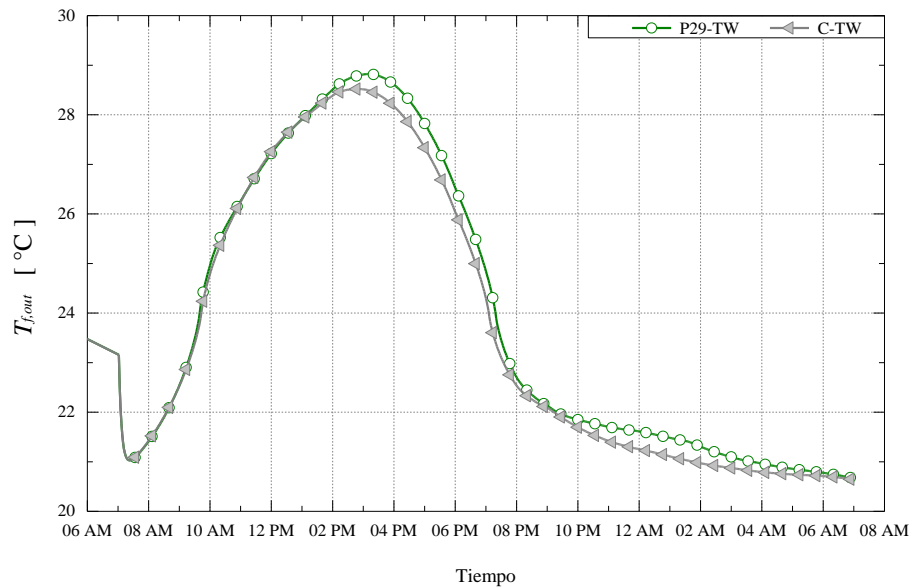
(b) C-TW

**Figura 4.9.** Comportamiento de las temperaturas  $T_{abs}$ ,  $T_{wall}$  y  $T_{amb}$ : Tulancingo.

En el caso del C-TW, se puede diferenciar que, debido a su menor inercia térmica, éste presenta un peor rendimiento en el almacenamiento de energía durante el mismo periodo. Esto se refleja en el comportamiento de  $T_{wall}$ , alcanzando una temperatura máxima de 37.4 °C, siendo mayor con respecto a la correspondiente al de P29-TW. Durante el periodo nocturno, las curvas de  $T_{abs}$  y  $T_{wall}$  son más acentuadas y menos estables. En estas no hay periodo de tiempo donde se mantengan de manera similar. De este modo el suministro nocturno de energía es peor que un P29-TW.

En la Figura 4.10 se muestra las curvas de  $T_{f,out}$ , ésta está relacionada con el calor útil. A simple vista se puede notar que las temperaturas prácticamente no varían una de otra, ni durante el periodo diurno ni en el nocturno, excepto por un intervalo de tiempo que va desde las 9:00 PM a las 6:00 AM. Esto se puede explicar de la Figura 4.9a, se observa cómo a partir de las 9:00 PM,  $T_{wall}$  pasa a tener valores de temperatura mayores que  $T_{abs}$ . Por lo tanto, en ese momento el muro empieza a suministrar una pequeña cantidad de calor no solo a la habitación sí no también al canal, es esta razón por la que  $T_{f,out}$  se comporta diferente durante ese breve periodo. Aun así, la diferencia sigue siendo insignificante, dando a entender que la aportación del calor convectivo del fluido del canal a la edificación es mínima durante el día, siendo así el muro la fuente de calor principal para la edificación, incluso más durante la noche.

Por consiguiente, es necesario comparar los perfiles de temperatura en el muro en diferentes instantes del día (12:00 AM, 6:00 PM y 12:00 PM) con el fin de conocer el comportamiento térmico del PCM y del concreto en el muro. La Figura 4.11 muestra los perfiles para P29-TW y C-TW. La parte sombreada en olivo representa la sección del muro donde se encapsula el PCM. De manera similar, se sombreó en gris a la zona del concreto.

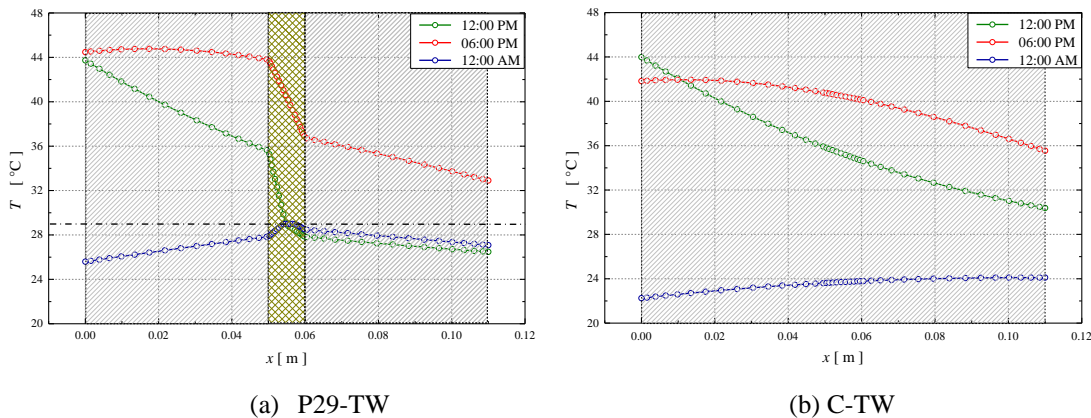


**Figura 4.10.** Comportamiento de  $T_{f,out}$  para un P29-TW y un C-TW: Tulancingo.

Se observa que para los límites del muro es decir  $L_w=0.0$  m y  $L_w=0.11$  m, durante las 12:00 PM, la diferencia de temperaturas en cada cara es muy grande entre ambos sistemas. Siendo mayor en el P29-TW, esto a causa de la inercia térmica que provoca el PCM. De hecho, la característica más notable del perfil de P29-TW es que la presencia del PCM provoca cambios notables en el gradiente de temperatura. Se observa como la fracción del PCM que está por encima de su punto de fusión tiene un cambio súbito en el perfil de temperatura ( $5.0 \text{ cm} < x < 5.4 \text{ cm}$ ), pasando de una pendiente acentuada a una moderada en el intervalo  $5.4 \text{ cm} < x < 6.0 \text{ cm}$ . Este cambio en el gradiente de temperatura (pendiente del perfil) es evidencia de que en el PCM existen dos fases.

Una vez se termina la sección del PCM del muro y empieza el concreto de nuevo, el perfil vuelve a presentar un gradiente moderado. Comparado esto contra el sistema C-TW, se observa que el perfil de temperatura presenta una apenas notable concavidad hacia arriba, es decir, es casi uniforme en todo su espesor. Esta uniformidad es un reflejo en el comportamiento de las propiedades termofísicas del material.

Para las 6:00 PM, el perfil de P29-TW alcanza temperaturas más altas comparado al perfil de las 12:00 PM. Sin embargo, se mantienen los cambios bruscos en el gradiente de temperatura. En la primera sección de concreto se aprecia que el perfil de temperatura es casi horizontal, lo que indica que el flujo de calor es mínimo en esa región. En la sección del PCM se observa que el perfil es completamente lineal, sin cambios bruscos. Esto indica que el PCM está en una sola fase. De acuerdo con la Figura 4.11a, el intervalo de temperatura en esta región está entre 36 °C y 44 °C, es decir, el PCM está en fase líquida por completo. Finalmente, la segunda sección de concreto tiene un perfil con pendiente negativa, indicando que el muro suministra energía hacia la habitación.



**Figura 4.11.** Perfiles de temperatura para el muro masivo: Tulancingo.

Por otro lado, el C-TW sigue teniendo un comportamiento semejante en cuanto a la uniformidad del perfil de temperatura. Se puede notar que la concavidad del perfil se invirtió, pasando de ser cóncava hacia arriba (concavidad positiva) a las 12:00 PM a ser cóncava hacia abajo (concavidad negativa) a las 6:00PM. La razón de esto es que durante estas horas de la tarde, la radiación solar incidente en el absorbedor ha empezado a disminuir a valores mínimos, por lo que la temperatura en el absorbedor empieza a bajar, siendo inclusive menor a la que se encuentra en la parte interna del muro. En otras palabras, el sistema C-TW ya está descargando energía a sus alrededores.

Por último, para las 12:00 AM, ambos sistemas ya se encuentran liberando energía hacia la edificación. Esto se puede observar mediante la concavidad del perfil de temperaturas. En ambos sistemas la concavidad es negativa. Para C-TW se observa en la Figura 4.11b que la temperatura del absorbedor es menor a la temperatura de la superficie expuesta a la habitación. De hecho, ésta última ya alcanzó el equilibrio con el aire de la habitación. En este sentido, el muro está extrayendo energía de la habitación.

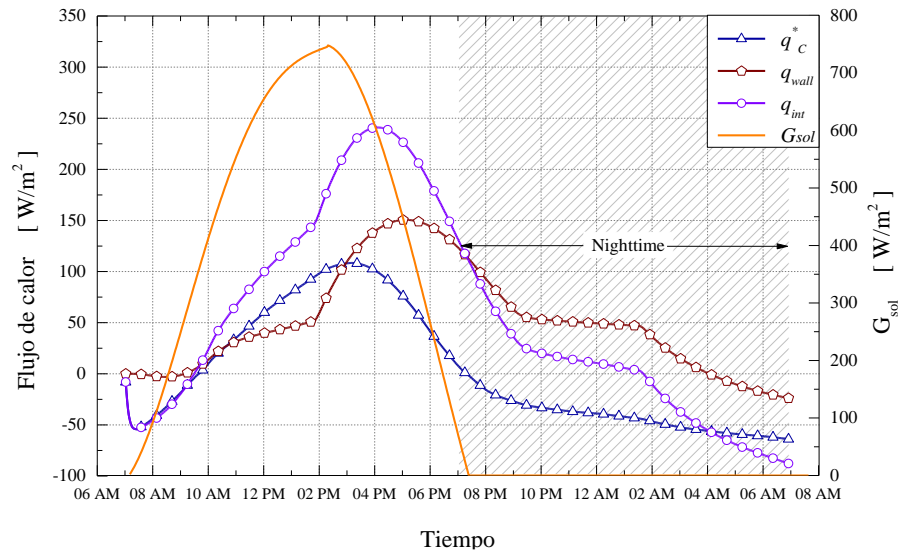
En el caso de P29-TW, en la sección del PCM encapsulado se puede ver cómo es que éste vuelve a pasar por un cambio de fase. Durante este cambio de fase la temperatura se mantiene constante para una pequeña sección de PCM. Además, se observa que la región del PCM presenta la mayor temperatura en el muro, por lo tanto, es evidente que actúa como una fuente de calor.

Para comprobar lo dicho, en la Figura 4.12 se muestran los flujos de calor  $q_{wall}$ ,  $q_c^*$  y  $q_{int}$  junto con la radiación solar. De acuerdo con la Figura 4.12, se observa cómo para ambos sistemas,  $q_{wall}$  es nulo durante las primeras 3 horas. Por el contrario,  $q_c^*$  para ambos casos empieza con valores negativos lo que significa que se está extrayendo energía de la habitación. Sin embargo, después de las 10:00 AM, gracias al efecto invernadero entre el canal y el vidrio, es cuando este flujo de calor logra ser positivo. A partir de este punto, para ambos sistemas, el comportamiento de  $q_c^*$  es prácticamente el mismo. En cuanto a  $q_{wall}$ , presenta diferencias considerables en ambos sistemas. Por un lado, para el caso del P29-TW, durante el periodo diurno se observa un aumento moderado del flujo de calor en comparación con C-TW. Se puede ver como el P29-TW logra suministrar calor a la habitación durante un lapso más largo en comparación con el C-TW: concretamente 4 horas más.

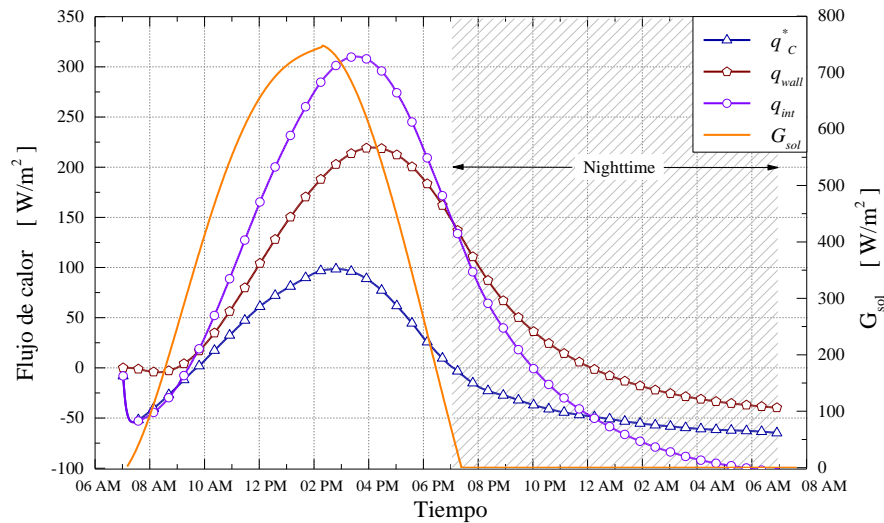
Por último,  $q_{int}$  permite observar que el suministro total de calor a la habitación. Para el C-TW presenta un comportamiento continuo y suave a lo largo del periodo de modelación.



Durante el día alcanza valores por encima del flujo de calor correspondiente a P29-TW, pero por la noche se invierte esta ventaja. El C-TW deja de suministrar energía a las 10:00 PM mientras que el P29-TW hace lo propio cerca de las 2:00 AM.



(a) P29-TW



(b) C-TW

**Figura 4.12.** Comportamiento de los flujos de calor hacia la habitación: Tulancingo.

Evaluación anual.

Con la finalidad de analizar el desempeño térmico del P29-TW, se muestra el comportamiento anual de la energía almacenada en el muro durante el periodo diurno ( $E_{sto,d}$ ), la energía suministrada a la edificación durante el día ( $E_{int,d}$ ) y la energía suministrada a la edificación durante la noche ( $E_{int,n}$ ). Para ello es posible auxiliarse en la Tabla 4.3 y en la Figura 4.13.

En forma general, se observa en la Figura 4.13 que, si sólo se analiza la energía total suministrada, el C-TW presenta un mejor desempeño que el P29-TW en todo el año. Sin embargo, de los resultados mostrados en la Sección 4.3 se aprendió que es necesario dividir el análisis en dos periodos. Así, en la Figura 4.13a, para  $E_{sto,d}$  se observa cómo el P29-TW es capaz de almacenar una mayor cantidad de energía en este periodo para todos los meses del año en comparación del C-TW. Esta mayor capacidad es debido a la incorporación del PCM en el muro. De esta manera se evidencia la superioridad que un PCM-TW tiene sobre un C-TW en cuanto al almacenamiento de energía. Por otro lado, ambos sistemas tienden a almacenar más energía durante los meses de otoño e invierno (enero, febrero, marzo, octubre, noviembre y diciembre), mientras que en los meses de verano este almacenamiento es mínimo.

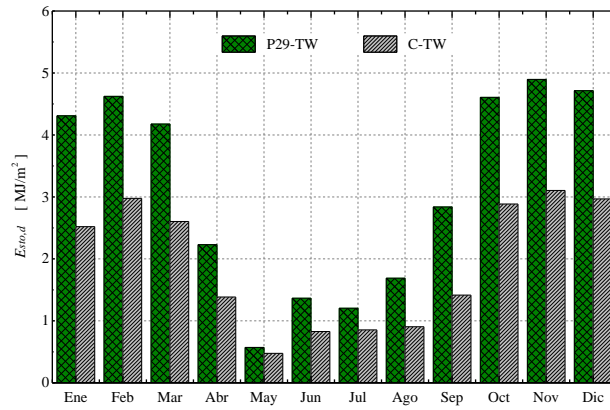
Ahora con respecto a la energía suministrada en periodo diurno, como se observa en la Figura 4.13b, el C-TW suministra una mayor cantidad de energía a la edificación durante el día, en comparación al P29-TW. Esto sucede durante todo el año. Aquí entonces se mira que el C-TW es superior a el P29-TW en cuanto a calentamiento diurno. Además, de manera similar a la energía almacenada, ambos sistemas también presentan valores máximos de suministro diurno de energía durante los meses de otoño e invierno, mientras que los valores mínimos se presentan en verano.

Por último, como se puede ver en la Figura 4.13c y en la Tabla 4.3,  $E_{int,n}$  presenta valores negativos a lo largo del año en ambos sistemas. Esto significa que, durante las horas de la noche, la edificación terminó perdiendo energía. Se observa que el sistema C-TW presenta pérdidas nocturnas de energía durante todo el año. No obstante, el sistema P29-TW presenta pérdidas nocturnas en los meses de enero, y en los meses de abril a agosto. El resto del año presenta ganancias. Esto indica que, durante los meses de febrero, y de septiembre a diciembre, el sistema P29-TW fue capaz de suministrar energía durante toda la noche (de 7:00 PM a 7:00 AM), es decir, durante los meses más fríos con la excepción de enero. Esto indica una clara ventaja de la incorporación del PCM en un muro de concreto. Adicionalmente, se aprecia que las mayores pérdidas se presentan entre abril y agosto. A pesar del comportamiento adverso que se presenta en verano, debe recordarse que el principal interés de un sistema de calor pasivo es brindar un mayor confort térmico para los días más fríos, días que se encuentran en los meses de invierno.

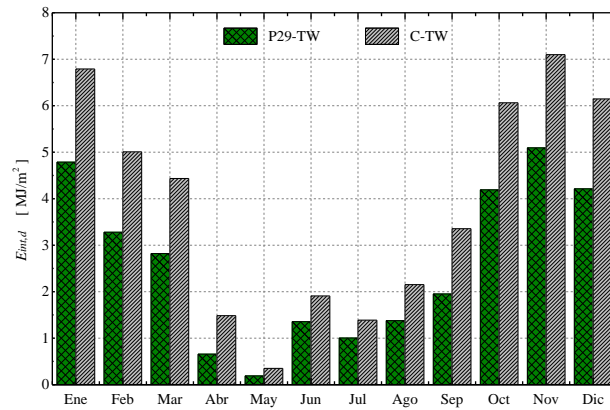
**Tabla 4.3.** Evaluación anual de energía suministrada en kWh/m<sup>2</sup>.

Mes	P29-TW			C-TW		
	$E_{int}$	$E_{int,d}$	$E_{int,n}$	$E_{int}$	$E_{int,d}$	$E_{int,n}$
<b>Enero</b>	1.26 (12.5)	1.33 (29.6)	-0.07 (15.9)	1.44	1.89	-0.44
<b>Febrero</b>	1.07 (13.0)	0.91 (34.5)	0.16 (200.0)	1.23	1.39	-0.16
<b>Marzo</b>	0.96 (13.5)	0.78 (36.6)	0.18 (250.0)	1.11	1.23	-0.12
<b>Abril</b>	-0.13 (44.4)	0.18 (56.1)	-0.31 (38.00)	-0.09	0.41	-0.50
<b>Mayo</b>	-0.65 (0.00)	0.05 (50.0)	-0.70 (6.70)	-0.65	0.10	-0.75
<b>Junio</b>	0.08 (20.0)	0.38 (28.3)	-0.30 (30.2)	0.10	0.53	-0.43
<b>Julio</b>	-0.08 (14.3)	0.28 (28.2)	-0.36 (20.0)	-0.07	0.39	-0.45
<b>Agosto</b>	0.12 (25.0)	0.38 (36.7)	-0.26 (40.9)	0.16	0.60	-0.44
<b>Septiembre</b>	0.57 (13.6)	0.54 (41.9)	0.03 (110.7)	0.66	0.93	-0.28
<b>Octubre</b>	1.33 (11.9)	1.16 (31.0)	0.16 (188.9)	1.51	1.68	-0.18
<b>Noviembre</b>	1.49 (11.3)	1.41 (28.4)	0.07 (124.1)	1.68	1.97	-0.29
<b>Diciembre</b>	1.40 (11.9)	1.17 (31.6)	0.23 (291.7)	1.59	1.71	-0.12
<b>TOTAL</b>	7.42 (12.5)	8.57 (29.6)	-1.17 (84.1)	8.67	12.83	-4.16

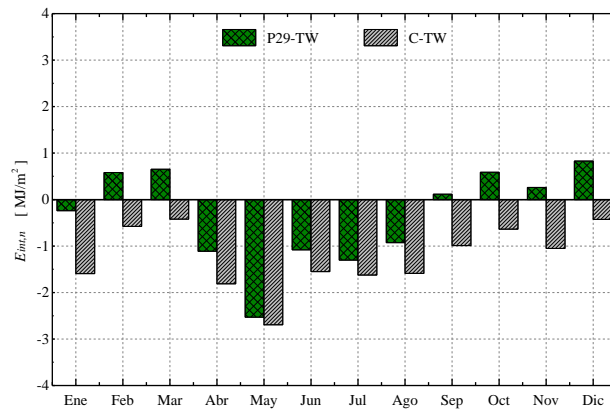
Valores en ( ) corresponden a la diferencia relativa porcentual.



(a) Energía almacenada durante el día



(b) Energía suministrada durante el día



(c) Energía almacenada durante la noche

**Figura 4.13.** Evaluación térmica anual de la energía almacenada/suministrada: Tulancingo.

### 4.3.2. Tacubaya, Ciudad de México (Cwb)

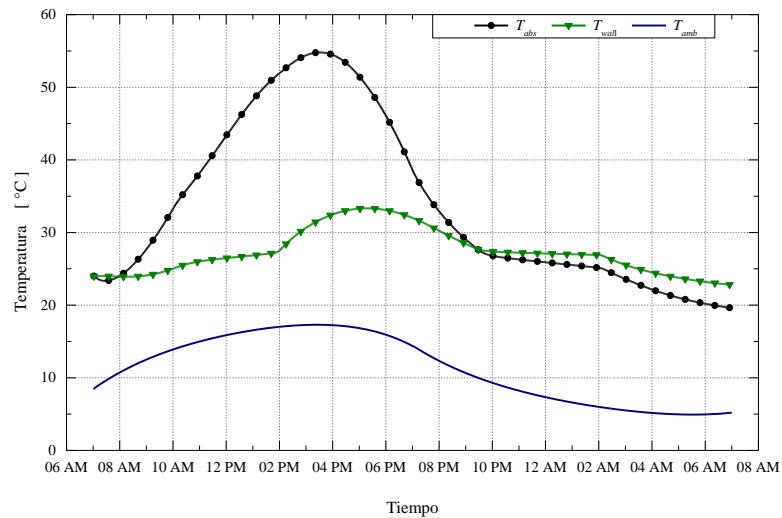
Día representativo del año

En la Figura 4.14 se muestra el comportamiento de la temperatura en el absorbedor ( $T_{abs}$ ), la superficie del muro expuesta a la habitación ( $T_{wall}$ ) y la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) para ambos sistemas. El día comienza con una  $T_{amb} = 8.5$  °C a las 7:00 AM. Conforme el día transcurre, la radiación solar se va incrementando, provocando un ascenso en la temperatura ambiente hasta un máximo de 17.3 °C a las 3:00 PM y descendiendo a partir de ese momento. El absorbedor del P29-TW hace lo propio comenzando en una temperatura de 24 °C y llegando a valores máximos de 54.78 °C cerca de las 3:30 PM. A partir de ahí, la temperatura empieza a descender durante el resto del día, esto debido a los cambios de la radiación solar durante el día. Por otro lado, la  $T_{wall}$  del P29-TW comienza a la misma temperatura que  $T_{abs}$ , logrando un máximo de 33.3 °C a las 5:15 PM. Sin embargo, el aumento en su temperatura es tardado y atenuado. Inclusive, después de las 7:00 PM, hora en que la radiación solar es cero,  $T_{wall}$ , se mantiene prácticamente constante entre 9:00 PM y 2:00 AM, periodo en el cual la energía acumulada durante el día se libera. Aun después de este momento,  $T_{wall}$  se mantiene por arriba de  $T_{abs}$ , y  $T_{amb}$ .

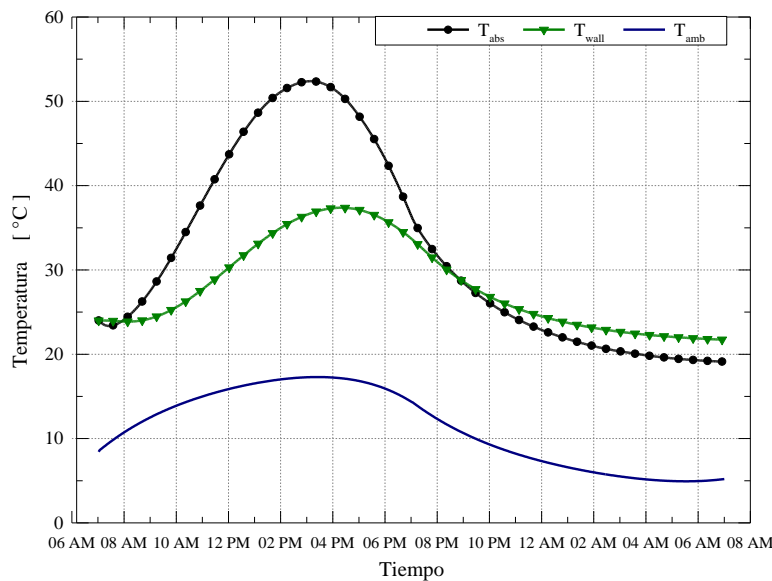
Se puede señalar que, a causa de una menor inercia térmica en el C-TW, éste presenta un peor rendimiento en el almacenamiento de energía con respecto al P29-TW. Esto se refleja en la Figura 14.4b donde la conducta de  $T_{wall}$  alcanza una temperatura máxima de 37.4 °C, superior con respecto a la observada para el P29-TW. Durante el ciclo nocturno, se observa que las curvas de  $T_{abs}$  y  $T_{wall}$  presentan una pendiente más pronunciada. Esto indica que el C-TW libera su energía almacenada más rápido que el P29-TW. De esta manera se puede notar que el suministro nocturno de energía es peor.

La Figura 4.15 muestra las curvas de la temperatura del fluido a la salida del canal ( $T_{f,out}$ ) para C-TW y P29-TW. A primera vista se puede apreciar que las temperaturas prácticamente no varían una de otra, excepto por un intervalo de tiempo que va desde las

9:00 PM a las 6:00 AM. Este comportamiento sugiere que la aportación de energía térmica por el lazo convectivo en el canal tiene poca influencia en la presencia del PCM en el muro. Sin embargo, es evidente que la presencia de un PCM en el TW produce resultados ligeramente mejores en  $T_{f,out}$ .

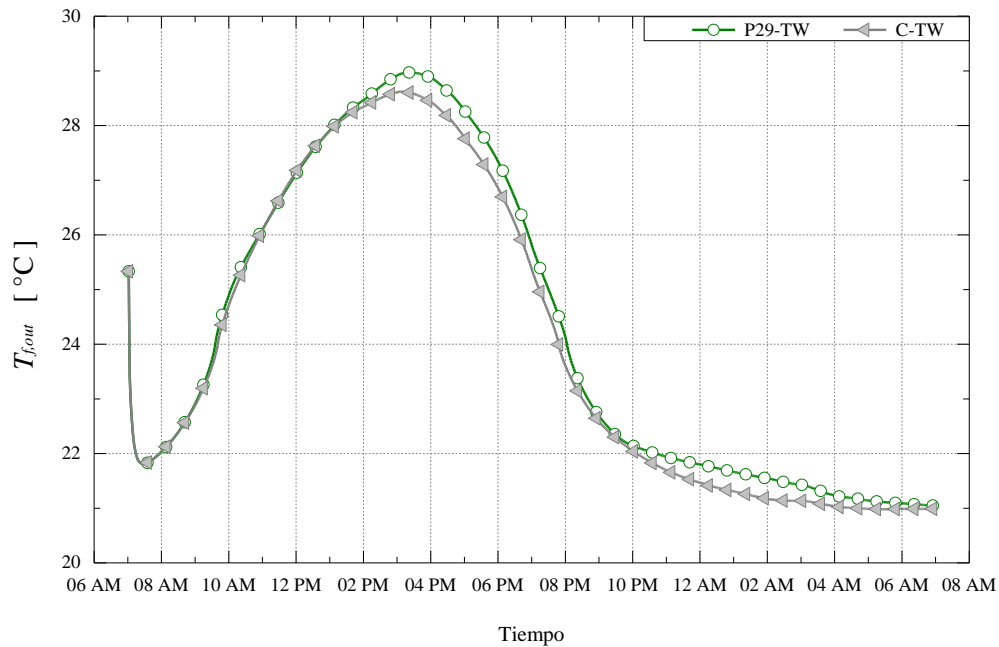


(a) P29-TW



(b) C-TW

**Figura 4.14.** Comportamiento de las temperaturas  $T_{abs}$ ,  $T_{wall}$  y  $T_{amb}$ : Tacubaya.



**Figura 4.15.** Comportamiento de  $T_{f,out}$  para un P29-TW y un C-TW: Tacubaya.

Con el fin de conocer el comportamiento térmico de ambos TW se procede a comparar los perfiles de temperatura en el muro para tres instantes del día: 12:00 PM, 6:00 PM y 12:00 AM.

La Figura 4.16 expone los perfiles para P29-TW y C-TW. De modo similar a la Figura 4.11a la parte sombreada en olivo representa la sección del muro donde se encapsula el PCM. En los límites del muro, es decir  $L_w=0.0$  m y  $L_w=0.11$  m, durante las 12:00 PM, la diferencia de temperaturas entre cada límite es muy amplia para los dos sistemas. Siendo de 11 °C en el P29-TW y de 8 °C en el C-TW. Esta particularidad en el perfil de P29-TW es debido al uso del PCM provocando cambios abruptos en el gradiente de temperatura.

Además, se observa que la fracción del PCM cuya temperatura está por encima del punto de fusión ( $5.0 \text{ cm} < x < 5.4 \text{ cm}$ ) tiene un cambio repentino en el perfil, pasando de una pendiente pronunciada a una más moderada desde el intervalo  $5.4 \text{ cm} < x < 6.0 \text{ cm}$ . Este cambio en la pendiente del perfil de temperatura es un reflejo en el proceso de cambio que

está ocurriendo en ese momento, dando como resultado la presencia de dos fases: líquida antes de 5.4 cm y sólida después de este punto.

Después de la sección del PCM en el muro, el perfil muestra otra vez una pendiente moderada. Comparando esto contra el C-TW, se muestra que el perfil de temperatura presenta una curva con pendiente negativa en todo el espesor. Siendo este comportamiento una indicación de que la energía térmica está fluyendo desde el absorbedor hacia la superficie expuesta a la habitación.

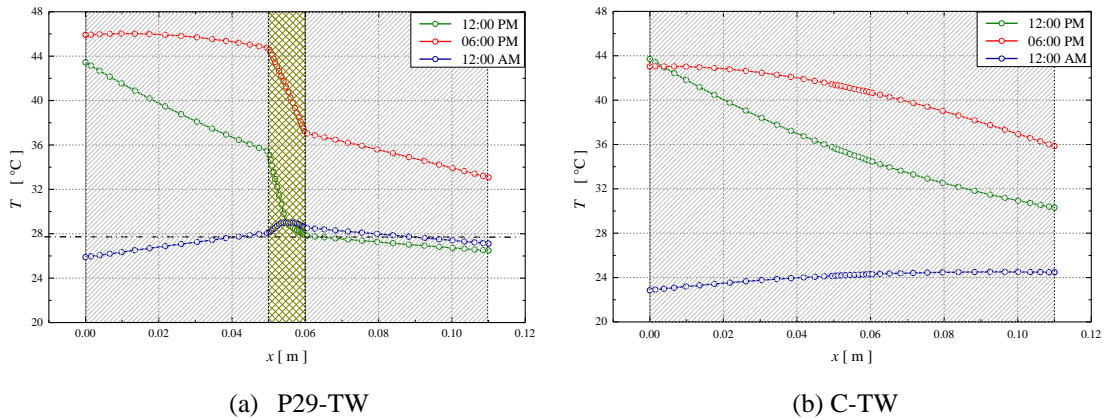
A las 6:00 PM, el perfil de P29-TW alcanza temperaturas más altas para los tres instantes de tiempo analizados. Como se muestra en la figura, los cambios precipitados se mantienen en el gradiente de temperatura. Siendo en la primera sección de concreto donde se muestra que el perfil de temperatura es casi horizontal, de manera que el flujo de calor es pequeño en esta parte. Mientras que en la sección del PCM, al encontrarse en un intervalo de temperaturas entre 37 °C y 44.5 °C este muestra un comportamiento completamente lineal, siendo señal de la presencia de una sola fase en el PCM. Finalmente, la segunda sección de concreto muestra una pendiente negativa, debido a que el muro se encuentra suministrando energía hacia la habitación desde el interior del muro.

Comparando, el C-TW sigue manteniendo un comportamiento uniforme en su perfil de temperatura. Sin embargo, se puede notar que la concavidad del perfil se invirtió, pasando de tener una concavidad positiva a las 12:00 PM a ser cóncava hacia abajo a las 6:00PM. El resultado de esto es que, durante esta hora, la radiación solar que recibe el absorbedor ha comenzado a descender. En consecuencia, la temperatura en el absorbedor empieza a bajar, por lo que el sistema C-TW ya está liberando energía a sus alrededores.

Por último, a las 12:00 AM, la edificación se encuentra recibiendo energía en ambas configuraciones. Esto se puede observar debido al cambio el sentido invertido en el perfil de temperaturas. Para ambos TW la concavidad es negativa. En el caso de C-TW, se puede



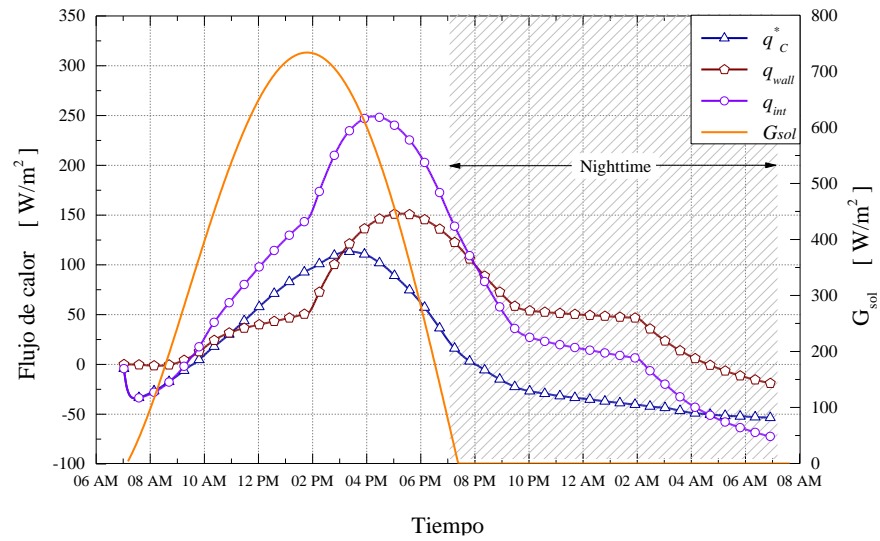
notar en la Figura 4.16b que  $T_{wall}$  (24.5 °C) es ligeramente superior a  $T_{room}$  (24 °C), pero  $T_{abs}$  (23 °C) es inferior a  $T_{room}$ . Esta proximidad entre las temperaturas del muro y la temperatura de la habitación indican que se ha alcanzado el equilibrio térmico con el aire de la habitación, incluso el sistema está extrayendo energía de ésta.



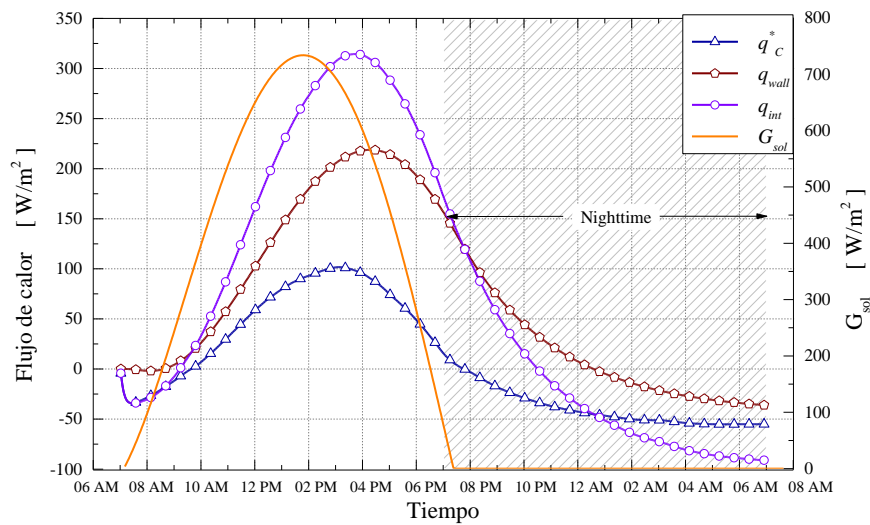
**Figura 4.16.** Perfiles de temperatura para el muro masivo: Tacubaya.

Por otro lado, en el caso del P29-TW, para la sección del PCM se puede notar cómo es que éste está experimentando un cambio de fase. Durante éste, la temperatura se conserva de manera constante para  $5.3 \text{ cm} < x < 5.7 \text{ cm}$ . Siendo este intervalo la temperatura de cambio de fase del PCM, proceso que actúa como una fuente de calor. Así, las pendientes en el perfil de temperatura en el muro indican que la energía térmica va del centro (PCM) hacia los extremos (canal y habitación).

Esto último se puede comprobar, en la Figura 4.17 donde se muestran los flujos de calor  $q_{wall}$ ,  $q_c^*$  y  $q_{int}$  junto con  $G_{sol}$ . Se observa cómo para los dos sistemas,  $q_{wall}$  es prácticamente nulo hasta las 10:00 AM. A diferencia de  $q_c^*$ , para ambos casos éste empieza con valores negativos, significando que, similar a lo ocurrido en Tulancingo, se está extrayendo energía de la habitación.



(a) P29-TW



(b) C-TW

**Figura 4.17.** Comportamiento de los flujos de calor hacia la habitación: Tacubaya.

De ahí que pasando las 10:00 AM y debido al efecto invernadero entre el canal y el vidrio, el flujo de calor pasa a ser positivo. Desde ahí el comportamiento para ambos sistemas pasa a ser prácticamente el mismo.

Por otro lado,  $q_{wall}$ , exhibe diferencias notables en ambos sistemas. Primeramente, para el caso del P29-TW, es durante el periodo diurno en el cual se muestra un aumento amortiguado del flujo de calor en comparación con C-TW.

Finalmente,  $q_{int}$  permite observar que el suministro total de calor a la habitación. En la Figura 4.17a se puede ver como el P29-TW suministrar calor a la edificación durante un periodo más largo en comparación con el C-TW: específicamente 3 horas y media más. Para el C-TW, se presenta un comportamiento persistente y suave a lo largo del periodo de modelación.

Durante el ciclo diurno logra alcanzar valores por encima del flujo de calor obtenido por el P29-TW. Sin embargo, es por la noche momento en que se invierte este comportamiento. Una vez que el Sol se oculta,  $q_{int}$  del C-TW disminuye en una manera más acelerada que el correspondiente para P29-TW. En conclusión, el sistema P29-TW deja de suministrar energía pasadas las 2:00 AM mientras que el C-TW pierde esta capacidad cerca de las 10:30 PM.

Evaluación anual.

Por último, en la Figura 4.18 y en la Tabla 4.4 se muestra el comportamiento anual de la energía almacenada en el muro durante el ciclo diurno ( $E_{sto,d}$ ), la energía suministrada a la edificación durante el día ( $E_{int,d}$ ) y la energía suministrada a la edificación durante la noche ( $E_{int,n}$ ).

Analizando los datos de la Tabla 4.4, la energía total suministrada del C-TW presenta un mejor desempeño en general respecto al P29-TW. Sin embargo, si se compara los resultados obtenidos para los periodos diurno y nocturno tal y como se realizó para Tulancingo, se puede observar como en la Figura 4.18a, para  $E_{sto,d}$ , el C-TW no es capaz de almacenar más energía en este periodo para todo el año en comparación con P29-TW.

Esta incapacidad se atribuye al uso del PCM y su capacidad para almacenar energía en forma de calor latente.

Similar a Tulancingo, ambos sistemas tienden a almacenar más energía durante el otoño e invierno, mientras que en primavera y verano ésta disminuye considerablemente. Algo similar ocurre en la Figura 4.18b donde se observa que la energía suministrada en periodo diurno, el P29-TW suministra una menor cantidad de energía a la edificación durante este lapso en comparación al C-TW. Esto se reproduce para todos los meses del año. Por lo que se puede decir que, para uso diurno, el C-TW es preferible a el P29-TW.

Adicionalmente del mismo modo que para el almacenamiento de energía, para ambos sistemas éstos también presentan valores superiores de suministro diurno de energía durante los meses de otoño e invierno, mientras que los valores mínimos se presentan en verano y primavera.

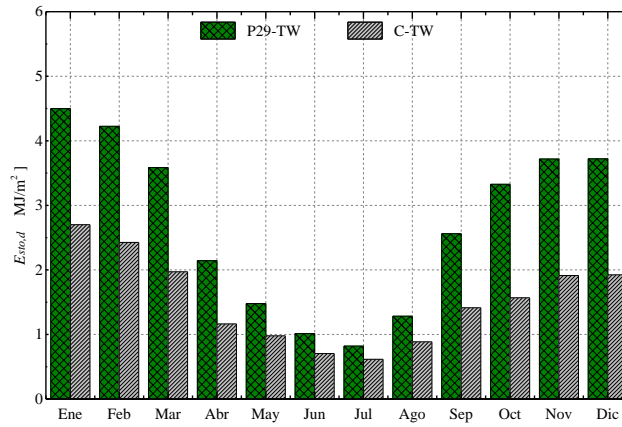
Finalmente como se puede ver en la Figura 4.18c y en la Tabla 4.4,  $E_{int,n}$  muestra valores negativos para ambos sistemas a lo largo del año. Siendo así que, durante las horas nocturnas, la edificación termino cediendo energía al muro.

Cabe destacar que para el C-TW estas pérdidas se presentan para todo el año. Sin embargo, el sistema P29-TW solamente presenta pérdidas durante los meses de abril a agosto, presentando valores positivos para el resto de los meses. Una vez más, esto indica que, durante los de otoño e invierno, el sistema P29-TW fue lo suficientemente eficiente para suministrar energía durante las horas de noche. Siendo así el sistema nocturno óptimo para brindar un mayor confort térmico en durante los meses más fríos del año en comparación del concreto.

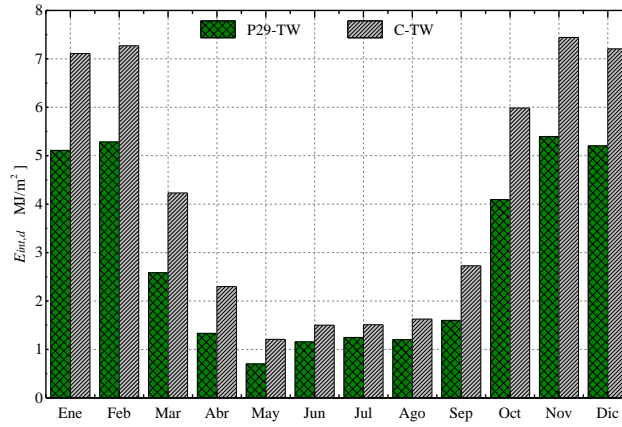
**Tabla 4.4.** Evaluación anual de energía suministrada en kWh/m<sup>2</sup>.

Mes	P29-TW			C-TW		
	$E_{int}$	$E_{int,d}$	$E_{int,n}$	$E_{int}$	$E_{int,d}$	$E_{int,n}$
<b>Enero</b>	1.51 (11.2)	1.42 (27.9)	0.07 (84.09)	1.70	1.97	-0.28
<b>Febrero</b>	1.81 (10.0)	1.47 (27.2)	0.34 (3500)	2.01	2.02	-0.01
<b>Marzo</b>	0.85 (12.4)	0.72 (38.5)	0.13 (165.0)	0.97	1.17	-0.20
<b>Abril</b>	0.33 (13.2)	0.37 (42.2)	-0.04 (84.0)	0.38	0.64	-0.25
<b>Mayo</b>	-0.10 (25.0)	0.20 (41.2)	-0.30 (28.6)	-0.08	0.34	-0.42
<b>Junio</b>	-0.13 (8.3)	0.32 (23.8)	-0.45 (16.7)	-0.12	0.42	-0.54
<b>Julio</b>	-0.14 (7.7)	0.35 (16.7)	-0.48 (12.7)	-0.13	0.42	-0.55
<b>Agosto</b>	0.20 (13.0)	0.33 (26.7)	-0.13 (43.5)	0.23	0.45	-0.23
<b>Septiembre</b>	0.51 (13.6)	0.44 (42.1)	0.07 (141.2)	0.59	0.76	-0.17
<b>Octubre</b>	1.15 (10.9)	1.14 (31.3)	0.01 (102.7)	1.29	1.66	-0.37
<b>Noviembre</b>	1.50 (11.2)	1.50 (27.5)	0.00 (100.0)	1.69	2.07	-0.38
<b>Diciembre</b>	1.52 (10.1)	1.45 (27.5)	0.07 (122.6)	1.69	2.00	-0.31
<b>TOTAL</b>	9.01 (11.1)	9.71 (27.9)	-0.71 (125.0)	10.22	13.92	-3.71

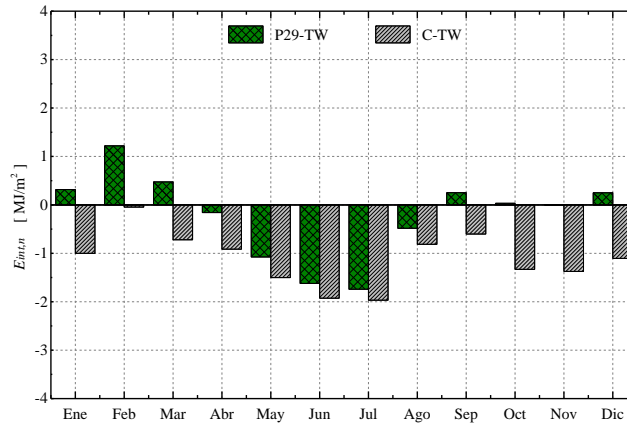
Valores en ( ) corresponden a la diferencia relativa porcentual.



(a) Energía almacenada durante el día



(b) Energía suministrada durante el día



(c) Energía suministrada durante la noche.

**Figura 4.18.** Evaluación térmica anual de la energía almacenada/suministrada: Tacubaya.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este Capítulo se presentan las conclusiones obtenidas a partir de los resultados. Adicionalmente se dan recomendaciones para la elaboración de trabajos futuros. Primeramente, se exponen las conclusiones del estudio paramétrico del efecto del punto de fusión del PCM en el muro, así como la evaluación anual del PCM-TW para ambas ciudades de la República Mexicana. Por último, se proporciona una serie de sugerencias para ser implementadas en trabajos futuros.

#### 5.1. Conclusiones

Se realizó un estudio paramétrico del punto de fusión de distintos PCM en el muro (P-29, P-37, P-48 y P-60). Se evaluó el P29-TW bajo condiciones climáticas de la ciudad de Tulancingo, Hidalgo y de la alcaldía de Tacubaya en la Ciudad de México. El comportamiento de este sistema se comparó con un C-TW. Con base en los resultados, puede concluirse lo siguiente:

- Para las condiciones del día más frío, el único sistema que realiza un cambio de fase por completo es el P29-TW. El P37-TW alcanza una fusión del 85%, el P48-TW se funde sólo el 8% y el P60-TW permanece en fase sólida durante todo el día.
- El punto de fusión del PCM no muestra un efecto aparente en el comportamiento térmico del vidrio colector, del aire en el canal ni del absorbedor durante el periodo diurno. Sin embargo, durante la noche, la influencia se hace notable únicamente para P29-TW y P37-TW, mientras que para C-TW, P37-TW y P60-TW no existe efecto alguno.

- De acuerdo con la cantidad de energía almacenada hasta las 7:00 PM ( $E_{sto,d}$ ), P29-TW presenta la mayor cantidad de energía almacenada: 41% más que C-TW; 7% más que P37-TW y 38% mejor que P48-TW y P60-TW.
- En relación con la energía suministrada por el sistema, se encontró que C-TW, P48-TW y P60-TW son los mejores suministrando energía durante horas diurnas: hasta 29% más que P29-TW y 24% más que P37-TW. Mientras que, durante la noche, P29-TW y P37-TW, al ser los únicos que logran cambiar de fase, proporcionan más energía que los otros sistemas. Entre estos dos sistemas, con un tiempo de suministro de 6 h 40 min, P29-TW es quien logra un tiempo mayor de suministro nocturno en la habitación, 2 h 10 min más que el P37-TW y 3 h 35 más que el C-TW.
- Respecto a la evaluación térmica anual para la ciudad de Tulancingo: se encontró que el P29-TW almacena mayor energía durante todo el año. No obstante, durante periodos diurnos, el C-TW se desempeñó de mejor manera, presentando una diferencia de hasta 56.1% con relación al P29-TW para la energía suministrada en horas de Sol en el mes de abril. Sin embargo, en los meses de verano, esa diferencia se reduce a 28.2%. Por otro lado, el P29-TW presentó mejor desempeño que el C-TW en periodos nocturnos, en especial durante los meses fríos. Adicionalmente, el P29-TW, al evitar pérdidas de calor nocturnas al exterior durante 6 meses del año, consigue un desempeño casi tres veces mayor con respecto al C-TW.
- De acuerdo con los resultados de la evaluación térmica anual para Tacubaya: P29-TW almacena más energía que el C-TW para todo el año, siendo más notable para los meses de otoño e invierno. Para periodos diurnos, C-TW suministró más energía a la habitación comparado al P29-TW para todos los meses del año, presentando un máximo de 42.2% en abril y un mínimo de 23.8%



junio. Sin embargo, para los periodos nocturnos, el P29-TW proporciona más energía que el C-TW, en especial durante los meses de otoño e invierno.

Como conclusión general, se puede afirmar que el sistema de PCM-TW tiene la capacidad para ser implementado en ciudades con clima generalmente frío de México. Sin embargo, los PCM con alto punto de fusión (P-48 y P-60) no se recomiendan, ya que los sistemas con estos materiales presentan un desempeño similar a un muro de concreto puro. Finalmente, antes de incorporar un PCM al sistema de TW, debe considerarse el uso que tendrá la edificación. Si la edificación es de uso diurno como un aula de clase, el C-TW es la opción más adecuada para calefacción pasiva. Por otro lado, si la edificación tendrá un uso nocturno como un dormitorio, el P29-TW es el ideal.

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

## **5.2. Recomendaciones Para Trabajos Futuros**

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

- Realizar un estudio paramétrico de la posición del del PCM en el muro masivo, del espesor del PCM y de los materiales de construcción en los que el PCM está embebido.
- Explorar PCMs con puntos de fusión cercanos al P-29 (entre 15 °C y 35 °C) para determinar si existe un punto de fusión óptimo.
- Elaborar un estudio experimental de un PCM-TW con el fin de obtener información para validar el modelo teórico.

- Realizar un estudio que considere la manipulación controlada del paso del fluido del canal a la edificación con el fin de disminuir pérdidas a través del vidrio y aumentar el tiempo de suministro de energía durante la noche.
- Continuar con en el análisis del comportamiento térmico del PCM-TW para condiciones climáticas de otros climas de la República Mexicana.
- Realizar un estudio comparativo de un P29-TW de 11 cm contra un C-TW de mayor espesor con el fin de determinar el espesor del C-TW que produzca el comportamiento equivalente al P29-TW.

## CAPÍTULO 6

### BIBLIOGRAFÍA

1. Abdeen A, Serageldin A, Ibrahim M, El-Zafarany A, Ookawara S, Murata Ryo, Experimental, analytical, and numerical investigation into the feasibility of integrating a passive Trombe wall into a single room, *Applied Thermal Engineering* 154 (2019): 751-768.
2. Akbarzadeh A, Charters W, Lesslie D, Thermocirculation characteristics of a trombe wall passive test cell, *Solar Energy* 28 (1982): 641-468.
3. Al-Saadi S, Zhai Z, A new valited TRNSYS module for simulating latent heat storage walls, *Energy and Buildings* 109 (2015): 274-290.
4. Arici M, Bilgin F, Nizetic S, Papadopoulos A, Phase change material based cooling of photovoltaic panel: A simplified numerical model for the optimization of the phase change material layer and general economic evaluation, *Journal of cleaner production*, 189 (2018): 738-745.
5. ASHRAE Fundamentals Handbook (2001).
6. Balcomb J, Hedstrom J, Mcfarland R, Simulation analysis of passive solar heated buildings-preliminary results, *Solar Energy* 19 (1977): 277-282.
7. Chagolla-Aranda M.A, Simá E, Xamán J, Álvarez G, Hernández-Pérez I, Téllez-Velázquez E, Effect of irrigation on the experimental termal performance of a green roof in a semi-warm climate in Mexico, *Energy and Buildings*, 154 (2017): 232-243.
8. Chagolla-Aranda M.A, Estudio de la transferencia de calor de techos verdes en edificaciones en México. Tesis de Doctorado CENIDET. (2017).

9. Churchill S, Chu H, Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 18 (1975): 1323– 1329.
10. CONABIO, Portal de geoinformación, <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> (2019).
11. Cuevas G. Análisis de la transferencia de calor conjugada en un sistema solar pasivo de muro Trombe. Tesis de Maestría CENIDET. (2008).
12. Duffie A, Beckman A, *Solar engineering of thermal processes*, John Wiley, New York (1996).
13. Duffie A, Beckman A, *Solar engineering of thermal processes*, John Wiley and Sons, Inc, New York (2006).
14. Ferziger J, Perić M, *Computational methods for fluid dynamics 3rd edición*, Springer (2002).
15. Fiorito F, Trombe walls for lightweight buildings in temperate and hot climates. Exploring the use of phase-change materials for performances improvement, *Energy Procedia* (2012): 1110-1119.
16. Ghoneim AA, Klein SA, Duffie JA, Analysis of collector-storage buildings walls using phase-change materials, *Solar Energy* 47 (1991): 37-242.
17. Hami K, Draoui B, Hami O, The thermal performances of a solar wall energy 39 (2012):
18. Hernández-López I, Xamán J, Chávez Y, Hernández-Pérez I, Alvarado-Juárez R, Thermal energy storage and losses in a room-trombe wall system located in México, *Energy* (2016): 512-524.

19. Hirunlabh J, Kongduang W, Namprakai P, Khedari J, Study of natural ventilation of houses by a metallic solar wall under tropical climate, *Renewable Energy* 154 (1999): 109-119.
20. Incropera F, De Witt D, *Fundamentals of heat and mass transfer*, 5ta edición, John Wiley, New York (2002).
21. INEGI, *Presentación de resultados, Estados Unidos Mexicanos* (2020): 9-13
22. Iten M, Liu S, Shukla A, A review on the air-PCM-TES application for free cooling and heating in the buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 61 (2016): 175-186.
23. Konstantinidis C V, *Integration of thermal energy storage in buildings*, Tesis de maestría, Univ. Tex. Austin, 2010.
24. Krüger E, Suzuki E y Matoski A, Evaluation of a trombe wall system in a subtropical location, *Energy and Buildings* 66 (2013): 364-372.
25. Leang E, Tittlein P, Zalewski L, Lassue S, Numerical study of a composite Trombe solar wall integrating microencapsulated PCM, *Energy Procedia* 122 (2017): 1009-1014.
26. Liu X, Zhou Y, Zhang G, Numerical study on cooling performance of a ventilated trombe wall with phase change materials, *Building Simulation* 11 (2018): 677-694.
27. Morse ES, *Warming and ventilating apartments by the sun's rays*, U.S. Patent (1881): 246-626, 1881.
28. Nejat P, Jomehzadeh F, Taheri MM, Gohari M, Majid MZA, A global review of energy consumption, CO<sub>2</sub> emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO<sub>2</sub> emitting countries), *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43 (2015): 843-862.

29. Ohanessian P. y Charters W, Thermal simulation of a passive solar house using a trombe-michel wall structure, *Solar Energy* 20 (1978): 275-281.
30. Onishi J, Soeda H, Mizuno M, Numerical study on a low energy architecture based upon distributed heat storage system, *Renewable Energy* 22 (2001): 61-66.
31. Ozisik M, Necati, Heat conduction, 2da edición, John Wiley & Song, Inc, (1976).
32. Patankar SV, Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere Publishing Co. (1980).
33. PureTemp (2021), Hoja de datos de PureTemp: <https://www.puretemp.com/stories/puretemp-technical-data-sheets>.
34. Rabani M, Kalantar V, Faghieh AK, Rabani M, Rabani R, Numerical simulation of a trombe wall to predict the energy storage rate in non-sunny periods, *Heat Mass Transfer* 49 (2013): 1395-1404.
35. SENER, Balance Nacional de Energía (2019): 29-36.
36. Solomon A, An easily computable solution to a two-phase Stefan problem, *Solar Energy*, 23 (1979): 525-528.
37. Souayfane F, Fardoun F, Biwole P, Phase Change Materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review, *Energy and Buildings* 129 (2016): 396-431.
38. Vázquez-Beltrán. Análisis dinámico de un sistema solar pasivo de muro Trombe para condiciones climáticas de México. Tesis de Maestría CENIDET. (2019).
39. Utzinger D, Klein S, Mitchell J, The effect of air rate in collector-storage wall, *Solar Energy* 25 (1980): 511-519.

40. Wei G, Wang G, Xu C, Ju X, Xing L, Du X, Yang Y, Selection principles and thermophysical properties of high temperatura phase change materials for thermal energy storage: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81 (2017): 1771-1786.

41. Xie J, Wang W, Liu J, Pan S, Thermal performance analiysis of pcm wallboards for building application based on numerical simulation, *Solar Energy* 162 (2018): 533-540.

## ANEXOS

### Anexo A: Datos climáticos del día más frío.

**Tabla A.1.** Datos climáticos del día más frío de la ciudad de Tulancingo, Hidalgo 2014.

Fecha	Hora	$G_{sol}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$T_{amb}$ [°C]	$V_{wind}$ [m/s]
18/01/2014	7:00:00 a.m.	0.00	0.00	0.47
18/01/2014	8:00:00 a.m.	22.46	-0.10	0.95
18/01/2014	9:00:00 a.m.	252.78	4.90	0.98
18/01/2014	10:00:00 a.m.	435.07	10.70	0.60
18/01/2014	11:00:00 a.m.	598.13	12.30	0.65
18/01/2014	12:00:00 p.m.	675.71	15.60	1.08
18/01/2014	1:00:00 p.m.	720.96	17.30	1.05
18/01/2014	2:00:00 p.m.	715.36	18.20	0.53
18/01/2014	3:00:00 p.m.	684.99	18.50	0.97
18/01/2014	4:00:00 p.m.	634.21	16.90	0.38
18/01/2014	5:00:00 p.m.	778.42	16.20	0.73
18/01/2014	6:00:00 p.m.	7.84	13.20	2.08
18/01/2014	7:00:00 p.m.	0.00	9.90	2.60
18/01/2014	8:00:00 p.m.	0.00	8.40	1.55
18/01/2014	9:00:00 p.m.	0.00	7.50	1.05
18/01/2014	10:00:00 p.m.	0.00	7.20	0.88
18/01/2014	11:00:00 p.m.	0.00	6.20	1.43
19/01/2014	12:00:00 a.m.	0.00	5.70	0.80
19/01/2014	1:00:00 a.m.	0.00	5.10	0.45
19/01/2014	2:00:00 a.m.	0.00	4.00	0.32
19/01/2014	3:00:00 a.m.	0.00	3.80	0.22
19/01/2014	4:00:00 a.m.	0.00	3.40	0.60
19/01/2014	5:00:00 a.m.	0.00	3.40	0.73
19/01/2014	6:00:00 a.m.	0.00	3.10	0.88
19/01/2014	7:00:00 a.m.	0.00	2.20	0.88



**Tabla A.2.** Funciones para la radiación solar y temperatura ambiente del día más frío de Tulancingo, Hidalgo.

Día	Horario	Funciones Radiación solar
Día más frío 18/01/2014	7 a.m. – 1 p.m.	$G_{sol}(t) = -0.00704 + 0.0491t - 8.48005x10^{-6}t^2$ $+ 1.42407x10^{-9}t^3 - 8.29762x10^{-14}t^4$ $+ 1.55844x10^{-18}t^5$
	1 p.m. – 7 p.m.	$G_{sol}(t) = -11004.39738 + 1.74124t - 1.03784x10^{-4}t^2$ $+ 3.15824x10^{-9}t^3 - 4.94387x10^{-14}t^4$ $+ 3.12597x10^{-19}t^5$
	7 p.m. – 7 a.m.	$G_{sol}(t) = 0$
		Funciones Temperatura ambiente
	7 a.m. – 7 p.m.	$T_{amb}(t) = 272.78009 - 2.35234x10^{-4}t + 2.04132x10^{-7}t^2$ $- 1.19421x10^{-11}t^3 + 2.69247x10^{-16}t^4$ $- 2.23097x10^{-21}t^5$
	7 p.m. – 7 a.m.	$T_{amb}(t) = 1199.28064 - 0.07413t - 2.37822x10^{-6}t^2$ $- 3.77872x10^{-11}t^3 + 2.96463x10^{-16}t^4$ $- 9.18268x10^{-22}t^5$

**Tabla A.3.** Datos climáticos del día más frío de la delegación Tacubaya, Ciudad de México 2014.

Fecha	Hora	$G_{sol}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$T_{amb}$ [°C]	$V_{wind}$ [m/s]
18/01/2014	7:00:00 a.m.	0.00	8.40	0.40
18/01/2014	8:00:00 a.m.	124.06	10.50	0.00
18/01/2014	9:00:00 a.m.	263.10	12.40	0.30
18/01/2014	10:00:00 a.m.	427.67	13.90	0.70
18/01/2014	11:00:00 a.m.	574.25	14.80	0.30
18/01/2014	12:00:00 p.m.	667.69	15.70	0.40
18/01/2014	1:00:00 p.m.	724.47	16.30	2.10
18/01/2014	2:00:00 p.m.	718.50	16.80	0.60
18/01/2014	3:00:00 p.m.	669.71	17.15	0.50
18/01/2014	4:00:00 p.m.	567.64	17.20	0.10
18/01/2014	5:00:00 p.m.	401.39	16.60	1.20
18/01/2014	6:00:00 p.m.	198.40	15.60	0.60
18/01/2014	7:00:00 p.m.	0.00	14.20	0.30
18/01/2014	8:00:00 p.m.	0.00	12.00	1.80
18/01/2014	9:00:00 p.m.	0.00	10.30	1.90
18/01/2014	10:00:00 p.m.	0.00	9.10	2.00
18/01/2014	11:00:00 p.m.	0.00	8.00	2.00
19/01/2014	12:00:00 a.m.	0.00	7.20	1.00
19/01/2014	1:00:00 a.m.	0.00	6.30	1.60
19/01/2014	2:00:00 a.m.	0.00	5.70	2.00
19/01/2014	3:00:00 a.m.	0.00	5.10	2.20
19/01/2014	4:00:00 a.m.	0.00	5.00	0.20
19/01/2014	5:00:00 a.m.	0.00	4.70	0.10
19/01/2014	6:00:00 a.m.	0.00	4.80	0.10
19/01/2014	7:00:00 a.m.	0.00	4.90	0.20

**Tabla A.4.** Funciones para la radiación solar y temperatura ambiente del día más frío de la delegación Tacubaya, Ciudad de México.

Día	Horario	Funciones Radiación solar
Día más frío 18/01/2014	7 a.m. – 7 p.m.	$G_{sol}(t) = 166697.12398 - 6.428t + 9.08145x10^{-5}t^2 - 5.56169x10^{-10}t^3 + 1.24665x10^{-15}t^4$
	7 p.m. – 7 a.m.	$G_{sol}(t) = 0$
		Funciones Temperatura ambiente
	7 a.m. – 7 p.m.	$T_{amb}(t) = -773.75158 + 0.03792t - 5.18264x10^{-7}t^2 + 3.20707x10^{-12}t^3 - 7.54881x10^{-18}t^4$
	7 p.m. – 7 a.m.	$T_{amb}(t) = 2751.37378 - 0.06192t + 5.89281x10^{-7}t^2 - 2.51629x10^{-12}t^3 + 4.06141x10^{-18}t^4$