



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



Análisis numérico de la transferencia de calor de materiales de cambio de fase en techos de edificaciones del estado de Tabasco

TESIS

para obtener el grado de

Maestro en Ciencias en Ingeniería

Presenta:

Ing. Jenifer Alejandra Triano Juárez

Director:

Dr. Edgar Vicente Macías Melo



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura**



DIRECCIÓN

OFICIO: DIR/DAIA/1251/2019

FECHA: 22 de mayo de 2019

ASUNTO: El que se indica

C. ING. JENIFER ALEJANDRA TRIANO JUÁREZ
PASANTE DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
PRESENTE.

En virtud de haber elaborado su trabajo de Tesis denominado:

"ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR DE MATERIALES DE CAMBIO DE FASE EN TECHOS DE EDIFICACIONES DEL ESTADO DE TABASCO"

Para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería y en el cual el Dr. Edgar Vicente Macías Melo ha sido el Director de Tesis.

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

Sin otro particular, le envío un afectuoso saludo.

ATENTAMENTE

[Firma manuscrita]

**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO
DIVISIÓN ACADÉMICA DE
DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

DR. GERMÁN PÉREZ HERNÁNDEZ
DIRECTOR

DIRECCIÓN

C.c.p. Archivo

DR. GPH/ DRA'MAAL/apl"



Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, km. 1, Col. La Esmeralda
C.P. 86690 Cunduacán, Tabasco
Tel. (993) 358.15.00 Ext. 6758
posgrado.daia@ujat.mx

www.ujat.mx



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura**



INSTITUTO JUÁREZ
1878-2019

JEFATURA DEL ÁREA DE POSGRADO

Cunduacán, Tabasco, a 17 de mayo de 2019
MEM/MCI/008/2019

PARA: DR. GERMÁN PÉREZ HERNÁNDEZ
DIRECTOR DE LA DAIA
DE: COMISIÓN SINODAL
ASUNTO: APROBACIÓN DE IMPRESIÓN TESIS DE MAESTRÍA

Una vez hecha la revisión detallada del Trabajo de Tesis denominado:

"ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR DE MATERIALES DE CAMBIO DE FASE EN TECHOS DE EDIFICACIONES DEL ESTADO DE TABASCO"

Desarrollado por la C. ING. JENIFER ALEJANDRA TRIANO JUÁREZ de la Maestría en Ciencias en Ingeniería, le comunicamos que aceptamos la impresión del trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.

COMISIÓN SINODAL

DR. JUAN BARAJAS FERNÁNDEZ
PRESIDENTE

**DRA. KARLA MARÍA AGUILAR
CASTRO**
SECRETARIO

DR. EDGAR VICENTE MACIAS MELO
VOCAL 1

**DR. JUAN GABRIEL ÁLVAREZ
RAMÍREZ**
VOCAL 2

DRA. EBELIA DEL ANGEL MERAZ
VOCAL 3

CARTA DE AUTORIZACIÓN

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente la tesis denominada “Análisis numérico de la transferencia de calor de materiales de cambio de fase en techos de edificaciones del estado de Tabasco”, de la cual soy autor y titular de los derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de la tesis antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y cualquier otra red académica con las que la universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis antes mencionada y para los fines estipulados de este documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Cunduacán, Tabasco a los 2 días del mes de agosto de 2019.

Autorizo

Ing. Jenifer Alejandra Triano Juárez

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el valioso apoyo brindado durante mis estudios de maestría.

A la División Académica de Ingeniería y Arquitectura Unidad Chontalpa de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco por haberme permitido cumplir uno de los objetivos en mi formación profesional.

A mi comité sinodal, al Dr. Edgar Vicente Macías Melo, a la Dra. Karla María Aguilar Castro, al Dr. Juan Barajas Fernández, y al Dr. Iván Hernández Pérez por sus comentarios y sugerencias que contribuyeron al desarrollo de este proyecto de tesis. De igual forma agradezco a mis profesores, compañeros y todos a aquellos que me compartieron sus conocimientos y su atención.

A mi familia, por el amor, la empatía, y su grata compañía. A mi madre, mi primera maestra y mi mejor amiga, por su dedicación, por animarme y confiar en mí.

A mi por siempre estimado GG, por su confianza y paciencia.

DEDICATORIAS

A mi mayor inspiración y alegría, a quién ha estado conmigo en todo momento apoyándome y acompañándome; esto es por ti y para ti Padre.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

RESUMEN

Se estudió numéricamente el comportamiento térmico de un techo de concreto con una capa intermedia de material de cambio de fase (PCM). La finalidad fue evaluar el efecto de la temperatura de cambio de fase y la posición de la capa de PCM para identificar la configuración con el comportamiento térmico y operativo que permita la reducción de las ganancias de calor hacia el interior de una edificación. Para este fin, se probaron dos PCM de 1 cm espesor; RT35 y RT44HC, con un rango de temperatura de cambio de fase entre 29-36°C y 41-44°C, respectivamente. Cada PCM se evaluó en cinco posiciones dentro del techo. El comportamiento térmico del sistema fue analizado para una semana típica de primavera y una semana típica de verano bajo el clima cálido-húmedo de la ciudad de Cunduacán, Tabasco. Para ello, se desarrolló y validó un código computacional capaz de resolver la ecuación de difusión de calor bidimensional en estado transitorio; discretizada con el método de volumen finito en un esquema implícito. Las superficies externas estuvieron sujetas a las variaciones de la temperatura ambiente y radiación solar, y la superficie interna en contacto con el aire interior a temperatura constante. El fenómeno de cambio de fase se formuló con el modelo de entalpía y el modelo de calor específico efectivo. De los casos analizados, el comportamiento térmico y operativo más favorable, se obtuvo con el PCM RT35 cuando se encuentra próximo a la superficie interna del techo. En la semana de primavera esta configuración redujo las ganancias de calor 1.441 kWh m⁻² (13.77%); y en la semana de verano 1.556 kWh m⁻² (14.09%). Estos valores permitirían un ahorro en el consumo eléctrico de \$6.06 a \$7.05 por m² en una edificación, y una reducción de 0.759-0.820 kg m⁻² en las emisiones de CO₂.

ABSTRACT

The thermal behavior of a concrete roof with an intermediate layer of phase change material (PCM) was studied numerically. The purpose was to evaluate the effect of the phase change temperature and the position of the PCM layer to identify the configuration with the thermal and operational behavior that allows the reduction of heat gains to the interior of a building. Thus, two PCM with thickness of 1 cm were tested; RT35 and RT44HC, with a range of temperature of change of phase between 29-36°C and 41-44°C, respectively. Each PCM was evaluated in five positions within the roof. The thermal behavior of the system was analyzed for a typical week of spring and a typical week of summer under the hot-humid climate of Cunduacán, Tabasco. A computational code was developed and validated to solve the two-dimensional heat diffusion equation in a transient state; discretized with the finite volume method in an implicit scheme. The external surface was subject to variations in ambient temperature and solar radiation, and the inner surface in contact with indoor air at constant temperature. The phenomenon of phase change was formulated with the enthalpy model and the effective specific heat model. Of the cases analyzed, the most favorable thermal and operative behavior was obtained with the PCM RT35 when it is close to the internal surface of the roof. In the spring week this configuration reduced heat gains 1.441 kWh m⁻² (13.77%); and in the summer week 1.556 kWh m⁻² (14.09%). These values would allow a saving in electricity consumption of \$6.06 to \$7.05 per m² in a building, and a reduction of 0.759-0.820 kg m⁻² in CO₂ emissions.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABLAS.....	IX
NOMENCLATURA.....	XI
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	
1.1. Generalidades.....	2
1.2. Antecedentes.....	4
1.3. Objetivos.....	12
1.3.1. Objetivo general.....	12
1.3.2. Objetivos específicos.....	12
1.4. Alcances del proyecto.....	12
1.5. Estructura de la tesis.....	13
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	
2.1. Fundamentos de transferencia de calor.....	15
2.1.1. Conducción.....	15
2.1.2. Convección.....	18
2.1.3. Radiación.....	19
2.2. Análisis numérico en la conducción de calor.....	20
2.3. Materiales de cambio de fase (PCM).....	22
2.4. Solución numérica de problemas de cambio de fase.....	26

2.4.1. Método de entalpía.....	27
2.4.2. Método de calor específico efectivo.....	28
2.5. Condiciones climáticas del Estado de Tabasco.....	29

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN NUMÉRICA

3.1. Modelo físico.....	32
3.1.1. Selección del PCM.....	33
3.1.2. Casos de estudio.....	35
3.2. Modelo matemático.....	39
3.2.1. Ecuación gobernante.....	40
3.2.2. Condiciones de frontera.....	42
3.2.3. Condición inicial.....	43
3.3. Generación de la malla computacional.....	45
3.3.1. Análisis de independencia de malla.....	47
3.4. Modelo numérico.....	49
3.4.1. Método de solución del sistema de ecuaciones algebraicas.....	52
3.4.2. Algoritmo de solución.....	54
3.5. Verificación y validación del modelo numérico.....	56
3.5.1. Verificación del comportamiento del PCM.....	56
3.5.2. Validación del modelo numérico para un sistema compuesto por materiales convencionales.....	57

3.5.3. Validación del modelo numérico para un sistema con PCM.....	59
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
4.1. Parámetros de estudio.....	63
4.2. Semana de primavera.....	63
4.2.1. Análisis de la temperatura.....	64
4.2.2. Análisis del flux de calor.....	75
4.3. Semana de verano.....	79
4.3.1. Análisis de la temperatura.....	79
4.3.2. Análisis del flux de calor.....	85
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	90
REFERENCIAS.....	92
ANEXO A. PCM REPORTADOS EN LA LITERATURA.....	97
ANEXO B. HOJAS TÉCNICAS DE LOS PCM ANALIZADOS.....	100
ANEXO C. COSTOS DE LOS PCM ANALIZADOS.....	103
ANEXO D. ITERACIONES Y RESIDUALES.....	105
ANEXO E. ACTIVIDADES ACADÉMICAS.....	107

LISTA DE FIGURAS

Figura	Descripción	Pág.
1.1	Ciclo de cambio de fase de los PCM.	3
2.1	Clasificación de los PCM.	24
2.2	PCM micro-encapsulado, a) en polvo, b) disperso en líquido.	25
2.3	PCM macro-encapsulado, a) en esferas, b) en tubos, c) en platos, d) en paneles.	26
2.4	Zonas climáticas de México y clima en el estado de Tabasco.	30
3.1	Modelo físico del techo-PCM.	32
3.2	Función $C_p(T)$ del PCM RT35 Rubitherm®.	35
3.3	Función $C_p(T)$ del PCM RT44HC Rubitherm®.	35
3.4	Casos de estudio.	36
3.5	Condiciones de frontera del techo.	43
3.6	Modelo físico de la condición inicial.	44
3.7	Puntos analizados en la independencia de malla.	48
3.8	Representación de un volumen de control de un nodo P sobre una malla bidimensional.	50
3.9	Algoritmo de solución para el problema de estudio.	55
3.10	Verificación del modelo numérico para un sistema con PCM.	56
3.11	Evolución de la temperatura en la superficie externa de una losa de concreto. Validación del modelo numérico en materiales convencionales.	58
3.12	Evolución de la temperatura en la superficie interna de una losa de concreto. Validación del modelo numérico en materiales convencionales.	58

3.13	Modelo físico para la validación del modelo numérico en un sistema con PCM.	59
3.14	Curva $C_p(T)$ del PCM Energain® para el problema de validación.	60
3.15	Temperatura del aire de la cámara externa del problema de validación con PCM.	61
3.16	Evolución experimental y numérica de la temperatura de superficie interna y externa para el problema de validación con PCM.	61
4.1	Temperatura e irradiancia solar durante la semana de primavera (28 mayo al 03 de junio del 2018).	64
4.2	Evolución de la temperatura en el techo de referencia en la semana de primavera.	65
4.3	Evolución de la temperatura del Caso A con PCM RT35 en la semana de primavera.	66
4.4	Evolución de la temperatura del Caso E con PCM RT35 en la semana de primavera.	67
4.5	Evolución de la fracción líquida del Caso E PCM RT35 en la semana de primavera.	69
4.6	Evolución de la temperatura del Caso A con PCM RT44HC en la semana de primavera.	71
4.7	Evolución de la temperatura del Caso D con PCM RT44HC en la semana de primavera.	71
4.8	Evolución de la fracción líquida del Caso A PCM RT44HC en la semana de primavera.	73
4.9	Evolución de la fracción líquida del Caso E PCM RT44HC en la semana de primavera.	73
4.10	Evolución del flux de calor del Caso A PCM RT35 en la semana de primavera.	75
4.11	Evolución del flux de calor del Caso A PCM RT44HC en la semana de primavera.	76

4.12	Evolución del flux de calor del caso de referencia, Caso A con PCM RT35 y PCM RT44HC en la semana de primavera.	77
4.13	Temperatura e irradiancia solar en la semana de verano (23-29 de julio del 2018).	79
4.14	Evolución de la temperatura en el techo de referencia en la semana de verano.	80
4.15	Evolución de la temperatura del Caso A con PCM RT35 en la semana de verano.	81
4.16	Evolución de la temperatura del Caso E con PCM RT35 en la semana de verano.	81
4.17	Evolución de la temperatura del Caso A con PCM RT44HC en la semana de verano.	84
4.18	Evolución de la temperatura del Caso D con PCM RT44HC en la semana de verano.	84
4.19	Evolución de la fracción líquida del Caso E PCM RT44HC en la semana de verano.	85
4.20	Evolución del flux de calor del Caso A PCM RT35 durante la semana de verano.	86
4.21	Evolución del flux de calor del Caso A PCM RT44HC en la semana de verano.	87
4.22	Evolución del flux de calor del caso de referencia, Caso A con PCM RT35 y PCM RT44HC durante la semana de verano.	88

LISTA DE TABLAS

Tabla	Descripción	Pág.
1.1	Configuraciones de techos con PCM reportados en la literatura.	9
2.1	Temperaturas máximas y mínimas promedio en Tabasco durante el periodo 2015-2018.	30
3.1	Propiedades termofísicas de los PCM seleccionados.	34
3.2	Propiedades termofísicas de los materiales de construcción del techo de concreto.	37
3.3	Diseño de los escenarios de estudio.	38
3.4	Condición inicial de las configuraciones de estudio.	45
3.5	Independencia de malla variando los Δt .	48
3.6	Independencia de malla variando los Δx , Δy .	49
3.7	Discretización de las ecuaciones de condiciones de frontera.	51
3.8	Diferencia máxima y promedio obtenida de la validación del código para un material convencional.	58
3.9	Propiedades termofísicas de los materiales para validación del comportamiento del PCM.	59
4.1	Temperaturas máximas y tiempos de retraso de los casos analizados durante la semana de primavera (28 mayo al 03 de junio del 2018).	65
4.2	Fracción líquida de los casos con PCM RT35 en la semana de primavera.	69
4.3	Fracción líquida de los casos con PCM RT44HC en la semana de primavera.	73
4.4	Reducción del pico de calor durante la semana de primavera.	75
4.5	Análisis del flux de calor de los casos con PCM RT35 en la semana de primavera.	78

4.6	Análisis del flux de calor de los casos con PCM RT44HC en la semana de primavera.	78
4.7	Temperaturas máximas y tiempos de retraso de los casos analizados durante la semana de verano (23-29 de julio del 2018).	80
4.8	Fracción líquida de los casos con PCM RT35 en la semana de verano.	82
4.9	Fracción líquida de los casos con PCM RT44HC en la semana de verano.	85
4.10	Reducción del pico de calor durante la semana de verano.	86
4.11	Análisis del flux de calor de los casos con PCM RT35 para la semana de verano.	89
4.12	Análisis del flux de calor de los casos con PCM RT44 para la semana de verano.	89

NOMENCLATURA

Símbolos	Descripción	Unidades
a, b	Coefficientes de la ecuación discretizada de coeficientes agrupados	Adimensional
A	Área	m^2
C_p	Calor específico	$J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$
dx, dy, dz	Diferencial en dirección x, y, z	m
dt	Diferencial de tiempo	s
f_{liq}	Fracción líquida	Adimensional
g	Generación de calor	$W\ m^{-3}$
h	Coefficiente convectivo o conductancia superficial	$W\ m^{-2}\ ^\circ C^{-1}$
H	Entalpía	$J\ kg^{-1}$
I	Irradiancia	$W\ m^{-2}$
L	Calor latente	$J\ kg^{-1}$
L_x, L_y	Longitud del dominio en dirección x y y .	m
n	Dirección en sistema de coordenadas	Adimensional
N_x, N_y	Número de nodos en dirección x y y .	Adimensional
q	Flujo de calor	W
q''	Flux de calor	$W\ m^{-2}$
T	Temperatura	$^\circ C$
t	Tiempo	s
U	Coefficiente global de transferencia de calor	$W\ m^{-2}\ ^\circ C^{-1}$

Letras griegas

α_t	Difusividad térmica	$m^2\ s^{-1}$
α	Absortancia	Adimensional
δ_x, δ_y	distancias entre nodos en dirección x, y .	m
Δt	Paso de tiempo	s
$\Delta x, \Delta y$	Tamaño de la malla numérica en dirección x, y .	m
ε	Emitancia	Adimensional
λ	Conductividad térmica	$W\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$

ρ	Densidad	kg m^{-3}
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$

Subíndices

∞	Ambiente
b	Cuerpo negro
e	Interfaz entre nodo P y E
E	Dirección este
exp	Experimental
ext	Exterior
$efec$	Efectivo
f	Fusión
i	Interior
II	Interfaz inferior
IS	Interfaz superior
l	Líquido
LC	Caso de referencia
$máx$	Máximo
$mín$	Mínimo
n	Interfaz entre nodo N y P
N	Dirección norte
num	Numérico
pc	Cambio de fase
P	Nodo central (en evaluación)
$RT35$	PCM RT35
$RT44$	PCM RT44HC
s	Interfaz entre nodo P y S
S	Dirección sur
sa	Sol-aire
SE	Superficie exterior
sf	Solidificación
SI	Superficie interior

<i>sl</i>	Sólido
<i>sol</i>	Solar
<i>sup</i>	Superficie
<i>w</i>	Interfaz entre nodo W y P
<i>W</i>	Dirección oeste

Siglas

CFD	Dinámica de fluidos computacional
MVF	Método de Volumen Finito
PCM	Material de cambio de fase

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Capítulo 1

Introducción

Se plantea el contexto de los PCM como alternativa de almacenamiento de energía para la envolvente de edificaciones. Se presenta la revisión de la literatura sobre los PCM. Asimismo, se dan a conocer el objetivo general, los objetivos específicos, el alcance y la estructura de la tesis.

1.1 Generalidades

La búsqueda de una mejor calidad de vida ha sido sin duda un objetivo característico en la historia de la humanidad. Sin embargo, el crecimiento de las ciudades y de la industrialización involucra un incremento continuo de la demanda energética, lo cual se ha convertido en un problema de política pública. Como estrategia de solución, se ha hecho énfasis en la eficiencia energética y la necesidad de utilizar normas que la promuevan. A este esfuerzo se suma principalmente la ciencia y la tecnología, para lograr que los procesos, productos o servicios se basen en el uso racional de la energía [1].

Uno de los sectores que se ha identificado con potencial para generar grandes ahorros de energía es el residencial [2,3]. Ante tal panorama, se ha planteado como uno de los ejes de la eficiencia energética, el mejorar el diseño térmico de las edificaciones mediante la selección adecuada de los materiales de construcción. La premisa es asegurar la comodidad térmica de los habitantes con el mínimo consumo de energía [3]. Para mejorar el comportamiento térmico de las edificaciones existen diferentes alternativas, como son: materiales de aislamiento térmico, películas reflectivas, materiales termo-crómicos, uso de vegetación en los techos (*green roofs*), integración de intercambiadores de calor, y el uso de Materiales de Cambio de Fase conocidos como PCM por sus siglas en inglés (*phase change materials*) [2,4,5]. Los PCM son sistemas de almacenamiento de energía térmica que han sido estudiados desde antes de 1980 [6]; sin embargo, en la última década se ha incrementado el interés por su estudio y aplicación en el sector de construcción debido a sus características térmicas [7]. La diferencia principal entre los materiales de construcción convencionales como el concreto y los PCM, radica que en los primeros el calor almacenado es calor sensible, el cual provoca un cambio de temperatura proporcional a la cantidad de calor agregado e inversamente proporcional a la masa del material [8]. En los PCM, como se ilustra en la Figura 1.1, inicialmente se almacena calor en forma sensible hasta que se alcanza la temperatura de

fusión, posteriormente el calor almacenado, ahora llamado calor latente, es empleado para el cambio de fase del material dentro de un rango de temperatura específico. Esta característica permite que los PCM puedan almacenar y liberar grandes cantidades de energía por unidad de volumen durante la transición sólido-líquido-sólido sin fluctuaciones bruscas de temperatura [7]. En consecuencia, la alta masa térmica de los PCM retarda la manifestación de la temperatura máxima exterior durante un periodo conocido como tiempo de retraso, y disminuye los picos de calor a razón de un coeficiente llamado factor de decremento. De esta manera, la implementación de los PCM en las edificaciones permite que las estructuras de peso ligero puedan tener una inercia térmica similar a la de una estructura masiva [9].

No obstante, para aprovechar al máximo la capacidad de almacenamiento de los PCM, es necesario que durante las horas de noche el PCM se solidifique al 100%. Si las temperaturas durante la noche son mayores que la temperatura de solidificación del PCM, este no puede solidificarse por completo y el cambio de fase es parcial, disminuyendo su capacidad de almacenamiento de calor para el día siguiente [9-14].

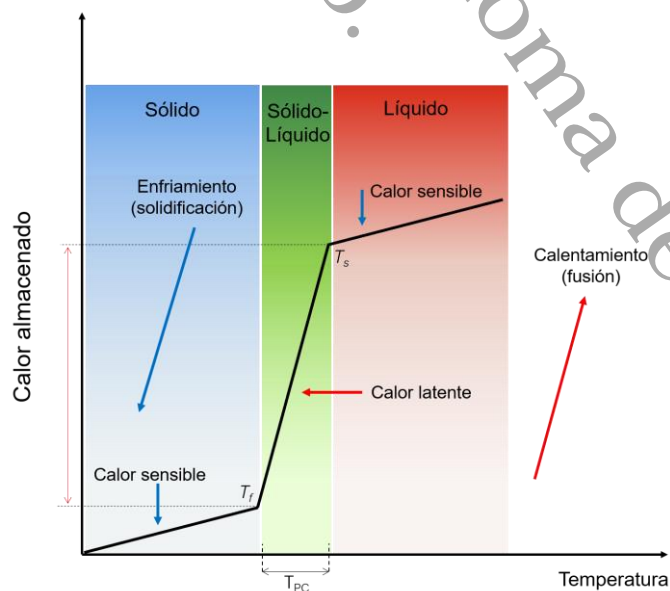


Figura 1.1 Ciclo de cambio de fase de los PCM. Modificado de [9].

1.2 Antecedentes

Los estudios experimentales y numéricos disponibles en la literatura confirman que los PCM pueden reducir y retardar las ganancias de calor hacia el interior del edificio, contribuyendo de esta manera a mejorar las condiciones de habitabilidad con un menor consumo de energía. Akeiber *et al.* [15] obtuvieron experimentalmente que, bajo las condiciones climáticas de Iraq, una habitación con PCM consumió 4.3 kWh de electricidad y una habitación sin PCM consumió 7.9 kWh. Esto representó una diferencia de 45% en las cargas de enfriamiento. Ramakrishnan *et al.* [16] realizaron un estudio experimental y numérico para evaluar el ahorro de energía producido en edificios comerciales al incorporar cemento flexible y un PCM con una temperatura de cambio de fase (T_{pc}) de 27°C. Para las condiciones climáticas de Melbourne y Sídney, Australia se obtuvo un ahorro anual de energía de 16 y 25%, respectivamente. Meng *et al.* [17] simularon el comportamiento térmico de una habitación bajo condiciones climáticas de Shanghái. La envolvente de la habitación estaba compuesta con paneles de PCM. Los resultados mostraron que, durante el verano, la temperatura de la habitación se redujo diariamente 4.3-7.7°C; y la reducción de las fluctuaciones de temperatura fue mayor a 29-38% con un tiempo de retraso de dos horas.

Sin embargo, se ha observado que la eficiencia de los PCM depende de varios parámetros, por lo cual las investigaciones se han orientado en buscar el diseño de la envolvente más favorable para las condiciones climáticas de una región en particular. Uno de los parámetros de estudio es la temperatura de cambio de fase. Elarga *et al.* [18] analizaron experimental y numéricamente un techo dividido en tres porciones; una de referencia y dos con una capa de PCM de diferentes temperaturas de cambio de fase (28°C y 35°C) a condiciones climáticas de verano en Torino, Italia. El PCM con una T_{pc} de 28°C mostró la mayor reducción en la temperatura máxima de la superficie interna del techo con un valor 8°C. Solgi *et al.* [19] realizaron un análisis térmico sobre la aplicación de PCM en edificios residenciales para diferentes climas de Irán. La capa de PCM de 1 cm

de espesor, se ubicó cerca de la superficie interna del techo y paredes. Los resultados muestran que, entre más próxima está la temperatura ambiente al rango de temperatura de cambio de fase del PCM, mayor es la reducción de la temperatura de aire interior. La reducción anual máxima de energía, 34%, se obtuvo en Teherán, aplicando un PCM con una T_{pc} de 29°C.

Cuando el PCM se usa en forma de paneles, varios estudios han analizado el efecto de la posición de la capa de PCM dentro de la envolvente. Por ejemplo, Gounni y El Alami [20] determinaron experimentalmente la ubicación óptima de un PCM en dos configuraciones de pared. Para la configuración con una capa de PCM, el flux de calor más bajo se produjo cuando la capa de PCM se ubica cerca de la fuente de calor. En la configuración con dos capas de PCM, la ubicación óptima se encontró en el arreglo exterior/PCM/madera/PCM/madera/interior, el cual mostró la mayor reducción de temperatura de la superficie externa y el menor flux de calor. Jin *et al.* [21] desarrollaron un modelo matemático para estimar la ubicación óptima de una capa de PCM en una pared. Para las simulaciones se utilizaron las condiciones climáticas de verano en Lawrence, Kansas, E.U.A. Los autores encontraron que conforme el calor latente, la temperatura de fusión y el grosor de la capa de PCM aumentan, la capa de PCM debe ubicarse más cerca de la superficie exterior de la pared. Zwanzig *et al.* [10], evaluaron numéricamente, el potencial en el ahorro de energía de un PCM incorporado en las paredes y techo de un edificio residencial, para tres zonas climáticas de E.U.A. (Mineápolis, Louisville, y Miami). Los autores analizaron tres posiciones de la capa de PCM dentro de la envolvente: 1) la capa de PCM próxima a la superficie externa; 2) próxima a la superficie interna; y 3) la capa de PCM en la superficie interna de la envolvente. Sus resultados mostraron que, la reducción anual máxima de la carga por enfriamiento, 321.63 kWh, se encontró en el caso dos para la zona climática de Louisville.

El espesor de la capa de PCM es otro de los parámetros estudiados en el rendimiento térmico de PCM incorporados en las envolventes de los edificios.

Mourid y Alami [6] estudiaron experimentalmente el efecto del espesor y de la ubicación de una capa de PCM incorporada en el techo de un edificio en Casablanca, Marruecos. Con el PCM ubicado cerca de la cara externa del techo, el flux de calor se redujo 58% para el caso de una capa (5.26 mm), y 88% para el caso de dos capas (10.52 mm). Con una capa de PCM adyacente a la cara interna del techo se observó un decremento de 49% en el flux de calor y de 3°C en la temperatura de la superficie interna del techo.

Por otra parte, en los resultados obtenidos en algunos estudios se ha identificado que, la configuración del PCM que mostró las mayores reducciones en las ganancias de calor para una temporada del año, no contribuye al confort térmico en otras temporadas. Por ejemplo, Xie *et al.* [22] simularon el comportamiento térmico de una habitación con aire acondicionado en cuya pared sur se colocó un PCM. El estudio se realizó bajo las condiciones climáticas de Beijing. Un PCM con un rango de T_{pc} de 24-26°C, mostró el mejor rendimiento térmico durante junio (4920 kJ m⁻² de ganancia de calor), pero el peor rendimiento durante diciembre (37500 kJ m⁻² de ganancia de calor). Reddy *et al.* [12] estudiaron el comportamiento térmico de un techo integrado con PCM para el clima tropical húmedo de Chennai, India. Los autores probaron diferentes temperaturas de cambio de fase, valores de calor latente y espesores de una capa de PCM. Sin embargo, notaron que en ninguno de los casos se alcanzaba el confort térmico y que en algunos meses el efecto térmico era negativo. Por lo cual extendieron su análisis a doble capa de PCM. El análisis numérico mostró que, la combinación de una capa de PCM con una T_{pc} de 28°C y 2 cm de espesor, con otra capa de PCM con una T_{pc} de 32°C y 3 cm de espesor permitió mantener la temperatura de la superficie interna del techo en 28°C para la mayor parte del año.

Por otra parte, en varios trabajos realizados para condiciones de clima templado o cálido, se ha estudiado el potencial térmico de la aplicación de PCM en los techos de edificaciones [9-11,13,19,23-25]. Debido a su exposición directa y prolongada a la radiación solar, los techos pueden influir de forma importante en

el consumo de energía en las edificaciones [6,12,14,18,26-28]. En la Tabla 1.1 se muestran las configuraciones de techo con PCM que mostraron el mejor rendimiento térmico para cada estudio referenciado. En la tabla se observa que en la mayoría de los casos el espesor de la capa de PCM es menor a 2 cm. El uso de espesores de PCM dentro de este rango puede considerarse adecuado desde el punto de vista técnico, operativo y económico. El uso de mayores espesores podría dificultar la instalación del PCM y las propiedades mecánicas del techo, aunado a un mayor costo de inversión. Aunque un mayor espesor puede permitir un mayor almacenamiento de calor, a la vez afectaría la liberación del mismo. En consecuencia, el PCM permanecería en estado líquido por tiempo indefinido, funcionando como un material convencional. Dong *et al.* [13] evaluaron el rendimiento térmico de un techo con una capa de PCM de 10 cm de espesor. Para los PCM analizados se obtuvo una reducción de 10-13°C en la temperatura de la superficie inferior del techo. Sin embargo, en todos los casos el PCM completó su proceso de fusión y solidificación entre 18-29% debido al gran espesor de la capa de PCM. Asimismo, Tokuç *et al.* [11] evaluaron numéricamente las cargas por enfriamiento de un techo plano con y sin PCM para la ciudad de Esmirna, Turquía. En el análisis de los ciclos de cambio de fase de los espesores probados de PCM, se observó que para el espesor de 1 cm el PCM se fusiona y solidifica completamente. Sin embargo, para el espesor de 3 y 5 cm, el PCM se fusiona y solidifica parcialmente.

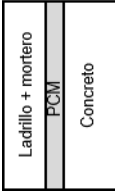
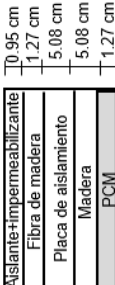
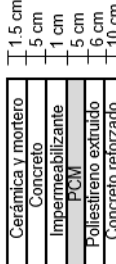
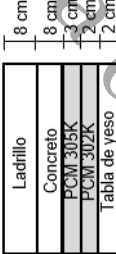
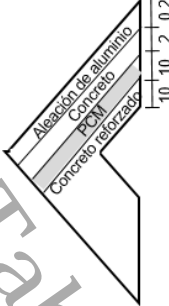
En la Tabla 1.1 también se puede observar que, generalmente las configuraciones de techo que se analizan involucran materiales aislantes y reflectivos además del PCM. Lo cual complica identificar la contribución del PCM en la eficiencia energética del edificio. Por ejemplo, Karaoulis [29] encontró que incorporar un PCM sobre el techo de cada piso de un edificio convencional con 5 cm de aislamiento produjo un ahorro de energía de 68% para el clima de Atenas, Grecia. Otro ejemplo es la configuración de techo reportada por Piselli *et al.* [24] la cual incluye además del PCM, una membrana impermeabilizante y materiales

aislantes. Para las condiciones climáticas de Roma y Abu Dabi, la reducción máxima en la temperatura de la superficie inferior del PCM fue de 19 y 28°C, respectivamente. En pocos trabajos reportados se estudia el rendimiento térmico del PCM en conjunto con un solo material [9,28] por ejemplo con el concreto. Este material de construcción ampliamente utilizado en las edificaciones favorece la liberación del calor almacenado en el PCM debido a su mayor conductividad térmica.

A partir de los trabajos mencionados anteriormente y como se observa en la columna cinco de la Tabla 1.1, se puede identificar que el potencial térmico del uso de PCM en las edificaciones es evaluado para las condiciones climáticas de una región en particular. Para el caso de México cuyo territorio se encuentra dentro de la franja solar, la radiación solar es la fuente principal de las ganancias de calor en las edificaciones especialmente a través de los techos [30]. En cuanto al estudio del uso de PCM en edificaciones de este país, sólo está reportado el estudio numérico realizado por Lira-Oliver y Vilchis-Martínez [9] (ver más detalles en la Tabla 1.1). Las condiciones analizadas en este estudio pertenecen a un clima templado subhúmedo. Sin embargo, para las zonas cálidas en la costa de México donde se tiene el mayor consumo eléctrico por cargas de enfriamiento, se desconoce el impacto que ejercería sobre la reducción de las cargas térmicas el uso de PCM en la envolvente de las edificaciones.

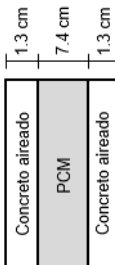
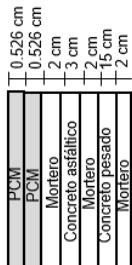
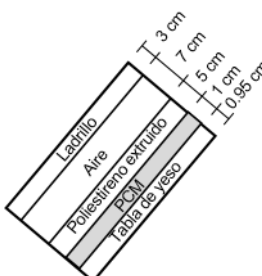
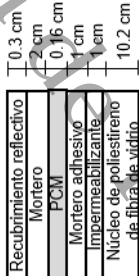

En el presente trabajo se evalúa la aplicabilidad de los PCM en un techo de concreto para una ciudad con clima cálido húmedo ubicada en el estado de Tabasco, México. Se analiza el potencial en la reducción de las ganancias de calor y el aprovechamiento de la capacidad de almacenamiento de energía del PCM.

Tabla 1.1 Configuraciones de techos con PCM reportados en la literatura. Parte A. Fuente propia.

Referencia	Configuración	T_{pc} (°C)	Espesor (m)	Condiciones de frontera	Resultado principal
[28]		26-28	0.025	Clima de Chennai, India $T_{\infty,max} \approx 34^{\circ}\text{C}$	El PCM estudiado logró mantener la temperatura interna del techo en un valor constante de 27°C a lo largo de un día.
[10]		25-27.5	0.0127	Clima de Louisville $T_{\infty,max} \approx 33^{\circ}\text{C}$	El PCM redujo los picos de calor en un 42% para cuatro días de julio y produjo un tiempo de retraso de 2.75 h.
[11]		25-72-26.22	0.01-0.05	Zonas climáticas de Turquía	EL mayor decremento en la carga de enfriamiento, 58%, se obtuvo para la ciudad de Erzurum, durante los meses de estudio (mayo-septiembre).
[12]		27-29 30-32	0.03 0.02	Clima tropical húmedo y seco de Chennai, India $T_{\infty,max} \approx 35^{\circ}\text{C}$, $I_{sol,max} \approx 1000 \text{ W m}^{-2}$	La doble capa de PCM con T_{pc} de 32 y 28°C , logró su ciclo completo de fusión-solidificación lo cual resultó en una temperatura constante de 28°C en la superficie interior del techo durante un día de julio. La simulación para un año muestra una reducción de la ganancia de calor de 25-35%.
[13]		30 34 38	0.04, 0.06, 0.08, 0.1	Zona noreste y fría de China $T_{\infty,max} \approx 29^{\circ}\text{C}$, $I_{sol,max} \approx 600 \text{ W m}^{-2}$	Para el día de estudio, el PCM con T_{pc} de 34°C produjo una reducción de 13°C en la temperatura de la superficie interna del techo, un tiempo de retraso de 3 h y una reducción de 11% en la ganancia de calor.


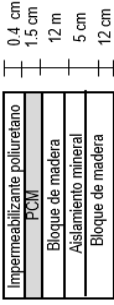
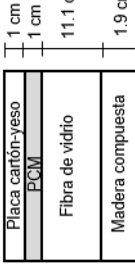
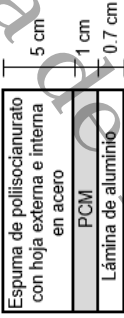
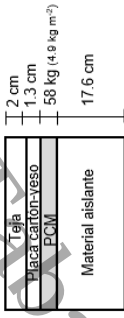
T_{pc} : temperatura de cambio de fase. $T_{\infty,max}$: temperatura ambiente máxima $T_{\infty,min}$: temperatura ambiente mínima $I_{sol,max}$: irradiancia solar máxima

Tabla 1.1 Configuraciones de techos con PCM reportados en la literatura. Parte B. Fuente propia.

Referencia	Configuración	T_{pc} (°C)	Espesor (m)	Condiciones de frontera	Resultado principal
[9]		17-19 21-23 24-26	0.074	Ciudad de México T_{comin} anual \approx 19.5°C, T_{comax} anual \approx 26.2°C.	El PCM con una T_{pc} de 25°C, mantuvo el mayor número de horas de confort térmico durante un año típico (72.26%).
[6]		21.7-31	0.010	Casablanca, Marruecos $T_{comax} \approx$ 37°C, $I_{sol,max} \approx$ 900 W m ⁻² del periodo estudiado	La incorporación de dos capas de PCM de igual espesor y T_{pc} , produjo una reducción del flux de calor de 88%, y la temperatura de la superficie inferior del techo osciló entre 24.5 y 28°C.
[18]		27-29 34-36	0.010	Torino, Italia temperatura entre el día y la noche de 32-16°C, $I_{sol,max}$ de 1000 W m ⁻²	El PCM con temperatura de fusión de 28°C disminuyó la carga pico de calor en un 59% y, en un 8.2°C la máxima temperatura de la superficie interna del techo, en comparación con el 13% de la carga pico de calor y los 2.2°C que redujo el PCM con la temperatura de fusión de 35°C.
[26]		29.5-31.8	0.001	Tianjin, China $T_{comax} \approx$ 35°C, $I_{sol,max} \approx$ 950 W m ⁻²	El PCM, monitoreado durante 4 días de agosto, mantuvo la temperatura de la superficie inferior del techo en el rango de 27-28.5°C, un tiempo de retraso máximo de 270 min, y una reducción de la entrada de calor de \approx 15%.
[14]		41-42	0.005	Tianjin, China $T_{comax} \approx$ 37°C, $I_{sol,max} \approx$ 900 W m ⁻²	Con esta configuración techo-PCM se logró una reducción en la temperatura de la superficie inferior del techo de 5°C respecto a un techo sin PCM.

T_{pc} : temperatura de cambio de fase. T_{comax} : temperatura ambiente máxima T_{comin} : temperatura ambiente mínima $I_{sol,max}$: irradiancia solar máxima

Tabla 1.1 Configuraciones de techos con PCM reportados en la literatura. Parte C. Fuente propia.

Referencia	Configuración	T_{pc} (°C)	Espesor (m)	Condiciones de frontera	Resultado principal
[23]		21 23 25 27	0.010	Condiciones climáticas de verano en Tánger, Marruecos $T_{s,max} \approx 27^\circ\text{C}$, $I_{sol,max} \approx 1000 \text{ W/m}^2$	El PCM con T_{pc} de 23°C produjo tiempo de retraso de 466 min y un factor de decremento promedio de 0.031 comparado con el tiempo de retraso de 308, 462 y 345 min, y con un factor de decremento de 0.049, 0.034 y 0.050 para los PCM con T_{pc} de 21, 25, y 27°C , respectivamente.
[24]		22-26	0.015	12:00 pm a 3:00 pm de un día representativo de verano de Italia y Abu Dabi	La máxima reducción de temperatura entre la superficie externa y la interface inferior del PCM es de 19°C en Roma y 28°C en Abu Dabi (comparado con la misma configuración, pero sin PCM).
[19]		19, 21, 23, 25, 27, y 29	0.010	Condiciones climáticas de Irán (Teherán, Tabriz, Yazd, y Bandar Abbás)	La mayor reducción anual de energía, 34%, se obtuvo en Teherán con el PCM con T_{pc} de 29°C , y la menor reducción, 10.9%, en Bandar Abbás con el PCM con $T_{pc} = 27^\circ\text{C}$.
[27]		44	0.010	Condiciones climáticas de Kut, Iraq, $T_{s,max} = 51^\circ\text{C}$.	Se obtuvo una reducción de 1.9°C en la temperatura interna y una reducción en las cargas por enfriamiento de 7%.
[25]		27	58kg (4.9 kg m ⁻²)	Condiciones de verano en Melbourne, Australia $T_{s,max} = 32^\circ\text{C}$ $T_{s,min} = 12^\circ\text{C}$	La aplicación pasiva del PCM resultó en una reducción máxima de 3.5°C de la temperatura de la superficie interna del techo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Analizar el comportamiento térmico de un material de cambio de fase en un techo de concreto mediante modelos diferenciales para la evaluación energética en una zona de clima cálido-húmedo.

1.3.2 Objetivos específicos

- Resolver el modelo matemático de difusión de calor de un techo de concreto con una capa intermedia de material de cambio de fase, usando el Método de Volumen Finito y dos modelos de cambio de fase; el método de calor específico efectivo y el método de entalpía, en el lenguaje de programación de Matlab.
- Analizar la evolución de la temperatura y del flux de calor de cinco diferentes configuraciones de un techo de concreto-PCM; variando la posición de la capa de PCM dentro del techo y la temperatura de cambio de fase, bajo condiciones de clima cálido húmedo de la ciudad de Cunduacán, Tabasco.
- Identificar la configuración de techo de concreto-PCM que presente el comportamiento térmico y operativo más favorable.

1.4 Alcances del proyecto

Como parte medular de este proyecto, se desarrolló un código computacional el cual es capaz de resolver la ecuación de conducción de calor para sistemas compuestos con n número de capas y m materiales, expuestos a la temperatura ambiente y radiación solar de cualquier clima. De esta manera, se puede extender el análisis de la aplicabilidad de los PCM en futuros estudios de techos, por ejemplo, el uso de múltiples capas de diferentes PCM o dentro de una misma capa alternar diferentes PCM con materiales convencionales.

1.5 Estructura de la tesis

El presente documento de tesis se ha organizado en cinco capítulos. En este capítulo 1 se abordó la aplicabilidad de los PCM en el diseño térmico de las edificaciones. El contenido de los siguientes capítulos se describe brevemente a continuación:

Capítulo 2. Marco teórico: los temas incluidos en este capítulo corresponden a los principios teóricos de este proyecto, principalmente sobre la conducción de calor y su análisis numérico, así como generalidades del clima de la ciudad de estudio.

Capítulo 3. Metodología de solución numérica: se presentan las etapas de solución del problema de estudio, desde el planteamiento del modelo físico hasta la validación del modelo numérico.

Capítulo 4. Resultados y discusión: los resultados son concentrados en tablas y gráficas acompañados de su correspondiente argumentación sobre las razones a las que se atribuye el comportamiento obtenido.

Conclusiones y recomendaciones: se resumen los principales resultados obtenidos y tendencias identificadas durante el análisis. Se sugiere el estudio de algunas alternativas que pueden mejorar el potencial térmico de los PCM en las edificaciones.

Capítulo 2

Marco teórico

Contiene los conceptos básicos de los mecanismos de transferencia de calor y del análisis numérico en la conducción de calor. Se presentan las principales características y la clasificación de los PCM. Se mencionan generalidades de los modelos numéricos que permiten resolver el fenómeno de fusión-solidificación de los PCM, haciendo énfasis en el método de calor específico efectivo y el método de entalpía. También se resumen las condiciones climáticas de Tabasco, estado al cual pertenece la ciudad analizada.

2.1 Fundamentos de transferencia de calor

El calor y el trabajo son dos formas en que puede interactuar un sistema y sus alrededores. La primera forma se manifiesta cuando el sistema y sus alrededores tienen diferente temperatura con tendencia de alcanzar el equilibrio térmico. En este caso, el calor fluye desde el cuerpo de mayor al de menor temperatura; ya sea por conducción, convección natural o forzada, radiación o una combinación entre estos mecanismos [31].

2.1.1. Conducción

Al proceso mediante el cual el calor es transmitido a través de un sólido a otro sólido, o de un sólido a un fluido en reposo se conoce como conducción térmica. En un cuerpo sólido, la conducción de calor tiene lugar debido a la vibración intermolecular y al flujo de los electrones libres. Mientras que, para los gases y líquidos, en los cuales las moléculas se encuentran más dispersas entre sí con respecto a la estructura molecular en los sólidos, la propagación de calor se debe a las colisiones al azar entre las moléculas [8].

La difusión de calor a través de un medio está en función de su composición y distribución molecular, del espesor del material, de la superficie perpendicular al flujo de calor, y del gradiente de temperatura. La ley de Fourier establece que, el flujo de calor por conducción en una dirección n , es proporcional al área normal al flujo, A , y al gradiente de temperatura en esa dirección, dT/dn . Esto se expresa como en la ec. (2.1).

$$q = -\lambda A \frac{dT}{dn} \quad (2.1)$$

El valor de λ , conocido como conductividad térmica, expresa la facilidad con que el material permite el paso de calor a través de él. Si la temperatura disminuye; por ejemplo, en el sentido positivo del eje x , el gradiente adquiere un valor

negativo, y al incluir un signo negativo en la ec. (2.1), se asegura que el flujo de calor resultante sea positivo [32].

El flux de calor, q'' , representa la cantidad de flujo de calor por unidad de área en la dirección n , como es expresado en la ec. (2.2).

$$q'' = \frac{q}{A} \quad (2.2)$$

La transferencia de calor en un sistema se puede plantear en estado estacionario o transitorio. En el primero de ellos, la temperatura o el flujo de calor no están sujetos a cambios en el transcurso del tiempo. Efecto contrario ocurre durante los fenómenos transitorios, donde la temperatura cambia con el tiempo y con la posición.

Generalmente la propagación de calor en, desde o hacia un medio es tridimensional, en este caso la razón de la transferencia de calor en cualquier ubicación en un momento específico, al ser una magnitud vectorial, puede expresarse por una triada de coordenadas. Por ejemplo, la conducción de calor en estado transitorio de un elemento tridimensional en el sistema de coordenadas rectangulares (x , y y z), se define matemáticamente en la ec. (2.3).

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + g \quad (2.3)$$

Donde ρ , C_p , y λ son la densidad, el calor específico y la conductividad térmica del elemento. Esta ecuación expresa que, el cambio instantáneo en la energía interna del elemento, es igual al flujo neto de salida de calor por conducción, más la generación de calor, g , en el interior del elemento. Si la conductividad térmica tiene un valor constante en todo el sistema, la ecuación general anterior se reduce a la ec. (2.4) [33].

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{g}{\lambda} = \frac{1}{\alpha_t} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.4)$$

La cual es conocida como la ecuación de Fourier-Biot, y en condiciones específicas se reduce a una de las ecs. (2.5)-(2.7) [8].

$$\begin{array}{l} \text{Condición estacionaria (ecuación de} \\ \text{Poisson)} \end{array} \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{g}{\lambda} = 0 \quad (2.5)$$

$$\begin{array}{l} \text{Condición transitoria sin generación de} \\ \text{calor (ecuación de difusión)} \end{array} \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.6)$$

$$\begin{array}{l} \text{Condición estacionaria sin generación} \\ \text{de calor (ecuación de Laplace)} \end{array} \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (2.7)$$

Por otra parte, la distribución de la temperatura y el flujo de calor en un medio también dependen del ambiente o estado térmico sobre sus superficies, llamadas condiciones de fronteras, dos por cada dirección del sistema de coordenadas. Las condiciones de fronteras se clasifican de acuerdo a la forma en que es evaluada la variable de interés en la frontera. Por ejemplo, si la condición de frontera es una temperatura o un flujo de calor (ambos como un valor específico o en función del tiempo o el espacio), se trata de una condición de frontera de primera y segunda clase, respectivamente. O bien, si en la frontera, el intercambio de calor es por convección, radiación o una combinación de los dos; la condición de frontera es de tercera clase. Las expresiones matemáticas de las condiciones de fronteras para un sistema unidimensional se presentan en las ecs. (2.8)-(2.10). Donde, 0 y L , hacen referencia a las fronteras del sistema [31].

De igual manera, en los fenómenos transitorios, es necesaria una distribución inicial de la temperatura en el medio, llamada condición inicial, la cual puede ser planteada como una función espacial o como un valor fijo [31].

Condición de primera clase (Dirichlet)

$$T(0) = T_1(n, t) \quad T(L) = T_2(n, t) \quad (2.8)$$

Condición de segunda clase (Von Neumann)

$$-\lambda \frac{dT(0)}{dn} = q_0(n, t) \quad -\lambda \frac{dT(L)}{dn} = q_L(n, t) \quad (2.9)$$

Condición de segunda clase (Robin) [34]

$$-\lambda \frac{dT(0)}{dn} = h_1 [T_{\infty 0} - T(0)] \quad -\lambda \frac{dT(L)}{dn} = h_2 [T(L) - T_{\infty L}] \quad (2.10)$$

* n representa la dirección normal a la frontera.

2.1.2. Convección

El flujo de calor entre una superficie en contacto con un fluido en movimiento tiene lugar mediante un proceso denominado convección. Si el movimiento del fluido es causado por un suministro externo de energía, como el uso de un ventilador o el viento, se trata de convección forzada. Caso contrario, es decir, convección natural (o libre), ocurre cuando la distribución de temperatura en el volumen del fluido altera su densidad, induciendo a fuerzas de flotación y, en consecuencia, al movimiento del fluido. La ecuación de flujo de calor por convección, según la ley de enfriamiento de Newton, se expresa en la ec. (2.11).

$$q = h A (T_{sup} - T_{\infty}) \quad (2.11)$$

Donde h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor, en $W m^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$, A es el área, en m^2 , sujeta a la transferencia de calor por convección, T_{sup} es la temperatura en dicha superficie, y T_{∞} es la temperatura del fluido a una distancia considerable de esa superficie. El coeficiente convectivo, h , depende de las características de la superficie, el tipo de flujo, las propiedades físicas del fluido, y si es un mecanismo natural o forzado. Sin embargo, para geometrías simples el coeficiente de transferencia de calor puede ser calculado analíticamente o numéricamente [32].

2.1.3 Radiación

La radiación es la emisión de energía por medio de ondas electromagnéticas (o fotones) de un cuerpo que se encuentra a una temperatura mayor al cero absoluto, debido al salto entre los orbitales atómicos de los electrones. A diferencia de la conducción y la convección, las cuales necesitan de un medio de transporte para el flujo de calor, la radiación puede propagarse en el vacío sin sufrir atenuación. Sin embargo, la propagación de radiación en otros medios, se atenúa como resultado de la absorción de radiación a través de estos. Para propósitos prácticos el aire atmosférico contenido en un recinto se considera que no interactúa con la radiación térmica [35].

El flujo de calor máximo por radiación que un cuerpo a una temperatura absoluta T_{sup} (K) puede emitir, es posible de calcular con la expresión matemática de la ley de Stefan-Boltzmann, presentada en la ec. (2.12).

$$q_b = \sigma A T_{sup}^4 \quad (2.12)$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann, igual a $5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$, esta ecuación hace referencia a un cuerpo idealizado, denominado cuerpo negro. No obstante, la radiación emitida por un cuerpo real a una temperatura absoluta, se obtiene a partir de la ec. (2.13).

$$q = \varepsilon \sigma A T_{sup}^4 \quad (2.13)$$

Donde ε es la emitancia de la superficie, cuyo valor está entre 0 y 1, por lo que el valor de la radiación emitida por un cuerpo real, es siempre menor a la radiación de un cuerpo negro. Según la ley de Kirchoff sobre radiación, los valores de emitancia y absortancia espectral de una superficie a una temperatura determinada son iguales. La misma consideración puede ser establecida bajo el concepto de cuerpo gris [36].

Como se mencionó anteriormente, los mecanismos de transferencia de calor no ocurren por separado, lo cual puede complicar la solución de las ecuaciones de calor. Por ejemplo, en el caso de superficies expuestas al aire atmosférico, deben considerarse los efectos radiativos y convectivos. De forma práctica esto puede resolverse mediante el uso de un coeficiente combinado de transferencia de calor, donde la temperatura ambiente se toma como la temperatura del cielo o del horizonte [8,33] como se muestra en la ec. (2.14).

$$q = h A (T_{\text{sup}} - T_{\infty}) + \varepsilon \sigma A (T_{\text{sup}}^4 - T_{\infty}^4) = h_{\text{combinado}} A (T_{\text{sup}} - T_{\infty}) \quad (2.14)$$

2.2 Análisis numérico en la conducción de calor

Diversos fenómenos que incluyen transferencia de calor, pueden ser resueltos directamente con los métodos analíticos disponibles en la literatura. Las soluciones analíticas también son útiles en problemas que permiten hacer consideraciones sin alejarse de la realidad del modelo físico. La solución analítica adquiere dificultad en aplicaciones de ingeniería, tales como, problemas de conducción de calor en geometrías complejas, problemas no lineales, sistemas que involucran el acoplamiento entre elementos, y muchos otros [33].

En el estudio de dinámica de fluidos computacional (CFD), los métodos numéricos se han convertido en una herramienta eficiente, que puede resolver problemas complejos de transferencia de calor y de mecánica de fluidos, y además es menos costosa comparada con la experimentación. Dentro de estas técnicas de solución aproximada se encuentra el Método de Diferencias Finitas (MDF), el Método de Volumen Finito (MVF), y el Método de Elemento Finito (MEF). La principal diferencia entre las tres técnicas está asociada con la manera en la cual las variables de flujo son aproximadas y con el proceso de discretización [34].

El MVF es ampliamente utilizado en el campo de la ciencia e ingeniería, porque se basa en la conservación integral de masa, momento y energía. Las ecuaciones

discretizadas bajo la formulación de volumen finito, expresan el principio de conservación de una magnitud física en un volumen de control finito, exactamente como las ecuaciones diferenciales expresan este principio a través de un volumen de control infinitesimal [34].

Cuando un problema es resuelto por medio de un método analítico, la solución resultante satisface la ecuación diferencial gobernante en todo el dominio, incluyendo las fronteras. Cuando se utiliza un esquema numérico tal como el MVF, la ecuación diferencial de difusión de calor es transformada en un conjunto de ecuaciones algebraicas que se cumplen en un número seleccionado de nodos discretos dentro del dominio. Por lo tanto, el punto de inicio en el análisis de un método numérico (en este caso se hará referencia al MVF), es desarrollar las ecuaciones para los nodos ubicados en el dominio. Tales ecuaciones son expresadas en términos de un balance de energía para el volumen de control que rodea a cada nodo. De esta manera, la solución de la ecuación diferencial parcial de conducción de calor es reducida a la solución de un sistema de ecuaciones algebraicas, cuyo número es igual al número de nodos establecidos en el dominio. El sistema de ecuaciones es resuelto con alguna subrutina de solución de ecuaciones algebraicas, ya sea un método directo o iterativo [33].

Los trabajos experimentales y numéricos que se han realizado en el campo de la transferencia de calor, han demostrado la exactitud que pueden ofrecer los modelos numéricos en la predicción, por ejemplo, de la distribución de temperatura o de flujo de calor en un sistema. En la selección del método de solución, analítico o numérico, se debe mantener un balance entre el número e impacto de las consideraciones a establecer, evitando el planteamiento de modelos muy idealizados que conlleven a resultados no representativos.

En los casos de estado transitorio, las temperaturas en el dominio físico cambian en cada paso de tiempo, Δt . Por lo que, Δt pequeños favorecen alcanzar la convergencia en el cálculo de la variable de interés. Para calcular la temperatura en cada Δt , puede emplearse la temperatura en el paso de tiempo previo, Δt^k , o

en el paso de tiempo nuevo, Δt^{k+1} . En el primer caso, se dice que el esquema de integración de tiempo es explícito (diferencia adelantada), y en el segundo caso el esquema es implícito (diferencia atrasada). El método explícito es de fácil implementación; sin embargo, la convergencia en la solución se ve restringida por el Δt máximo permisible. En el método implícito no hay límite en el Δt ; no obstante, requiere que las temperaturas en el dominio físico sean resueltas simultáneamente en cada Δt [8].

2.3. Materiales de cambio de fase (PCM)

Los PCM son materiales que tienen la capacidad de almacenar cantidades masivas de energía por unidad de volumen debido a su elevado calor latente. Su uso en edificaciones permite retardar y disminuir las ganancias de calor; durante las horas de sol utiliza el aporte de energía de los alrededores para su transición de fase sólida a líquida [6,18,19,21,23,24]. Durante las horas de noche, el PCM libera el calor almacenado y regresa a su estado sólido inicial. En general, las características deseadas en los PCM para su uso en edificaciones son:

- Alto calor latente de fusión por unidad de volumen, y alto calor específico. De modo que en una menor cantidad de material se pueda almacenar la cantidad de energía requerida.
- Temperatura o rango de temperatura de cambio de fase constante.
- Baja presión de vapor a la temperatura operativa para evitar fugas o rupturas (en casos de PCM encapsulado).
- Estabilidad química y baja tasa de corrosión (a fin de evitar que reaccione con los otros materiales adyacentes).
- Baja inflamabilidad y no emisión de sustancias venenosas durante un incendio o en caso de ruptura del encapsulamiento.
- Alta tasa de solidificación sin degradación.
- Bajo o nulo grado de superenfriamiento para evitar alteraciones en la temperatura de cambio de fase.

- Alta conductividad térmica. Para una tasa alta de absorción o liberación de calor, el material debe permitir que el calor fluya a través suyo.
- Alta densidad y baja variación de densidad durante el cambio de fase. La primera de ellas es deseable debido a que menos volumen será ocupado por el material. La baja variación de densidad evita problemas de expansión de volumen que pueden afectar la resistencia interna de los materiales adyacentes [7].
- Fabricado con materiales abundantes y baratos [37].

Según su composición, los PCM pueden ser clasificados en orgánicos, inorgánicos, y eutécticos. Como se muestra en la Figura 2.1, cada tipo presenta características, ventajas y desventajas, las cuales deben ser consideradas para el diseño de las estructuras según su aplicación. Los PCM orgánicos tienen cualidades que los hacen adecuados para su uso en edificaciones como es el caso de la parafina, cuyo uso se ha encontrado ser el más frecuente sin importar la zona climática (frecuencia máxima de uso de 87.5%) [7]. Sin embargo, muchos PCM de tipo orgánico son inflamables. Los PCM inorgánicos para aplicaciones de edificaciones generalmente consisten en hidratos de sal, ya que los metálicos no están dentro del rango de temperatura deseado con fines de confort térmico. No obstante, los PCM basados en hidratos de sal, tienen la desventaja de sufrir fusión inconsistente que puede llevar a alterar la temperatura de cambio de fase. El término eutéctico se refiere a un compuesto de dos o más elementos con temperaturas de cambio de fase diferentes (por ejemplo, un compuesto inorgánico-inorgánico), y cuya unión resulta en un material con un punto de fusión o vaporización menor al de cada uno de los elementos constituyentes. Durante el cambio de fase en procesos isobáricos, el material eutéctico presenta un comportamiento similar a una sustancia pura, es decir, ocurre a una temperatura constante. Esta propiedad permite que se pueda formar una amplia variedad de combinaciones para aplicaciones específicas [2, 5].

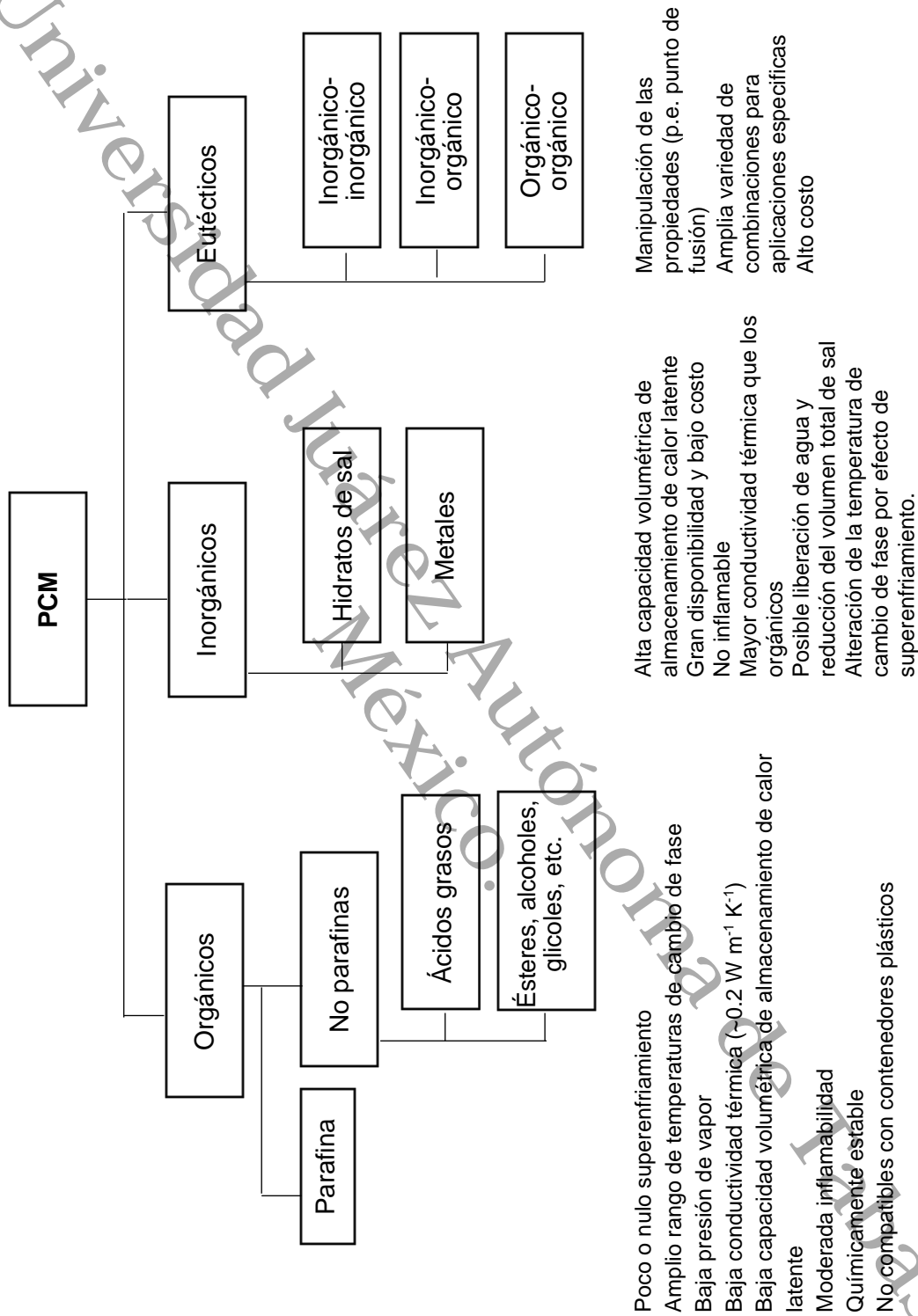


Figura 2.1 Clasificación de los PCM. Adaptado de [2, 5].

Los PCM pueden ser incorporados a la envolvente o a los materiales de construcción a través de encapsulamiento, incorporación directa o inmersión. Sin embargo, estas dos últimas generalmente no son adecuadas para aplicaciones a largo plazo, debido a posibles problemas de fugas y la difusión de líquidos de baja viscosidad a través del material, por lo cual su uso en edificaciones es poco común. El encapsulamiento ayuda a evitar esos problemas; sin embargo, se debe cuidar que el material seleccionado para el encapsulado no reaccione con el PCM. La manera en que un PCM es integrado a la envolvente o a los materiales de construcción depende de la forma y tamaño del encapsulamiento. Los principales métodos de encapsulamiento son:

Micro-encapsulamiento: consiste en el empaquetamiento del PCM en cápsulas de 1-300 micrómetros, lo cual incrementa la transferencia de calor gracias a una mayor superficie de intercambio y reduce la reactividad con otros materiales; no obstante, reduce la capacidad volumétrica de almacenamiento de calor latente. Los PCM micro-encapsulados pueden expandir su volumen sin afectar la integridad de la envolvente, y pueden incorporarse directamente, por ejemplo, al concreto o al yeso. El micro-encapsulamiento puede producirse en forma de polvo o por dispersión en un líquido como se muestra en la Figura 2.2.



Figura 2.2 PCM micro-encapsulado, a) en polvo, b) disperso en líquido [2, 5].

Macro-encapsulamiento: el PCM es encapsulado en cualquier tipo de contenedor como son, tubos, esferas o paneles, como es ilustrado en la Figura 2.3. El macro-encapsulamiento es la técnica más ampliamente usada en el sector residencial por su amplia flexibilidad de diseño y manufactura. Como desventajas de esta

técnica está la tendencia del PCM a fusionarse o solidificarse en las fronteras llevando a una descarga incompleta de energía durante la noche, además el PCM necesita protección contra destrucción o perforación lo cual puede incrementar su costo [2,5].

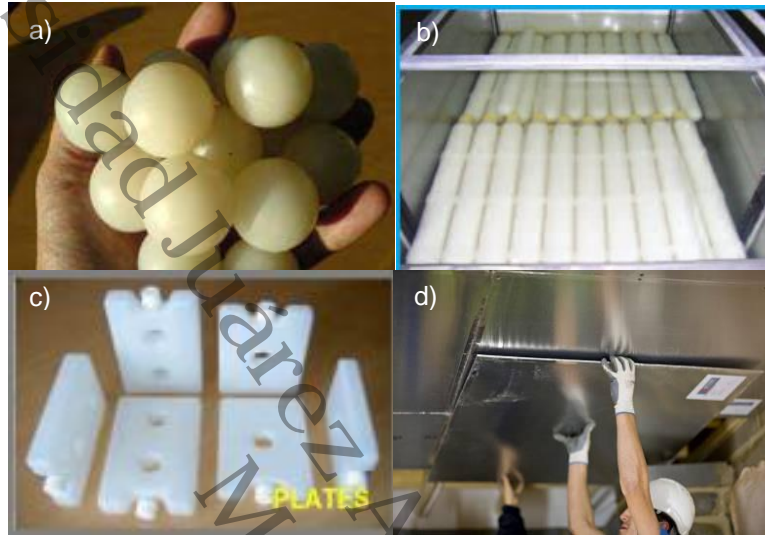


Figura 2.3 PCM macro-encapsulado, a) en esferas, b) en tubos, c) en platos, d) en paneles [2, 5].

2.4. Solución numérica de problemas de cambio de fase

Los problemas prácticos de cambio de fase son raramente unidimensionales, las condiciones iniciales y de frontera son complejas, las propiedades termofísicas pueden variar con la fase, la temperatura y la concentración del elemento, o varios mecanismos de transporte pueden ocurrir simultáneamente. Estas características limitan la aplicación de los métodos analíticos para los problemas de cambio de fase. Los métodos numéricos de evolución de calor latente permiten evaluar con especial tratamiento el almacenamiento y liberación del calor latente en fenómenos de cambio de fase. Estos métodos son clasificados en fuertes y débiles. Los métodos fuertes permiten ubicar la posición de la interfase sólido-líquido. Son aplicados a problemas que involucran una o dos fases en una dimensión; para casos de múltiples dimensiones los esquemas numéricos son muy complicados y el tiempo computacional requerido es mayor.

Por otro lado, los modelos débiles no se enfocan en determinar la posición de la interfase, por lo que pueden ser aplicados en problemas donde la región de cambio de fase es un volumen y no una superficie. Estos métodos forman parte de los métodos de malla fija, por lo cual permiten solucionar problemas multidimensionales de forma más simple y fácil que los métodos fuertes. Dentro de esta clasificación se encuentran: el método de calor aparente, el método de calor específico efectivo, método de entalpía, método de integración de calor, y método fuente [38].

Para determinar el modelo de cambio de fase apropiado a utilizar, deben considerarse en cada uno de ellos, su habilidad para resolver problemas de múltiples dimensiones, la facilidad de implementación, su habilidad para evaluar el calor latente liberado en el rango de temperatura de transición, la información disponible de las propiedades del material de cambio de fase, la exactitud, estabilidad numérica y la eficiencia computacional que ofrece. En los dos apartados siguientes se describe el método de entalpía y el método de calor específico efectivo. Se hace referencia a estos dos, porque son los métodos utilizados en este proyecto, ya que ambos han demostrado ofrecer desviaciones menores en los perfiles de temperatura comparados con los otros métodos [39].

2.4.1 Método de entalpía

En este modelo la evolución del calor latente se trata por medio de la entalpía, y a partir de esta se obtiene la distribución de la temperatura. La relación entre la temperatura y la entalpía, se define en términos de una función de paso para los problemas de cambio de fase isotérmicos, y como una función lineal para los casos de cambio de fase no isotérmicos. El método de entalpía da soluciones de gran exactitud, especialmente para materiales donde existe un rango de temperatura de cambio de fase, independientemente de la amplitud de este y del paso de tiempo [38]. La ecuación de conducción de calor bidimensional en este método se expresa en la ec. (2.15).

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + g \quad (2.15)$$

Donde ρ la densidad, H la entalpía, t es el tiempo, T es la temperatura, λ la conductividad térmica, g la generación de calor, x y y , las coordenadas espaciales. Se asume que, el calor absorbido o liberado a una cierta temperatura durante la transición de fases, es una función de la temperatura. La variación de la entalpía con la temperatura puede obtenerse experimentalmente.

2.4.2 Método de calor específico efectivo

El método de calor específico efectivo es más preciso que el método de calor aparente; al evaluar la ecuación gobernante en cada paso de tiempo se asegura que el método considere correctamente el efecto del calor latente. Generalmente se asume un perfil lineal de temperatura entre los nodos. La solución es independiente del rango de cambio de fase y del paso de tiempo [38,39]. La ecuación de energía en estado transitorio que gobierna el fenómeno de fusión-solidificación del PCM formulada con el método de calor específico efectivo, es dada en la ec. (2.16).

$$\frac{\partial(\rho C p_{efec} T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (2.16)$$

Donde el $C p_{efec}$ es el calor específico efectivo y se calcula con la ec. (2.17). En esta ecuación, L es el calor latente de cambio de fase, y ΔT_{pc} es el intervalo de temperatura de cambio de fase ($^{\circ}\text{C}$).

$$C p_{efec} = C p + \frac{L}{\Delta T_{pc}} \quad (2.17)$$

El $C p$ es evaluado en función de la fracción líquida definida en la ec. (2.18).

$$f_{liq} = \left(\frac{T - T_f}{T_{sf} - T_f} \right) \quad \begin{matrix} 0 \leq f_{liq} \leq 1 \\ \text{Sólido} \qquad \qquad \text{líquido} \end{matrix} \quad (2.18)$$

Donde f_{liq} es la fracción líquida, y los subíndices, f y sf , indican fusión y solidificación, respectivamente. Si $T < T_f$, entonces f_{liq} se establece igual a cero, o si $T \geq T_{sf}$, entonces f_{liq} es igual a 1; lo cual indica que el nodo evaluado dentro del PCM está en estado sólido o líquido, respectivamente, y su calor específico es definido como $C_p = C_{p_{sl}}$, o $C_p = C_{p_l}$. Los subíndices, sl y l , indican sólido y líquido, respectivamente. Cuando $0 \leq f_{liq} \leq 1$, el nodo en evaluación dentro del PCM se encuentra en transición de fases, y el calor específico es definido como en la ec. (2.19).

$$C_p = f_{liq} C_{p_l} + (1 - f_{liq}) C_{p_{sl}} \quad (2.19)$$

2.5 Condiciones climáticas del Estado de Tabasco

Tabasco es un estado ubicado en la zona costera del sureste de México, cuya latitud y longitud son $17^{\circ}58'20''N$ y $92^{\circ}35'20''O$, respectivamente. Su capital es la ciudad de Villahermosa. Su territorio, de 25 267 km², se encuentra delimitado, al norte, por 191 km de litoral; algunas fronteras corresponden a ríos, como es el Mezcalapa, Tonalá, Usumacinta, San Pedro y San Pablo, principalmente [40]. Debido a su ubicación geográfica y su altitud (9 msnm), el clima cálido húmedo predomina casi en la totalidad del estado, con una pequeña fracción de clima cálido subhúmedo como se observa en la Figura 2.4.

Tabasco presenta una temperatura máxima, media y mínima promedio anual de 36°C (mes de mayo), 27°C y 18.5°C (mes de enero), respectivamente [41]. La Tabla 2.1 contiene las temperaturas máximas y mínimas promedio para los meses de los años 2015-2018. La velocidad media anual del viento es de 2.1-2.5 m s⁻¹, y una irradiación solar de 4.7–5.8 kWh m⁻² por día. Tabasco es el estado con más lluvias en el país, con un valor promedio de 2 550 mm anuales. La temporada característica de lluvias abarca el periodo junio-octubre [41, 42].

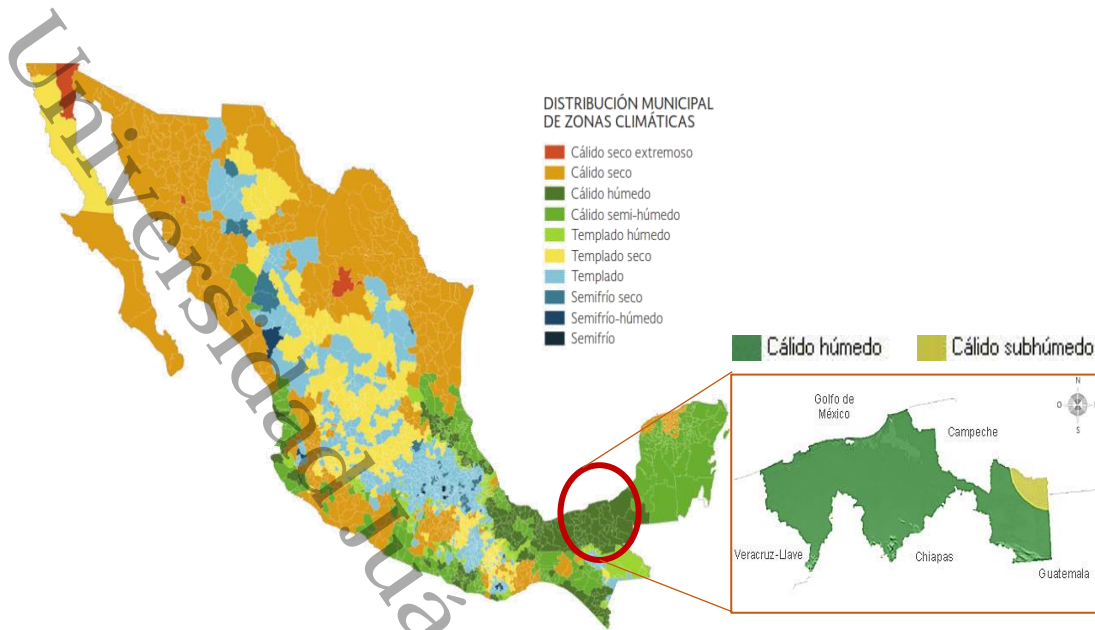


Figura 2.4 Zonas climáticas de México y clima en el estado de Tabasco. Modificado de [43].

Tabla 2.1 Temperaturas máximas y mínimas promedio (°C) en Tabasco durante el periodo 2015-2018. Elaborado a partir de [44].

	Ene	Feb	Mar	Abr	Mayo	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2015												
<i>T_{máx}</i>	27.1	28.3	30.7	34.9	34.8	33.1	34.1	34.8	33.3	32.1	31.1	30.7
<i>T_{mín}</i>	18.8	18.5	21.1	24.0	23.9	23.6	23.7	23.9	23.9	23.5	23.4	22.2
2016												
<i>T_{máx}</i>	27.7	28.0	32.4	34.2	35.7	33.8	34.1	33.3	32.5	31.7	29.6	30.1
<i>T_{mín}</i>	18.9	18.8	22.3	23.9	24.9	23.8	23.8	24.0	23.5	22.8	21.3	21.4
2017												
<i>T_{máx}</i>	29.8	31.8	32.6	34.5	35.6	33.2	33.6	33.7	32.4	30.7	29.4	28.8
<i>T_{mín}</i>	19.1	20.2	21.2	22.9	24.2	23.9	23.8	23.7	24.0	22.7	20.9	19.6
2018												
<i>T_{máx}</i>	26.6	30.9	33.0	33.7	34.7	34.3	35.2	33.8	33.6	32.5	30.6	29.0
<i>T_{mín}</i>	17.6	20.8	21.9	22.8	23.9	23.7	23.6	23.1	23.6	23.3	21.7	19.6

Capítulo 3

Metodología de solución numérica

Se establece el modelo físico y matemático; se definen los casos de estudio, las ecuaciones gobernantes, ecuaciones de frontera y condición inicial del sistema techo de concreto-PCM. Se describen las etapas del algoritmo de solución, así como la verificación y validación del modelo numérico desarrollado.

3.1 Modelo físico

El modelo físico del techo corresponde a una geometría bidimensional rectangular sobre el plano x-y. La estructura del techo está compuesta por tres capas; una capa interna y una externa de concreto reforzado, y una capa intermedia de PCM de 1 cm de espesor. Las superficies laterales del techo tienen un revoco de concreto de 1 cm de espesor. Este modelo representa el techo de una edificación como se observa en la Figura 3.1. El techo está expuesto a las condiciones ambientales de la ciudad de Cunduacán, Tabasco, cuya latitud y longitud son $18^{\circ} 4' 0''$ N, $93^{\circ} 10' 0''$ W. El clima en dicha región es cálido húmedo, con un intervalo de diferencia de temperatura entre el día y la noche de $8-10^{\circ}\text{C}$.

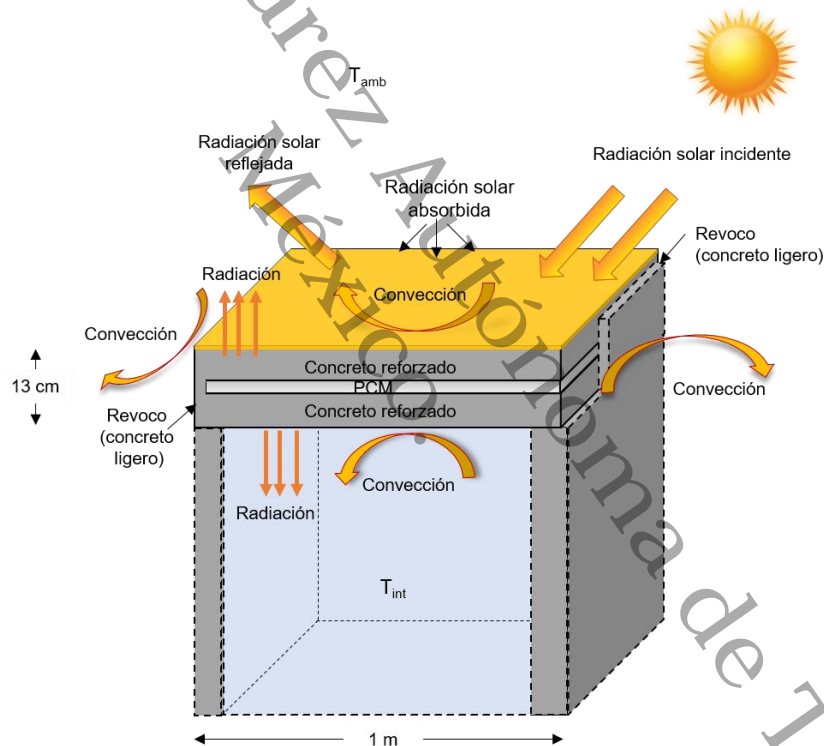


Figura 3.1 Modelo físico del techo-PCM.

La superficie superior está expuesta a la radiación solar y temperatura ambiente; mientras que, las superficies laterales externas solo interactúan con la temperatura ambiente. Se considera que, de la radiación solar que incide sobre el techo, una fracción es absorbida y la fracción restante es reflejada hacia los

alrededores. El techo emite radiación al ambiente interno y externo. La razón de la transferencia de calor entre las fronteras del techo y el medio contiguo se representa mediante un coeficiente convectivo. En este modelo los efectos de la convección y de la radiación son tratados mediante un coeficiente convectivo-radiativo, esto es, una conductancia superficial externa. El techo interactúa con el ambiente interno de un edificio proyectado que se mantiene a una temperatura constante de 25°C por medio de un equipo de aire acondicionado. El intercambio de energía entre la superficie interna y el medio interno es a través de convección y radiación. De igual forma que para las superficies externas, se adopta un valor de conductancia superficial para tratar los efectos de la convección y radiación. Los valores de conductancia superficial externa e interna fueron tomados de la NOM-020-ENER-2011 [3].

3.1.1 Selección del PCM

Los PCM utilizados en las edificaciones se clasifican según su composición química, tipo de empaquetamiento, y su rango de temperatura de cambio de fase. Por lo que, esos fueron los criterios analizados en la selección del PCM a utilizar en este proyecto. Con base a los argumentos teóricos mencionados en la sección 2.3, así como en la Figura 2.1, en el presente estudio se analizan PCM orgánicos a base de parafina. Una característica importante de este tipo de PCM es que, tienen poca o nula histéresis, lo cual permite definir la relación capacidad calorífica-temperatura con una sola curva. Como desventaja se encuentra su baja conductividad térmica ($\sim 0.2 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$); sin embargo, una configuración adecuada de la envolvente puede compensar esta desventaja [2, 5].

En cuanto al método de incorporación del PCM al techo, en este proyecto se optó por paneles. Puesto que además de sus ventajas técnicas, el empaquetamiento en forma de panel facilita estudiar el efecto de la ubicación del PCM en el comportamiento térmico del techo; uno de los objetivos de este proyecto.

La selección de la temperatura de cambio de fase se basó en las condiciones ambientales promedio de la ciudad analizada. Para las dos semanas de estudio, la temperatura ambiente promedio está en el rango de 29-31°C, y la temperatura promedio incluyendo el efecto de la irradiancia solar está en el rango de 43-46°C. Según Solgi *et al.* [19], las mayores reducciones de las cargas por enfriamiento se obtuvieron en los meses donde la temperatura ambiente se encontraba dentro del rango de temperatura de cambio de fase del PCM. Por lo que, con base a estas conclusiones, se ha seleccionado para este proyecto un PCM con un rango de temperatura de cambio de fase cercano al rango de 43-46°C. Sin embargo, Piselli *et al.* [24], identificaron en su estudio que la temperatura de cambio de fase más favorable depende de las propiedades de los otros materiales con los que interactúa el PCM. En nuestro estudio el techo está formado en mayor proporción por concreto (material con importante masa térmica), por lo que fue conveniente probar un PCM con un rango de cambio de fase cercano al rango que considera solamente la temperatura ambiente promedio (29-31°C). Dentro de los fabricantes de PCM se encontró que Rubitherm® es la marca más referenciada (ver Anexo A), esto debido a la amplia gama de rangos de temperatura de cambio de fase que ofrece y a los espesores de paneles de PCM disponibles. Es por ello que se han seleccionado dos de sus productos, el PCM RT35 y el PCM RT44HC, con propiedades termofísicas mostradas en la Tabla 3.1. En la Figura 3.2 y Figura 3.3 se grafica la capacidad calorífica en función de la temperatura $C_p(T)$ de cada PCM, y sus hojas técnicas se muestran en el Anexo B.

Tabla 3.1 Propiedades termofísicas de los PCM seleccionados.

PCM	ΔT_{pc} (°C)	L (J kg ⁻¹)	λ (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	ρ (kg m ⁻³)	C_p (J kg ⁻¹ °C ⁻¹)
RT35	29 (<i>f</i>) - 36 (<i>sf</i>)	158 000	0.20 (<i>sl</i>), 0.20 (<i>l</i>)	860 (<i>sl</i>), 770 (<i>l</i>),	2 000 (<i>sl</i>), 2 000 (<i>l</i>)
RT44HC	41 (<i>f</i>) - 44 (<i>sf</i>)	248 000	0.20 (<i>sl</i>), 0.20 (<i>l</i>)	800 (<i>sl</i>), 700 (<i>l</i>),	2 000 (<i>sl</i>), 2 000 (<i>l</i>)

*El subíndice *pc* indica cambio de fase, *f* es fusión, *sf* es solidificación, *sl* indica la propiedad en estado sólido, y *l* es la propiedad en estado líquido.

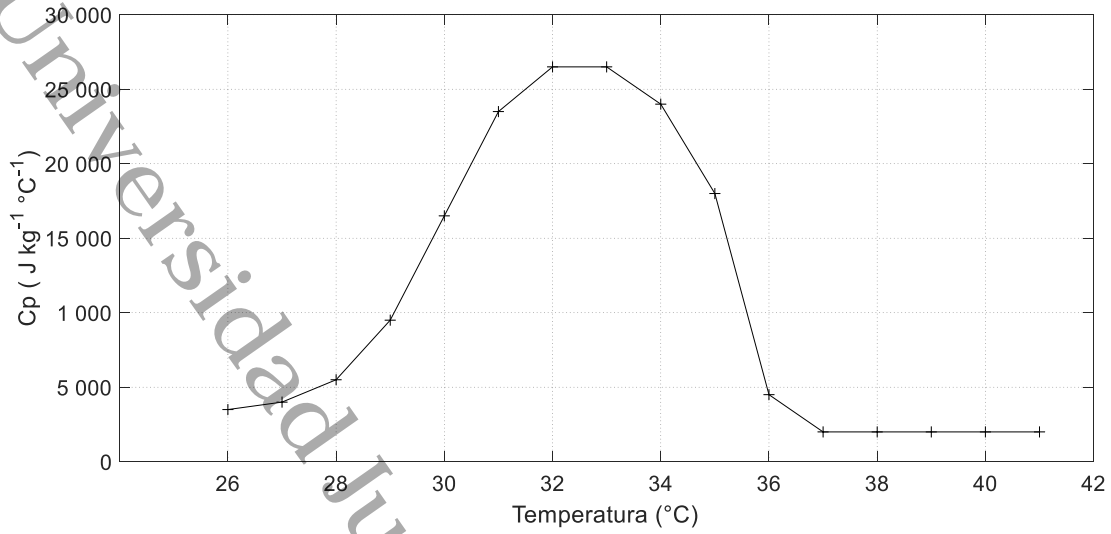


Figura 3.2 Función $C_p(T)$ del PCM RT35 Rubitherm®.

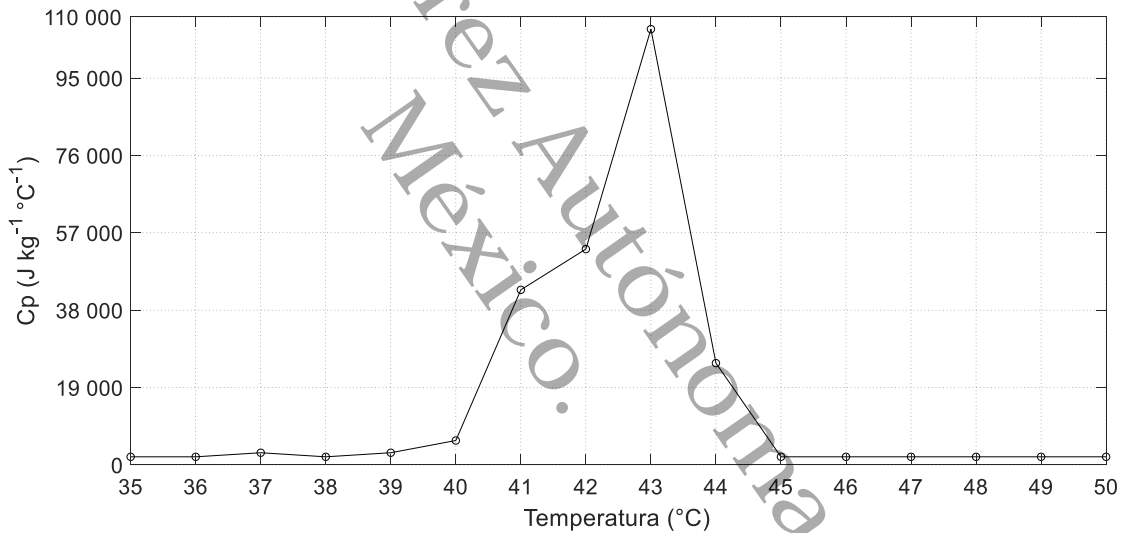


Figura 3.3 Función $C_p(T)$ del PCM RT44HC Rubitherm®.

3.1.2 Casos de estudio

Con el objetivo de analizar el efecto de la ubicación de la capa de PCM dentro de un techo de concreto se propusieron cinco diferentes configuraciones, variando la posición de la capa de PCM cada 2 cm, como se muestra en la Figura 3.4. El Caso A corresponde al techo donde la capa de PCM está más próxima a la superficie superior externa (a 2 cm de distancia); y en el Caso E la capa de PCM está más próxima a la superficie interna del techo (a 2 cm de distancia).

Para analizar el efecto de la temperatura de cambio de fase, las configuraciones se estudiaron con los PCM seleccionados, RT35 y RT44HC. Los resultados fueron evaluados con respecto a un techo convencional de concreto (caso s/PCM en la Figura 3.4) a fin de conocer las ganancias de calor y la reducción de las cargas térmicas. La Tabla 3.2 enlista las propiedades de los materiales convencionales del techo. Los valores de absorptancia solar (α) y emitancia (ϵ) del concreto fueron de 0.67, 0.87, respectivamente.

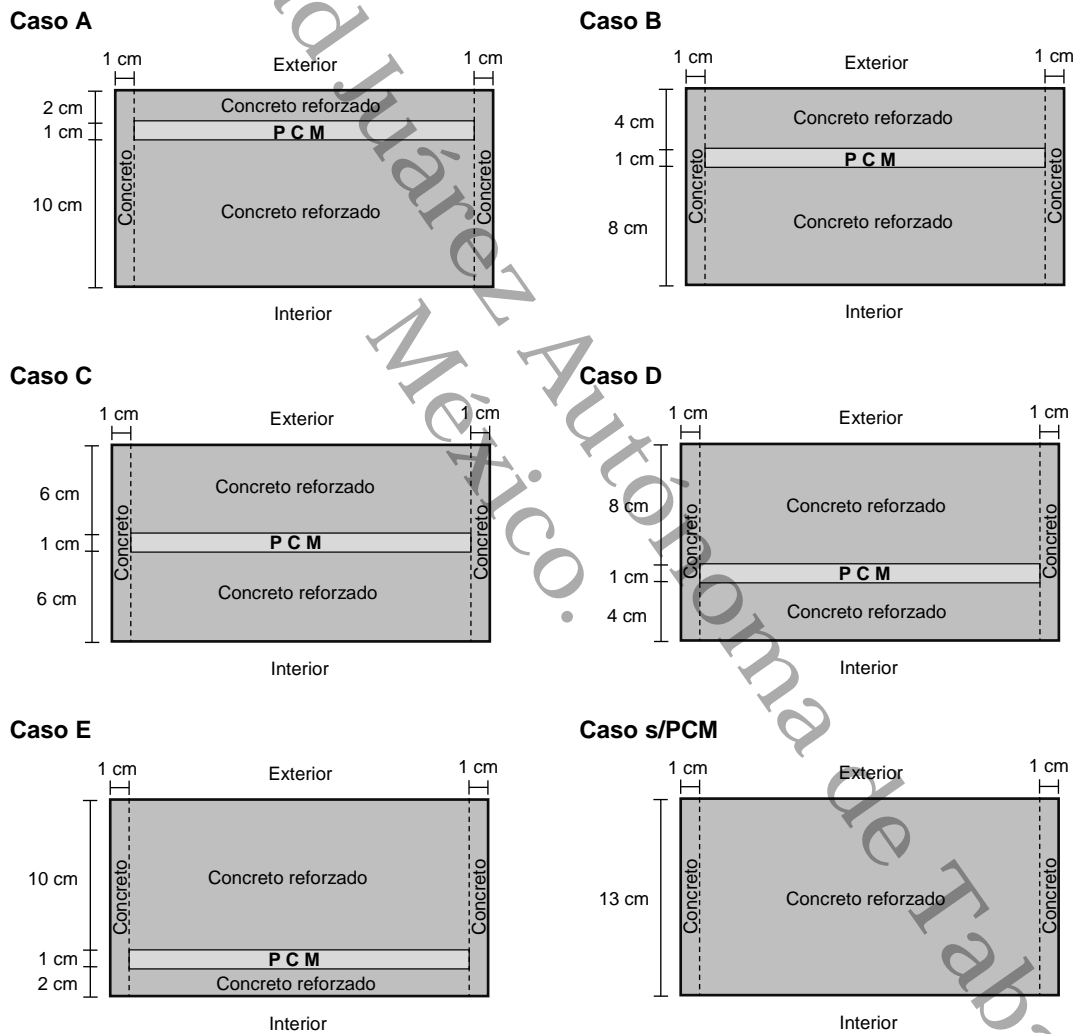


Figura 3.4 Casos de estudio.

Tabla 3.2 Propiedades termofísicas de los materiales de construcción del techo de concreto [3].

Material	λ (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	ρ (kg m ⁻³)	C_p (J kg ⁻¹ °C ⁻¹)
Concreto	1.28	2 200	850
Concreto reforzado	1.74	2 300	920

El comportamiento térmico de los casos propuestos se estudió bajo las condiciones de clima cálido húmedo de la ciudad de Cunduacán, Tabasco. El periodo analizado corresponde a una semana típica de primavera (28 de mayo-03 de junio), y una semana típica de verano (23-29 de julio) del 2018. Lo cual hace un total de 22 escenarios de estudio como se observa en la Tabla 3.3. Los valores de las variables meteorológicas fueron obtenidos de una estación meteorológica ubicada en el Centro de Investigación de Ciencia y Tecnología Aplicada de Tabasco (CICTAC). La semana de primavera presentó temperaturas e irradiancias máximas de 37-42°C y 944-1167 W m⁻², respectivamente. Mientras que, en la semana de verano, los valores máximos de temperatura ambiente e irradiancia solar fueron 40-42°C, y 922 a 1106 W m⁻², respectivamente. El conjunto de simulaciones realizadas se encuentra organizado en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Diseño de los escenarios de estudio. Parte A.

No. de prueba	Capa superior Material / espesor	Capa intermedia Material / espesor	Capa inferior Material / espesor	Semana de estudio
1	Concreto reforzado de 13 cm de espesor			Primavera
2	Concreto reforzado / 2 cm	PCM RT35 / 1 cm	Concreto reforzado / 10 cm	Primavera
3	Concreto reforzado / 4 cm	PCM RT35 / 1 cm	Concreto reforzado / 8 cm	Primavera
4	Concreto reforzado / 6 cm	PCM RT35 / 1 cm	Concreto reforzado / 6 cm	Primavera
5	Concreto reforzado / 8 cm	PCM RT35 / 1 cm	Concreto reforzado / 4 cm	Primavera
6	Concreto reforzado / 10 cm	PCM RT35 / 1 cm	Concreto reforzado / 2 cm	Primavera
7	Concreto reforzado / 2 cm	PCM RT44HC / 1 cm	Concreto reforzado / 10 cm	Primavera
8	Concreto reforzado / 4 cm	PCM RT44HC / 1 cm	Concreto reforzado / 8 cm	Primavera
9	Concreto reforzado / 6 cm	PCM RT44HC / 1 cm	Concreto reforzado / 6 cm	Primavera
10	Concreto reforzado / 8 cm	PCM RT44HC / 1 cm	Concreto reforzado / 4 cm	Primavera
11	Concreto reforzado / 10 cm	PCM RT44HC / 1 cm	Concreto reforzado / 2 cm	Primavera

Tabla 3.3 Diseño de los escenarios de estudio. Parte B.

No. de prueba	Capa superior Material / espesor	Capa intermedia Material / espesor	Capa inferior Material / espesor	Semana de estudio
12	Concreto reforzado de 13 cm de espesor			Verano
13	Concreto reforzado / 2 cm	PCM RT35 / 1 cm	Concreto reforzado / 10 cm	Verano
14	Concreto reforzado / 4 cm	PCM RT35 / 1 cm	Concreto reforzado / 8 cm	Verano
15	Concreto reforzado / 6 cm	PCM RT35 / 1 cm	Concreto reforzado / 6 cm	Verano
16	Concreto reforzado / 8 cm	PCM RT35 / 1 cm	Concreto reforzado / 4 cm	Verano
17	Concreto reforzado / 10 cm	PCM RT35 / 1 cm	Concreto reforzado / 2 cm	Verano
18	Concreto reforzado / 2 cm	PCM RT44HC / 1 cm	Concreto reforzado / 10 cm	Verano
19	Concreto reforzado / 4 cm	PCM RT44HC / 1 cm	Concreto reforzado / 8 cm	Verano
20	Concreto reforzado / 6 cm	PCM RT44HC / 1 cm	Concreto reforzado / 6 cm	Verano
21	Concreto reforzado / 8 cm	PCM RT44HC / 1 cm	Concreto reforzado / 4 cm	Verano
22	Concreto reforzado / 10 cm	PCM RT44HC / 1 cm	Concreto reforzado / 2 cm	Verano

3.2 Modelo matemático

Las consideraciones para el modelo matemático fueron las siguientes:

- El PCM es homogéneo e isotrópico.
- El intervalo de temperatura de cambio de fase, la densidad y la conductividad térmica (en su correspondiente fase sólida y líquida) son valores constantes.

- La relación capacidad calorífica-temperatura durante el calentamiento del PCM, es la misma que se considera durante el enfriamiento.
- No se considera la resistencia térmica de contacto entre las capas internas del techo.
- La radiación de los alrededores es ignorada, excepto la del cielo.
- La temperatura de aire interior es un valor constante.

3.2.1 Ecuación gobernante

La ecuación de difusión de calor bidimensional en estado transitorio para las capas del techo diferentes a la capa PCM es dada en la ec. (3.1).

$$\frac{\rho_j C p_j}{\lambda_j} \frac{\partial T}{\partial t} = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.1)$$

Donde T es la temperatura ($^{\circ}\text{C}$), t es el tiempo (s), x y y , las coordenadas espaciales (m). Se considera a la conductividad térmica, λ_j ($\text{W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), la densidad, ρ_j (kg m^{-3}), y el calor específico, $C p_j$ ($\text{J kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), de cada uno de los j -materiales como valores constantes.

La ecuación de energía en estado transitorio que gobierna el fenómeno de fusión-solidificación del PCM, formulada con el método de calor específico efectivo, es dada en la ec. (3.2).

$$\frac{\partial(\rho C p_{efec} T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (3.2)$$

En este caso, las propiedades termofísicas del PCM, ρ y λ , dependen del estado del PCM. El calor específico efectivo $C p_{efec}$ ($\text{J kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), considera el efecto del calor latente L (J kg^{-1}) durante el intervalo de temperatura de cambio de fase ΔT , como se expresa en la ec. (3.3).

$$C p_{efec} = C p + \frac{L}{\Delta T_{pc}} \quad (3.3)$$

Donde $C p$ es evaluado en función de la fracción líquida mediante la ec. (3.4).

$$Cp = f_{liq} Cp_l + (1 - f_{liq}) Cp_{sl} \quad (3.4)$$

Los subíndices, sl y l , indican sólido y líquido, respectivamente, y f_{liq} es la fracción líquida. Si la temperatura en el PCM es menor o igual a la temperatura de fusión ($T \leq T_f$), la f_{liq} es igual a cero; lo cual indica que el PCM está en estado sólido.

Si la temperatura en el PCM es mayor o igual a la temperatura de solidificación ($T \geq T_{sf}$), la f_{liq} es igual a 1, y significa que el PCM se encuentra en estado líquido.

Si la temperatura del PCM está entre la temperatura de fusión y la de solidificación ($T_f < T < T_{sf}$), el valor de f_{liq} se obtiene con la ec. (3.5).

$$f_{liq} = \left(\frac{T - T_f}{T_{sf} - T_f} \right) \quad (3.5)$$

El resultado obtenido es un valor entre 0 y 1, que indica que el PCM se encuentra en transición de fases. A partir de la f_{liq} , se calculan los valores de las propiedades termofísicas del PCM mediante las ecs. (3.6)-(3.7).

$$\rho = f_{liq} \rho_l + (1 - f_{liq}) \rho_{sl} \quad (3.6)$$

$$\lambda = f_{liq} \lambda_l + (1 - f_{liq}) \lambda_{sl} \quad (3.7)$$

La ecuación de energía bidimensional en estado transitorio sobre el fenómeno de fusión-solidificación del PCM, formulada con el método de entalpía [45], es dada en la ec. (3.8).

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (3.8)$$

Se considera que la conductividad térmica, la densidad, y la entalpía H ($J \text{ kg}^{-1}$), varían con la temperatura. La relación entalpía-temperatura se expresa en las ecs. (3.9)-(3.11):

$$H = \int_T^{T_f} Cp_{sl}(T) dT \quad T < T_f \text{ (sólido)} \quad (3.9)$$

$$H = f_{liq} L \quad T_f < T < T_{sf} \text{ (sólido-líquido)} \quad (3.10)$$

$$H = \int_{T_{sf}}^T C_{p_l}(T) dT + L \quad T > T_{sf} \text{ (líquido)} \quad (3.11)$$

Donde L es el calor latente (J kg^{-1}). El valor de la conductividad térmica y de la densidad es calculado con las ecs. (3.6) y (3.7). La evolución del calor específico con la temperatura, $C_p = f(T)$, es obtenida de las curvas presentadas en la Figura 3.2 y Figura 3.3.

3.2.2 Condiciones de frontera

En la superficie expuesta a la radiación solar (superficie superior), se considera que las ganancias y pérdidas de energía son por los mecanismos de radiación y convección. Esta condición de frontera es dada en la ec. (3.12).

$$\lambda_j \frac{\partial T}{\partial y} = h_{ext} (T_{sa} - T) \quad (3.12)$$

Donde, h_{ext} es la conductancia superficial externa con un valor de $13 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ [3], T_{sa} es la temperatura sol-aire ($^\circ\text{C}$), y T es la temperatura de la superficie del techo ($^\circ\text{C}$). La temperatura sol-aire utilizada en la ec. (3.12) se obtiene mediante la ec. (3.13).

$$T_{sa} = T_\infty + \frac{\alpha I_{sol}}{h_{ext}} \quad (3.13)$$

Donde, T_∞ es la temperatura ambiente ($^\circ\text{C}$), α es la absorptancia solar del concreto reforzado, e I_{sol} es la irradiancia solar (W m^{-2}).

La condición de frontera de las superficies laterales del techo es dada en la ec. (3.14), en la cual se observa que sólo se considera el efecto de la temperatura ambiente.

$$\lambda_j \frac{\partial T}{\partial x} = h_{ext} (T_\infty - T) \quad (3.14)$$

En la superficie interior del techo en contacto con las condiciones de ambiente interior, la condición de frontera se presenta en la ec. (3.15).

$$\lambda_j \frac{\partial T}{\partial y} = h_i (T - T_i) \tag{3.15}$$

Donde, h_i la conductancia superficial interna con un valor de $6.6 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ [3], y T_i es la temperatura de aire interior (25°C). La Figura 3.5 muestra las condiciones de frontera del sistema de estudio.

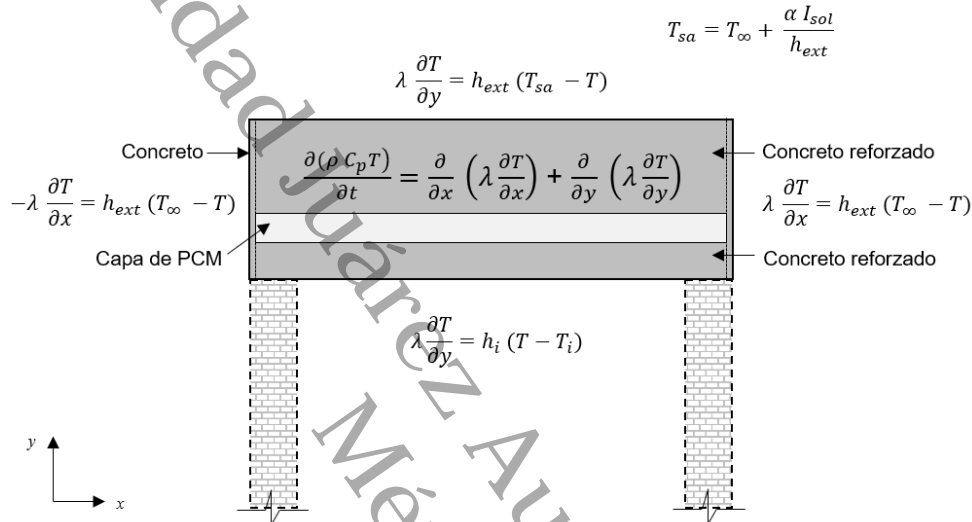


Figura 3.5 Condiciones de frontera del techo.

3.2.3 Condición inicial

La distribución de la temperatura en el techo en el tiempo $t = 0$, se representó mediante una función lineal $f(x,y)$ para cada una de las capas, la cual representa un gradiente de temperatura en el eje y .

Utilizando el concepto de resistencia térmica se calculó las temperaturas de la superficie externa, interna y de las interfaces, como se observa en la Figura 3.6. Con estos valores se definió la función lineal de temperatura para cada una de las cinco configuraciones de techo concreto-PCM, las cuales son válidas para los dos PCM seleccionados porque tienen el mismo espesor y conductividad térmica. Mediante el mismo procedimiento se determinó las funciones para los casos de referencia. El cálculo se realizó con las ecs. (3.16)-(3.21). En la Tabla 3.4 se muestran las funciones lineales obtenidas.

La temperatura exterior correspondió a la temperatura sol-aire a las 12:00 a.m. del primer día de cada semana seleccionada. En la semana de primavera este valor fue de 25.90°C, y para la semana de verano de 27.42°C. Para la temperatura de aire interno se fijó un valor constante de 25°C.

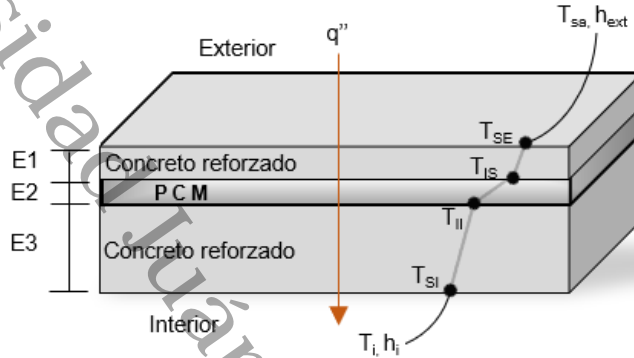


Figura 3.6 Modelo físico de la condición inicial.

$$U = \frac{1}{h_{ext}} + \frac{E_1}{\lambda_1} + \frac{E_2}{\lambda_2} + \frac{E_3}{\lambda_3} + \frac{1}{h_i} \quad (3.16)$$

$$q'' = U(T_{sa} - T_i) \quad (3.17)$$

$$T_{SE} = T_{sa} - \frac{q''}{h_{ext}} \quad (3.18)$$

$$T_{IS} = T_i - q'' \left(\frac{1}{h_{ext}} + \frac{E_1}{\lambda_1} \right) \quad (3.19)$$

$$T_{II} = T_i - q'' \left(\frac{1}{h_{ext}} + \frac{E_1}{\lambda_1} + \frac{E_2}{\lambda_2} \right) \quad (3.20)$$

$$T_{SI} = T_i - \frac{q''}{h_i} \quad (3.21)$$

Donde,

U : Coeficiente global de transferencia de calor ($W m^{-2} °C^{-1}$).

h_{ext} : Conductancia superficial externa, con un valor de $13 W m^{-2} °C^{-1}$.

h_i : Conductancia superficial interna, con un valor de $6.6 \text{ W m}^{-2} \text{ °C}^{-1}$.

E_1, E_2, E_3 : Espesor de la capa superior, de la capa intermedia y de la capa inferior, respectivamente, (m).

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$: Conductividad térmica de la capa superior, de la capa intermedia y de la capa inferior, respectivamente, ($\text{W m}^{-1} \text{ °C}^{-1}$).

q'' : Flux de calor total perpendicular a la estructura del techo, (W m^{-2}).

T_{sa} : Temperatura sol-aire (°C).

T_{SE} : Temperatura de la superficie externa (°C).

T_{IS}, T_{II} : Temperatura de la interfaz superior e inferior (°C).

T_{SI} : Temperatura de la superficie interna (°C).

T_i : Temperatura de aire interior (°C).

Tabla 3.4 Condición inicial de las configuraciones de estudio.

	Capa inferior	Capa intermedia (PCM)	Capa superior
Caso A			
Semana 1*	$T = 8.52y + 24.95$	$T = 4.32y + 25.37$	$T = 1.38y + 25.69$
Semana 2	$T = 22.92y + 24.87$	$T = 1.30y + 27.29$	$T = 3.71y + 26.87$
Caso B			
Semana 1	$T = 10.56y + 24.95$	$T = 4.68y + 25.42$	$T = 0.78y + 25.77$
Semana 2	$T = 28.40y + 24.87$	$T = 12.60y + 26.13$	$T = 2.09y + 27.08$
Caso C			
Semana 1	$T = 13.96y + 24.95$	$T = 5.04y + 25.48$	$T = 0.58y + 25.80$
Semana 2	$T = 37.55y + 24.87$	$T = 13.56y + 26.31$	$T = 1.56y + 27.15$
Caso D			
Semana 1	$T = 20.77y + 24.95$	$T = 5.40y + 25.56$	$T = 0.48y + 25.81$
Semana 2	$T = 55.85y + 24.87$	$T = 14.53y + 26.52$	$T = 1.29y + 27.18$
Caso E			
Semana 1	$T = 41.18y + 24.95$	$T = 5.76y + 25.66$	$T = 0.42y + 25.82$
Semana 2	$T = 110.73y + 24.87$	$T = 15.50y + 26.77$	$T = 1.12y + 27.20$
Caso de referencia			
Semana 1	$T = 7.08y + 24.96$		
Semana 2	$T = 19.03y + 24.89$		

*semana 1 es la semana de primavera, semana 2 es la semana de verano.

3.3 Generación de la malla computacional

Una malla numérica es un arreglo distribuido de puntos discretos (nodos) sobre el modelo o dominio físico. La generación de la malla es el paso inicial en la etapa de pre-procesamiento de la solución numérica; consiste en determinar las

coordenadas de los nodos discretos (x, y) , el tamaño de los volúmenes de control $(\Delta x, \Delta y)$, y la distancia entre nodos $(\delta x, \delta y)$. En función al tratamiento de las fronteras del dominio computacional, la malla puede crearse en dos arreglos diferentes:

Geometría con contacto con la frontera. El dominio físico es dividido en volúmenes de control de acuerdo a un tamaño o razón de aspecto definido por el usuario. El término, con contacto con la frontera, se refiere a que la interfaz de los volúmenes de control adyacentes a la frontera coincide con el límite del dominio físico, por lo que los volúmenes de control en la frontera no tienen espesor [34].

Geometría sin contacto con la frontera. A diferencia de la geometría anterior, en este caso la interfaz de los volúmenes de control en la frontera no coincide con el límite del dominio; por lo que cada volumen de control en la frontera tendrá espesor [34].

Para fines de este proyecto se eligió la geometría con contacto con la frontera. Desde el punto de vista físico, las superficies del dominio no tienen espesor. Por lo cual la energía que entra a través de ellas no se acumula en las fronteras, sino que es transmitida a lo largo del espesor de la estructura. El modelo matemático de las condiciones de frontera planteado en el presente trabajo se basa en esta consideración.

El espesor de los volúmenes de control, Δx y Δy , fueron calculados con la ecs. (3.22)-(3.23).

$$\Delta x = \frac{Lx}{Nx - 2} \quad (3.22)$$

$$\Delta y = \frac{Ly}{Ny - 2} \quad (3.23)$$

Donde Lx y Ly , son la longitud y espesor del techo, en m; Nx y Ny son el número de nodos en Lx y en Ly , respectivamente. Las coordenadas de los nodos (x, y)

fueron definidas en las ecs. (3.24)-(3.25).

$$\begin{aligned} x_1 &= 0 \\ x_i &= \Delta x_{i-1} + \frac{\Delta x_i}{2} \quad i = 2, 3, \dots, (Nx - 1) \end{aligned} \quad (3.24)$$

$$x_{Nx} = Lx$$

$$\begin{aligned} y_1 &= 0 \\ y_j &= \Delta y_{j-1} + \frac{\Delta y_j}{2} \quad j = 2, 3, \dots, (Ny - 1) \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$y_{Ny} = Ly$$

La distancia entre nodos, δx y δy , se obtuvo a partir de las coordenadas (x, y) , con en las ecs. (3.26)-(3.27).

$$\delta x_i = x_i - x_{i-1} \quad (3.26)$$

$$\delta y_j = y_j - y_{j-1} \quad (3.27)$$

3.3.1 Análisis de independencia de malla

El tamaño de la malla está ligado directamente a los errores en el cálculo de la variable dependiente; un mayor incremento espacial (Δx y Δy) o temporal (Δt) conlleva a un mayor error. No obstante, al reducir los tamaños de malla se incrementa el esfuerzo y tiempo computacional. Por lo que, el diseño adecuado de la malla debe respaldarse por soluciones preliminares en malla gruesa, lo que se conoce como análisis de independencia de malla. Este análisis consistió en ir reduciendo los Δx , Δy y Δt hasta que, las diferencias de temperatura entre los arreglos de malla fueran menores a las incertidumbres mínimas obtenidas en las mediciones de temperatura (rango de las centésimas).

El estudio de independencia de malla se realizó para el primer día de la semana de primavera con el Caso A usando el PCM RT35. Se probaron cinco Δt : 30 s, 20 s, 10 s, 5 s y 1 s; y cinco tamaños de Δx y Δy : 5.0 mm, 3.3 mm, 2.5 mm, 2.0 mm y 1.4 mm. Siendo un total de 25 arreglos de malla. Los cuatro puntos de

comparación corresponden a las posiciones de las superficies e interfaces del techo como se observa en la Figura 3.7

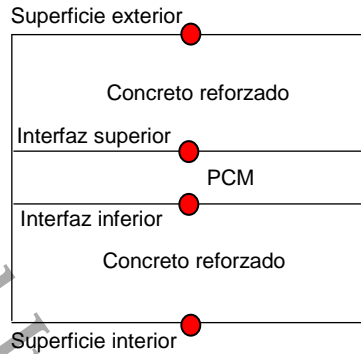


Figura 3.7 Puntos analizados en la independencia de malla.

El primer parámetro que se evaluó fue la sensibilidad a los Δt . Para un mismo Δx y Δy , se determinó el promedio máximo de la diferencia entre las temperaturas (de los cuatro nodos evaluados) con un Δt y el siguiente Δt menor. Por ejemplo, en la Tabla 3.5 se muestra el valor máximo del promedio de la diferencia entre las temperaturas evaluadas; para una malla de 5.0 mm cuando su Δt pasa de 30 s a 20 s, posteriormente cuando pasa de 20 s a 10 s en el mismo tamaño de malla; y así sucesivamente con los demás Δt . Las siguientes columnas de la tabla se desarrollaron de la misma manera, pero con los demás Δx y Δy .

Tabla 3.5 Independencia de malla variando los Δt .

Δt	$\Delta x, \Delta y$				
	5.0 mm	3.3 mm	2.5 mm	2.0 mm	1.4 mm
30 s → 20 s	0.01394575	0.01415929	0.01423672	0.01427231	0.01430372
20 s → 10 s	0.01438113	0.01468875	0.01481024	0.01487989	0.01493371
10 s → 5 s	0.00744556	0.00770834	0.00783456	0.00790144	0.00796618

A partir de los resultados de la Tabla 3.5 se identifica que, para los cinco $\Delta x/\Delta y$, el paso de 10 s a 5 s produce una variación de 0.007°C. Desde el sentido físico de medición de las temperaturas consideramos como criterio de selección, diferencias dentro del rango de las centésimas. Por lo tanto, un $\Delta t = 5$ s ofrece resultados con una variación aceptable.

La segunda relación evaluada fue la influencia del cambio de Δx y Δy para cada Δt . En la Tabla 3.6, se muestra el valor máximo del promedio de la diferencia entre las temperaturas evaluadas para un Δt de 30 s, cuando Δx y Δy pasan de 5.0 mm a 3.3 mm, posteriormente cuando pasan de 3.3 mm a 2.5 mm en el mismo Δt ; y así sucesivamente con los demás Δx y Δy . Las siguientes columnas de la tabla se obtuvieron de la misma manera, pero con los demás Δt . La comparación de los resultados muestra que para los Δt evaluados, el paso de 2.5 mm a 2.0 mm genera las diferencias mínimas. Sin embargo, utilizar $\Delta x = \Delta y = 2.0$ mm duplica el tiempo computacional. Por lo que se eligió los $\Delta x = \Delta y = 2.5$ mm; puesto que sus diferencias máximas son de centésimas y el tiempo de simulación es aceptable.

Tabla 3.6 Independencia de malla variando los Δx , Δy .

$\Delta x/\Delta y$	Δt			
	30 s	20 s	10 s	5 s
5.0 mm \rightarrow 3.3 mm	0.166174	0.166051	0.165917	0.165849
3.3 mm \rightarrow 2.5 mm	0.084002	0.083948	0.083895	0.083865
2.5 mm \rightarrow 2.0 mm	0.050686	0.050666	0.050639	0.050627
2.0 mm \rightarrow 1.4 mm	0.058201	0.058178	0.058159	0.058146

A partir de los dos factores evaluados, el arreglo de malla seleccionado para este proyecto fue $\Delta x = \Delta y = 2.5$ mm con un $\Delta t = 5$ s.

3.4 Modelo numérico

Las ecuaciones gobernantes (3.1)-(3.2), (3.8), y las ecuaciones de frontera (3.12), (3.14)-(3.15) fueron discretizadas con el método de volumen finito (MVF) [46]. La formulación de este método se basó en dividir el dominio físico en un número de volúmenes de control, en cuyo centro se asignó un nodo representativo de cada volumen. Las ecuaciones gobernantes y de frontera se integraron sobre cada volumen de control del dominio físico para un esquema transitorio implícito. Cada ecuación discretizada es igual a la ec. (3.28). Esta ecuación en notación de coeficientes agrupados, involucra los valores de la

temperatura para un grupo de nodos adyacentes, T_E, T_W, T_N, T_S , al nodo evaluado, T_P , como se ilustra en la Figura 3.8.

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + b \quad (3.28)$$

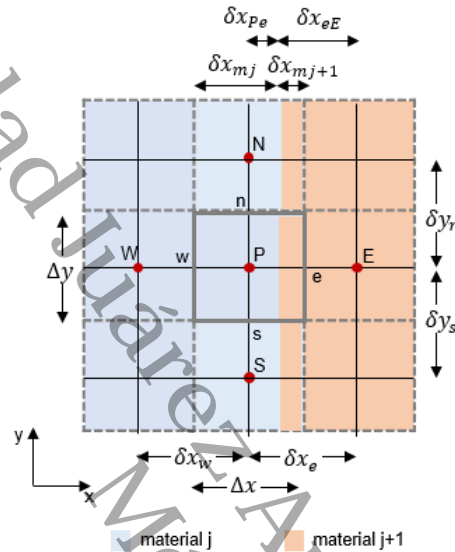


Figura 3.8 Representación de un volumen de control de un nodo P sobre una malla bidimensional.

Para los nodos internos el valor de los coeficientes de la ec. (3.28) es dado en las ecs. (3.29)-(3.34).

$$a_E = \frac{\lambda_e \Delta y}{\delta x_e} \quad (3.29)$$

$$a_W = \frac{\lambda_w \Delta y}{\delta x_w} \quad (3.30)$$

$$a_N = \frac{\lambda_n \Delta x}{\delta y_n} \quad (3.31)$$

$$a_S = \frac{\lambda_s \Delta x}{\delta y_s} \quad (3.32)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_P^0 \quad (3.33)$$

$$b = a_P^0 T_P^0 \quad (3.34)$$

Para la ec. (3.1) el término a_p^0 se expresa en la ec. (3.35).

$$a_p^0 = \rho C_p \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} \tag{3.35}$$

Para la ec. (3.2) el término a_p^0 se expresa en la ec. (3.36).

$$a_p^0 = \rho C_p c_{efec} \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} \tag{3.36}$$

Para la ec. (3.8) el término a_p^0 se expresa en la ec. (3.37).

$$a_p^0 = \rho H \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} \tag{3.37}$$

Donde δx , δy son las distancias entre nodos y, Δx y Δy es el tamaño del volumen de control en la dirección x o y , respectivamente. La temperatura anterior o inicial se denota por T_p^0 , y los valores nuevos (desconocidos) en $t + \Delta t$ corresponden a T_p , T_E , T_W , T_N , T_S . Los subíndices en mayúsculas se refieren a valores en los nodos, mientras que los subíndices en minúsculas indican valores en las fronteras de los volúmenes de control. Los valores de los coeficientes de la ec. (3.28) para los nodos de cada una de las fronteras se presentan en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Discretización de las ecuaciones de condiciones de frontera.

	Norte	Sur	Este	Oeste
Ec	$\lambda_j \frac{\partial T}{\partial y} = h_{ext} (T_{sa} - T)$	$\lambda_j \frac{\partial T}{\partial y} = h_i (T - T_i)$	$\lambda_j \frac{\partial T}{\partial x} = h_{ext} (T_\infty - T)$	$-\lambda_j \frac{\partial T}{\partial x} = h_{ext} (T_\infty - T)$
a_N	0	1	0	0
a_S	1	0	0	0
a_E	0	0	0	1
a_W	0	0	1	0
a_P	$1 + \frac{h_{ext} \delta y_s}{\lambda_s}$	$1 + \frac{h_i \delta y_n}{\lambda_n}$	$1 + \frac{h_{ext} \delta x_w}{\lambda_w}$	$1 + \frac{h_{ext} \delta x_e}{\lambda_e}$
b	$\left(\frac{h_{ext} \delta y_s}{\lambda_s} \right) T_{sa}$	$\left(\frac{h_i \delta y_n}{\lambda_n} \right) T_i$	$\left(\frac{h_{ext} \delta x_w}{\lambda_w} \right) T_\infty$	$\left(\frac{h_{ext} \delta x_e}{\lambda_e} \right) T_\infty$

Obsérvese que en las ecuaciones discretas se requiere conocer el valor de la conductividad térmica en las fronteras de los volúmenes de control. Cuando entre dos nodos P y E , por ejemplo, se encuentre la interfaz de materiales e (ver la Figura 3.8), la conductividad térmica es obtenida por interpolación armónica entre esos dos puntos, como se expresa en la ec. (3.38).

$$\lambda_e = \frac{\lambda_P \lambda_E \delta x_e}{\lambda_P \delta x_{eE} + \lambda_E \delta x_{Pe}} \quad (3.38)$$

Donde δx_{eE} y δx_{Pe} corresponden a las distancias asociadas con la interface e (ver Figura 3.8). Si el volumen de control se encuentra entre dos materiales en dirección x , la densidad y calor específico de un volumen de control se obtiene a través de una interpolación lineal como se muestra en la ec. (3.39) y la ec. (3.40). Donde δx_{mj} y δx_{mj+1} (ver Figura 3.8) corresponden al espesor Δx del volumen de control que pertenece al material j y al material $j+1$, respectivamente.

$$\rho_P = \frac{\rho_W \delta x_{mj+1} + \rho_E \delta x_{mj}}{\Delta x} \quad (3.39)$$

$$Cp_P = \frac{Cp_W \delta x_{mj+1} + Cp_E \delta x_{mj}}{\Delta x} \quad (3.40)$$

3.4.1 Método de solución del sistema de ecuaciones algebraicas.

Los métodos numéricos de solución para un sistema de ecuaciones algebraicas se clasifican generalmente como directos e iterativos. Para alcanzar la solución mediante un método directo el número de operaciones a ejecutar es exponencial al número de ecuaciones por resolver (en este caso $N_x * N_y$), requiriendo así una gran cantidad de memoria computacional, y la generación de mayores errores de redondeo. Por esta razón, el uso de los métodos directos en CFD es poco preferente. Los métodos indirectos se basan en suponer inicialmente un valor de la variable de interés, el cual en cada iteración es reemplazado por el valor nuevo obtenido. El ciclo termina cuando se cumple con el criterio de convergencia

establecido. Existen varios métodos iterativos, entre ellos, el método de Gauss-Seidel. Este método utiliza el valor de la variable recién calculado en el nodo para calcular el valor de la variable en el nodo siguiente, en vez de aplicar los valores de la iteración anterior. Su aplicación se resume en los siguientes pasos:

1. Suponer una distribución inicial de la variable para todos los nodos $(T)^{n=0}$.
2. Calcular el valor de la variable para un primer nodo con la ec. (3.41).

$$T_p^{n+1} = \frac{a_N T_N^n + a_S T_S^n + a_W T_W^n + a_E T_E^n + b_p}{a_p} \quad (3.41)$$

Ahora el valor obtenido en ese nodo sustituirá al valor supuesto de la variable en ese nodo, el cual será considerado en el cálculo del nodo siguiente. Por ejemplo, si el orden de evaluación de los nodos es de izquierda a derecha, T_p^{n+1} se convierte en T_W^n para el cálculo de la temperatura del siguiente nodo. Este barrido punto a punto se continúa para todos los nodos completándose la primera iteración.

3. Evaluar el criterio de convergencia para la variable T_p en todos los nodos. Si éste se cumple, se avanza al siguiente Δt , de lo contrario se regresa al paso dos tomando ahora el valor de la temperatura recién obtenido para el cálculo de las temperaturas. El paso 2 y 3 se repiten hasta que se cumpla el criterio de convergencia en cada Δt .

La convergencia del método de Gauss-Seidel es lenta, lo cual podría parecer una desventaja; sin embargo, para el fenómeno de fusión-solidificación de los PCM esta característica resulta favorable porque ayuda a evitar problemas de divergencia ocasionados por cambios grandes y acelerados en el calor latente. Por lo cual, en este trabajo se ha seleccionado el método de Gauss-Seidel como la técnica de solución del sistema de ecuaciones algebraicas y un criterio de convergencia de $1e-10$.

3.4.2 Algoritmo de solución

A continuación, se describe el orden de las operaciones que realiza el código computacional desarrollado en el software Matlab® R2017a, y de igual forma se encuentra ilustrado en la Figura 3.9.

1. Delimitar el dominio computacional; es decir, el dimensionamiento de las capas. Definir las propiedades termofísicas de cada capa.
2. Establecer los Δx , Δy y Δt (determinados a partir del análisis de independencia de malla), así como el tiempo total a simular.
3. Establecer los coeficientes convectivos y la condición inicial en el sistema.
4. Calcular la temperatura sol-aire para cada Δt a partir de la base de datos meteorológicos.
5. Calcular las propiedades termofísicas y el valor de los coeficientes de la ec. (3.28) para los volúmenes de control de los materiales ajenos al PCM.
6. Evaluar la fracción líquida con el valor inicial o anterior de temperatura para cada volumen de control que contenga PCM.
7. Calcular las propiedades termofísicas para los volúmenes de control dentro de la capa de PCM. El valor de la conductividad térmica se calcula por interpolación armónica. Mientras que la densidad y el calor específico se determinan mediante interpolación lineal.
8. Calcular el valor de los coeficientes de la ec. (3.28) para cada volumen de control. El conjunto de ecuaciones algebraicas resultantes se resuelve mediante el método iterativo Gauss-Seidel. Cuando se cumple el criterio de convergencia, $1e-10$, se obtiene la distribución espacial de la temperatura en el tiempo Δt . Calcular el flux de calor que se transfiere hacia el espacio interior utilizando la temperatura del nodo central sobre la superficie interna del techo.
9. Se repiten los pasos del 6 al 9 para los siguientes Δt , hasta llegar al tiempo total a simular. Finalmente, se determina la reducción de las ganancias de

calor del caso en evaluación respecto al de referencia, así como la reducción de las emisiones de CO₂.

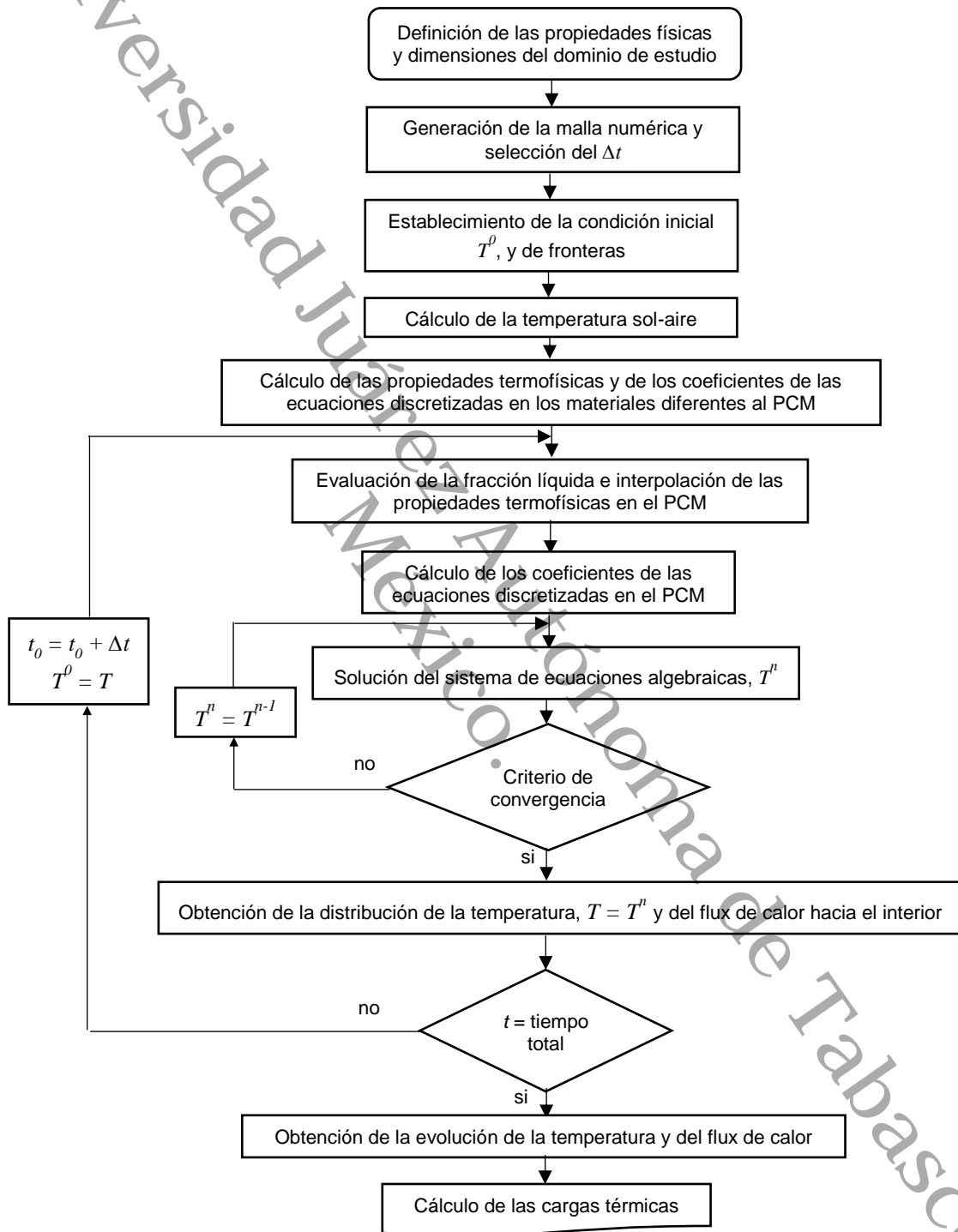


Figura 3.9 Algoritmo de solución para el problema de estudio.
 * El superíndice n indica iteración actual, $n-1$ indica iteración previa.

3.5 Verificación y validación del modelo numérico.

3.5.1 Verificación del comportamiento del PCM

La verificación del modelo numérico se realizó considerando el problema reportado por Carnahan [47]. El caso de referencia consiste en un molde cilíndrico de 2 ft, cargado con una aleación fundida de metal a una temperatura inicial de 400°F. El molde se encuentra aislado excepto la frontera norte, la cual se mantiene a una temperatura fija de 150°F. Las propiedades termofísicas del material permanecen constantes durante la solidificación. Los valores de la fracción líquida mostrados en los datos de referencia, fueron representados en el modelo numérico mediante el polinomio expresado en la ec. (3.42).

$$\begin{aligned}
 f_{liq} = & -2.76325856923262e-14 T^5 + 4.54152209932445e-11 T^4 \\
 & -3.00142451520796e-08 T^3 + 1.00338741272214e-05 T^2 \\
 & -0.0017170759740123 T + 0.124117319466685
 \end{aligned}
 \tag{3.42}$$

En la Figura 3.10 se observan las isótermas de temperatura obtenidas por Carnahan (líneas segmentadas), y las isótermas de temperatura obtenidas con el código computacional desarrollado (líneas continuas). Las isótermas representan la evolución de la temperatura cada 5 h, de 11 nodos equidistantes (cada uno de los puntos marcados en el eje x). Los resultados obtenidos mostraron una diferencia absoluta máxima y promedio de 0.27°C y de 0.09°C, respectivamente.

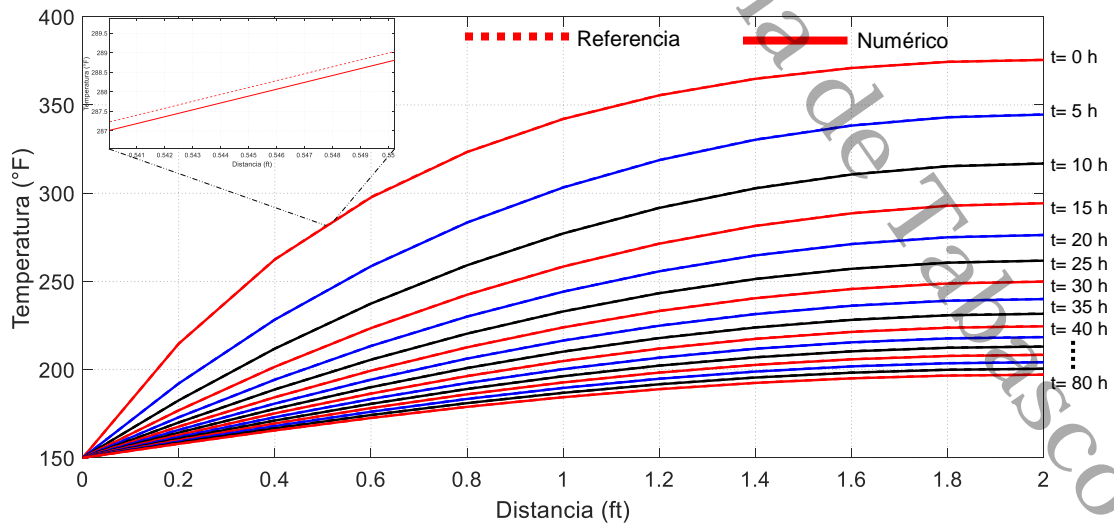


Figura 3.10 Verificación del modelo numérico para un sistema con PCM.

3.5.2 Validación del modelo numérico para un sistema compuesto por materiales convencionales.

Los casos de estudio de esta investigación se basan en techos de concreto. Por ello se validó con resultados experimentales la transferencia de calor a través de este material. El uso de un estudio de referencia con condiciones climáticas similares a las analizadas en el presente trabajo no fue posible debido a la limitada información que presentan los trabajos disponibles. Por ello se utilizó el estudio realizado por Hernández-Pérez *et al.* [48] debido a la periodicidad en la que reportan la variación de la temperatura ambiente y radiación solar, información detallada de la condición inicial y de frontera, los cuales son datos de entrada esenciales para realizar la simulación. Asimismo, la periodicidad de los resultados reportados permitió calcular las desviaciones entre estos y los resultados simulados de una forma más exacta.

El caso experimental se basó en una losa de concreto de 0.6 m de longitud por 0.06 m de espesor con una λ , ρ , C_p , α y ε de $1.8 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 2400 kg m^{-3} y $1080 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 0.67 y 0.87 respectivamente. La superficie superior estuvo sujeta a condiciones climáticas de cielo despejado de un día de la ciudad de Cuernavaca, Morelos. La losa fue colocada sobre una celda calorimétrica con la finalidad de mantener una temperatura de aire interior en un rango de $13\text{-}38^\circ\text{C}$. Los resultados experimentales y los resultados numéricos son mostrados en la Figura 3.11 y Figura 3.12, respectivamente. Donde T_∞ es la temperatura ambiente, T_i es la temperatura de aire interior, I_{sol} es la irradiancia solar, T_{SE} y T_{SI} son las temperaturas de la superficie exterior e interior, respectivamente. El subíndice *exp* se refiere a los resultados experimentales, y *num* a los obtenidos numéricamente. La Tabla 3.8, contiene los errores máximos y los errores promedios de la validación. Estos valores son cercanos a los obtenidos en el caso de referencia (5.5%) donde también validan un modelo numérico. Se considera que los mayores errores se encuentran en la superficie externa debido a que está afectada por la variación de la temperatura ambiente y radiación solar.

Tabla 3.8 Diferencia máxima y promedio obtenida de la validación del código para un material convencional.

Superficie evaluada	Diferencia máxima, %	Diferencia promedio, %
Externa	8.84	3.05
Interna	4.67	1.63

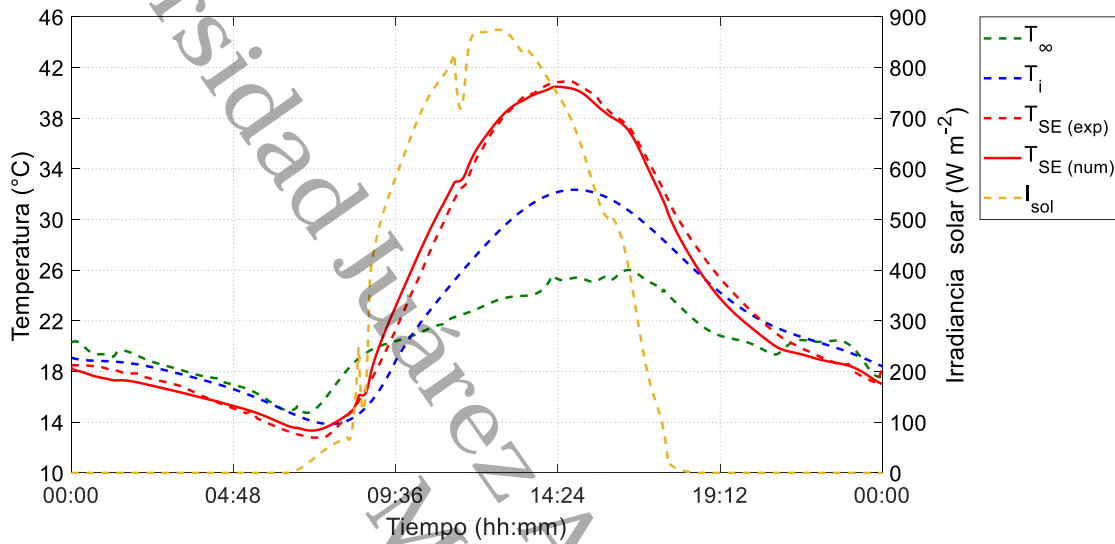


Figura 3.11 Evolución de la temperatura en la superficie externa de una losa de concreto. Validación del modelo numérico en materiales convencionales.

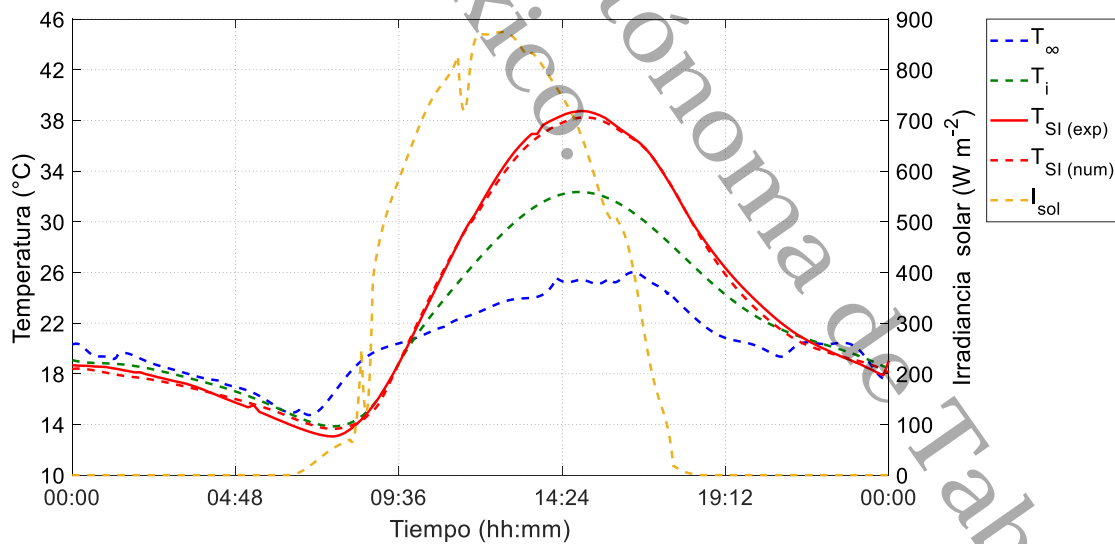


Figura 3.12 Evolución de la temperatura en la superficie interna de una losa de concreto. Validación del modelo numérico en materiales convencionales.

3.5.3 Validación del modelo numérico para un sistema con PCM.

El modelo numérico propuesto para un sistema con PCM fue validado con las mediciones reportadas en [23]. El caso experimental consistió en dos cavidades aisladas de 1 m³, separadas por un panel de PCM acoplado a una capa de madera como se muestra en la Figura 3.13. Las mediciones reportadas son las temperaturas de la superficie externa (cara del PCM en contacto con el aire de la cámara externa), y de la superficie interna (cara del panel de madera en contacto con el aire de la cámara interna). La temperatura de cambio de fase del PCM, marca Energain®, es de 18-22°C. La Tabla 3.9 enlista las propiedades de los materiales probados, y en la Figura 3.14 se grafica la capacidad calorífica (o capacidad de almacenamiento de calor) en función de la temperatura $C_p(T)$ del PCM. Esta última figura contiene los datos requeridos para simular el fenómeno de fusión-solidificación del PCM. Nótese que la mayor capacidad de almacenamiento de calor ocurre en el rango de temperatura de cambio de fase.

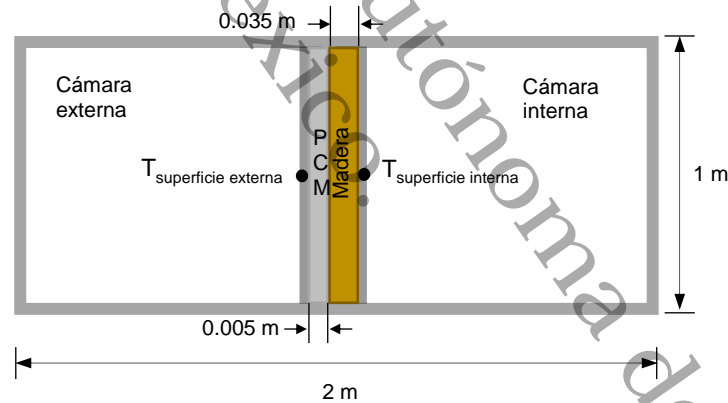


Figura 3.13 Modelo físico para la validación del modelo numérico en un sistema con PCM.

Tabla 3.9 Propiedades termofísicas de los materiales para validación del comportamiento del PCM.

Material	Espesor (m)	λ (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	ρ (kg m ⁻³)	C_p (J kg ⁻¹ °C ⁻¹)
Panel de madera	0.035	0.11	680	2400
PCM	0.005	0.14(l)-0.18(sl)	680	$C_p(T)$

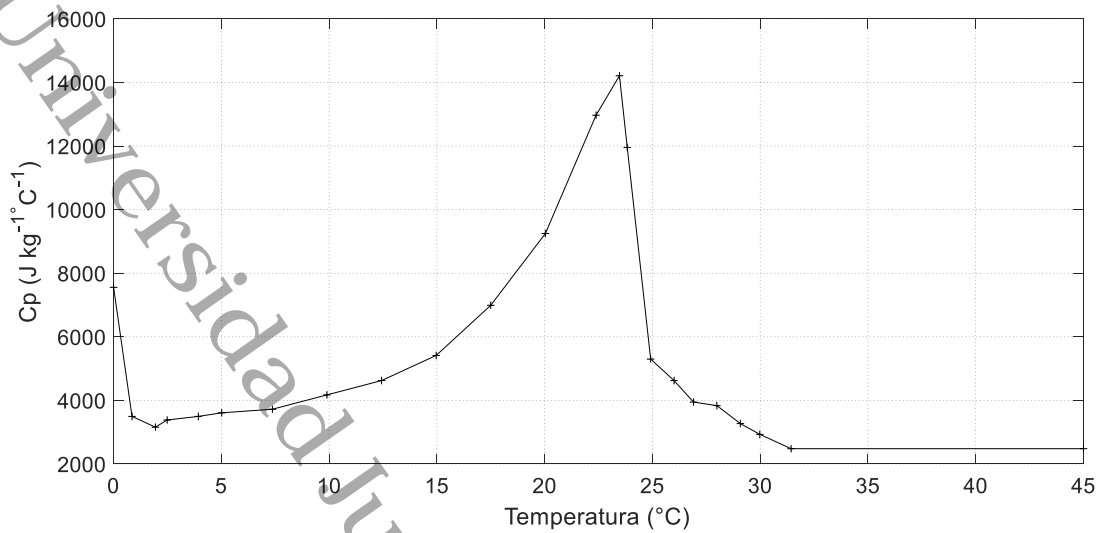


Figura 3.14 Curva $C_p(T)$ del PCM Energain® para el problema de validación.

La primera cavidad es la cámara interior, dentro de la cual se simulan las condiciones de temperatura de aire interior manteniendo una temperatura constante de 21°C durante 8 h. El segundo recinto llamado cámara exterior, simula las condiciones de temperatura de aire externo mediante una temperatura periódica entre 15°C y 30°C. La evolución de la temperatura de aire externo es mostrada en la Figura 3.15. El coeficiente de transferencia de calor interno y externo fue de 8 W m⁻² °C⁻¹. Para la simulación se utilizó una geometría sin contacto con la frontera, un criterio de convergencia de 1e-10, y un tiempo total de 8 h con pasos de tiempo, Δt , de 60 s. La temperatura inicial del sistema se representó en función del espacio mediante la ec. (3.43),

$$T(x, y) = -15y + 21.1 \quad (3.43)$$

En esta ecuación se observa que, la temperatura varía solo con el espesor del sistema, por lo que, la temperatura de los nodos a lo largo del eje x es la misma que la del primer nodo de esa fila. En la Figura 3.16 se presentan los resultados experimentales (subíndice *exp*) y numéricos (subíndice *num*) para la temperatura de la superficie externa (T_{SE}) e interna (T_{SI}). Para la temperatura de la superficie interna se obtuvo una diferencia máxima y promedio de 0.28°C y 0.10°C. Para la superficie externa la diferencia máxima y promedio fue de 1.32°C y 0.57°C;

respectivamente. En el caso de referencia donde también validan un modelo numérico, reportan una diferencia máxima de 0.5°C para superficie externa y 0.35°C para la superficie interna. Por lo tanto, el modelo numérico desarrollado en este proyecto ofrece una exactitud de predicción aceptable para un sistema con PCM. Se considera que, en la superficie externa se obtuvieron los errores mayores debido a que los valores de la capacidad calorífica en función de la temperatura se obtuvieron a partir de datos graficados en la referencia.

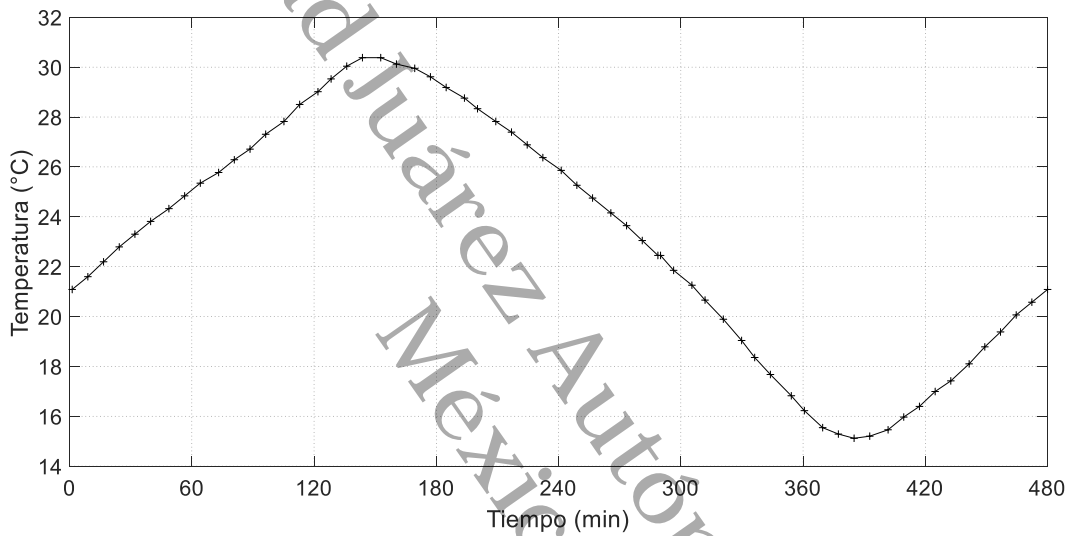


Figura 3.15 Temperatura del aire de la cámara externa del problema de validación del PCM.

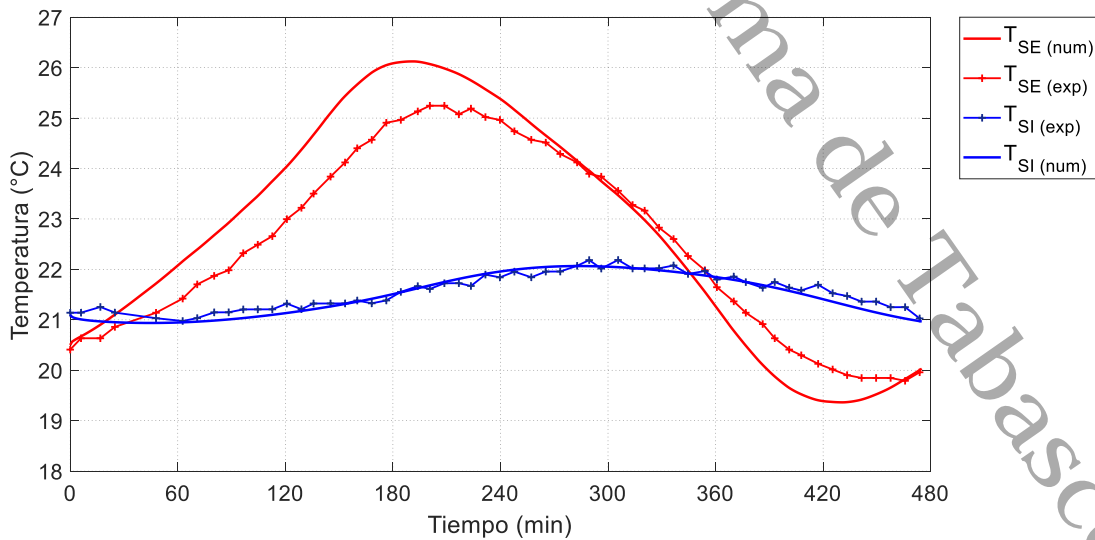


Figura 3.16 Evolución experimental y numérica de la temperatura de superficie interior y exterior para problema de validación del PCM.

Capítulo 4

Resultados y discusión

Se muestra la evolución de la temperatura, del flux de calor y de la fracción líquida, así como la reducción de las ganancias de calor para cada escenario de estudio.

4.1 Parámetros de estudio

Como se mencionó en el Capítulo 1, muchos trabajos teóricos y experimentales han demostrado las ventajas del uso de los PCM en las edificaciones. Sin embargo, es importante remarcar que la eficiencia de esta tecnología depende de diversos factores, como es, el espesor de la capa de PCM, la ubicación de la capa de PCM dentro de la envolvente, la temperatura de cambio de fase del PCM, el calor latente de cambio de fase, y los materiales de construcción adyacentes a la capa de PCM. Es por ello, que las investigaciones reportadas se basan en el estudio de estos factores, a fin de evaluar su influencia en el comportamiento de los PCM bajo condiciones climáticas específicas.

En este trabajo, se evaluó el comportamiento térmico de cinco posiciones de una capa de PCM de 1 cm de espesor dentro de un techo de concreto como es mostrado en la Figura 3.4. En cada configuración se probaron dos PCM, el RT35 con un rango de cambio de fase de 29-36°C, y el RT44HC, con un rango de temperatura de cambio de fase de 41-44°C. Los periodos de estudio corresponden a una semana de primavera y una de verano bajo condiciones de clima cálido húmedo. El techo de referencia también fue simulado para la misma semana de primavera y de verano, lo cual hace un total de 22 casos de estudio (ver Tabla 3.3). Como resultados se obtuvo la evolución de las temperaturas en el techo, de la fracción líquida y del flux de calor hacia el espacio interior.

4.2 Semana de primavera

La variación de la temperatura ambiente (T_{∞}) e irradiancia solar (I_{sol}) para la semana de primavera se muestra en la Figura 4.1. Se pueden observar temperaturas e irradiancias máximas en el rango de 37-42°C y 944-1167 W m⁻², respectivamente, y temperaturas mínimas en el rango de 22-26°C. Obsérvese que la evolución de temperatura ambiente y de radiación solar es uniforme en toda la semana; los picos de temperatura corresponden a los picos de la radiación

solar. Los periodos en los cuales se presentan las temperaturas menores son simultáneos a los periodos de ausencia de radiación solar.

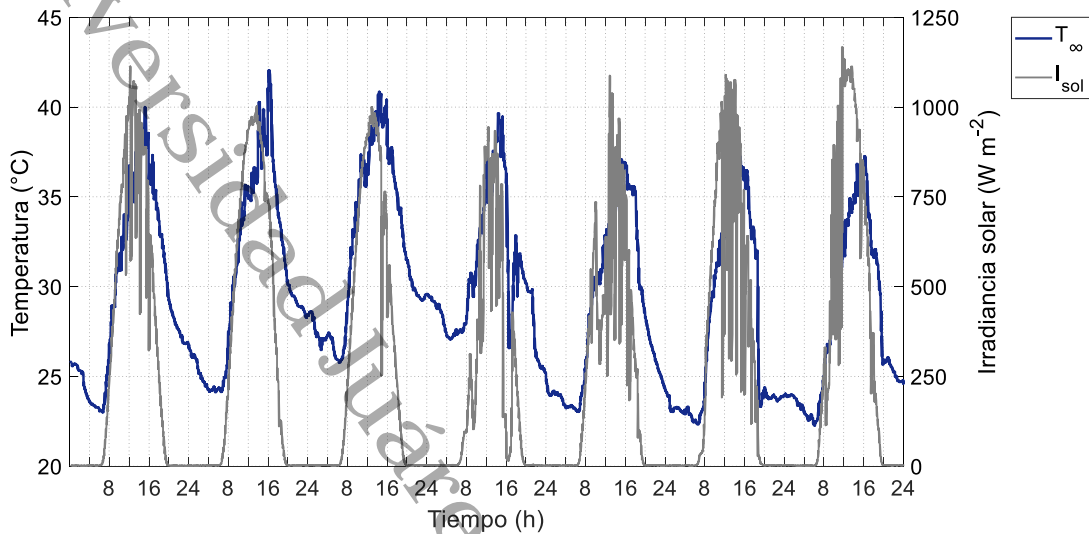


Figura 4.1 Temperatura e irradiancia solar durante la semana de primavera (28 mayo al 03 de junio del 2018).

4.2.1 Análisis de la temperatura

En todos los casos, la temperatura de aire interior (T_i) se consideró como un valor constante de 25°C mantenido por un equipo de aire acondicionado. Para las configuraciones de techo con PCM, se obtuvo la evolución de la temperatura en cuatro posiciones dentro del techo: superficie exterior (T_{SE}), interfaz PCM-capa superior de concreto (T_{IS}), interfaz PCM-capa inferior de concreto (T_{II}), y la superficie interior (T_{SI}). Para el techo de referencia, se obtuvo la evolución de la temperatura de la superficie exterior, y de la superficie interior. La Tabla 4.1 contiene los valores promedio de las temperaturas máximas de la superficie exterior e interior, así como los tiempos de retraso para cada uno de los casos analizados durante la semana de primavera.

En la Figura 4.2 se presenta la evolución de la temperatura para el caso de referencia. A partir de esta figura y de los resultados de la Tabla 4.1, se observa que la superficie exterior del techo muestra una temperatura máxima promedio de 59°C, y la superficie interna de 45°C.

Tabla 4.1 Temperaturas máximas y tiempos de retraso de los casos analizados durante la semana de primavera (28 mayo al 03 de junio del 2018).

Temperaturas máximas promedio de la superficie exterior (°C)					
Caso s/PCM	59.00				
	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso E
PCM RT35	62.28	61.34	60.45	59.56	58.85
PCM RT44	60.46	59.53	59.28	59.24	59.30
Temperaturas máximas promedio de la superficie interior (°C)					
Caso s/PCM	45.32				
	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso E
PCM RT35	41.26	41.46	41.57	41.62	41.60
PCM RT44	40.04	40.02	39.94	39.79	39.83
Tiempos de retraso promedio (min)					
Caso s/PCM	105				
	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso E
PCM RT35	170	141	143	142	125
PCM RT44	186	184	205	216	207

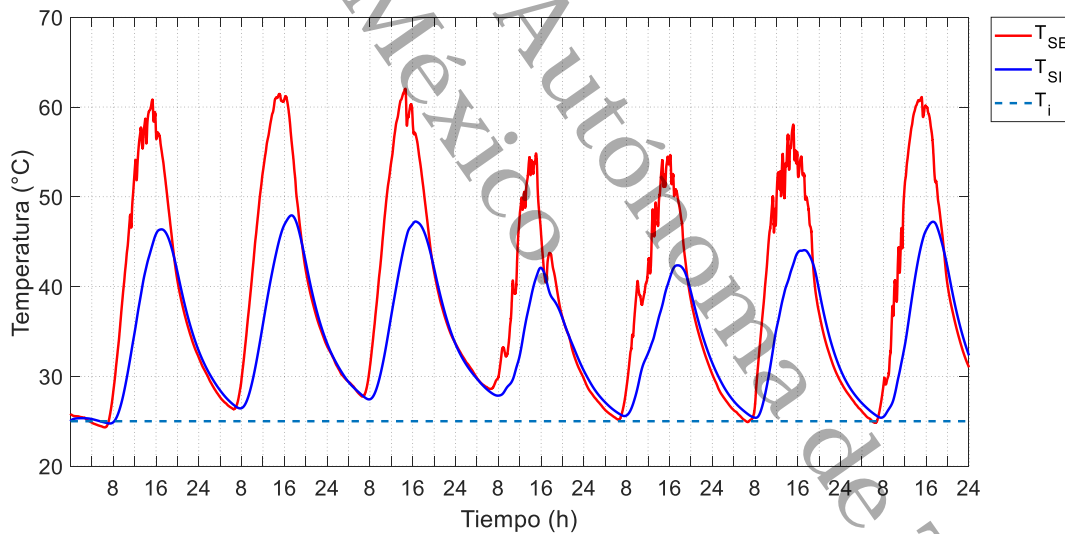


Figura 4.2 Evolución de la temperatura en el techo de referencia en la semana de primavera.

Con respecto a los casos con PCM RT35, la Tabla 4.1 muestra que los valores mayores de las temperaturas máximas de la superficie exterior pertenecen al Caso A, y los valores más bajos al Caso E. Este comportamiento se puede atribuir al efecto de la masa térmica del concreto y la baja conductividad térmica del PCM (8 veces menor que la del concreto). En el Caso A, la cercanía de la capa de

PCM a la superficie exterior, impide la propagación de calor proveniente del ambiente hacia el resto del techo, provocando que la superficie externa tenga una temperatura más elevada. Mientras que, en el Caso E, la mayor proporción de concreto sobre el PCM favorece la transferencia de calor proveniente del ambiente. La evolución de la temperatura del Caso A y del Caso E es mostrada en la Figura 4.3 y Figura 4.4, respectivamente. A partir de T_{IS} y T_{II} en estas figuras se observa que, el efecto de la posición de la capa de PCM también se ve reflejado en las temperaturas que se alcanzan en esta capa; en el Caso A el PCM está sometido a temperaturas máximas de 61°C (ver T_{IS} en Figura 4.3), y el Caso E a temperaturas máximas de 51°C (ver T_{IS} en Figura 4.4). Este aspecto es importante desde el punto de vista operativo, puesto que, la temperatura de operación máxima permisible del PCM RT35 es de 65°C (ver Anexo B). Por lo cual, el Caso E ofrece un mayor margen de seguridad entre la temperatura máxima que puede alcanzar el PCM y la temperatura de operación máxima permisible. En los otros casos (B, C y D), las temperaturas máximas de la superficie exterior y las temperaturas máximas en el PCM se encuentran entre los valores del Caso A y Caso E.

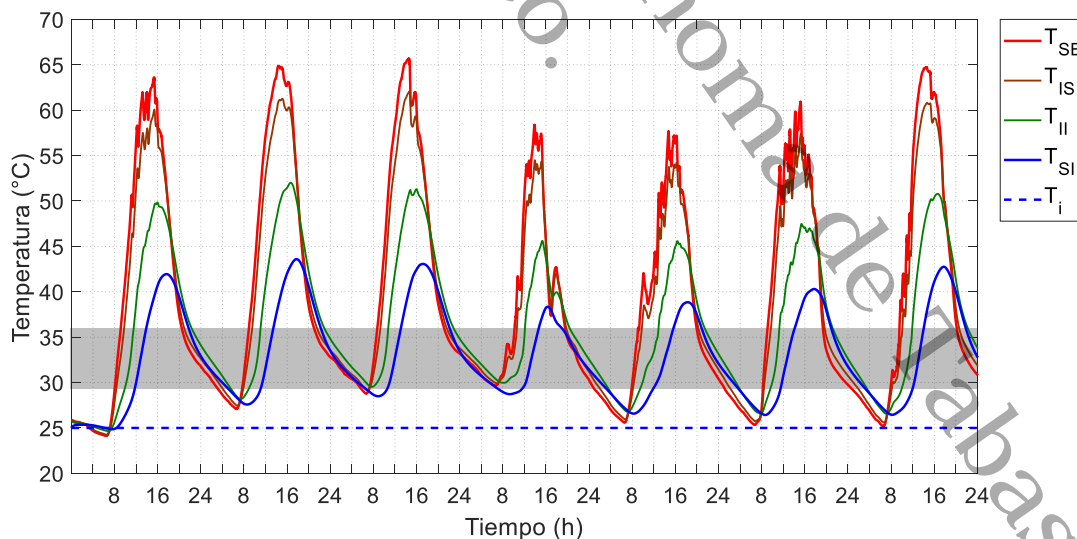


Figura 4.3 Evolución de la temperatura del Caso A con PCM RT35 en la semana de primavera.

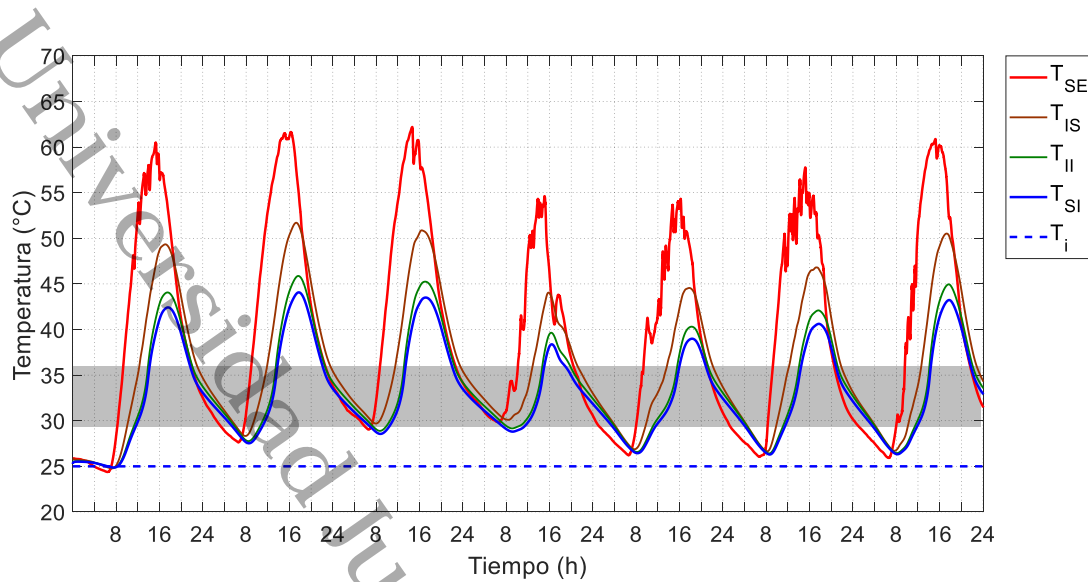


Figura 4.4 Evolución de la temperatura del Caso E con PCM RT35 en la semana de primavera.

Por otra parte, en los casos con PCM RT35 no se encontraron diferencias significativas entre las temperaturas máximas de la superficie interior; la mayor diferencia entre los casos es de aproximadamente 0.5°C . No obstante, comparado con los valores del techo de referencia, el PCM RT35 disminuyó, en promedio, 4°C la temperatura de la superficie interna. De la literatura consultada, los estudios con las condiciones climáticas más cercanas a las analizadas en el presente trabajo, pertenecen a Zhu *et al.* [14], Lu *et al.* [26], Pasuphaty *et al.* [28], Reddy *et al.* [12] y Elarga *et al.* [18]. Como se observa en la Tabla 1.1 en estos estudios los techos se expusieron a temperaturas máximas de $32\text{-}37^{\circ}\text{C}$ e irradiancia solar entre $900\text{-}1000\text{ W m}^{-2}$. Zhu *et al.* [14] obtuvieron una reducción de 5°C en la temperatura de la superficie interna del techo utilizando una capa de 0.5 cm de PCM y 10 cm de material aislante. Los resultados reportados por Lu *et al.* [26] muestran que la temperatura de la superficie interna del techo se mantuvo en 28°C ; sin embargo, esta configuración tenía recubrimiento reflectivo y material aislante. En los trabajos de Pasuphaty *et al.* [28] y Reddy *et al.* [12] la temperatura de la superficie interna del techo se logró mantener en $27\text{-}28^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, en el primer estudio [28] el espesor del techo es casi el doble del espesor del techo propuesto en el presente estudio y la capa de PCM es de 2.5

cm. Y en el estudio de Reddy *et al.* [12] el espesor del techo era de 23 cm con una capa doble de PCM con 5 cm de espesor.

Por otra parte, los tiempos de retraso mostrados en la Tabla 4.1, indican el desfase temporal entre las temperaturas máximas de la superficie externa e interna. En los casos con PCM RT35, el mayor y menor tiempo de retraso se presentaron en el Caso A (170 min) y Caso E (125 min), respectivamente.

En la Figura 4.3 y Figura 4.4, la distancia vertical entre una curva y otra, señala el amortiguamiento térmico de cada capa de material. Por ejemplo, para el Caso A en el primer día (ver Figura 4.3), la capa superior de concreto, la capa intermedia de PCM, y la capa inferior de concreto, redujeron el pico de temperatura ~ 3.5 , ~ 11 y $\sim 10^\circ\text{C}$, respectivamente. Nótese que 1 cm de PCM tiene una reducción mayor de temperatura que 10 cm de concreto. En los días siguientes se observa, al menos, una reducción de temperatura de 7°C en la capa de PCM. En los casos donde la capa de PCM se encuentra próxima a la superficie interna, por ejemplo, el Caso E (ver Figura 4.4), el mayor amortiguamiento de temperatura tiene lugar en la capa superior de concreto y no en la de PCM.

El área sombreada en la Figura 4.3 y Figura 4.4, indica el rango de cambio de fase del PCM RT35 ($29\text{-}36^\circ\text{C}$). En las horas de sol, el periodo en que T_{IS} y T_{II} se encuentran dentro del área sombreada, significa que el PCM se encuentra en transición de fase sólida a líquida. El periodo anterior a esta transición de fases, corresponde al periodo en que el PCM se encuentra en estado sólido; y en el periodo posterior, el PCM se encuentra en estado líquido. En las horas de la noche, el tiempo en que T_{IS} y T_{II} están dentro del área sombreada, corresponde al periodo en que el PCM se encuentra en transición de fase líquida a sólida. El ciclo de cambio de fase del PCM descrito en las líneas anteriores, puede representarse mediante el concepto de fracción líquida. Donde el valor de 0 significa que el PCM se encuentra en estado sólido, y el valor de 1, que se encuentra en estado líquido. Los valores entre 0 y 1 corresponden a la transición de fases. Se considera que el PCM completa al 100% su ciclo de cambio de fase;

si el valor de la fracción líquida del PCM pasa de 0 a 1 durante la fusión, y si el valor de la fracción líquida pasa de 1 a 0 durante la solidificación. El porcentaje promedio en que el PCM completó su ciclo de cambio de fase durante toda la semana se muestra en la columna “ciclo de cambio de fase” de la Tabla 4.2, en la cual se resume el comportamiento de la fracción líquida de cada uno de los casos con PCM RT35 durante la semana de primavera. Nótese que ninguno de los casos completó al 100% sus ciclos de cambio de fase, debido a que el PCM no se solidificó completamente durante el segundo y tercer ciclo de cambio de fase, como puede observarse en la Figura 4.5 que ilustra la evolución de la fracción líquida del Caso E. La oscilación de la temperatura ambiente entre el día y la noche (ver Figura 4.1), no fue suficiente para que el PCM llegara a su temperatura de cambio de fase antes que iniciaran nuevamente las horas de sol.

Tabla 4.2 Fracción líquida de los casos con PCM RT35 en la semana de primavera.

Configuración	Ciclo de cambio de fase (%)	Tiempo de fusión (hh:mm)	Tiempo en estado líquido (hh:mm)	Tiempo de solidificación (hh:mm)	Tiempo en estado sólido (hh:mm)
Caso A	96.84	03:38	09:09	08:46	03:42
Caso B	96.78	03:54	09:11	08:15	03:46
Caso C	96.95	04:10	09:01	08:02	03:55
Caso D	97.35	04:29	08:28	08:12	04:08
Caso E	97.87	04:41	07:39	08:44	04:19

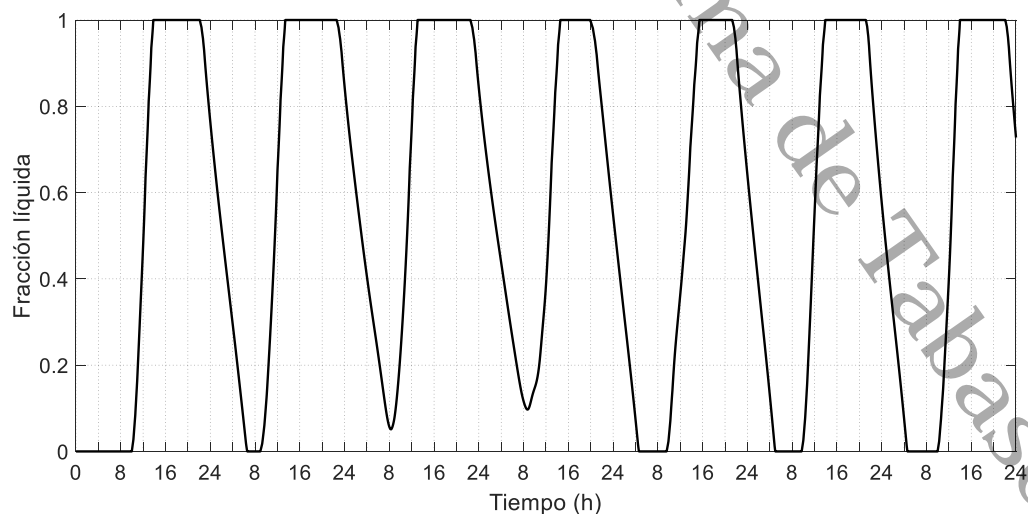


Figura 4.5 Evolución de la fracción líquida del Caso E PCM RT35 en la semana de primavera.

De acuerdo a la Tabla 4.2, conforme la capa de PCM RT35 se aproxima a la superficie interna del techo, el tiempo de fusión de esta capa incrementa, lo cual se atribuye al amortiguamiento térmico por parte de la capa superior de concreto. El tiempo en que el PCM permanece en estado líquido es superior a las siete horas con treinta minutos, periodo durante el cual el PCM alcanza sus mayores temperaturas, como puede observarse a partir de T_{IS} y T_{II} en la Figura 4.3 y Figura 4.4. Posteriormente, con el descenso de la temperatura ambiente y de la irradiancia solar, la temperatura en el PCM cae a su temperatura de cambio de fase (36°C) e inicia su proceso de solidificación, el cual dura alrededor de 8 h. Este es el tiempo que le toma al PCM liberar la energía que almacenó como calor latente.

A partir de los resultados de la Tabla 4.2, y como se observa en la Figura 4.5, el tiempo en que el PCM RT35 se encuentra en estado sólido es corto comparado con el tiempo en que permanece en estado líquido. Lo cual está directamente relacionado con las oscilaciones de la temperatura ambiente (ver Figura 4.1).

De acuerdo a la Tabla 4.1, en los casos con PCM RT44HC, los mayores valores de las temperaturas máximas de la superficie externa pertenecen al Caso A, y los valores más bajos al Caso D. Inclusive, las T_{SE} en el Caso A son mayores a las T_{SE} en el caso sin PCM. La diferencia entre las configuraciones se relaciona con el efecto en conjunto de la capacidad de almacenamiento y conductividad térmica del concreto y del PCM. Lo cual también influye en las temperaturas máximas que alcanza el PCM; en el Caso A el PCM es sometido a temperaturas máximas de 60°C (ver T_{IS} en Figura 4.6), y en el Caso D a temperaturas máximas de 51°C (ver T_{IS} en Figura 4.7). Para el PCM RT44HC la temperatura de operación máxima permisible es de 70°C (ver Anexo B). Por lo cual, el Caso D ofrece un mayor margen de seguridad entre la temperatura máxima que puede alcanzar el PCM y la temperatura de operación máxima permisible. Es decir, el Caso D puede exponerse a valores de temperatura ambiente e irradiancia solar

mayores a los de la semana de primavera, sin dañar las propiedades termofísicas y la funcionalidad del PCM.

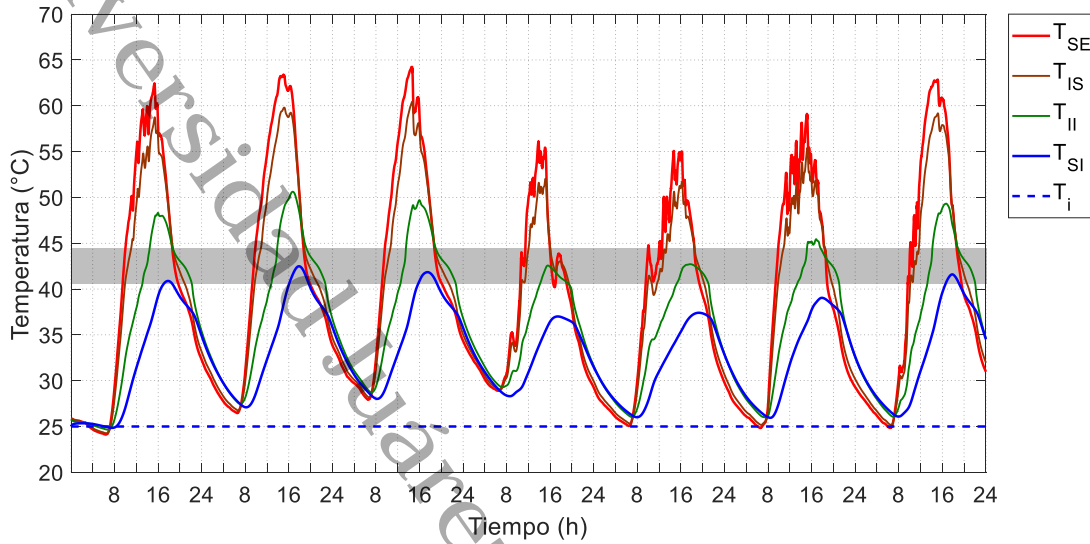


Figura 4.6 Evolución de la temperatura del Caso A con PCM RT44HC en la semana de primavera.

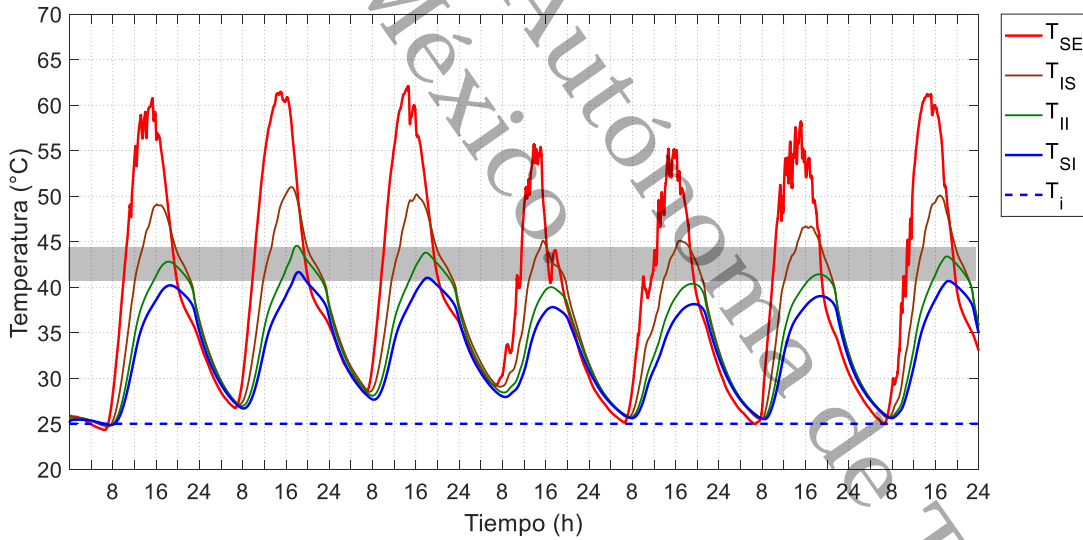


Figura 4.7 Evolución de la temperatura del Caso D con PCM RT44HC en la semana de primavera.

En cuanto a las temperaturas máximas de la superficie interior, en la Tabla 4.1 se observa que los resultados entre los casos con PCM RT44HC son muy cercanos; sin embargo, comparado con el caso de referencia, los casos con PCM RT44HC disminuyeron en promedio 5°C la T_{SI} .

En el Caso A PCM RT44HC (Figura 4.6) se observa que, para cualquiera de los días, la reducción de temperatura en la capa de PCM es, al menos, de 7°C. Por ejemplo, en el día uno la capa superior de concreto, la capa intermedia de PCM, y la capa inferior de concreto, reducen el pico de temperatura ~4°C, ~11°C y ~10°C, respectivamente. Por lo que, 1 cm de PCM RT44HC en ese día, tiene una reducción mayor de temperatura que 10 cm de concreto. Para los demás casos, como se observa en el Caso D (Figura 4.7), el incremento del espesor de la capa de concreto sobre el PCM, causa que el mayor amortiguamiento de temperatura tenga lugar en la capa superior de concreto y no en la de PCM.

En cuanto a los tiempos de retraso, en la Tabla 4.1 se muestra que en los casos con PCM RT44HC, el mayor desfase temporal entre la temperatura máxima de la superficie externa e interna se presenta en el Caso D (216 min).

El área sombreada en la Figura 4.6 y Figura 4.7 indica el rango de cambio de fase del PCM RT44HC (41-44°C), de igual forma como se describió para el PCM RT35, esta área sombreada ayuda a identificar los ciclos de cambio de fase del PCM, los cuales se representan también con la evolución de la fracción líquida. En la Tabla 4.3 se resume el comportamiento de la fracción líquida de cada uno de los casos con PCM RT44HC durante la semana de primavera. Se observa que ninguno de los casos completa al 100% sus ciclos de cambio de fase. El Caso A es el que presenta el mayor porcentaje (97.5%), mientras que el Caso E el menor porcentaje (66.9%). En la Figura 4.8 se ilustra la evolución de la fracción líquida del Caso A. En ella se observa que, durante el almacenamiento de calor en el día 4 y 5, el PCM no logra llegar completamente a su estado líquido (que la fracción líquida sea igual a 1) debido a que, en ese momento la temperatura ambiente comenzó a descender, y con ello la temperatura del PCM, de tal forma que no alcanzó los 44°C necesarios para completar su fusión. Para los demás casos, conforme la capa de PCM se posiciona más próxima a la superficie interna del techo, incrementa la fracción de PCM que queda sin fusionarse. Por ejemplo, el Caso E se fusiona parcialmente los siete días de la semana (ver Figura 4.9).

Tabla 4.3 Fracción líquida de los casos con PCM RT44HC en la semana de primavera.

Configuración	Ciclo de cambio de fase (%)	Tiempo de fusión (hh:mm)	Tiempo en estado líquido (hh:mm)	Tiempo de solidificación (hh:mm)	Tiempo en estado sólido (hh:mm)
Caso A	97.54	04:12	04:45	03:14	09:42
Caso B	93.28	04:32	03:31	03:17	10:21
Caso C	87.28	04:35	03:13	03:22	10:58
Caso D	79.01	05:04	01:38	03:35	11:48
Caso E	66.95	04:56	00:00	03:28	12:32

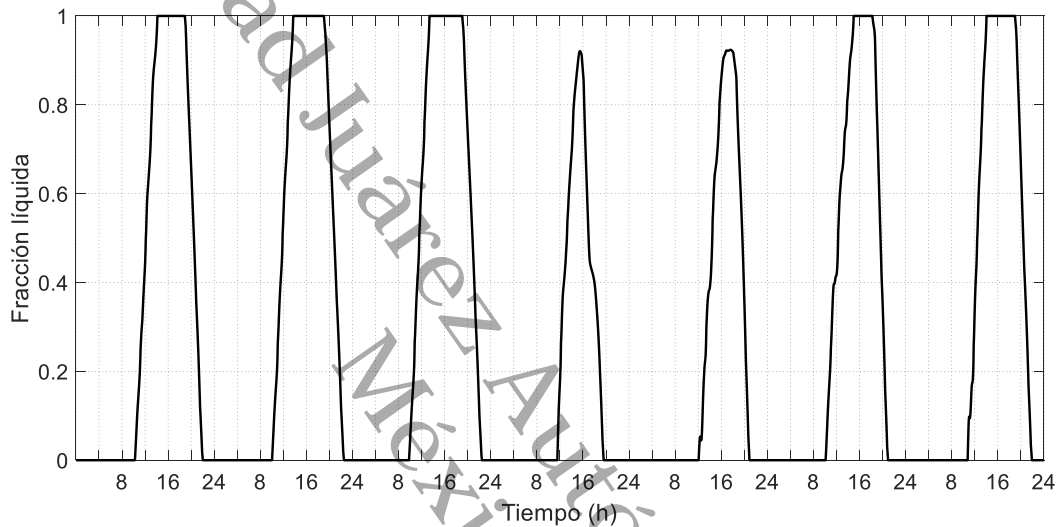


Figura 4.8 Evolución de la fracción líquida del Caso A PCM RT44HC en la semana de primavera.

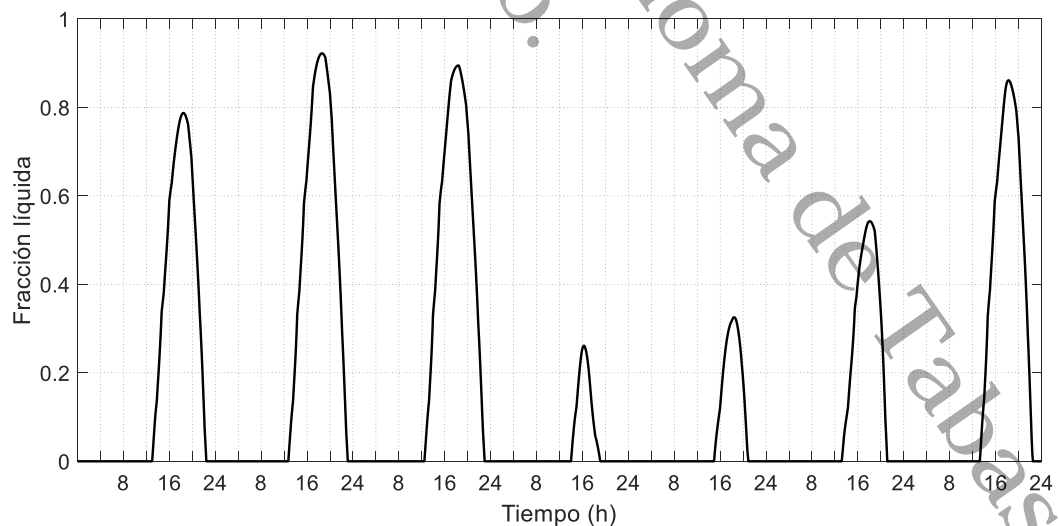


Figura 4.9 Evolución de la fracción líquida del Caso E PCM RT44HC en la semana de primavera.

Por otra parte, para todos los casos y para todos los días de la semana, el PCM RT44HC logra liberar el calor almacenado (fracción líquida igual a cero). Como se observa en la Tabla 4.3, este periodo de solidificación (de alrededor de tres horas), es más corto que el tiempo de fusión. Asimismo, el tiempo en que el PCM permanece en estado sólido supera significativamente al tiempo en que permanece en estado líquido. Los dos últimos efectos son contrarios a lo que ocurre con el PCM RT35, y reflejan la influencia de la temperatura de cambio de fase en el almacenamiento y liberación de calor del PCM. El PCM RT44HC no solo tiene un rango de temperatura de cambio de fase más elevado que el PCM RT35, sino también un mayor calor latente (64% mayor). A partir de la evolución de las temperaturas en las interfaces del PCM en el Caso A, se infiere que sólo una porción de la parte superior del PCM alcanza la temperatura de cambio de fase; y es esta porción la que se encarga del almacenamiento de calor. No obstante, la otra parte que queda sin fusionarse trabaja como un material convencional; es decir, su almacenamiento de energía es mediante calor sensible.

En la literatura hay escasos trabajos que reporten el efecto de la temperatura de cambio de fase sobre el comportamiento de la fracción líquida. Entre ellos está el estudio realizado por Wang *et al.* [49] donde la fracción de PCM que completa el ciclo de fusión-solidificación disminuye con el incremento de la temperatura de cambio de fase. Este resultado es similar a lo obtenido en el presente trabajo donde los casos con el PCM con menor temperatura de cambio de fase (PCM RT35) completaron en mayor porcentaje los ciclos de fusión-solidificación del PCM. En la configuración de techo reportada por Tokuç *et al.* [11], la capa de PCM de 1 cm de espesor se fusionó y solidificó al 100%; un valor aproximado es obtenido en los casos con PCM RT35 y en el Caso A con PCM RT44HC del presente análisis.

4.2.2 Análisis del flux de calor

La Tabla 4.4 contiene la diferencia promedio entre los picos de flux de calor de los casos con PCM comparados con el flux de calor del caso de referencia.

Tabla 4.4 Reducción del pico de calor durante la semana de primavera.

	Reducción promedio del pico de calor (%)				
	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso E
PCM RT35	20.40	19.12	18.61	18.35	18.47
PCM RT44	26.23	26.26	26.49	27.03	26.72

Para el PCM RT35 la mayor y menor reducción del pico de calor se encuentra en el Caso A (20%) y Caso E (18%), respectivamente. Sin embargo, la diferencia entre ambos resultados no es mayor al 2%. En la Figura 4.10 se puede identificar que en el Caso A con PCM RT35, en todos los días cerca de la media noche las curvas de flux de calor se invierten; es decir, el flux de calor del caso con PCM (q_{RT35}) es mayor al flux de calor del caso de referencia (q_{LC}), en promedio durante 8 h. Lo cual se atribuye a que, en este periodo el PCM se encuentra liberando el calor almacenado; cantidad que es significativamente superior a la cantidad de calor almacenado por el caso de referencia.

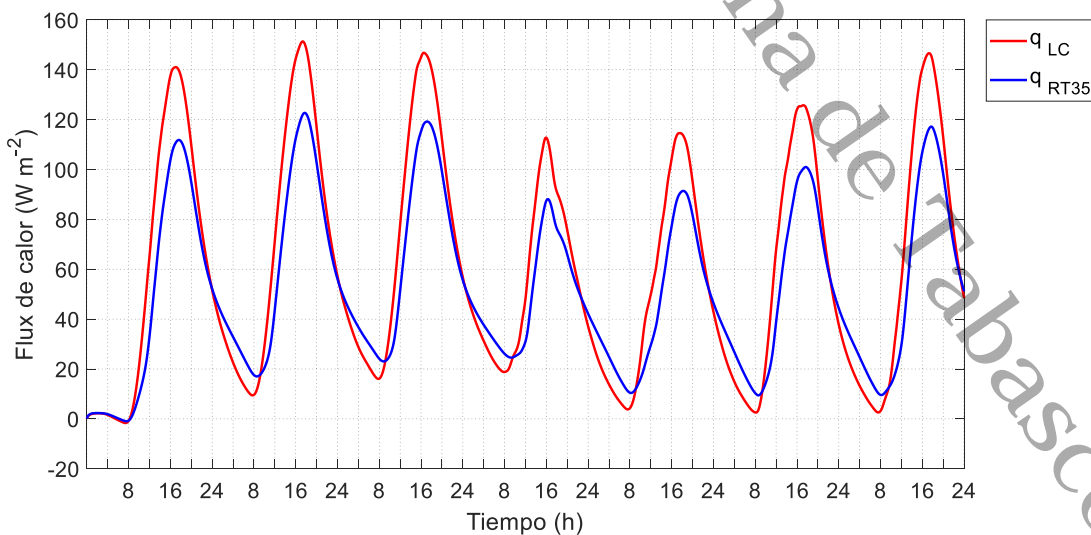


Figura 4.10 Evolución del flux de calor del Caso A PCM RT35 en la semana de primavera.

Por otra parte, en los casos con PCM RT44HC, la reducción de los picos de calor es de alrededor de 26-27%. Como ejemplo, en la Figura 4.11 se compara la evolución del flux de calor del Caso A PCM RT44HC (q_{RT44}) y la del caso de referencia (q_{LC}). En todos los días entre las 8:00 y 10:00 pm, durante un promedio de 11 h, el caso con PCM RT44HC aporta más calor hacia el interior que el caso de referencia (la curva q_{RT44} se mantiene por encima de q_{LC}). Este comportamiento se debe a la masiva cantidad de calor almacenado en el PCM comparado con el calor almacenado en el concreto.

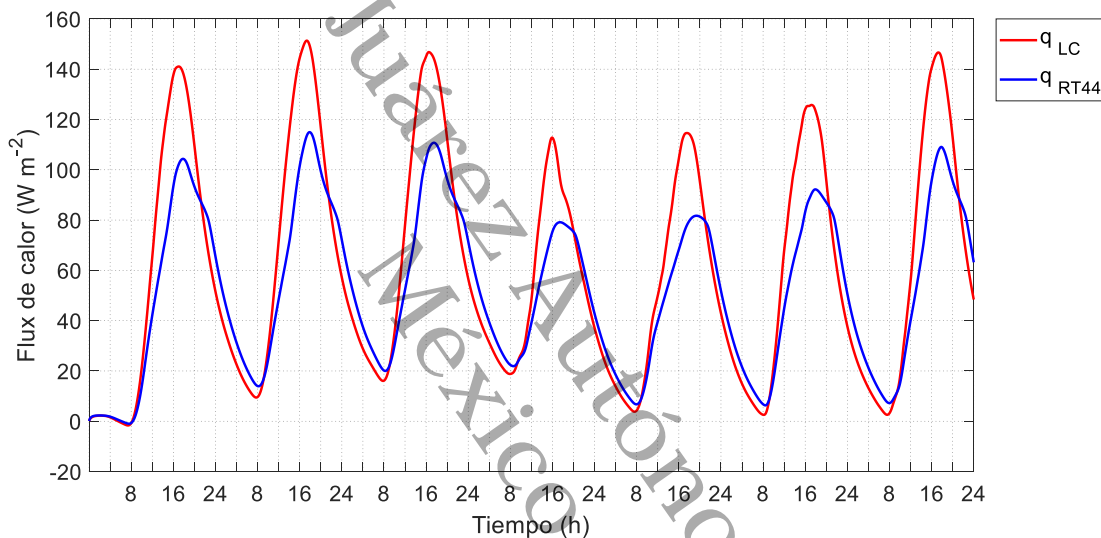


Figura 4.11 Evolución del flux de calor del Caso A PCM RT44HC en la semana de primavera.

De acuerdo a la Tabla 4.4, la altura de los picos de flux de calor del Caso A PCM RT44HC es menor que la altura de los picos de flux de calor del Caso A PCM RT35, como se muestra de igual forma en la Figura 4.12. Sin embargo, en los periodos previos y posteriores a los picos de calor, se observa que, durante un mayor número de horas, el flux de calor del caso con PCM RT44HC es mayor al flux de calor del caso con PCM RT35. Este comportamiento se confirmó con el cálculo de las ganancias de calor para cada caso en ambos PCM. Estos resultados, entre otros, dados por m^2 , son mostrados en la Tabla 4.5 y Tabla 4.6.

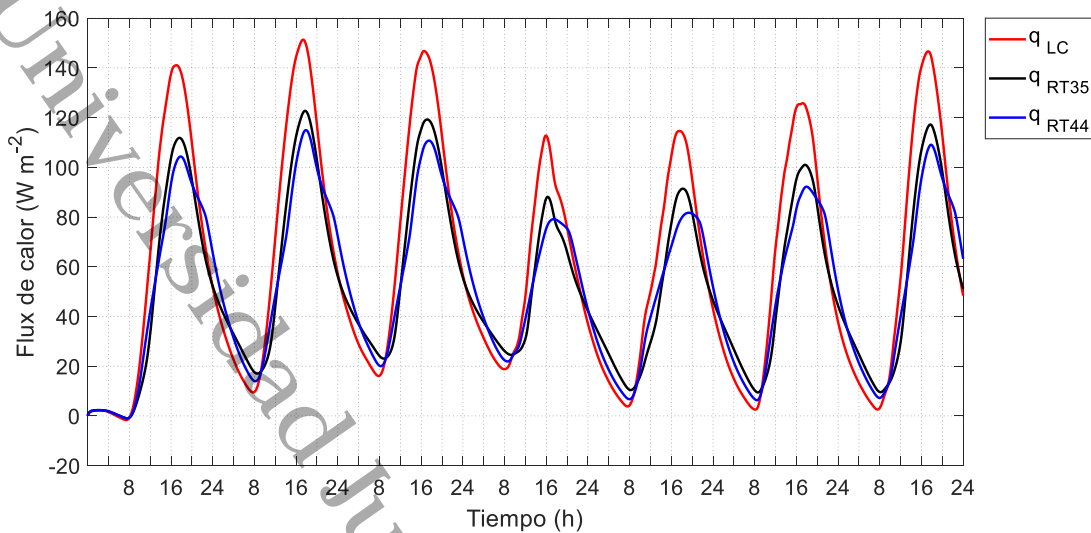


Figura 4.12 Evolución del flujo de calor del caso de referencia, Caso A con PCM RT35 y PCM RT44HC en la semana de primavera.

Para el flujo de calor promedio y las ganancias de calor entre los casos de un mismo PCM no se observan diferencias significativas. Para los casos con PCM RT35, la reducción de las cargas térmicas fue de 1.435-1.449 kWh m⁻², lo cual indica un ahorro en el consumo eléctrico semanal de \$6.10 a \$6.03 MXN por m², y una reducción en las emisiones de CO₂ de 0.756 a 0.763 kg m⁻². Para los casos con PCM RT44HC, se obtuvo una reducción de 1.367-1.430 kWh m⁻² en las cargas térmicas, equivalente a un ahorro de electricidad de \$5.75-\$6.01 MXN por m², y a una reducción en las emisiones de CO₂ de 0.720-0.753 kg m⁻². Para el cálculo del ahorro del consumo eléctrico, se utilizó la tarifa de alto consumo de la región sur y peninsular de México correspondiente al mes de mayo del 2018 (\$4.209 MXN por kWh) [50]. Para el cálculo de las reducciones en las emisiones de CO₂ se utilizó el Factor de Emisión del Sistema Eléctrico Nacional del año 2018 (1 kWh = 0.527 kg de CO₂) [51].

De acuerdo a los resultados en el ahorro en el consumo eléctrico el costo de inversión se recupera en ~10 años, debido a que, 1 m² de PCM RT35 o RT44HC, en forma de panel cuesta ~158 euros equivalente a ~\$3400 MXN (a fecha de marzo del 2019) (ver Anexo C).

Tabla 4.5 Análisis del flux de calor de los casos con PCM RT35 en la semana de primavera.

	Caso s/PCM	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso E
Flux de calor promedio (W m ⁻²)	60.87	52.24	52.31	52.33	52.33	52.29
Ganancia de calor (kWh m ⁻²)	10.23	8.77	8.78	8.79	8.79	8.78
Reducción en la ganancia de calor (kWh m ⁻²)	-	1.449	1.440	1.435	1.435	1.441
Ahorro (\$/m ²) *	-	6.10	6.06	6.03	6.03	6.06
Reducción de CO ₂ (kg m ⁻²)*	-	0.763	0.758	0.756	0.756	0.759
Reducción en la ganancia de calor (% m ⁻²)	-	14.17	14.08	14.03	14.03	14.09

*Para una tarifa de \$4.209 MNX [50] y considerando que 1 kWh = 0.527 kg de CO₂ [51].

Tabla 4.6 Análisis del flux de calor de los casos con PCM RT44HC en la semana de primavera.

	Caso s/PCM	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso E
Flux de calor promedio (W m ⁻²)	60.87	52.36	52.44	52.52	52.62	52.73
Ganancia de calor (kWh m ⁻²)	10.23	8.79	8.81	8.82	8.84	8.85
Reducción en la ganancia de calor (kWh m ⁻²)	-	1.430	1.416	1.403	1.387	1.367
Ahorro (\$/m ²) *	-	6.01	5.95	5.90	5.83	5.75
Reducción de CO ₂ (kg m ⁻²)*	-	0.753	0.746	0.739	0.730	0.720
Reducción en la ganancia de calor (% m ⁻²)	-	13.98	13.85	13.71	13.56	13.37

*Para una tarifa de \$4.209 MNX [50] y considerando que 1 kWh = 0.527 kg de CO₂ [51].

En el trabajo reportado por Mourid y Alami [6], se obtuvo una reducción del flux de calor de 88% para un techo expuesto a una temperatura máxima de 37°C e irradiancia solar de 900 W m⁻². Sin embargo, este resultado se obtuvo en una configuración con recubrimiento reflectivo y material aislante. Para el techo analizado por Elarga *et al.* [18] expuesto a un intervalo de temperatura ambiente entre 16-32°C e irradiancia solar de 1000 W m⁻², el pico de calor se redujo en un 59%. No obstante, la configuración tenía material aislante y además una capa de aire de 7 cm de espesor.

4.3 Semana de verano

La variación de la temperatura ambiente (T_{∞}) e irradiancia solar (I_{sol}) durante la semana de verano se ilustra en la Figura 4.13, donde se observan temperaturas e irradiancias máximas en el rango de 40-42°C y 922-1106 W m⁻², respectivamente, y temperaturas mínimas en el rango de 23-25°C. La oscilación de la temperatura ambiente y radiación solar muestran un comportamiento uniforme a lo largo de la semana; sin diferencia notable entre los picos de ambas variables.

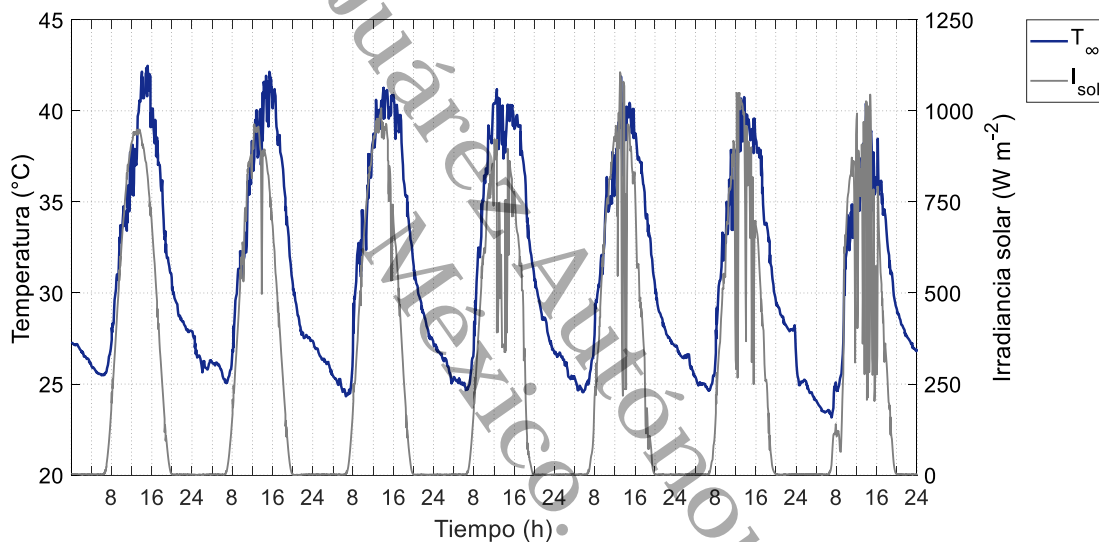


Figura 4.13 Temperatura e irradiancia solar en la semana de verano (23-29 de julio del 2018).

4.3.1 Análisis de la temperatura

La Tabla 4.7 contiene las temperaturas máximas de la superficie exterior e interior para cada uno de los casos analizados durante la semana de verano. Para el techo convencional de concreto, mostrado en la Figura 4.14, las temperaturas máximas de la superficie exterior e interior son en promedio de 60°C y 46°C.

Para los casos con PCM RT35, de acuerdo a la Tabla 4.7, los valores mayores de temperaturas máximas de la superficie exterior pertenecen al Caso A, y los valores más bajos al Caso E. A su vez, esto influye para que en el Caso A el PCM

RT35 esté sometido a temperaturas máximas de 63°C (ver T_{IS} en Figura 4.15), y en el Caso E a temperaturas máximas de 52°C (ver T_{IS} en Figura 4.16). Por lo cual, la diferencia entre la temperatura máxima del PCM y la temperatura de operación máxima permisible es 2°C para el Caso A, y 13°C para el Caso E.

Tabla 4.7 Temperaturas máximas y tiempos de retraso de los casos analizados durante la semana de verano (23-29 de julio del 2018).

Temperaturas máximas promedio de la superficie exterior (°C)					
Caso s/PCM	60.25				
	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso E
PCM RT35	63.77	62.73	61.79	60.93	60.24
PCM RT44	62.18	60.98	60.53	60.48	60.50
Temperaturas máximas promedio de la superficie interior (°C)					
Caso s/PCM	46.48				
	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso E
PCM RT35	42.39	42.62	42.76	42.84	42.81
PCM RT44	41.26	41.15	40.91	40.60	40.47
Tiempos de retraso promedio (min)					
Caso s/PCM	136				
	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso E
PCM RT35	202	178	171	168	162
PCM RT44	191	196	208	224	240

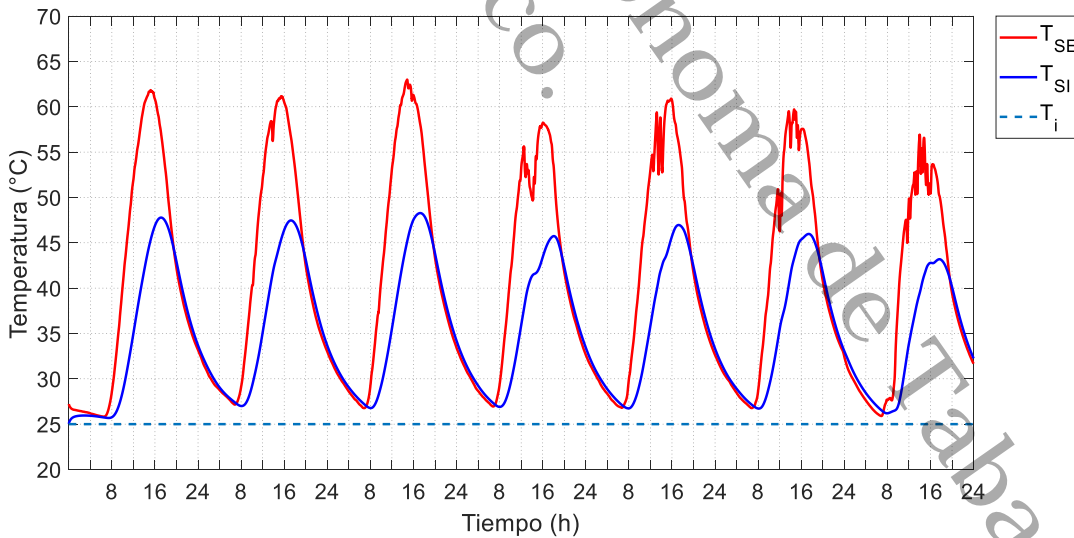


Figura 4.14 Evolución de la temperatura en el techo de referencia en la semana de verano.

Las temperaturas máximas de la superficie interna entre los casos con PCM RT35 son muy cercanas; la mayor diferencia es de aproximadamente 0.5°C , siendo el Caso A el que mostró los valores más bajos. Comparado con el techo de referencia, el PCM RT35 disminuye, en promedio, 4°C la temperatura de la superficie interna. El mayor y menor tiempo de retraso para el PCM RT35 se obtuvo en el Caso A (202 min) y Caso E (162 min), respectivamente.

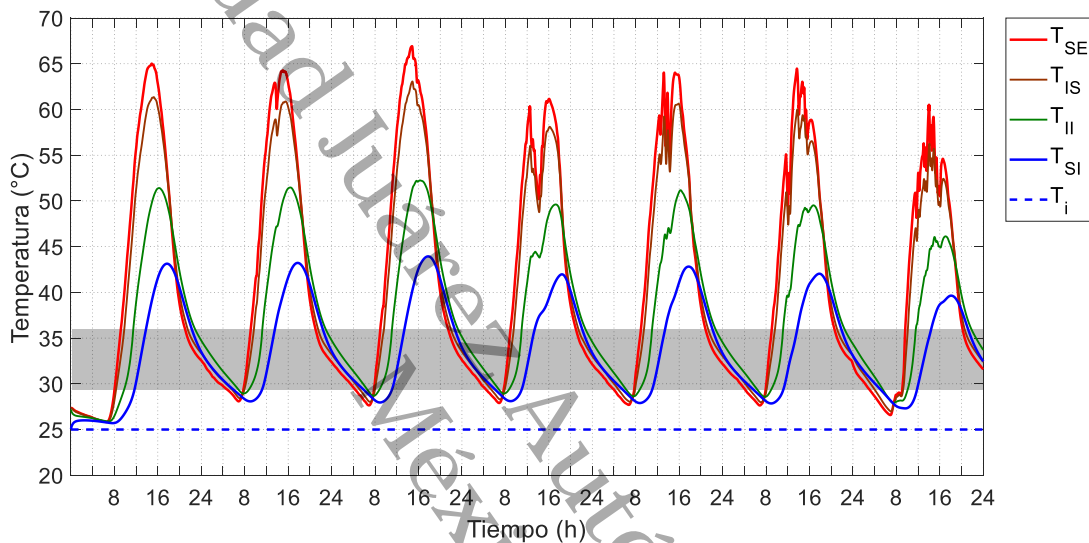


Figura 4.15 Evolución de la temperatura del Caso A con PCM RT35 en la semana de verano.

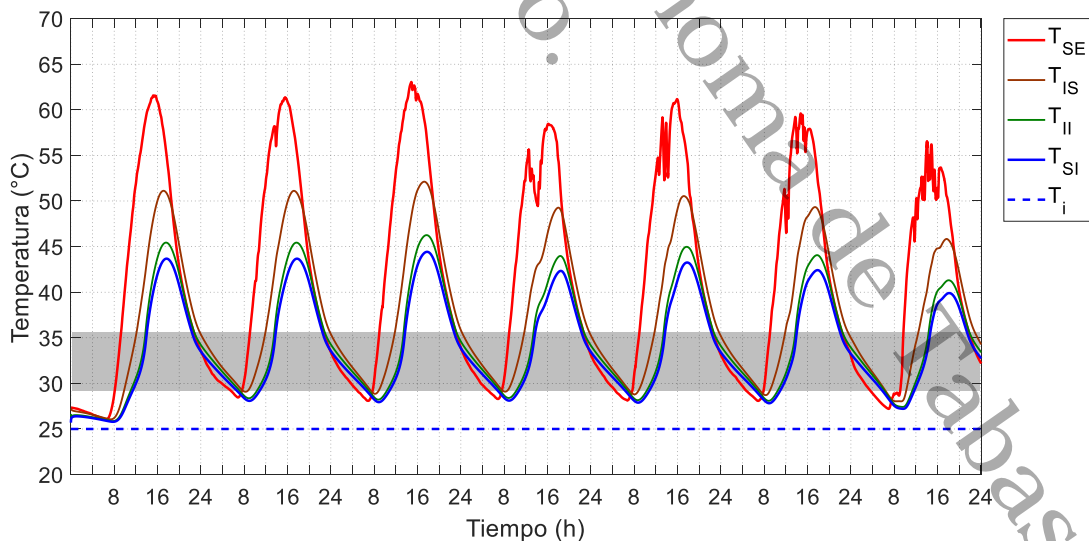


Figura 4.16 Evolución de la temperatura del Caso E con PCM RT35 en la semana de verano.

En la Figura 4.15 y Figura 4.16, la distancia entre una onda y otra, señala el amortiguamiento térmico de cada capa de material. Para el Caso A, la capa de PCM presenta las mayores diferencias de temperatura (superiores a 8°C en todos los días). Por ejemplo, para el primer día de la semana de verano, la capa superior de concreto, la capa intermedia de PCM, y la capa inferior de concreto, reducen el pico de temperatura ~4°C, ~11.5°C y ~10.5°C, respectivamente. Nótese que 1 cm de PCM tiene mayor reducción de temperatura que 10 cm de concreto. Para los demás casos, por ejemplo, en el Caso E (Figura 4.16) el incremento del espesor de la capa de concreto sobre el PCM, causa que el mayor amortiguamiento de temperatura tenga lugar en la capa superior de concreto y no en la de PCM.

De igual forma como fue presentado en la semana de primavera, el área sombreada de en la Figura 4.15 y Figura 4.16, señala el rango de cambio de fase del PCM RT35. La relación de T_{IS} y T_{II} con esta área permite evaluar el comportamiento de la fracción líquida del PCM. En la Tabla 4.8 se presenta el porcentaje promedio en que el PCM completó sus ciclos de cambio de fase durante la semana de verano, el tiempo que duró la fusión y solidificación del PCM, así como el periodo en que el PCM permaneció en estado líquido y sólido. Se observa que el Caso A, B y C completan al 100% sus ciclos de cambio de fase. En los casos D y E durante la liberación de calor en el primer y tercer día, el PCM no llega totalmente a su estado sólido de forma muy similar a lo ocurrido con el Caso E en la semana de primavera (ver Figura 4.5).

Tabla 4.8 Fracción líquida de los casos con PCM RT35 en la semana de verano.

Configuración	Ciclo de cambio de fase (%)	Tiempo de fusión (hh:mm)	Tiempo en estado líquido (hh:mm)	Tiempo de solidificación (hh:mm)	Tiempo en estado sólido (hh:mm)
Caso A	100	03:02	10:18	09:14	01:14
Caso B	100	03:30	10:18	08:45	01:12
Caso C	100	04:00	10:10	08:21	01:14
Caso D	99.98	04:26	09:38	08:26	01:45
Caso E	99.93	04:38	08:50	09:02	01:48

La Tabla 4.8 muestra que en cualquiera de los casos el periodo de fusión, en promedio, no sobrepasa las 5 h. El orden descendente en que los casos alcanzan la temperatura de fusión (29°C), en todos los días, es A, B, C, D y E. Lo cual explica por qué, el Caso A y Caso E presentan el menor y mayor periodo de fusión, respectivamente. La etapa en que el PCM permanece en estado líquido dura entre 9 a 10 h. La Tabla 4.8 también menciona que la etapa de solidificación toma alrededor de 8 a 9 h. Además, para todos los casos, el periodo de solidificación es significativamente mayor al periodo de fusión. El periodo en que el PCM se encuentra en fase sólida es de 1 a 2 h. La corta duración es relacionada con el breve periodo en que la temperatura ambiente se mantiene en valores que permiten que el PCM se mantenga por debajo de su temperatura de cambio de fase (29°C).

Con relación a los casos con PCM RT44HC, la Tabla 4.7 muestra que los valores mayores de T_{SE} pertenecen al Caso A. Las máximas T_{SE} en los demás casos (B, C, D y E) no muestran una notable diferencia entre sí, siendo el Caso D, el que tiene las T_{SE} más bajas. El efecto de la masa térmica del concreto influye en las temperaturas a las que es expuesto el PCM, a temperaturas máximas de 61°C en el Caso A (ver T_{IS} en Figura 4.17), y a temperaturas máximas de 51°C en el Caso D (ver T_{IS} en Figura 4.18).

En cuanto a los valores máximos de T_{SI} , la diferencia entre casos con PCM RT44HC es menor a 1.3°C ; sin embargo, en comparación con el valor máximo de T_{SI} del caso de referencia muestran una diferencia de 6°C . En la Tabla 4.7 se observa que, contrario a lo que ocurre en los casos con PCM RT35, el mayor y menor tiempo de retraso para el PCM RT44HC se presenta en el Caso E (240 min) y Caso A (191 min), respectivamente.

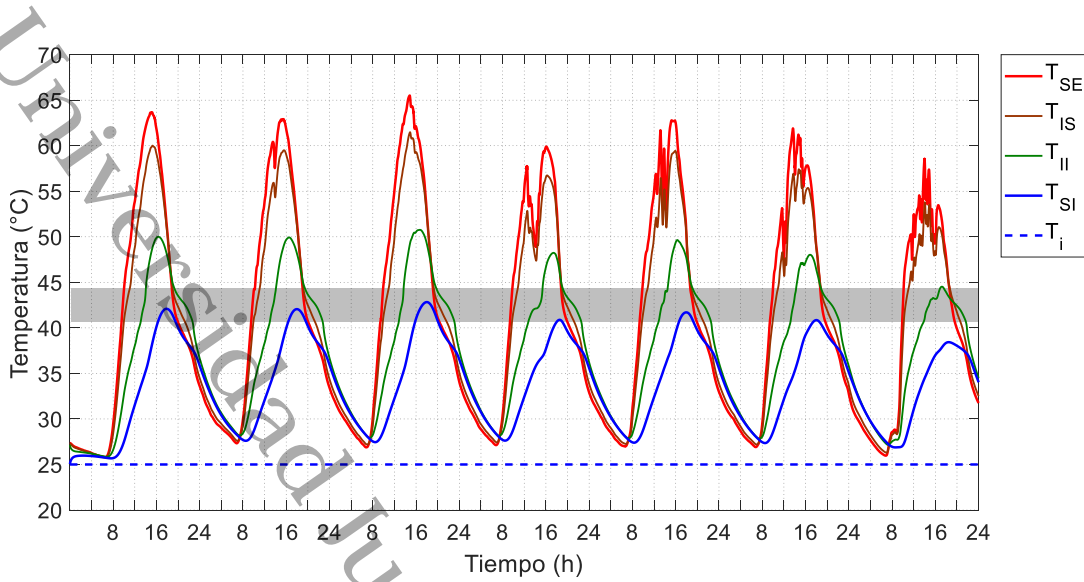


Figura 4.17 Evolución de la temperatura del Caso A con PCM RT44HC en la semana de verano.

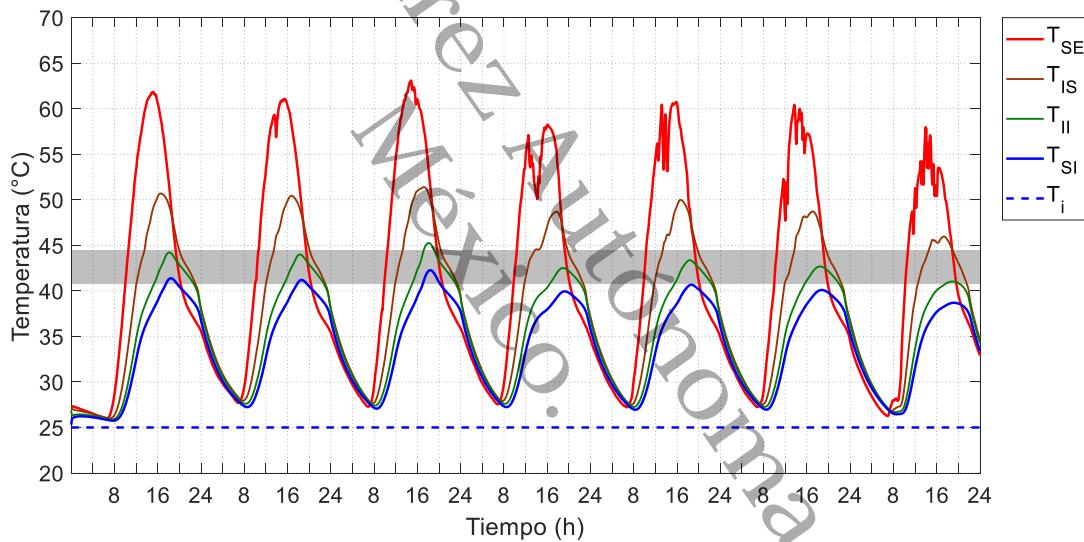


Figura 4.18 Evolución de la temperatura del Caso D con PCM RT44HC en la semana de verano.

En la Tabla 4.9 se resume el comportamiento de la fracción líquida de cada uno de los casos con PCM RT44HC durante la semana de verano. La tabla muestra que, solo el Caso A completa al 100% sus ciclos de cambio de fase. En los demás casos la fusión del PCM RT44HC es parcial; conforme la capa de PCM se aproxima hacia la superficie interior, aumentan el número de ciclos de cambio de fase en que el PCM no se funde completamente. Por ejemplo, en el Caso E, el PCM RT44HC no completa su fusión en ninguno de los días (ver Figura 4.19).

Tabla 4.9 Fracción líquida de los casos con PCM RT44HC en la semana de verano.

Configuración	Ciclo de cambio de fase (%)	Tiempo de fusión (hh:mm)	Tiempo en estado líquido (hh:mm)	Tiempo de solidificación (hh:mm)	Tiempo en estado sólido (hh:mm)
Caso A	100	04:13	04:35	03:21	09:17
Caso B	99	04:43	04:18	03:16	10:03
Caso C	97	05:05	03:00	03:28	10:27
Caso D	91.4	05:49	02:01	03:48	08:20
Caso E	79.6	06:02	00:00	03:46	09:01

En la Tabla 4.9 se observa también que, la etapa de solidificación del PCM RT44HC toma de 3 a 4 h, para posteriormente permanecer en estado sólido alrededor de 8 a 10 h con 30 min, sin una tendencia notable entre los casos. Este comportamiento es similar a lo mostrado en la semana de primavera bajo el mismo PCM RT44, donde el PCM permanece durante mayor tiempo en estado sólido.

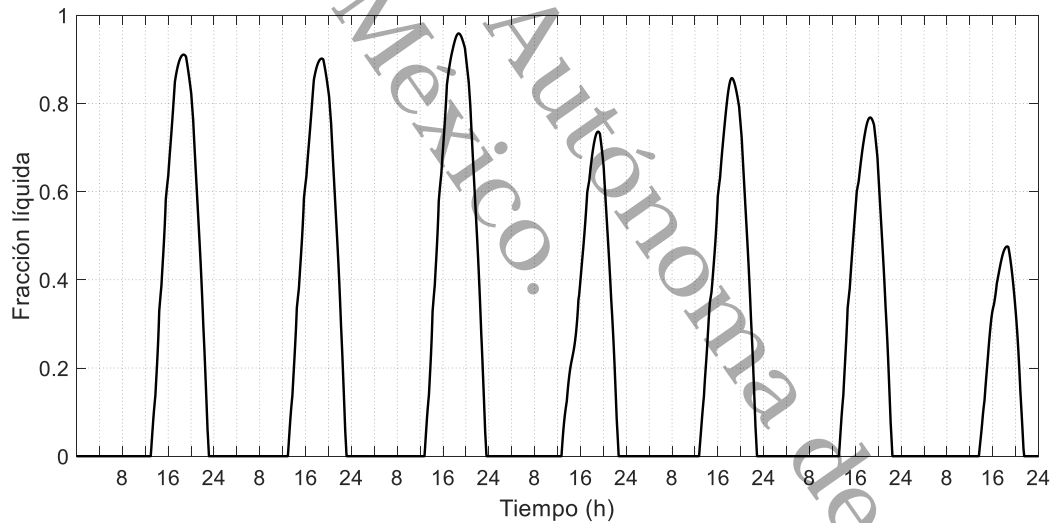


Figura 4.19 Evolución de la fracción líquida del Caso E PCM RT44HC en la semana de verano.

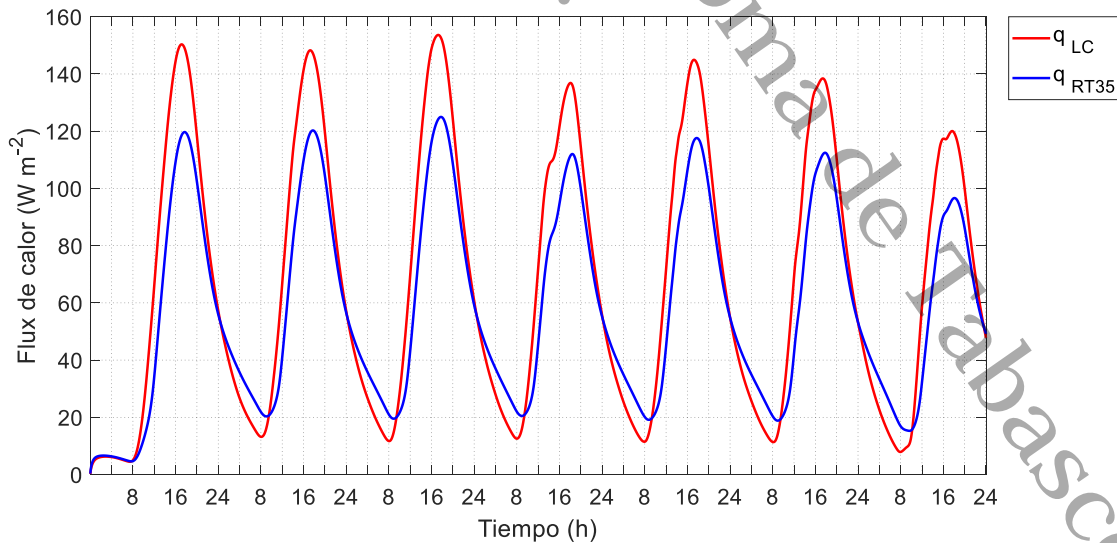
4.3.2 Análisis del flux de calor

La Tabla 4.10 muestra la reducción de los picos de calor durante la semana de verano para los casos analizados con PCM.

Tabla 4.10 Reducción del pico de calor durante la semana de verano.

	Reducción promedio del pico de calor (%)				
	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso E
PCM RT35	19.03	17.96	17.30	16.97	17.11
PCM RT44	24.34	24.86	25.96	27.32	27.83

En los casos con PCM RT35, se observa que los picos de calor se redujeron entre 17 y 19%. En la Figura 4.20, que ilustra la evolución del flux de calor en el Caso A, se observa que, cerca de la media noche, el flux de calor del caso con PCM (q_{RT35}) es mayor al flux de calor del caso de referencia (q_{LC}), durante un promedio de ocho horas. El caso de referencia al tener una menor capacidad de almacenamiento de energía ocasiona valores mayores de flux de calor durante las horas de sol. A su vez, el menor almacenamiento de energía causará que el calor a liberar por el caso de referencia sea menor que el calor a liberar por el caso con PCM. El comportamiento de la evolución del flux de calor para los demás casos es similar al Caso A (descrito en las líneas anteriores); la diferencia es la altura de los picos de calor, la cual aumenta al aproximarse la capa de PCM hacia la superficie interior del techo.

**Figura 4.20** Evolución del flux de calor del Caso A PCM RT35 durante la semana de verano.

Por otra parte, a partir de la Tabla 4.10 para el PCM RT44HC, se tiene que el Caso E es el que produce la mayor reducción de los picos de calor (28%). Mientras que el Caso A, es el que muestra el menor porcentaje de reducción (24%). En la Figura 4.21 se compara la evolución del flux de calor del Caso A PCM RT44HC (q_{RT44}) y la del caso de referencia (q_{LC}). La evolución del flux de calor en los demás casos sigue el mismo comportamiento. Sin embargo, conforme la capa de PCM se ubica más próxima a la superficie interior los picos de flux de calor se reducen, y aumenta la diferencia en que el flux de calor del PCM sobrepasa al flux de calor del caso de referencia.

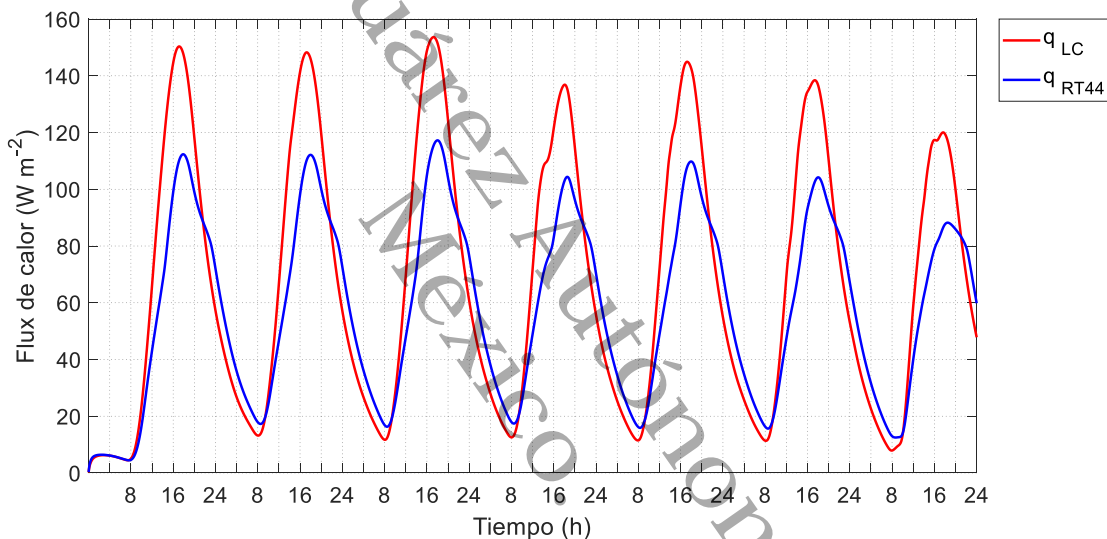


Figura 4.21 Evolución del flux de calor del Caso A PCM RT44HC en la semana de verano.

Aunque la altura de los picos del flux de calor del Caso A PCM RT44HC es menor a la altura de los picos del Caso A PCM RT35, como se observa en la Figura 4.22; el periodo durante el cual el flux de calor del caso con PCM es mayor al del caso de referencia, es más extenso en el caso con PCM RT44HC. Este comportamiento fue confirmado con los parámetros contenidos en la Tabla 4.11 y Tabla 4.12. Donde se identifica que, la ganancia de calor total en el Caso A con PCM RT35 es menor a la del Caso A con PCM RT44HC. Se observa que no hay diferencias significativas entre los resultados de un mismo PCM. En los casos con PCM RT35, se obtuvo una reducción en las cargas térmicas de 1.554-1.570

kWh m^{-2} , lo cual indica un ahorro semanal de \$7.04 a \$7.11 MXN por m^{-2} , y una reducción en las emisiones de CO_2 de 0.818 a 0.827 kg m^{-2} . En los casos con PCM RT44HC, las cargas térmicas se redujeron entre 1.455-1.545 kWh m^{-2} , equivalente a un ahorro de electricidad de \$5.59-\$7.00 MXN por m^{-2} , y a una reducción en las emisiones de CO_2 de 0.766-0.814 kg m^{-2} . Para el cálculo del ahorro del consumo eléctrico, se utilizó la tarifa de alto consumo de la región sur y peninsular de México correspondiente al mes de julio del 2018 (\$4.534 MXN por kWh) [50].

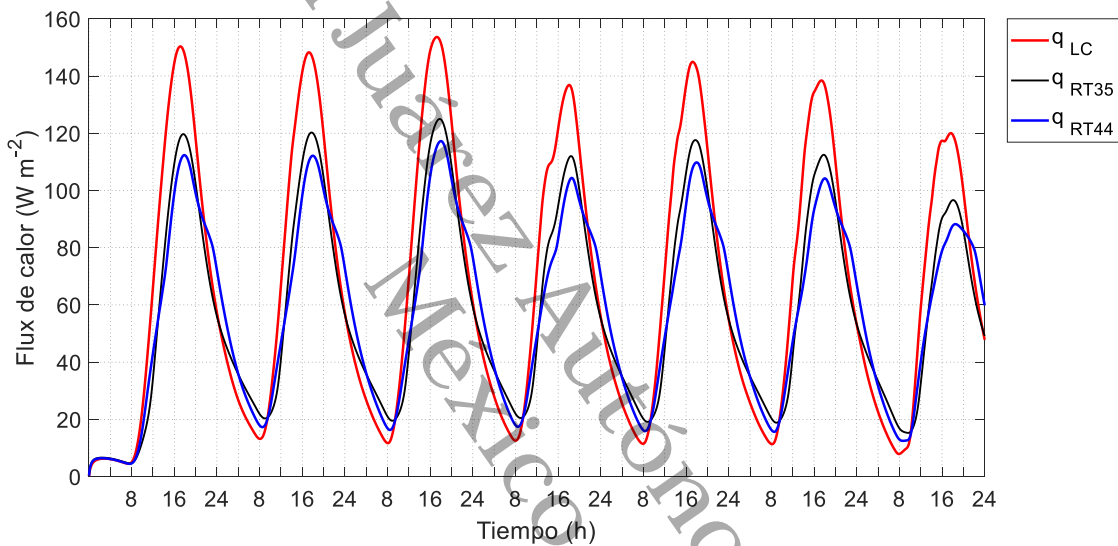


Figura 4.22 Evolución del flux de calor del caso de referencia, Caso A con PCM RT35 y PCM RT44HC durante la semana de verano.

Tabla 4.11 Análisis del flux de calor de los casos con PCM RT35 para la semana de verano.

	Caso s/PCM	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso E
Flux de calor promedio (W m ⁻²)	67.22	57.88	57.93	57.96	57.98	57.96
Ganancia de calor (kWh m ⁻²)	11.29	9.72	9.73	9.73	9.73	9.73
Reducción en la ganancia de calor (kWh m ⁻²)	-	1.570	1.561	1.555	1.554	1.556
Ahorro (\$/m ²) *	-	7.11	7.07	7.05	7.04	7.05
Reducción de CO ₂ (kg* m ⁻²)	-	0.913	0.908	0.905	0.904	0.905
Reducción en la ganancia de calor (% m ⁻²)	-	13.90	13.82	13.77	13.76	13.77

*Para una tarifa de \$4.534 MNX y considerando que 1 kWh = 0.527 kg de CO₂.

Tabla 4.12 Análisis del flux de calor de los casos con PCM RT44 para la semana de verano.

	Caso s/PCM	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso E
Flux de calor promedio (W m ⁻²)	67.22	58.03	58.16	58.31	58.45	58.56
Ganancia de calor (kWh m ⁻²)	11.29	9.74	9.77	9.79	9.81	9.83
Reducción en la ganancia de calor (kWh m ⁻²)	-	1.545	1.522	1.497	1.474	1.455
Ahorro (\$/m ²) *	-	7.00	6.90	6.78	6.68	6.59
Reducción de CO ₂ (kg* m ⁻²)	-	0.899	0.886	0.871	0.858	0.847
Reducción en la ganancia de calor (% m ⁻²)	-	13.67	13.47	13.25	13.05	12.88

*Para una tarifa de \$4.534 MNX y considerando que 1 kWh = 0.527 kg de CO₂.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este proyecto se analizó numéricamente la transferencia de calor en un techo de concreto con una capa intermedia de PCM, expuesto a condiciones de clima cálido húmedo de la ciudad de Cunduacán, Tabasco. Se estudiaron cinco diferentes posiciones de la capa de PCM dentro del techo, con dos rangos de temperaturas de cambio de fase; 29-36°C y 41-44°C. Para resolver el modelo matemático se desarrolló y validó un código computacional.

Con base al análisis de los resultados, se identificó que las temperaturas de la superficie exterior y las temperaturas que alcanza el PCM, incrementan conforme la capa de PCM se aproxima a la superficie exterior. Lo cual se atribuye a la baja conductividad térmica del PCM, y su capacidad de acumulación de calor por unidad de volumen. La posición de la capa de PCM no influye notablemente en las temperaturas máximas de la superficie interior en ambos PCM. Sin embargo, comparado con el caso de referencia, la temperatura de la superficie interior se redujo 4°C en los casos con PCM RT35, y 5-6°C en los casos con PCM RT44HC. El análisis de la fracción líquida mostró que el PCM RT35 completa sus ciclos de cambio de fase entre un 96-100%. En los casos con PCM RT44HC se identificó que conforme la capa de PCM RT44HC se posiciona más próxima a la superficie interna del techo, una mayor fracción de PCM queda sin fusionarse. Esta fracción de PCM que permanece en estado sólido, almacenó calor en forma de calor sensible, es decir, funcionó como un material convencional.

En los casos con PCM RT35, la altura de los picos de flux de calor aumenta al aproximarse la capa de PCM hacia la superficie interior del techo. En los casos con PCM RT44HC, ocurre lo contrario, conforme la capa de PCM se ubica más próxima a la superficie interior, los picos de flux de calor se reducen. Sin embargo, la diferencia entre casos del mismo PCM se encuentra entre 1 y 2%. Con respecto a las ganancias de calor se encontró que no hay diferencias significativas entre los resultados; para los casos con PCM RT35 y para los casos

con PCM RT44HC, las ganancias de calor se redujeron entre 13.76-14.17%, y 12.88-13.98%, respectivamente.

Para las configuraciones de techo de concreto con una capa de PCM intermedia expuesto a condiciones de clima cálido húmedo, se encontró que el Caso E con PCM RT35, es la configuración más favorable, desde un punto de vista térmico y operativo. Respecto al caso de referencia, el Caso E con PCM RT35 mostró una reducción en las cargas térmicas de 1.441 kWh m⁻² (13.77%) en la semana de primavera, y 1.556 kWh m⁻² (14.09%) en la semana de verano, equivalente a un ahorro en el consumo eléctrico de \$6.06 m⁻²-\$7.05 m⁻². Con el ahorro semanal en el consumo de eléctrico obtenido en el Caso E con PCM RT35, \$6.06 m⁻²-\$7.05 m⁻², el costo por m² de PCM se recuperaría en alrededor de 10 años (este monto no incluye los gastos de instalación). En cuanto a las emisiones de CO₂, el Caso E con PCM RT35 mostró una reducción de 0.759-0.820 kg m². Para cada ciclo de almacenamiento y liberación de calor, el PCM en esta configuración completó su cambio de fase entre un 97-99%. Lo cual indica un aprovechamiento óptimo en la capacidad de almacenamiento de calor del PCM. Además, el Caso E presentó el mayor margen de seguridad de operación del PCM RT35; una diferencia de 16-18°C entre la temperatura máxima alcanzada en esta configuración y la temperatura de operación máxima permisible.

En este estudio, se confirmó que los PCM son capaces de atenuar y retardar los picos de calor, y reducir las cargas térmicas. Sin embargo, durante su transición de sólido a líquido, una cantidad significativa del calor almacenado es liberado hacia el interior. Como posible solución a este problema, se recomienda añadir un material aislante en una capa inferior al PCM. Se recomienda también, estudiar el comportamiento térmico del PCM en conjunto con otros materiales que incrementen la reducción de las cargas por enfriamiento y de las reducciones en las emisiones de CO₂. Por ejemplo, el uso de un recubrimiento reflectivo en la superficie superior externa, o la técnica de construcción de techo tipo vigueta-bovedilla.

REFERENCIAS

- [1] O. Buen, F. Hernández, J. Navarrete, Análisis de la evolución del consumo eléctrico del sector residencial entre 1982 y 2014 e impactos de ahorro de energía por políticas públicas, México, 2016.
- [2] A. Bland, M. Khzouz, T. Statheros, E. I. Gkanas, PCMs for Residential Building Applications: A Short Review Focused on Disadvantages and Proposals for Future Development, *Buildings* 7 (2017) 78.
- [3] C. C. N. de N. para la P. y U. R. de los R. E. (CCNNPURRE), Norma Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011, Eficiencia energética en edificaciones.- Envoltorio de edificios para uso habitacional. México: Diario Oficial de la Federación, 2011.
- [4] F. Pacheco-Torgal, C. G. Granqvist, B. P. Jelle, G. P. Vanoli, J. Kurnitski, *Cost-Effective Energy-Efficient Building Retrofitting*, Elsevier, 2017.
- [5] S. E. Kalnæs, B. P. Jelle, Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities, *Energy Build.* 94 (2015) 150-176.
- [6] A. Mourid, M. El Alami, Thermal behavior of a building provided with phase-change materials on the roof and exposed to solar radiation, *Sol. Energy* 139 (6) (2017).
- [7] Y. Cui, J. Xie, J. Liu, J. Wang, S. Chen, A review on phase change material application in building, *Adv. Mech. Eng.* 9 (6) (2017) 1–15.
- [8] Y. A. Çengel, A. J. Ghajar, *Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones*, 4ta ed., McGraw-Hill, 2011.
- [9] A. Lira-Oliver, S. Vilchis-Martínez, Thermal Inertia Performance Evaluation of Light-Weighted Construction Space Envelopes Using Phase Change Materials in Mexico City's Climate, *Technologies* 5 (2017) 69.
- [10] S. D. Zwanzig, Y. Lian, E. G. Brehob, Numerical simulation of phase change material composite wallboard in a multi-layered building envelope, *Energy Convers. Manag.* 69 (2013) 27–40.
- [11] A. Tokuç, S. C. Yesügey, T. Başaran, An evaluation methodology proposal for building envelopes containing phase change materials: the case of a flat roof in Turkey's climate zones, *Archit. Sci. Rev.* 60 (5) (2017) 408–423.
- [12] K. Reddy, V. Mudgal, T. Mallick, Thermal Performance Analysis of Multi-Phase Change Material Layer-Integrated Building Roofs for Energy

- Efficiency in Built-Environment, *Energies* 10 (2017) 1367.
- [13] L. Dong, Z. Yumeng, L. Changyu, W. Guozhong, Numerical analysis on thermal performance of roof contained PCM of a single residential building, *Energy Convers. Manag.* 100 (2015) 147–156.
- [14] L. Zhu, Y. Yang, S. Chen, Y. Sun, Numerical study on the thermal performance of lightweight temporary building integrated with phase change materials, *Appl. Therm. Eng.* 138 (2018) 35–47.
- [15] H. J. Akeiber, S. E. Hosseini, H. M. Hussien, M. A. Wahid, A. T. Mohammad, Thermal performance and economic evaluation of a newly developed phase change material for effective building encapsulation, *Energy Convers. Manag.* 150 (2017) 48–61.
- [16] S. Ramakrishnan, X. Wang, J. Sanjayan, J. Wilson, Experimental and Numerical Study on Energy Performance of Buildings Integrated with Phase Change Materials, *Energy Procedia* 105 (2017) 2214–2219.
- [17] E. Meng, H. Yu, B. Zhou, Study of the thermal behavior of the composite phase change material (PCM) room in summer and winter, *Appl. Therm. Eng.* 126 (2017) 212–225.
- [18] H. Elarga, S. Fantucci, V. Serra, R. Zecchin, E. Benini, Experimental and numerical analyses on thermal performance of different typologies of PCMs integrated in the roof space, *Energy Build.* 150 (2017) 546–557.
- [19] E. Solgi, S. Memarian, G. N. Moud, Financial viability of PCMs in countries with low energy cost: A case study of different climates in Iran, *Energy Build.* 173 (2018) 128–137.
- [20] A. Gounni, M. El Alami, The optimal allocation of the PCM within a composite wall for surface temperature and heat flux reduction: An experimental Approach, *Appl. Therm. Eng.* 127 (2017) 1488–1494.
- [21] X. Jin, M. A. Medina, X. Zhang, Numerical analysis for the optimal location of a thin PCM layer in frame walls, *Appl. Therm. Eng.* 103 (2016) 1057–1063.
- [22] J. Xie, W. Wang, J. Liu, S. Pan, Thermal performance analysis of PCM wallboards for building application based on numerical simulation, *Sol. Energy* 162 (2018) 533–540.
- [23] Y. Kharbouch, L. Ouhsaine, A. Mimet, M. El Ganaoui, Thermal performance investigation of a PCM-enhanced wall/roof in northern Morocco, *Build. Simul.* 11 (6) (2018) 1083–1093.

- [24] C. Piselli, V. L. Castaldo, A. L. Pisello, How to enhance thermal energy storage effect of PCM in roofs with varying solar reflectance: Experimental and numerical assessment of a new roof system for passive cooling in different climate conditions, *Sol. Energy* (2018), <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.06.047>.
- [25] M. Alam, J. Sanjayan, P. X. W. Zou, S. Ramakrishnan, J. Wilson, Evaluating the passive and free cooling application methods of phase change materials in residential buildings: A comparative study, *Energy Build.* 148 (2017) 238–256.
- [26] S. Lu, Y. Chen, S. Liu, X. Kong, Experimental research on a novel energy efficiency roof coupled with PCM and cool materials, *Energy Build.* 127 (2016) 159–169.
- [27] M. I. Hasan, H. O. Basher, A. O. Shdhan, Experimental investigation of phase change materials for insulation of residential buildings, *Sustain. Cities Soc.* 36 (2018) 42–58.
- [28] A. Pasupathy, L. Athanasius, R. Velraj, R. V. Seeniraj, Experimental investigation and numerical simulation analysis on the thermal performance of a building roof incorporating phase change material (PCM) for thermal management, *Appl. Therm. Eng.* 28 (5-6) (2008) 556–565.
- [29] A. Karaoulis, Investigation of Energy Performance in Conventional and Lightweight Building Components with the use of Phase Change Materials (PCMS): Energy Savings in Summer Season, *Procedia Environ. Sci.* 38 (2017) 796–803.
- [30] M. H. Chung, J. C. Park, Development of PCM cool roof system to control urban heat island considering temperate climatic conditions, *Energy Build.* 116 (2016) 341–348.
- [31] F. Incropera, D. DeWitt, *Fundamentos de transferencia de calor*, 4ta ed., Prentice Hall, México, 1999.
- [32] J. Manrique, *Transferencia de calor*, 2da ed., Oxford, México, 2002.
- [33] Y. Bayazıtöđlu, M. N. Öziřık, *Elements of heat transfer*, McGraw-Hill, 1988.
- [34] J. Xamán, M. Gijón-Rivera, *Dinámica de fluidos computacional para ingenieros*, Palibrio, 2016.
- [35] R. Siegel, J. Howell, *Thermal radiation heat transfer*, 4ta ed., McGraw-Hill, EUA, 1972.

- [36] M. Modest, Radiative heat transfer, 3ra ed., Elsevier, EUA, 2013.
- [37] J. Schröder, K. Gawron, Latent heat storage, *Int. J. Energy Res.* 5 (2) (1981) 103–109.
- [38] H. Hu, S. A. Argyropoulos, Mathematical modelling of solidification and melting: a review, *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* 4 (1996) 371–396.
- [39] D. Poirier, M. Salcudean, On numerical methods used in mathematical modeling of phase change in liquid metals, *J. Heat Transfer* 110 (1988) 562–570.
- [40] INAFED, Medio Físico-Tabasco.
<http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM27tabasco/mediofisico.html> (Consultado: 25-sep-2018).
- [41] INEGI, Clima en Tabasco, Banco de información económica, México, 2017.
- [42] E. Angel-Meraz, L. Veleza, M. Acosta-Alejandro, Agresividad atmosférica basada en el tiempo de humectación del clima tropical húmedo del estado de Tabasco, *Univ. y Ciencia. Trópico Húmedo* 25 (2) (2009) 1–11.
- [43] Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), Estudio de Caracterización del Uso de Aire Acondicionado en Viviendas de Interés Social en México. México, 2016.
- [44] C. Servicio Meteorológico Nacional, Temperatura máxima promedio a nivel nacional y por entidad federativa 2015-2018.
<http://smn.cna.gob.mx/tools/DATA/Climatología/Pronóstico climático/Temperatura y Lluvia/TMAX/>.pdf (Consultado: 12-abr-2018).
- [45] V. R. Voller, L. Shadabi, Enthalpy methods for tracking a phase change boundary in two dimensions, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 11 (3) (1984) 239–249.
- [46] S. V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, 1ra ed., Hemisphere Publishing Corporation, EUA, 1980.
- [47] B. Carnahan, H. A. Luther, J. Wilkes, Approximation of the Solution of Partial Differential Equations, *Applied Numerical Methods*, Krieger Publishing Company, Florida, 1990 (Capítulo 7).
- [48] I. Hernández-Pérez, J. Xamán, E. V Macías-Melo, K. M. Aguilar-Castro, Experimental thermal evaluation of building roofs with conventional and reflective coatings, *Energy Build.* 158 (2018) 569–579.

- [49] Q. Wang, R. Wu, Y. Wu, C. Y. Zhao, Parametric analysis of using PCM walls for heating loads reduction, *Energy Build.* 172 (2018) 328–336.
- [50] Comisión Federal de Electricidad, Tarifa DAC. <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRECasa/Tarifas/TarifasDAC.aspx> (Consultado: 09-Abr-2019).
- [51] Comisión Reguladora de Energía, Factor de Emisión del Sistema Eléctrico Nacional 2018, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, 2019.
- [52] Z. Younsi, H. Naji, A numerical investigation of melting phase change process via the enthalpy- porosity approach : Application to hydrated salts, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 86 (2017) 12–24.
- [53] O. Pop, L. F. Tutunaru, M. Balan, Numerical Model for Solidification and Melting of PCM Encapsulated in Spherical Shells, *Energy Procedia* 112 (2017) 336–343.
- [54] Y. Li, S. Liu, J. Lu, Effects of various parameters of a PCM on thermal performance of a solar chimney, *Appl. Therm. Eng.* 127 (2017) 1119–1131.
- [55] K. Kant, A. Shukla, A. Sharma, Heat transfer studies of building brick containing phase change materials, *Sol. Energy* 155 (2017) 1233–1242.
- [56] S. Guichard, F. Miranville, D. Bigot, B. Malet-Damour, K. Beddiar, H. Boyer, A complex roof incorporating phase change material for improving thermal comfort in a dedicated test cell, *Renew. Energy* 101 (2017) 450–461.
- [57] Z. Younsi, H. Naji, Simulation numérique du comportement thermique d'un mur de brique intégrant des microcapsules de matériaux à changement de phase via la méthode enthalpique, en: 25^o Congreso Francés de Térmica, Marsella, 2017.
- [58] Y. Li, S. Liu, Numerical study on thermal behaviors of a solar chimney incorporated with PCM, *Energy Build.* 80 (2014) 406–414.

Anexo A

PCM reportados en la
literatura

Tabla A.1. Propiedades termo físicas de PCM aplicados en algunos estudios experimentales y numéricos. Parte A.

Referencia	PCM	T_{pc}^* (°C)	L (J kg ⁻¹)	λ_{sl}^* (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	λ_l^* (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	ρ_{sl} (kg m ⁻³)	ρ_l (kg m ⁻³)	Cp_{sl} (J kg ⁻¹ °C ⁻¹)	Cp_l (J kg ⁻¹ °C ⁻¹)
[52]	PCM 27	27.0	172 420	0.57	0.81	1 710	1 530	1 754	2 225
[53]	RT20®	21.5	143 400	-	-	880	770	2 900	2 300
[54]	RT42®	38.0-43.0	174 000	0.20	0.20	760	760	2 000	2 000
[17]	SP 29®	28.0-30.0	190 000	0.60	0.60	1 530	1520	-	-
	RT18®	17.0-19.0	225 000	0.20	0.20	880	770	-	-
[55]	Parafina	28.2	245 000	0.35	0.14	814	775	1 934	2 196
	Ácido cúprico	32.0	152 700	0.37	0.15	1 018	888	1 900	2 400
	RT25	26.6	232 000	0.19	0.18	785	749	1 800	2 400
[18]	RT28®	27.0-29.0	250 000	-	-	-	-	2 000	2 000
	RT35®	34.0-36.0	160 000	-	-	-	-	2 000	2 000
[12]	302K	26.8-28.8	132 000	0.70	0.50	1 480	1 480	3 600	3 600
	305K	30.2-31.8	188 000	0.80	0.68	1 510	1 510	1 800	1 800
[56]	Dupont™ Energain®	23.4	71 000	0.22	0.18	-	-	3 134	2 833
[57]	Micronal® DS5001X	26.0	130 000	0.20	0.13	995	995	1 700	2 153

* El subíndice pc indica cambio de fase, sl indica la propiedad en estado sólido y l es la propiedad en estado líquido.

Tabla A.1. Propiedades termo físicas de PCM aplicados en algunos estudios experimentales y numéricos. Parte B.

Referencia	PCM	T_{pc}^* (°C)	L (J kg ⁻¹)	λ_{sl}^* (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	λ_l^* (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	ρ_{sl} (kg m ⁻³)	ρ_l (kg m ⁻³)	Cp_{sl} (J kg ⁻¹ °C ⁻¹)	Cp_l (J kg ⁻¹ °C ⁻¹)
[6]	DuPont Energain®	21.7-31.0	70 000	0.18	0.14	853	853	2 500	2 500
	RT25 Rubitherm®	22.0-26.0	146 000	0.20	0.20	880	760	2 000	2 000
[24]	RT31 Rubitherm®	27.0-33.0	163 000	0.20	0.20	880	760	2 000	2 000
	RT43 Rubitherm®	41.0-44.0	248 000	0.20	0.20	880	700	2 000	2 000
[25]	BioPCM macro-encapsulado	25.0	200 000	0.20	0.20	-	-	1 970	1 970
[21]	RT27 Rubitherm®	27.0	179 000	0.20	0.20	880	760	2 000	2 000
[58]	RT25 Rubitherm®	22.0 – 26.0	148 000	0.19	0.18	880	760	2 900	2 110
	RT42 Rubitherm®	38.0 – 43.0	174 000	0.20	0.20	880	760	1 800	2 400

* El subíndice pc indica cambio de fase, sl indica la propiedad en estado sólido y l es la propiedad en estado líquido.

Anexo B

Hojas técnicas de los
PCM analizados

PCM RT35

Data sheet



RT35



RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

We look forward to discussing your particular questions, needs and interests with you.

Properties for RT-line:

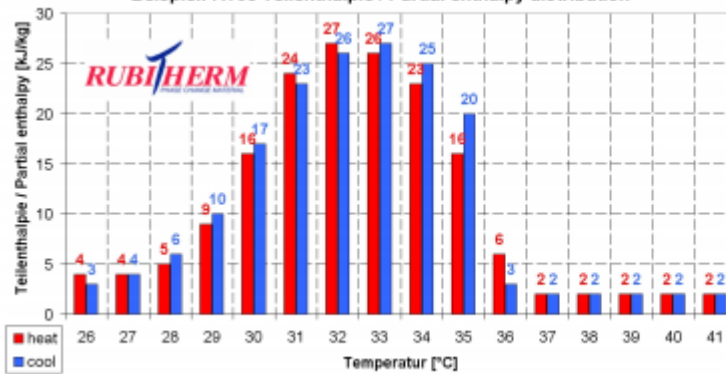
- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -9 °C and 100 °C available

The most important data:

	Typical Values	
Melting area	29-36	[°C]
	main peak: 33	
Congeeing area	36-31	[°C]
	main peak: 35	
Heat storage capacity ± 7,5%	160	[kJ/kg]*
Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 26°C to 41°C.	45	[Wh/kg]*
Specific heat capacity	2	[kJ/kg·K]
Density solid at 15 °C	0,86	[kg/l]
Density liquid at 45 °C	0,77	[kg/l]
Heat conductivity (both phases)	0,2	[W/(m·K)]
Volume expansion	12,5	[%]
Flash point	167	[°C]
Max. operation temperature	65	[°C]



Beispiel: RT35 Teilenthalpie / Partial enthalpy distribution



Rubitherm Technologies GmbH
 Imhoffweg 6
 D-12307 Berlin
 Tel: +49 (30) 7109622-0
 Fax: +49 (30) 7109622-22
 E-Mail: info@rubitherm.com
 Internet: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version: 06.08.2018

*Measured with 3-layer-calorimeter.

PCM RT44HC

Data sheet



RT44HC



RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

We look forward to discussing your particular questions, needs and interests with you.

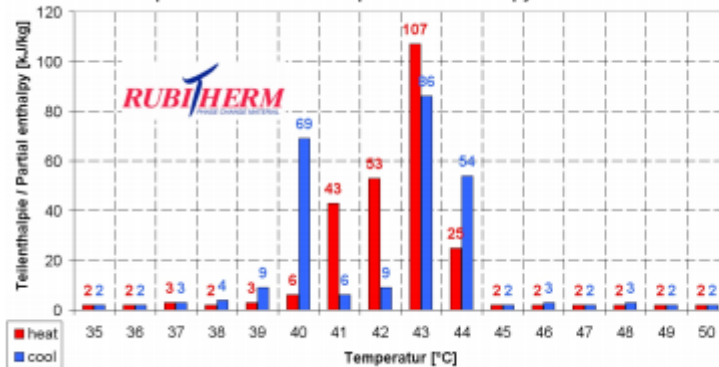
Properties:

- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -4 °C and 100 °C

The most important data:

	Typical Values	
Melting area	41-44	[°C]
	main peak: 43	
Congeeing area	44-40	[°C]
	main peak: 43	
Heat storage capacity ± 7,5%	250	[kJ/kg]*
Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 35°C to 50°C.	70	[Wh/kg]*
Specific heat capacity	2	[kJ/kg·K]
Density solid at 25 °C	0,8	[kg/l]
Density liquid at 80 °C	0,7	[kg/l]
Heat conductivity (both phases)	0,2	[W/(m·K)]
Volume expansion	12,5	[%]
Flash point	>180	[°C]
Max. operation temperature	70	[°C]

Beispiel: RT44HC Teilenthalpie / Partial enthalpy distribution



*Measured with 3-layer-calorimeter.

Rubitherm Technologies GmbH
 Sperenberger Str. 5a
 D-12277 Berlin
 Tel: +49 30 720004-62
 Fax: +49 30 720004-99
 E-Mail: info@rubitherm.com
 Internet: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version: 31.05.2016

Anexo C

Costos de los PCM
analizados

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.



Rubitherm Technologies GmbH
 Imhoffweg 6
 12307 Berlin
 www.rubitherm.com
 Tel: +49 30 71 09 622-0
 Fax: +49 30 71 09 622-22

OFFER

Number : 20190000157
 Date : 01.03.2019
 Customer : 92000
 VAT-ID :

Juarez Autonomous University of Tabasco
 Jenifer Triano
 Tabasco
 MEXIKO

Pos.	Part-ID / Description	Quantity	U-Price	UQ	Ex-Price	S
We thank you for your interest in Rubitherm products and can offer as follows:						
1	14010011 RUBITHERM CSM 450x300x10 filled with: RT35HC	1 pc	21,33		21,33	1
2	14010011 RUBITHERM CSM 450x300x10 filled with: RT44HC	1 pc	21,34		21,34	1
3	96020102 bankcharges	1	10,00		10,00	1
4	96020103 minimum order surcharge	2 Stck	100,00		200,00	1
5	96020104 Packaging	1	8,00		8,00	1
6	96020100 cost for shipping (*)	1	80,00		80,00	1
The prices are valid till 31st March 2019						
By ordering our material you declare to accept and be bound by the conditions stated below.						
Orders for less than 100 pcs of identical CSM panels carry a minimum order surcharge of 100,00EUR						
Delivery terms: DAP Tabasco If agreed Rubitherm can arrange the transportation with a third forwarder. (*)Please note, that the quoted shipping prices can differ from the shipping costs at delivery date due to surcharges that are included in the price which are subject to fluctuations on the market. Rubitherm reserves the right to charge the cost difference to the customer and the customer agrees to pay this difference.						
Standard lead- time: within 4 weeks after payment excl. shipping provided an uninterrupted production						
Payment condition: prepayment via wire transfer or check. Credit cards are not accepted.						
amount carried forward			EUR		340,67	

Anexo D

Iteraciones y residuales

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
Mexico.

En la Figura D.1 se grafican las iteraciones obtenidas con el método de Gauss-Seidel en cada paso de tiempo para el Caso D con PCM RT35 en la semana de verano. En la Figura D.2 se ilustra la evolución de los residuales para este caso; cuyos valores están entre $0.65e-10$ y $1e-10$, el cual es el valor del criterio de convergencia establecido para las simulaciones. Las iteraciones realizadas en el Caso D (38-55) y los valores de los residuales, están dentro del mismo rango que presentan los demás casos en ambos PCM analizados.

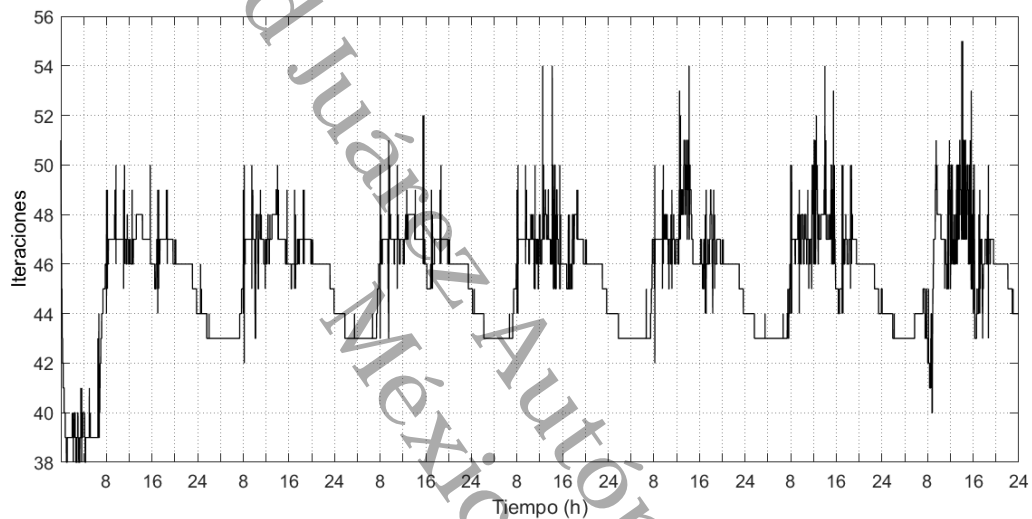


Figura D.1 Iteraciones de la simulación del Caso D con PCM RT35 para la semana de verano.

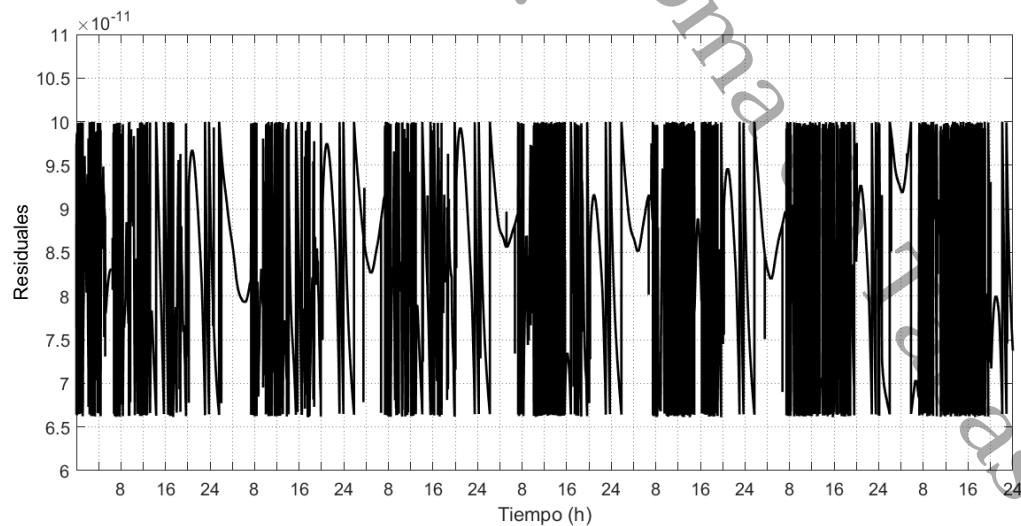


Figura D.2 Residuales de la simulación del Caso D con PCM RT35 para la semana de verano.

Anexo E

Actividades académicas

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
Mexico.

1. Ponencia en el XXIV Congreso Internacional Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica (SOMIM).

XXIV CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM
"Transformando la Educación para el hombre del futuro"

La Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica otorga el presente reconocimiento a:

Jenifer Alejandra Triano Juárez

Por su valiosa participación como

PONENTE

Al haber presentado el artículo A4_76: "Análisis energético de un techo tipo vigueta-bovedilla para clima cálido-húmedo", en el XXIV Congreso Internacional Anual de la SOMIM celebrado del 19 al 21 de septiembre de 2018.

Campeche, Campeche a 21 de Septiembre de 2018

DR. VICTOR HUGO JACOBO ARMENDÁRIZ
Presidente SOMIM

2. Artículo en las Memorias del XXIV Congreso Internacional Anual de la SOMIM.

MEMORIAS DEL XXIV CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM
19 al 21 DE SEPTIEMBRE DE 2018 CAMPECHE, CAMPECHE, MÉXICO

Tema A4 Termofluidos: Transferencia de calor

“Análisis energético de un techo tipo vigueta-bovedilla para clima cálido-húmedo”

Triano-Juárez J^a, Hernández-Pérez I^a, Macias-Melo E V^a

**Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ingeniería y Arquitectura (DAIA-UJAT), Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez km. 1, Cunduacán, Tabasco, C.P. 86690, México.*

**Jenifer Alejandra Triano Juárez, Dirección de correo electrónico: jat7712@gmail.*

RESUMEN

Se estudió numéricamente el potencial de ahorro de energía de un techo tipo vigueta-bovedilla de poliestireno expandido (EPS) con y sin recubrimiento reflectivo. El comportamiento térmico del sistema fue analizado para un día de condiciones extremas de una ciudad de México con clima cálido-húmedo. La solución se basa en un modelo bidimensional transitorio resuelto mediante el método de volumen finito en esquema implícito; condiciones de frontera convectivas sujetas a variables meteorológicas en las superficies externas, y a una temperatura fija para el ambiente interior. Los resultados, muestran que un techo tipo vigueta-bovedilla con y sin una película reflectiva color blanca puede reducir la ganancia de calor hacia el interior del edificio en un 85.6 y 71.4% respectivamente. Estos valores indican una reducción en la carga térmica de 1363 y 1137.8 W·h·m⁻² comparado con un techo convencional de concreto, así como una reducción de 0.61 y 0.51 kg·m⁻² las emisiones de CO₂.

Palabras Clave: rendimiento térmico, bloques de EPS, material aislante, material reflectivo, techos.

ABSTRACT

The energy saving potential of a reinforced concrete beam-polystyrene expanded (EPS) blocks roof with and without reflective coating was numerically studied. The thermal behavior of the system was analyzed for a day of extreme conditions of a city in Mexico with hot-humid weather. The solution is based on a transient two-dimensional model solved through the finite volume method using an implicit discretization scheme; convective boundary conditions dependent on meteorological variables for external surfaces, and at a fixed temperature for the indoor environment. The results show that a beam-EPS blocks roof with and without a white reflective coating can reduce the heat gain towards the interior of the building by 85 and 71%, respectively. These values indicate a reduction in the thermal load of 1363 and 1137.8 W·h·m⁻² respect to the traditional concrete roof, as well as a reduction of 0.61 and 0.51 kg m⁻² CO₂ emissions.

Keywords: thermal performance, EPS blocks, insulation material, reflective material, roofs.

1. Introducción

La Comisión Nacional para el Uso Eficiente de Energía, reporta que cerca del 30% del consumo eléctrico del sector residencial en México, es destinado para el confort térmico en las regiones de ambiente cálido [1]. Uno de los componentes que determina de forma importante la ganancia de calor, es el techo, debido a su exposición directa y prolongada a la radiación solar [2]. Para mejorar el comportamiento térmico de los techos de edificaciones existen diferentes alternativas, algunas de éstas son: las películas reflectivas, materiales termo-crómicos, materiales de cambio de fase, el uso de vegetación, la integración de

intercambiadores de calor, y los materiales de aislamiento térmico [3,4]. Una de las aplicaciones de éste último son los techos tipo vigueta-bovedilla. Esta técnica de construcción consiste en un sistema estructural formado por componentes portantes prefabricados denominados viguetas, componentes aligerantes llamados bovedillas y por una losa de compresión. Las bovedillas son los elementos de soporte en el sistema, fabricados de cemento-arena o de poliestireno expandido (EPS) [5]. Este tipo de losa ligera proporciona aislamiento térmico y acústico, rapidez de instalación, ahorros de inversión y de consumo eléctrico gracias a la reducción de las cargas por enfriamiento por parte de los equipos de acondicionamiento de aire. Esto es demostrado por Martínez-Martínez *et al.*, [6], quienes realizaron una simulación numérica, en el software Fluent, del

Cita: J. Triano-Juárez, I. Hernández-Pérez, and E. V Macias-Melo, Análisis energético de un techo tipo vigueta-bovedilla para clima cálido- húmedo, Memorias del XXIV Congr. Int. Anu. la SOMIM (2018) 6–13.

comportamiento térmico de un techo vigueta-bovedilla con bovedillas de EPS para ocho diferentes configuraciones. La superficie superior externa del techo se estableció en 40°C, y la superficie inferior interna en 25°C. Con base al perfil de temperatura, las gráficas de flujo de calor, y la resistencia térmica equivalente, los autores encontraron que aislando el puente térmico localizado en la sección de la vigueta es posible reducir hasta un 79% el flujo total de calor a través del sistema. Observaron que la reducción del flujo no mejoró con el aumento del espesor del sistema completo. Xamán *et al.*, [7] desarrollaron un modelo numérico de la transferencia de calor de un techo tipo vigueta-bovedilla en el cual la bovedilla era de cemento-arena (bloques huecos), con y sin materiales aislantes y reflectivos. El estudio se basó en dos días en condiciones extremas de Hermosillo, Sonora, considerando el efecto de la irradiancia solar y la temperatura externa para cada hora. Las cuatro configuraciones analizadas fueron: 1) caso de referencia, block tradicional + revoco; 2) block tradicional + revoco + película reflectiva; 3) block tradicional + material aislante + revoco; 4) block tradicional + material aislante + revoco + película reflectiva. Las películas reflectivas aplicadas fueron en color blanco, gris, y negro. El caso 4 con recubrimiento blanco mostró la menor carga térmica, 1045 y 975 $W \cdot h \cdot m^{-2}$, para block con dos y tres espacios, respectivamente.

Generalmente los techos de los edificios en México son oscuros, ya sea de color gris del concreto o de color rojo el cual es ampliamente usado como impermeabilizante. En la literatura existen muchos trabajos que han estudiado el efecto de materiales reflectivos sobre el consumo de energía y el confort térmico en las edificaciones. Hernández-Pérez *et al.*, [8] evaluaron experimentalmente el rendimiento térmico de techos con diferentes recubrimientos durante dos semanas en condiciones ambientales de Cuernavaca, México. La temperatura y el pico de flujo de calor máximo de la superficie del techo rojo fue 3°C y 20%, respectivamente, más alto que para un techo gris. Los techos reflectivos blancos redujeron la temperatura de la superficie entre 10 y 14.6°C comparado con el techo gris. Concluyeron que el techo reflectivo blanco es un estrategia costo-efectiva para reducir el consumo de energía en México, puesto que el periodo de recuperación es menor a dos años.

En los trabajos revisados se pudo encontrar que hasta el momento no se han reportado trabajos experimentales que consideren el estudio de techos tipo vigueta-bovedilla. Por otra parte, no se han presentado estudios teóricos que consideren el comportamiento del flujo de calor de este tipo de techos durante un día completo, ni que consideren el efecto de materiales reflectivos en los casos donde la bovedilla es de EPS.

En este contexto, el objetivo de este trabajo es evaluar el comportamiento térmico de un techo tipo vigueta-bovedilla de EPS con y sin recubrimiento reflectivo, en términos de la evolución de la temperatura y del flujo de calor. Con estos resultados, estimar la reducción de las cargas térmicas y de las emisiones de CO₂. La transferencia de calor en el sistema es estudiada durante 24 horas considerando la irradiancia solar y la temperatura ambiente para cada hora

de la región con clima cálido-húmedo de Cunduacán, Tabasco, México.

2. Metodología

2.1. Descripción del sistema de estudio

El modelo físico corresponde a una geometría bidimensional rectangular de dimensiones $L \times W$ sobre el plano $x-y$, como se observa en la Fig. 1. Este modelo representa el techo de una edificación ubicada en Cunduacán, Tabasco cuya latitud y longitud son 18° 4' 0" N, 93° 10' 0" W. La superficie superior y laterales están expuestas a las condiciones climáticas, y la superficie inferior a un ambiente interno. La estructura del techo está compuesta por tres capas. La capa interna y externa son de concreto, y la capa intermedia alterna los materiales correspondientes a vigueta y bovedilla. La Tabla 1 enlista las propiedades de los diferentes materiales del techo. Asimismo, en la Fig. 2 y Fig. 3 se muestran las dimensiones típicas, encontradas en el sector constructivo mexicano, de la vigueta y bovedilla, respectivamente.

Con la finalidad de evaluar el comportamiento térmico del techo vigueta-bovedilla se estudiaron tres configuraciones: caso 1) techo de referencia (losa de concreto), caso 2) techo tipo vigueta-bovedilla convencional, y caso 3) techo tipo vigueta-bovedilla con recubrimiento reflectivo sobre su superficie exterior. La Tabla 2 muestra los valores de reflectancia (ρ), absorptancia (α), y emisivancia (ϵ) solar del concreto (color gris) y del recubrimiento analizado (color blanco).

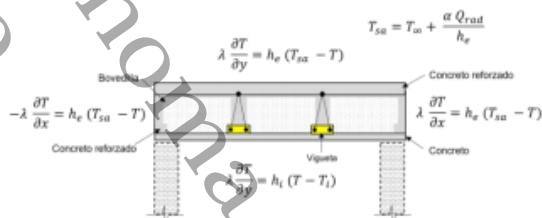


Figura 1 - Modelo físico y condiciones de frontera.

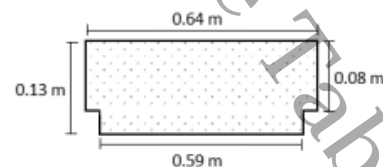


Figura 2 - Dimensiones de la bovedilla.

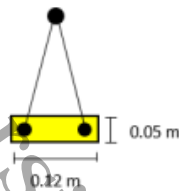


Figura 3. Dimensiones de la viga.

Tabla 1 – Propiedades termofísicas de los materiales de construcción.

Material	λ (W·m ⁻¹ ·°C)	ρ (kg·m ⁻³)	C_p (J·kg ⁻¹ ·°C)
1. Concreto	1.28	2200	850
2. Poliestireno expandido	0.036	9.6	1400
3. Concreto reforzado	1.74	2300	920

Tabla 2 – Propiedades ópticas del recubrimiento externo superior del techo [9].

Recubrimiento	ρ	α	ϵ	τ
Gris (Cemex Tolteca®)	0.33	0.67	0.87	0
Blanco (Comex® Top reflective)	0.84	0.16	0.78	0

La simulación se realizó con datos experimentales del 28 de abril de 2014, donde la temperatura y la irradiación solar máxima fueron de 40 °C y 936 W·m⁻², respectivamente. Los datos de las variables climáticas fueron obtenidos del laboratorio LERMER-UJAT (Laboratorio de Energías Renovables y Mediciones Estratégicas Regionales de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco).

2.2. Ecuación gobernante y condiciones de frontera

La ecuación de difusión de calor bidimensional en estado transitorio para la estructura del techo es dada en la ec. (1):

$$\rho_j C_{p_j} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_j \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_j \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1)$$

Se considera a la conductividad térmica, λ_j (W·m⁻¹·K⁻¹), la densidad, ρ_j (kg·m⁻³), y el calor específico, C_{p_j} (J·kg⁻¹·K⁻¹), de cada uno de los j-materiales como valores constantes.

En las superficies expuestas a la radiación solar (cara superior y laterales del techo), se considera que las ganancias y pérdidas de energía son por los mecanismos de radiación y convección. Por lo tanto, la condición de frontera es dada en la ec. (2) como,

$$\lambda_j \frac{\partial T}{\partial n} = h_e (T_{sa} - T) \quad (2)$$

Donde, h_e es la conductancia superficial exterior (W·m⁻²·K⁻¹), T_{sa} es la temperatura sol-aire (K), T es la temperatura de la superficie del techo (K).

La temperatura sol-aire utilizada en la ec. (2) se obtiene mediante la ec. (3).

$$T_{sa} = T_{\infty} + \frac{\alpha Q_{rad}}{h_e} \quad (3)$$

Donde, T_{∞} es la temperatura ambiente (K), α es la absorptancia de las superficies externas del techo, y Q_{rad} es la irradiación solar (W·m⁻²).

En la superficie interior del techo en contacto con las condiciones de ambiente interno, la condición de frontera se presenta en la ec. (4).

$$\lambda_j \frac{\partial T}{\partial y} = h_i (T - T_i) \quad (4)$$

Donde, h_i la conductancia superficial interior (W·m⁻²·K⁻¹), y T_i es la temperatura de aire interior (K).

2.3. Modelo numérico

El método para la discretización de las ecs. (1), (2) y (4) es el de volumen finito (MVF) [10]. La formulación de este método se basa en dividir el dominio físico en un número de volúmenes de control en cuyo centro se asigna un nodo que es representativo de cada volumen. La ec. (1) se integra sobre cada volumen de control del dominio físico para un esquema transitorio implícito. La ecuación discreta obtenida en notación de coeficientes agrupados, ec. (5), involucra los valores de la temperatura para un grupo de nodos adyacentes, T_E , T_W , T_N , T_S , al nodo evaluado, T_P , como se ilustra en la Fig. 4.

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + b \quad (5)$$

Para los nodos internos el valor de los coeficientes es dado en las ecs. (6)-(12)

$$a_E = \frac{\lambda_e \Delta y}{\delta x_e} \quad (6)$$

$$a_W = \frac{\lambda_w \Delta y}{\delta x_w} \quad (7)$$

$$a_N = \frac{\lambda_n \Delta x}{\delta y_n} \quad (8)$$

$$a_S = \frac{\lambda_s \Delta x}{\delta y_s} \quad (9)$$

$$b = a_p^0 T_p^0 \quad (10) \quad a_p = 1 + \frac{h_i \delta y_n}{\lambda_n} \quad (20)$$

$$a_p^0 = \frac{\rho C_p \Delta x \Delta y}{\Delta t} \quad (11)$$

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S + a_p^0 \quad (12)$$

Donde δx , δy son las distancias entre nodos y, Δx y Δy son el tamaño del volumen de control en la dirección x o y , respectivamente. La temperatura anterior o inicial se denota por T_p^0 , y los valores nuevos (desconocidos) en $t + \Delta t$ corresponden a T_p , T_E , T_W , T_N , T_S . Los subíndices en mayúsculas se refieren a valores en los nodos, mientras que los subíndices en minúsculas indican valores en las fronteras de los volúmenes de control.

El valor de los coeficientes de la ec. (5) para los nodos de la frontera este se presenta en las ecs. (13)-(16), respectivamente.

$$a_E = a_N = a_S = 0 \quad (13)$$

$$a_W = 1 \quad (14)$$

$$b = \left(\frac{h_e \delta x_w}{\lambda_w} \right) T_{sa} \quad (15)$$

$$a_p = 1 + \frac{h_e \delta x_w}{\lambda_w} \quad (16)$$

De manera análoga se deducen los coeficientes para los nodos de las otras dos fronteras externas, es decir, frontera oeste y norte. Para los nodos de la frontera oeste a_W , a_N , a_S son igual a cero y a_E es igual a uno, en el término b y a_p , el subíndice w es reemplazado por el subíndice e . Para los nodos de la frontera norte a_E , a_W , a_N son igual a cero y a_S es igual a uno, δx_w , y λ_w son reemplazados por δy_s y λ_s , respectivamente.

El valor de los coeficientes de la ec. (5) para los nodos de la frontera sur se muestran en las ecs. (17)-(20), respectivamente.

$$a_E = a_W = a_S = 0 \quad (17)$$

$$a_N = 1 \quad (18)$$

$$b = \left(\frac{h_i \delta y_n}{\lambda_n} \right) T_i \quad (19)$$

Como puede observarse en las ecuaciones discretas se requiere conocer el valor de la conductividad térmica en las fronteras de los volúmenes de control. Para los casos en que entre dos nodos P y E, por ejemplo, se encuentre una interface de materiales, la conductividad térmica es obtenida por una interpolación armónica entre esos dos puntos, como se expresa en la ec. (21).

$$\lambda_e = \frac{\lambda_p \lambda_E \delta x_e}{\lambda_p \delta x_{pm} + \lambda_E \delta x_{me}} \quad (21)$$

Donde δx_{me} y δx_{pm} corresponden a la longitud del Δx del volumen de control que pertenece al material j y al material $j+1$, respectivamente. Si el volumen de control se encuentra entre varios materiales, la densidad y calor específico de un volumen de control se obtiene a través de una interpolación lineal como se muestra en la ec. (22) y la ec. (23).

$$\rho_{Pi} = \frac{\rho_p \delta x_{pm} + \rho_E \delta x_{me}}{\Delta x} \quad (22)$$

$$C_{pP} = \frac{C_{pP} \delta x_{pm} + C_{pE} \delta x_{me}}{\Delta x} \quad (23)$$

El sistema de ecuaciones algebraicas discretas se resuelve aplicando el método de línea por línea de Gauss-Seidel de direcciones alternantes.

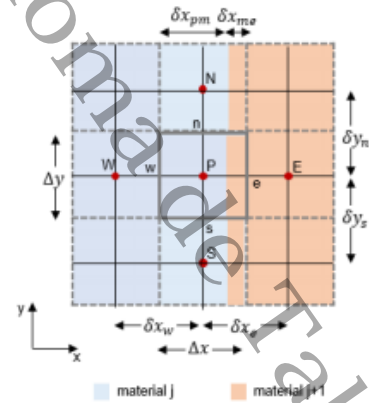


Figura 4 – Representación de un volumen de control de un nodo P sobre una malla bidimensional.

2.4. Algoritmo numérico

La solución al problema planteado por cada uno de los tres casos de estudio, como se observa en la Fig. 5, se inició por definir el dominio computacional y a partir de ello generar la malla numérica. Dado que la difusión de calor entre los materiales del techo es sólo por conducción, la malla no requirió mayor refinamiento en los límites. La distancia entre nodos en la dirección x y en la dirección y , fue de $\Delta x = \Delta y = 5$ mm. Con el fin de verificar las características espaciales de la malla se realizó una comparación de los resultados obtenidos del código desarrollado vs los resultados obtenidos a partir de una solución analítica. El análisis muestra que la malla seleccionada permite obtener resultados satisfactorios. Los valores de las propiedades termofísicas en las interfaces de los volúmenes de control se calcularon por interpolación armónica. Se establecieron los tipos de condiciones de frontera y la temperatura inicial imperante en el sistema. A partir de los datos meteorológicos disponibles se calculó la temperatura sol-aire para cada intervalo de tiempo fijado. Posteriormente las ecs. (1), (2) y (4) fueron discretizadas con el MVF en esquema implícito para cada volumen de control. Al resolver el conjunto de ecuaciones algebraicas se obtuvo la evolución espacio-temporal de la temperatura en el techo. Con estos valores se calculó para todos los casos, el flujo de calor que se transfiere desde el techo hacia el espacio interior de un recinto y la reducción de las cargas térmicas.

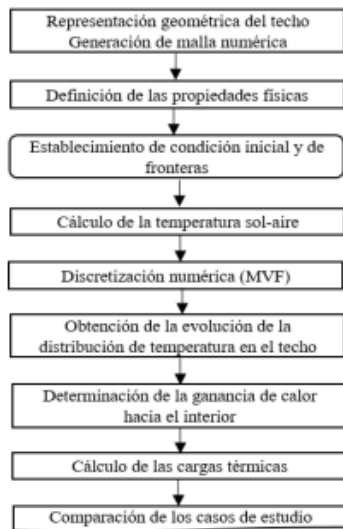


Figura 5 – Algoritmo solución para el problema de estudio.

2.5. Verificación numérica

El código numérico fue desarrollado en el lenguaje de programación del software Matlab® R2017a. Este código fue verificado comparando los resultados de la simulación con los resultados de una solución analítica para un problema de referencia. En la Fig. 6 se observan los valores analíticos y los valores numéricos obtenidos. Las TSE , TCC , TSI son la temperatura de la superficie externa, temperatura centro y temperatura de la superficie interna del techo, respectivamente. El subíndice N corresponde a los resultados numéricos y A indica los resultados analíticos.

La Tabla 3 enlista el error absoluto máximo, E_{am} , y el error absoluto promedio, \bar{E}_a , para cada hora simulada. El máximo error absoluto fue de 1.99°C y el máximo error absoluto promedio fue de 1.40°C. Se puede identificar que los mayores errores corresponden al rango entre las 2-9 horas, en las cuales el cambio de temperatura va desde 35°C (temperatura inicial para la verificación) a 2°C, por lo que, puede considerarse que el código numérico desarrollado para este estudio ofrece resultados aceptables.

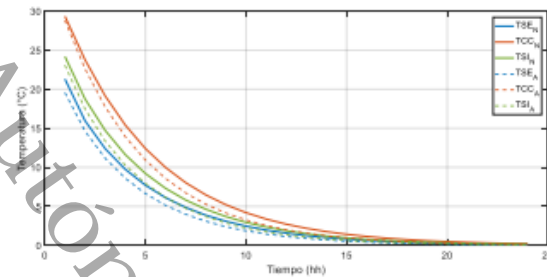


Figura 6 – Comparación de la evolución de la temperatura numérica y analítica para superficie exterior, interior y centro del techo.

Tabla 3– Error absoluto máximo (E_{am}) y promedio (\bar{E}_a) de las temperaturas para cada hora analizada.

Hora	E_{am}	\bar{E}_a	Hora	E_{am}	\bar{E}_a
1	0.01	0.001	13	0.62	0.44
2	1.99	1.39	14	0.53	0.37
3	1.70	1.40	15	0.45	0.31
4	1.49	1.35	16	0.38	0.25
5	1.48	1.26	17	0.32	0.22
6	1.41	1.16	18	0.27	0.18
7	1.31	1.04	19	0.23	0.15
8	1.20	0.92	20	0.19	0.12
9	1.07	0.81	21	0.16	0.10
10	0.95	0.70	22	0.13	0.08
11	0.83	0.60	23	0.11	0.07
12	0.72	0.52	24	0.09	0.06

3. Resultados y discusión

Para la simulación del caso 2 y caso 3, la dimensión del techo fue de 2.13 m (longitud) por 0.18 m (altura). Los espesores de la capa de concreto simple, la capa vigueta-bovedilla y la capa de concreto reforzado fueron 0.01 m, 0.13 m y 0.04 m, respectivamente. Para el caso 3, la longitud del techo fue de 2.13 m y una altura de 0.12 m, considerando que está compuesto por una sola capa de concreto reforzado de espesor igual a la altura mencionada. La variación horaria de la temperatura ambiente y de la irradiancia solar del día seleccionado se ilustra en la Fig. 7. La conductancia externa, $13 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$, y la conductancia interna, $6.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$, obtenidos de la NOM-020-ENER-2011 [2], se consideraron constantes a lo largo del día. La temperatura de aire interior se fijó en 25°C . La temperatura inicial del dominio se estableció en 27°C y un paso de tiempo, Δt , de 10 segundos.

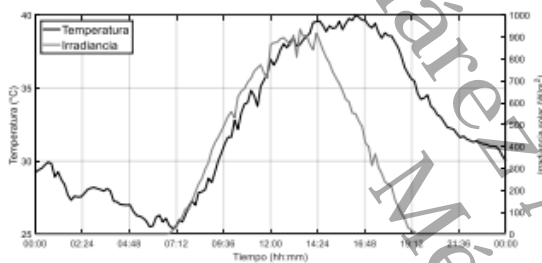


Figura 7 – Temperatura ambiente e irradiancia solar en la localidad de estudio.

3.1. Análisis de la temperatura

La Fig. 8 ilustra la variación de la temperatura del techo convencional de concreto reforzado, con una absorptancia de 0.67. La T_{SA} corresponde a la temperatura sol-aire; T_a es la temperatura ambiente; T_i pertenece a la temperatura de aire interior de un recinto; T_{SE} , T_{CC} , T_{SI} son la temperatura de la superficie externa, temperatura centro y temperatura de la superficie interna del techo, respectivamente. En este caso se observa que la máxima temperatura de la superficie externa, 60.6°C , e interna del techo, 48°C , se manifiestan alrededor de las 2:40 PM y 4:42 PM, respectivamente. Esto indica un tiempo de retraso de cerca de 2 horas. La mayor variación de temperatura ocurre entre la superficie externa y el centro del techo. La Fig. 9 muestra el perfil de temperatura en el tiempo para el caso del techo tipo vigueta-bovedilla sin recubrimiento, con absorptancia igual a 0.67. A partir de esta figura se observa que la máxima temperatura alcanzada por la superficie exterior del techo es de 75.6°C , alrededor de las 2:45 PM. La máxima temperatura en un punto central es 56.6°C a las 3:21 PM. Mientras que, la máxima temperatura en la superficie interior del techo, 31.6°C , se alcanza a las 4:28 PM. Lo cual indica un tiempo de retraso, de cerca de 1 hora y 43 minutos, entre la superficie externa e interna. También, se observa que el mayor gradiente de temperatura

ocurrió del punto central a la superficie inferior del techo.

Los resultados de la temperatura para el caso del techo tipo vigueta-bovedilla + recubrimiento color blanco en la superficie exterior con absorptancia de 0.16, se muestran en la Fig. 10. Donde se observa un comportamiento similar al caso anterior respecto a la zona de mayor gradiente de temperatura, y al desfase temporal de las temperaturas máximas entre la superficie externa (46°C) alcanzada a las 3:30 PM, e interna (27.8°C) del techo a las 5:22 PM, lo cual produce un tiempo de retraso de 1 hora y 51 minutos.

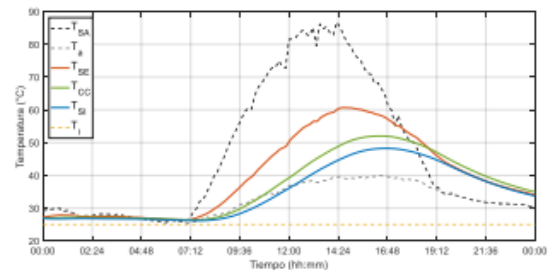


Figura 8 – Evolución de la temperatura del techo convencional de concreto.

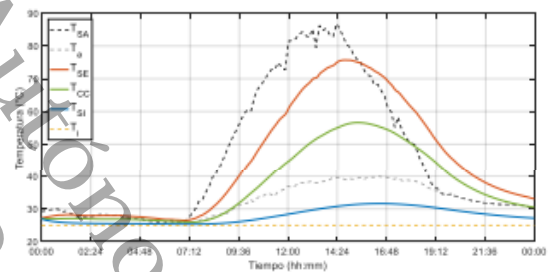


Figura 9 – Evolución de la temperatura del techo tipo vigueta-bovedilla sin recubrimiento.

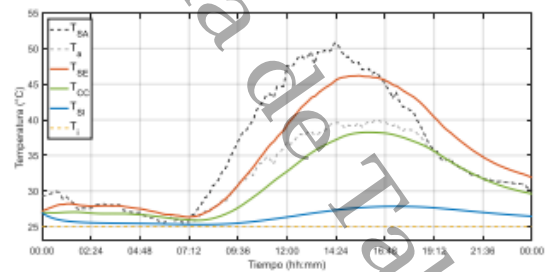


Figura 10 – Evolución de la temperatura del techo tipo vigueta-bovedilla con recubrimiento.

3.2. Análisis del flujo de calor

El comportamiento del flujo de calor conducido a través de un techo cuadrado con un área superficial de 4.53 m^2 hacia el interior del recinto proyectado para cada uno de los casos

se muestra en la Fig. 11. En esta figura, *LC* indica losa de concreto, α es la absorción, y *VB* son los techos tipo viga-bovedilla. En la gráfica se puede observar que durante el período de las horas de sol, hay una diferencia significativa entre los casos analizados. Los picos de flujo de calor del caso 1, 696.5 W, caso 2, 197.7 W, y caso 3, 885.5 W, se presentan entre las 4:28 PM y 5:22 PM, sin un desfase temporal significativo entre ellos. Estos valores indican una reducción de 71.4% y 85.6% en la ganancia de calor, para el caso 2 y 3 comparado con el caso 1, respectivamente.

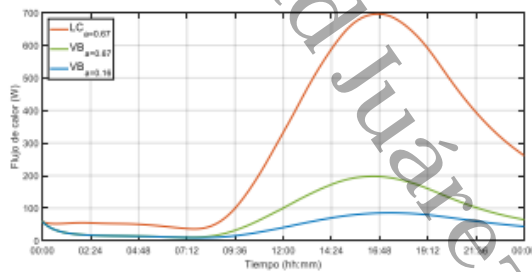


Figura 11 – Evolución del flujo de calor de los casos de estudio.

3.3. Reducción de las cargas por enfriamiento

La Fig. 12 muestra la comparación cualitativa de las diferencias entre la entrada de flujo de calor de la losa de concreto y la losa con viga-bovedilla (caso 1- caso 2), así como, las diferencias entre la entrada de flujo de calor de la losa de concreto y la losa de viga-bovedilla con recubrimiento blanco (caso 1-caso 3). A partir de los valores promedios de estas diferencias se obtuvo que para el edificio proyectado, la reducción de las cargas térmicas del caso 1 comparado con el caso 2 fue de 5.16 kW·h. Para el caso 3 comparado con el caso 1 fue de 6.18 kW·h. Lo cual representa un ahorro diario de \$14.46 y \$17.33 MNX (para una tarifa de \$2.802 MNX) y una reducción de emisiones de CO₂ de 2.34 kg y 2.8 kg, respectivamente (considerando que 1kW·h = 0.454 kg de CO₂ [11]).

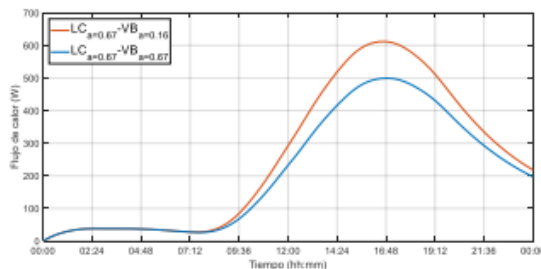


Figura 12 – Reducción de los flujos de calor para los techos viga-bovedilla respecto al techo convencional de concreto de referencia.

4. Conclusión

En el presente estudio se desarrolló un modelo numérico para resolver el caso de conducción de calor bidimensional transitorio a través de tres configuraciones de techo, 1) un techo convencional de concreto reforzado, 2) un techo multicapas tipo viga-bovedilla sin recubrimiento, y 3) un techo tipo viga-bovedilla con recubrimiento reflectivo color blanco. Se aplicó el MVF en un esquema implícito. El código computacional fue verificado por comparación con la solución analítica de un problema de referencia.

Las condiciones de frontera convectivas utilizadas fueron determinadas a partir de los datos meteorológicos de Cunduacán, Tabasco. Se estudió la oscilación de la temperatura y el flujo de calor durante un día de condiciones extremas de abril.

En este trabajo se obtuvo que los techos tipo viga-bovedilla pueden reducir los picos de temperatura de la superficie cercana al ambiente interno en un $\Delta T \approx 16$ °C, y hasta un $\Delta T \approx 20$ °C en caso de incorporar una película reflectiva externa, ambos valores comparados con un techo convencional de concreto. En cuanto al flujo de calor, los resultados indican que respecto a un techo convencional de concreto, se obtiene una reducción en la carga térmica y en la emisión de CO₂ de 1137.8 W·h·m⁻² y 0.51 kg·m⁻² para el caso 2, y de 1363 W·h·m⁻² y 0.61 kg·m⁻² para el caso 3. Por lo que, la menor ganancia de calor hacia el interior de un recinto proyectado pertenece al techo tipo viga-bovedilla con recubrimiento.

Se identificó que la integración de un recubrimiento color blanco en la superficie externa del techo ejerce un efecto significativo principalmente en las temperaturas de la cara externa e interna y en consecuencia, en las entradas de calor.

Los resultados indican que en los casos 2 y 3, la capa intermedia que alberga los elementos aislantes presenta los mayores gradientes de temperatura. Lo cual se puede atribuir a la baja conductividad térmica del EPS, es decir, que su efecto recae en ofrecer resistencia al paso del flujo de calor. Sin embargo, las temperaturas de la superficie exterior y las temperaturas de un punto central para el caso 2 fueron mayores que las obtenidas para el caso 1. Esto se puede atribuir a la gran diferencia de inercia térmica entre el concreto reforzado (2116 kJ·m⁻³K⁻¹) y el poliestireno expandido (13.44 kJ·m⁻³K⁻¹). El almacenamiento de calor parece tener mayor efecto en esta parte del techo. Lo cual también tiene influencia en el desfase temporal en que se presenta la máxima temperatura de la superficie interna del techo; para el caso 1 el tiempo de retraso es de 2 horas mientras que para el caso 2 es de 1 hora y 43 minutos.

Los techos tipo viga-bovedilla ofrecen muchas ventajas, no sólo en cuanto al ahorro de inversión por costos de construcción sino también en cuanto al ahorro de energía, ya que permiten reducir las cargas por enfriamiento, actuando como una barrera térmica a la entrada de calor, cuyo efecto se incrementa al incorporar un recubrimiento reflectivo color blanco en el exterior.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), la oportunidad de colaborar en el campo de la investigación y cuyo apoyo económico hizo posible la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] CONUEE, Estudio de Caracterización Del Uso de Aire Acondicionado En Viviendas de Interés Social En México, México, 2016.
- [2] CCNNPURRE, NOM-020-ENER-2011, Diario Oficial de la Federación, Estados Unidos Mexicanos, 2011.
- [3] F.P. Torgal, C.G. Granqvist, B.P. Jelle, G.P. Vanoli, B.P. Jelle, Cost-Effective Energy Efficient Building Retrofitting : Materials, Technologies, Optimization and Case Studies, Woodhead Publishing, 2017.
- [4] O. Saadatian, K. Sopian, E. Salleh, C.H. Lim, S. Riffat, E. Saadatian, A. Toudeshki, M.Y. Sulaiman, Renew. Sustain. Energy Rev. 23 (2013) 155–168.
- [5] ONNCCE, NMX - C - 406 - 1997- ONNCCE, México, 1998.
- [6] S. Martínez-Martínez, F.A. Sánchez-Cruz, J. Chávez-Galán, E. Soto-Espinosa, V.F.J. Tavitas-Medrano, Memorias Del XVI Congr. Int. Anu. La Somim (2010).
- [7] J. Xamán, J. Cisneros-Carreño, I. Hernández-Pérez, I. Hernández-López, K.M. Aguilar-Castro, E. V. Macías-Melo, Appl. Therm. Eng. 123 (2017) 243–255.
- [8] I. Hernández-Pérez, G. Álvarez, J. Xamán, I. Zavala-Guillén, J. Arce, E. Simá, Energy Build. 80 (2014) 81–105.
- [9] I. Hernández-Pérez, J. Xamán, E. V. Macías-Melo, K.M. Aguilar-Castro, I. Zavala-Guillén, I. Hernández-López, E. Simá, Energy Build. 158 (2018) 569–579.
- [10] Patankar, S. V., (1980), Numerical heat transfer and fluid flow, (44-59), Hemisphere Publishing Corporation.
- [11] Subsecretaría de Planeación y Política Ambiental Dirección General de Políticas para el Cambio Climático, Reporte Del Registro Nacional de Emisiones, México, 2015.

3. Cursos de formación continua



Otorga la presente

CONSTANCIA

A: JENIFER ALEJANDRA TRIANO JUÁREZ

Por haber asistido al Curso de Educación Continua "PROCESAMIENTO DE DATOS ASISTIDO POR COMPUTADORA(MATLAB)" llevado a cabo del 3 al 13 de octubre del presente año, en las instalaciones de esta División Académica, con una duración de 30 horas.

Cunduacán, Tabasco a 13 de octubre de 2017.

UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO
DIVISIÓN ACADÉMICA DE
INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Dr. Candelario Bolaina Torres
Director

Dr. Edgar Vicente Macias Melo
Instructor

 UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO
"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



Otorga la presente

CONSTANCIA

A: Jenifer Alejandra Triano Juárez

Por su participación en el Curso-Taller "*Dinámica de Fluido Computacional para la simulación térmica de Edificaciones*" realizado en las instalaciones de la División Académica de Ingeniería y Arquitectura de esta casa de estudios, del 08 al 12 de Enero de 2018 con una duración de 25 horas.

Cunduacán, Tabasco; Martes 17 de Enero de 2018





Dr. Candelario Bolaina Torres
DIRECTOR

DAIA/GI/2018/018

 UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO
"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"


UJAT

Otorga la presente

CONSTANCIA

A : Jenifer Alejandra Triano Juárez

Por su participación en el Curso-Taller "Simulación térmica de Edificaciones con Energy-Plus" realizado en las instalaciones de la División Académica de Ingeniería y Arquitectura de esta casa de estudios, del 08 al 12 de Enero de 2018 con una duración de 25 horas.

Cunduacán, Tabasco; Martes 17 de Enero de 2018




DIRECCIÓN

Dr. Candelario Bolaina Torres
DIRECTOR

DIA/CV/2018/008





UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO
"ESTUDIO EN LA DUDA, ACCIÓN EN LA FE"



División Académica
de Ingeniería
y Arquitectura

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

División Académica de Ingeniería y Arquitectura

Otorgan la presente

CONSIGNANCIA

A: Jenifer Alejandra Triano Juárez

Por su participación como **Asistente** al curso " **SOLID WORKS BÁSICO** ", realizado como actividad previa al **4^{to}. CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA "Ingeniería para el Desarrollo Sustentable"** del 10 al 17 de Abril del presente, en las instalaciones de esta División Académica, con duración de 30 horas.



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
CANDUACIÓN, TABASCO



Dr. Candelario Bolajina Torres
Director



Consorcio de
Universidades
Mexicanas



GEN
UJAT



XIME



4
CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA
MECÁNICA ELÉCTRICA
Ingeniería para el Desarrollo Sustentable



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
CANDUACIÓN, TABASCO a 04 de Mayo de 2018.

Folio: IME/CDC/E/2018/006-457



Otorga la presente

CONSTANCIA

Jenifer Alejandra Triano Juárez

Por haber asistido al Taller: *Redacción Científica*, llevado a cabo en las instalaciones de la División Académica de Ingeniería y Arquitectura del 27 al 31 de agosto de 2018. Con un total de 30 horas.

Cunduacán, Tabasco a 31 de agosto del 2018

«Estudio en la duda. Acción en la fe»



Dr. Germán Pérez Hernández
Director.

PFCE
2018-2019

FOLIO: CIPdaia-2018-04-353

 UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO
"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



Otorga la presente

CONSTANCIA

A: Jenifer Alejandra Triano Juárez

Por asistir al **Curso-Taller "Latex para la redacción de documentos científicos"** realizado en las instalaciones de la División Académica de Ingeniería y Arquitectura de esta casa de estudios, del 24 de Octubre al 06 de Diciembre de 2018, con una duración de 30 horas.

Cunduacán, Tabasco; Miércoles 13 de Diciembre de 2018.



DIRECCIÓN

Dr. Germán Pérez Hernández
DIRECTOR