



**SEP**

SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



**TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO**

---

---

# **Tecnológico Nacional de México**

**Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico**

## **Tesis de Maestría**

**Evaluación Térmica de Materiales de  
Cambio de Fase en Techos para  
Edificaciones**

presentada por

**Ing. Alan Alexander Rodriguez Ake**

como requisito para la obtención del  
grado de

**Maestro en Ciencias en  
Ingeniería Mecánica**

Director de tesis

**Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor**

Cuernavaca, Morelos, México. Julio de 2018.



Cuernavaca, Mor., 22/junio /2018

OFICIO No. DIM/168/2018

**Asunto:** Aceptación de documento de tesis

**C. DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ**  
**SUBDIRECTOR ACADÉMICO**  
**PRESENTE**

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del C. Ing. Alan Alexander Rodríguez Ake, con número de control M16CE072 , de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **"Evaluación térmica de materiales de cambio de fase en techos para edificaciones"** y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS



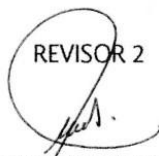
DR. JESÚS PERFECTO XAMÁN VILLASEÑOR  
Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica  
4672156

REVISOR 1



DRA. YVONNE CHÁVEZ CHENA  
Doctora en Ciencias en Ingeniería Mecánica  
7492003

REVISOR 2



DR. JESÚS ARCE LANDA  
Doctor en Ingeniería  
6170951

REVISOR 3



DR. EFRAÍN SIMÁ MOO  
Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica  
6601954

C.p. Jefa del Departamento de Servicios Escolares.  
Estudiante  
Expediente

Iniciales JD/secretaria



Cuernavaca, Mor. 22 de junio de 2018  
OFICIO No. SAC/280/2018

**Asunto:** Autorización de impresión de tesis

**ING. ALAN ALEXANDER RODRÍGUEZ AKE**  
**CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS**  
**EN INGENIERÍA MECÁNICA**  
**P R E S E N T E**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **“Evaluación térmica de materiales de cambio de fase en techos para edificaciones”**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

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

**ATENTAMENTE**  
*EXCELENCIA EN EDUCACIÓN TECNOLÓGICA®*  
*“CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA AL SERVICIO DE MÉXICO”*



**DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ**  
**SUBDIRECTOR ACADÉMICO**



SEP TecNM  
CENTRO NACIONAL  
DE INVESTIGACIÓN  
Y DESARROLLO  
TECNOLÓGICO  
SUBDIRECCIÓN  
ACADÉMICA

C.p. M.T.I. María Elena Gómez Torres- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.  
Expediente

GVGR/mcr



## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme permitido vivir hasta este día, por darme la fuerza y el coraje para hacer este sueño realidad. Por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

A mi madre Vilma Ake, por el gran amor y la devoción que tienes a tus hijos, por el apoyo ilimitado e incondicional a lo largo de mi vida, por cada una de tus enseñanzas para salir adelante sin importar los obstáculos, por haberme formado como un hombre de bien, y por ser la mujer que me dio la vida. Eres y serás siempre mi ejemplo a seguir. Te amo mamá.

A mi hermano Ángel, por cuidar de mí, por su paciencia, y sobre todo por preocuparse por mí en todo momento. Gracias por todo lo que has hecho por mí.

A mí cuñada Rosa que de alguna u otra forma siempre ha estado para apoyarme, y de igual manera, por brindarme la oportunidad de ser tío de mis dos hermosas sobrinas Camila y Guadalupe, que son la alegría del hogar y mi fuente de inspiración.

Al Dr. Jesús P. Xamán Villaseñor por la confianza y oportunidad que me brindo desde el inicio de este proceso. Gracias por compartir sus conocimientos y experiencia para poder llevar a cabo el presente trabajo. Un excelente profesionista y gran ser humano.

Al jurado revisor: Dra. Yvonne Chávez C., al Dr. Efraín Sima M. y al Dr. Jesús Arce. Gracias por sus comentarios y sugerencias a lo largo de este proyecto, los cuales fueron de gran aporte a mi formación académica.

Al Dr. Irving O. Hernández por sus enseñanzas y conocimientos compartidos durante mi formación académica, al M.C. Rogelio y a los compañeros del Laboratorio de Simulación Numérica.

A mis amigos y compañeros David Ake, Miguel Beltrán, Miguel Che, Luis González, Tomas Pérez y Saulo Landa, por todos los grandes momentos compartidos y por apoyo que me brindaron para culminar este proyecto. Son grandes seres humanos, cada uno con grandes virtudes.

Al Ing. Julio Canul y al M.C. Juan Esquivel por el apoyo que me brindaron al inicio de este proyecto.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), por darme la oportunidad de continuar con mi formación académica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado.

Al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) por brindarme los datos meteorológicos necesarios para culminar este proyecto de Tesis.





Si algo importa, todo importa. Dado que tú eres importante, todo lo que haces es importante. Cada vez que perdonas, el universo cambia; cada vez que te esfuerzas y tocas un corazón o una vida, el mundo cambia; con cada bondad y favor, visto o no, mis propósitos se cumplen y no volverá hacer lo mismo.

WM. PAUL YOUNG



# ÍNDICE

LISTA DE TABLAS	v
LISTA DE FIGURAS	vi
NOMENCLATURA	viii
RESUMEN	xi
1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Estado del Arte .....	5
1.2 Conclusión de la revisión del estado del arte .....	13
1.3 Objetivo.....	14
1.3.1 Objetivos específicos.....	14
1.4 Alcance.....	14
2 FUNDAMENTOS Y CONCEPTOS DE MATERIAL DE CAMBIO DE FASE (PCM) .....	15
2.1 Cambio de Fase .....	15
2.2 Almacenamiento de Energía Térmica.....	15
2.2.1 Calor Sensible .....	16
2.2.2 Calor Latente .....	17
2.3 Materiales de cambio de fase (PCM).....	18
2.3.1 PCM's Orgánicos .....	20
2.3.2 PCM's Inorgánicos.....	24
2.3.3 PCM's Eutécticos.....	26
2.4 Criterios de selección de PCM.....	27
2.5 Encapsulación PCM .....	28
2.5.1 Macro- encapsulado .....	28
2.5.2 Ejemplos de macro encapsulación .....	29
2.5.3 Micro-encapsulado .....	32
2.6 Solución numérica de problemas de cambio de fase.....	34
2.6.1 Método de Entalpia .....	34
2.6.2 Método de capacidad calorífica.....	35
3 MODELO FÍSICO Y MATEMÁTICO .....	36
3.1 Modelo físico .....	36

3.2	Modelo matemático.....	38
3.2.1	Modelo matemático: Losa de concreto .....	38
3.2.2	Modelo matemático: Material de cambio de fase (PCM) .....	39
3.3	Condiciones de Frontera.....	40
3.4	Condición inicial .....	42
4	METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN NUMÉRICA Y VERIFICACIÓN.....	43
4.1	Metodología de solución numérica .....	43
4.1.1	Generación de la malla computacional .....	44
4.1.2	Discretización de la ecuación gobernante de conducción de calor bidimensional en estado transitorio. ....	46
4.1.3	Método de solución del sistema de ecuaciones algebraica.....	59
4.2	Verificación.....	62
4.2.1	Medio compuesto .....	62
4.2.2	Verificación transitoria.....	63
4.2.3	Verificación del PCM.....	65
4.3	Independencia de malla espacial y temporal. ....	67
4.3.1	Techo convencional (Losa de Concreto).....	67
4.3.2	Techo Compuesto (Losa de concreto con PCM).....	71
5	RESULTADOS DE TECHOS PARA LA REPÚBLICA MEXICANA. ....	74
5.1	Parámetros de estudio.....	74
5.2	Evaluación Térmica.....	80
5.2.1	Techo convencional.....	80
5.2.2	Techo compuesto.....	82
5.3	Integración numérica para el flujo de calor de la superficie interior.....	91
6	CONCLUSIONES .....	94
6.1	Recomendaciones para trabajos futuros. ....	95
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	96

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1 Comparación de PCM's orgánicos, inorgánicos y eutécticos. (Zeng et al., 2017) .....	19
Tabla 2-2. Propiedades térmicas básicas de n-parafinas (Kosny, 2008). .....	20
Tabla 2-3 Ejemplos de ácidos grasos que se han investigado como PCM (Mehling y Cabeza, 2008). .....	22
Tabla 2-4 Ejemplos de alcoholes de azúcar investigados como PCM (Mehling y Cabeza, 2008). ..	23
Tabla 2-5 Ejemplos de PEGs y sus propiedades termofísicas (Mehling y Cabeza, 2008). .....	24
Tabla 2-6 Ejemplos de hidratos de sal investigados como PCM (Mehling y Cabeza, 2008). .....	25
Tabla 2-7 Ejemplos de soluciones eutécticas agua-sal que han sido investigadas como PCM (Mehling y Cabeza, 2008). .....	26
Tabla 3-1 Propiedades Termofísicas del Concreto. ....	39
Tabla 3-2 Propiedades Físicas de algunos PCM's. ....	39
Tabla 4-1 Resultados obtenidos de forma numérica y analítica, para el problema transitorio. ....	64
Tabla 4-2 Datos de Temperatura a 20 y 80 segundos. ....	66
Tabla 4-3 Comparación de resultados a 60 y 70 minutos, con diferentes pasos de tiempo .....	68
Tabla 4-4 Malla de NX=101 y NY= 11, 21, 31, 41, 51 y 61, a los 70 y 80 minutos. ....	69
Tabla 4-5 Malla de NX=41, 51, 61, 71, 81, 91,101, 111 y 121, NY= 31, a los 70 y 80 minutos. ..	70
Tabla 4-6 Comparación de resultados a 50 y 60 minutos, con diferentes pasos de tiempo. ....	71
Tabla 4-7 Malla Numérica PCM de NX=61 y NY= 21, 31, 41, 51 ,61 y 71 a los 50 y 60 minutos, respectivamente. ....	72
Tabla 5-1 Funciones de temperatura ambiente del día frío. ....	78
Tabla 5-2 Funciones de radiación solar del día frío. ....	78
Tabla 5-3 Funciones de temperatura ambiente del día cálido. ....	79
Tabla 5-4 Funciones de Radiación Solar del Día Cálido. ....	79
Tabla 5-5 Flujos de Calor Totales para el día frío. ....	92
Tabla 5-6 Flujos de Calor Totales para el día cálido. ....	93
Tabla 7-1 Datos climatológicos (radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento), para el día frío. ....	99
Tabla 7-2 Continuación: Datos climatológicos (radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento), para el día frío. ....	100
Tabla 7-3 Datos climatológicos (radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento), para el día cálido. ....	101
Tabla 7-4 Continuación: Datos climatológicos (radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento), para el día cálido. ....	102
Tabla 7-5 Propiedades de Materiales de Cambio de Fase. ....	103

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 Posibles métodos de almacenamiento reversible de calor y frío. ....	2
Figura 1-2 Clasificación de los PCM s, Cheng et al. (2017). ....	3
Figura 2-1 Almacenamiento de energía como calor sensible. ....	16
Figura 2-2 Cambios de estado de la materia. ....	17
Figura 2-3 Almacenamiento de calor como calor latente para el caso de cambio de fase sólido- líquido. ....	18
Figura 2-4 Clasificación de los materiales de cambio de fase (PCM's). ....	18
Figura 2-5 Macro-encapsulación en envases plásticos. De izquierda a derecha: paneles de doble barra de Dörken (imagen Dörken), panel de PCP (imagen: PCP), contenedor plano de Kissmann y bolas de Cristopia, también llamadas módulos. ....	29
Figura 2-6 Macro encapsulación en rayas de cápsulas producida por PCP y Dörken para PCM inorgánico (imagen: ZAE Bayern). ....	30
Figura 2-7 Macro encapsulación en bolsas; izquierda, producido por Climator (imagen: Climator), y a la derecha, producido por Dörken (foto: Dörken). ....	30
Figura 2-8 Macro encapsulación en contenedores metálicos: izquierda, perfiles de aluminio con aletas para mejorar la transferencia de calor de Climator (imagen: Climator) y chapa de aluminio recubierta derecha de Rubitherm Technologies GmbH (foto: Rubitherm Techno). ....	31
Figura 2-9 Imagen de microscopio electrónico de muchas cápsulas (foto: FhG-ISE) y una micro- cápsula abierta (foto: BASF). ....	32
Figura 2-10 Parafina micro-encapsulada producida por BASF, a la izquierda como dispersión fluida, ya la derecha como polvo seco (imágenes: BASF). ....	33
Figura 3-1 Modelo físico, a) techo convencional y b) techo compuesto. ....	37
Figura 4-1 Representación de los volúmenes de control en 2-D. ....	44
Figura 4-2 Arreglo de malla: contacto con la frontera. ....	44
Figura 4-3 Malla temporal del volumen de control P en 2-D. ....	48
Figura 4-4 Nodo frontera oeste con condición de segunda clase. ....	55
Figura 4-5 Nodo frontera Este con condición de segunda clase. ....	56
Figura 4-6 Nodo frontera Norte con condición de tercera clase. ....	57
Figura 4-7 Nodo frontera sur con condición de tercera clase. ....	58
Figura 4-8 Diagrama de flujo en estado transitorio. ....	61
Figura 4-9 Modelo Físico del Medio Compuesto. ....	62
Figura 4-10 Comparación de Isotermas entre el Método Numérico y el Analítico. ....	63
Figura 4-11 Modelo Físico representativo del sistema unidimensional. ....	63
Figura 4-12 Modelo Representativo de PCM. ....	65
Figura 4-13 Perfil de temperaturas del PCM a) 20 s, b) 80 s. ....	65
Figura 4-14 Malla numérica del sistema de techo compuesto. ....	73
Figura 5-1 Comportamiento: a) Temperatura ambiente, b) Radiación Solar y C) velocidad del viento, durante el día frío. ....	76
Figura 5-2 Comportamiento: a) Temperatura ambiente, b) Radiación Solar y C) velocidad del viento, durante el día cálido. ....	77
Figura 5-3 Comportamiento de las temperaturas promedio al exterior e interior del techo convencional: a) día frío, b) día cálido. ....	80
Figura 5-4 Comportamiento del flujo de calor promedio al exterior e interior del techo convencional: a) día frío y b) día cálido. ....	81

Figura 5-5 Comportamiento de las temperaturas superficiales al interior del techo compuesto (PCM-MG29) a) día frío y b) día cálido. ....	82
Figura 5-6 Comportamiento de los flujos de calor al interior del techo compuesto (PCMMG29) durante el a) día frío y b) día cálido. ....	84
Figura 5-7 Comportamiento de las temperaturas superficiales al interior del techo compuesto (N-EICOSANO) durante a) día frío y b) día cálido.....	85
Figura 5-8 Comportamiento de los flujos de calor al interior del techo compuesto (N-EICOSANO) durante a) día frío y b) día cálido. ....	85
Figura 5-9 Comportamiento de las temperaturas superficiales al interior del techo compuesto (Hidrato de sal) durante a) día frío y b) día cálido. ....	86
Figura 5-10 Comportamiento de los flujos de calor al interior del techo compuesto (Hidrato de Sal) durante a) día frío y b) día cálido. ....	87
Figura 5-11 Comportamiento de la temperatura en la superficie interior de 3 PCM's diferentes con un espesor de 0.5 cm, durante a) día frío y b) día cálido.....	88
Figura 5-12 Comportamiento de la temperatura de 3 PCM's diferentes con un espesor de 1.0 cm, durante a) día frío y b) día cálido. ....	89
Figura 5-13 Comportamiento de la temperatura de 3 PCM's diferentes con un espesor de 1.5 cm, durante a) día frío y b) día cálido. ....	90

## NOMENCLATURA

### Símbolos

$a_P, a_W, a_E, a_S, a_N, a_{P0}$	Coefficientes de la ecuación discretizada.
$b$	Termino fuente.
$C_P$	Calor Especifico ( $J Kg^{-1} K^{-1}$ ).
$dx, dy, dz$	Diferenciales en dirección $-x, y, z$ .
$G$	Radiación solar ( $W m^{-2}$ ).
$H$	Entalpía ( $Kj Kg^{-1} K^{-1}$ ).
$h_{ls}$	Calor Latente de fusión ( $Kj Kg^{-1} K^{-1}$ ).
$h_{int}$	Coefficiente de transferencia de calor convectivo interior ( $W m^{-2} K^{-1}$ ).
$h_{out}$	Coefficiente de transferencia de calor convectivo exterior ( $W m^{-2} K^{-1}$ ).
$H_x$	Espesor del techo (m).
$H_y$	Ancho del techo (m).
$N_x$	Número de nodos computacionales en dirección $-x$ .
$N_y$	Número de nodos computacionales en dirección $-y$ .
$q_{cond}$	Flujo de calor por conducción ( $W m^{-2}$ ).
$q_{conv,int}$	Flujo de calor por convección al interior ( $W m^{-2}$ ).
$q_{cond,out}$	Flujo de calor por convección al exterior ( $W m^{-2}$ ).
$q_{rad,int}$	Flujo de calor por radiación al interior ( $W m^{-2}$ ).
$q_{rad, out}$	Flujo de calor por convección al exterior ( $W m^{-2}$ ).
$q_{rad,int}$	Flujo de calor por radiación al interior ( $W m^{-2}$ ).
$q_{rad, out}$	Flujo de calor por convección al exterior ( $W m^{-2}$ ).
$q_{tot,int}$	Flujo de calor total al interior ( $W m^{-2}$ ).
$T_{amb}$	Temperatura del medio ambiente ( $^{\circ}C$ ).
$T_c$	Temperatura de la losa de concreto ( $^{\circ}C$ ).
$T_{int}$	Temperatura al interior de la edificación ( $^{\circ}C$ ).
$T_{PCM}$	Temperatura del PCM ( $^{\circ}C$ ).



$T_{s,ext}$	Temperatura de la superficie exterior ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{s,int}$	Temperatura de la superficie interior ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{sky}$	Temperatura de la bóveda celeste ( $^{\circ}\text{C}$ ).
$V$	Velocidad del viento ( $\text{m s}^{-1}$ ).
$x, y, z$	Coordenadas en dirección $x, y, z$ .

### Símbolos Griegos

$\alpha$	Absortancia solar.
$\delta_x, \delta_y, \delta_z$	Distancia entre nodos computacionales en dirección - $x, y, z$ .
$\Delta T$	Gradiente de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	Espesor de volumen espacial en dirección - $x, y, z$ .
$\epsilon$	Emisividad.
$\lambda$	Conductividad térmica ( $\text{W/m K}$ ).
$\xi$	Criterio de conservación.
$\rho$	Densidad ( $\text{kg/m}^3$ ).
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann.

### Siglas

CFD	Dinámica de Fluidos Computacionales
LBL	Línea por línea.
LBL-x.	Línea por línea en dirección - $x$ .
LBL-y.	Línea por línea en dirección - $y$ .
LBL-ADI	Método línea por línea en direcciones alternantes.
LGS - $x$ .	Línea en Gauss -Seidel en dirección - $x$ .
LGS - $y$ .	Línea en Gauss -Seidel en dirección - $y$ .
LGS-ADI	Método de línea en Gauss -Seidel en direcciones alternantes.
MVF	Método de Volumen Finito.
PCM	Material de cambio de fase.
VC	Volumen de Control.

Subíndices y Superíndices.

E, e	Este
Liq	Líquido.
N, n	Norte.
PCM	Material de cambio de fase.
S, s	Sur.
Sol	Sólido.
W, w	Oeste.

## RESUMEN

En la presente tesis se realizó un estudio numérico para evaluar el desempeño térmico de un techo plano de una edificación con la implementación de un material de cambio de fase (PCM), bajo condiciones climatológicas de un clima cálido de la Ciudad de Mérida, Yucatán; Se consideró el día más frío y más cálido del año en estudio.

Se consideraron dos configuraciones para el techo, la primera configuración es un techo de losa de concreto (techo convencional) con dimensiones de 1m de largo x 0.12 m de espesor; la segunda configuración es un techo de losa de concreto con un PCM (techo compuesto), en el cual, se examinó tres diferentes PCM: PCM-MG29, N-Eicosano y un Hidrato de Sal. El espesor de estos PCM's se varió en 0.5, 1.0 y 1.5 cm, respectivamente. Las paredes verticales del sistema se consideran adiabáticas, mientras que la pared superior está sometida a las condiciones climatológicas del lugar de estudio. Asimismo la temperatura al interior se consideró de 24 °C.

Los resultados muestran que para el día frío la configuración de la losa de concreto con espesores de 1.0 y 1.5 cm, respectivamente, del PCM-MG29 son eficientes en reducir los flujos de calor y temperaturas en la superficie interior con respecto al techo convencional durante las horas de trabajo (7:00-18:00 horas). Estos espesores contribuyen a la reducción del flujo de calor total al interior en 7.5 y 43 %, mientras que para la temperatura de logro reducir en 0.8 y 5.5 °C. De manera similar, para el día cálido el PCM-MG29 con espesores de 1.0 y 1.5 cm, redujo el flujo de calor total en un 14 y 35 %, respecto al flujo de calor en el techo convencional.

La Configuración del PCM- N-Eicosano mostró un mejor comportamiento térmico para el día cálido, en donde con espesores de 1.0 y 1.5 cm logró una reducción en la temperatura de 3.7 y 3.8 °C, y asimismo el flujo de calor se redujo en un 3 y 6 %, con respecto a los resultados obtenidos para el techo convencional. Por otro lado, el uso del Hidrato de Sal como PCM no tuvo beneficios desde el punto de vista de reducción del flujo de calor al interior del techo.

En general, la selección adecuada de un material de cambio de fase ayuda en gran manera a reducir el flujo de calor total al interior de una edificación. Asimismo, el espesor del PCM juega un papel importante para lograr estas reducciones de temperatura y flujo de calor durante horarios de radiación solar.

## ABSTRAC

In this research work, a numerical study to assess the thermal performance of a horizontal roof in a building when implementing a phase change material (PCM) was carried out, subject to warm weather conditions in the city of Merida. For the modeling, the coldest and the warmest day of the year were considered.

In the study, the finite volume method (FVM) was used to achieve the solution of the energy conservation equation. Two configurations for the roof were defined: the first configuration was the conventional monolithic slab with dimensions 1 m long and 0.12 m thickness; the second configuration was a monolithic slab with a PCM (composite roof) where three different phase change materials were tested: PCM MG29, N-Eicosane and Salt hydrate. The thicknesses of all the PCM's were set as 0.5, 1.0 and 1.5 cm. The vertical boundaries of the system were considered adiabatic while the upper boundary was subject to the weather conditions of the city under study. In the same way, the inside temperature was defined as 24°C.

The results show that for the coldest day, the roof with the PCM MG29 of 1.0 and 1.5 cm thickness perform efficiently at reducing heat flows and temperatures on the inside surface, compared to the conventional roof. The reduction on the heat flows was 7.5 and 43% respectively, and regarding the temperatures they decreased 0.8 and 5.5°C respectively. Similarly for the warmest day, the PCM MG29 of 1.0 and 1.5 cm thickness, reduced the heat flows 14 and 35% respectively compared to the conventional roof.

The roof with the PCM N-Eicosane showed a better thermal performance for the warmest day at decreasing the temperature 3.7 and 3.8 °C for 1.0 and 1.5 cm thickness respectively and the heat flows diminished 3 and 6% compared to the conventional roof.

In general, the selection of the appropriate phase change material can greatly help to reduce the total heat flow to the inside of a building. Likewise, the thickness of the change phase material plays an important role to achieve such reductions.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la demanda de energía eléctrica ha sido una de las principales causas de contaminación del medio ambiente, ocasionado éste por combustibles fósiles que generan los gases de efecto invernadero, volviéndolo un tema de relevancia en el planeta. Por lo cual, el hombre ha buscado la manera de aprovechar nuevas fuentes alternas para producir energía eléctrica y disminuir la contaminación al medio ambiente; entre ellas la energía solar, energía eólica, energía hidráulica, etc. Estas energías se enfocan en disminuir el impacto negativo que los seres humanos ocasionamos al obtener energía de fuentes contaminantes y agotables.

En particular, la energía solar es obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del sol y que a su vez mediante el uso o aplicación de las tecnologías alternas es convertida en energía útil para el ser humano, ya sea para calentar o enfriar (energía térmica) o para producir energía eléctrica (energía fototérmica) por mencionar algunas de sus aplicaciones.

Las diferentes tecnologías solares se clasifican en pasivas o activas en función de la forma en que capturan, convierten y distribuyen la energía solar. Las técnicas pasivas aprovechan la energía solar directa, sin transformarla; entre ellas se encuentran diferentes técnicas enmarcadas en la arquitectura bioclimática: la orientación de los edificios al sol, la selección de materiales con una masa térmica favorable o que tengan propiedades para la dispersión de luz, así como el diseño de espacios mediante ventilación natural, todo con el fin de lograr el confort térmico al interior de una edificación.

El confort térmico representa un estado en el cual una persona se encuentra en equilibrio fisiológico dado que no existe un malestar térmico. A su vez es un concepto utilizado en el diseño bioclimático como parámetro de control de las condiciones de habitabilidad tanto en espacios interiores como en exteriores.

El uso adecuado de materiales de construcción en las edificaciones permite disminuir las cargas térmicas necesarias para el confort térmico. Cada componente constructiva de una edificación (techos, muros, piso, etc.) tiene un rol importante en el funcionamiento térmico de la misma.

En particular, los techos por estar expuestos a la radiación solar directa, es uno de los componentes que determinan de forma importante el transporte de energía hacia el interior de una edificación. Las propiedades de las superficies de los techos controlan de mayor a menor medida la transferencia de calor, así como el tipo de material que conforma el techo (losa, block, aislantes, etc.). Para mejorar el desempeño térmico de los techos de las edificaciones existen alternativas como son: las películas reflectantes (cool roofs), el uso de vegetación (Green roofs), la integración de intercambiadores de calor (heat exchange- roof).

Recientemente, ha surgido el interés por el uso de la tecnología de materiales de cambio de fase (PCM, por sus siglas en ingles). Los PCM por su composición tienen la capacidad de retener o almacenar la energía durante el proceso de cambio de fase, provocando un retardo o un desplazamiento del ingreso de la energía en la edificación y liberando a ésta con el cambio de condiciones ambientales durante el día.

El almacenamiento de energía térmica (TES, por sus siglas en ingles), también comúnmente llamado almacenamiento de calor o frío, permite el almacenamiento de energía para ser utilizado más tarde. Para recuperar el calor o frío después de algún tiempo, se necesita de un método de almacenamiento que sea reversible. La figura 1-1 muestra posibles métodos; ellos pueden ser divididos dentro de procesos físicos o químicos (Dincen y Rosen, 2002).

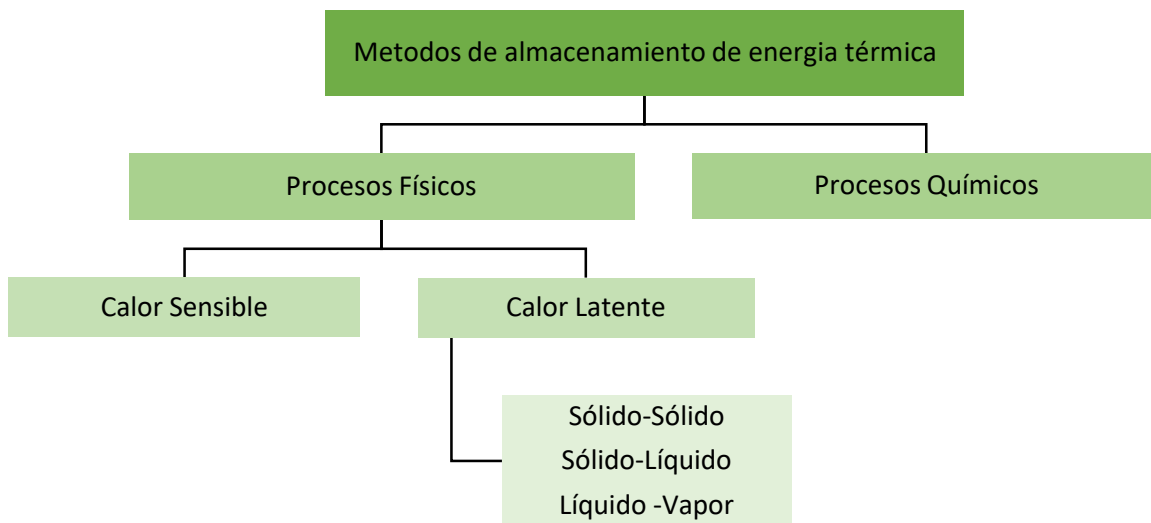


Figura 1-1 Posibles métodos de almacenamiento reversible de calor y frío.

## Introducción

---

El método de almacenamiento más común en la construcción de materiales para las edificaciones comerciales y/o residenciales son los procesos físicos, en especial el uso del calor latente. El calor latente es la capacidad que tiene un material para absorber o liberar energía manteniendo su temperatura constante, en el cual durante este proceso puede producirse un cambio de estado o cambio de fase, ya sea de sólido a líquido (calor de fusión) o de líquido a gaseoso (calor de vaporización).

Un parámetro importante el cual afecta el desempeño de los PCM es su alto calor latente, ya que es mediante esta propiedad, que el PCM almacena y descarga su energía. De esta manera pueden ser divididos conforme su cambio de estado, nombrado sólido a sólido, sólido a líquido, y líquido a gas dependiendo de la temperatura a la que esté sometido cada PCM. La composición química de los PCM's (sólido-líquido) es importante ya que de acuerdo a esta se pueden clasificar como orgánicos, inorgánicos y eutécticos, *Cheng et al. (2017)*; tal como se muestra en la Figura 1-2

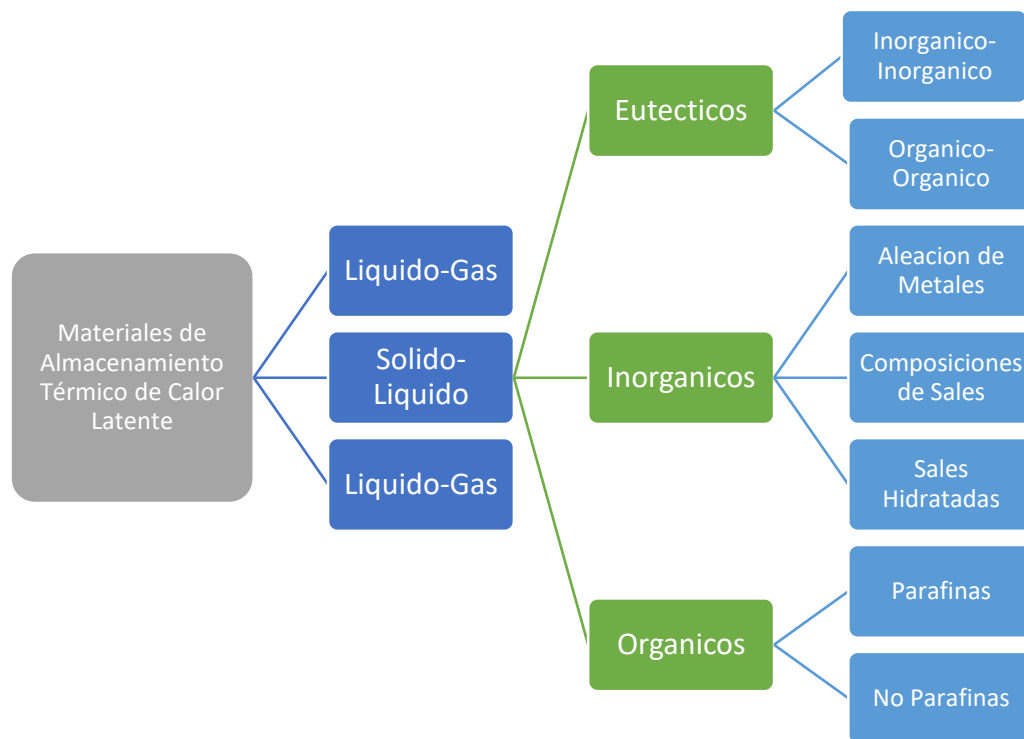


Figura 1-2 Clasificación de los PCM s, *Cheng et al. (2017)*.

Los PCM son sustancias orgánicas o inorgánicas con una temperatura de fusión según las necesidades de las aplicaciones y alto calor latente de fusión, tal como parafina y sales. Durante el día, el PCM se funde y absorbe parte de la ganancia de calor a través del proceso de fusión, y por la noche, el PCM solidifica y libera el calor almacenado. El efecto neto es la reducción de la energía necesaria para la refrigeración durante el día y el cambio a otros tiempos.

La selección del PCM se basa principalmente en la temperatura de fusión del PCM. La temperatura de fusión del PCM debe estar dentro del rango de temperaturas del tiempo para asegurar ciclos de fusión y solidificación. Además, los materiales de bajo costo, no tóxicos, no inflamables y químicamente estables son los PCM preferidos. Los PCM s son uno de los medios de control térmico que se utilizan hoy en los sobres de edificios y en componentes de construcción internas.

En trabajos realizados, se ha implementado los PCM's en las componentes constructivas de las edificaciones, tal es el caso de Alawadi y Alqallaf (2011) consideraron un modelo numérico que consiste de un techo con agujeros huecos cónicos llenados con PCM. Los resultados mostraron que el flujo de calor en el espacio interior se puede reducir hasta un 39% cuando el PCM se introduce en el techo. El rendimiento térmico de las paredes oeste y sur de una edificación fueron analizadas por Lee et al. (2015) en las cuales se observó que las reducciones promedio diarias de transferencia de calor fueron de 27,4 y 10,5% para las paredes orientadas al sur y al oeste, respectivamente. Una investigación numérica y experimental sobre el desempeño térmico de un techo de una edificación con la implementación de PCM fue propuesto por Pasupathy y Verlaj (2008), los resultados mostraron que con una capa doble de PCM es posible mantener una temperatura constante y cómoda durante todo un día.

En el presente trabajo se estudió el efecto del uso de materiales de cambio de fase en techos de losa de concreto para climas cálidos de la República Mexicana.



### 1.1 Estado del Arte

El estudio de techos con uso de materiales de cambio de fase, tanto numéricos como experimentales, ha sido relativamente reciente, a continuación se presentan los resúmenes de los artículos analizados en orden cronológico. Relacionadas con técnicas pasivas en techos como lo es el uso de PCM's.

Alawadhi (2008) realizó un estudio numérico para evaluar el desempeño térmico de un ladrillo de construcción con agujeros cilíndricos, los cuales contienen material de cambio de fase (PCM). En el estudio se utilizó el método de elemento finito (MEF). Se consideraron cuatro configuraciones distintas: un ladrillo con uno, dos y tres cilindros PCM, respectivamente; y un ladrillo sin PCM, en los cuales se examinó tres tipos de parafina como PCM, el N-Octadecano, N-Eicosano y el P116. Las dimensiones del ladrillo son de 0.25m x 0.15m x 0.15m y el diámetro del agujero es de 0.03m. Se observó que la ganancia de calor se reduce cuando el PCM se incorpora en el ladrillo con agujero y, particularmente el N-Eicosano presentó mejor comportamiento térmico entre los diferentes PCM. Se encontró que la configuración de tres cilindros con PCM es la mejor en términos de reducción de energía. El autor concluyó que el flujo de calor en el interior se puede reducir hasta un 17.55% cuando los tres cilindros son introducen y localizan en la línea centro del ladrillo.

Pasupathy y Verlaj (2008) realizaron un estudio numérico-experimental para evaluar el rendimiento térmico del techo de una edificación, el cual contiene un material de cambio de fase (PCM). En el estudio se construyeron dos habitaciones idénticas de dimensiones de 1.22 m de ancho x 1.22 m de largo x 2.44 m de altura. En la primera habitación se analizaron dos configuraciones distintas de techo, la primera configuración contiene un panel PCM, el cual se ubica entre una losa superior y una inferior, en la segunda configuración se adicionó un segundo panel PCM entre la losa superior y el primer panel PCM; y la segunda habitación no contiene un panel PCM sobre el techo de la edificación. El panel esta hecho de acero inoxidable de dimensiones de 2 m ancho x 2 m de largo x 2.54 cm de espesor, en el cual el primer panel contiene sal hidratada inorgánica como PCM, y el segundo panel contiene Climsel C 32. En el estudio numérico se utilizó el método de volumen finito (MVF). En la simulación numérica se varió el espesor de los paneles PCM desde 0.5 a 2.5 cm y asimismo el espesor de la losa de concreto superior de 2 a 6 cm, esto bajo condiciones climáticas de la ciudad de Chennai durante todo el año. Los resultados muestran que con una capa doble de PCM es posible mantener una temperatura constante y cómoda durante todo un día. Se encontró que el espesor de 2,5 para el panel PCM y 4 cm de espesor de la losa de concreto superior son las configuraciones que mostraron mejor comportamiento térmico.

Pasupathy et al. (2008) realizaron un estudio numérico-experimental para evaluar el desempeño térmico del techo de una edificación, en el cual, el techo contiene un material de cambio de fase (PCM). En el estudio se construyeron dos habitaciones idénticas de dimensiones de 1.22 m de ancho x 1.22 m de largo x 2.44 m de altura. En la primera habitación se analizó un panel PCM, el cual se ubica entre una losa superior y una inferior que forman el techo, mientras que la segunda habitación se analizó sin un panel PCM sobre el techo de la edificación. El panel está hecho de acero inoxidable de dimensiones de 2 m ancho x 2 m largo y 2.54 cm de espesor el cual contiene sal hidratada inorgánica como PCM. En el estudio numérico se utilizó el método de volumen finito (MVF); esto, bajo condiciones climáticas de la ciudad de Chennai durante todo el año. Se observó que la diferencia de temperatura de la habitación con techo PCM y la habitación sin PCM no es apreciable como los resultados teóricos.

Alawadhi y Alqallaf (2011) realizaron un estudio numérico del techo de un edificio, el cual tiene un material de cambio de fase (PCM). En el estudio se utilizó el método de elemento finito. Se consideraron cinco geometrías para los orificios del techo, éstas cambian de forma cilíndrica a un tronco de cono mediante la variación de sus diámetros, en los cuales se examinó tres tipos de parafina como PCM: N-Octadecano, N-Eicosano y SUNTECH P116. Se observó que la ganancia de calor se reduce cuando el PCM se incorpora en el techo y, particularmente el N-Eicosano presentó un mejor comportamiento térmico entre los diferentes PCM examinados. Se encontró que la geometría cónica es la mejor en términos de reducción de ganancia de energía. Los autores concluyeron que el flujo de calor en el espacio interior se puede reducir hasta un 39% cuando el PCM se introduce en el techo.

Bozonnet et al. (2011) realizaron un estudio numérico-experimental para evaluar el desempeño térmico en el techo de un edificio de Poitiers (Francia), el cual tiene un recubrimiento reflectante. El techo tiene una inclinación orientada hacia el este, el cual está compuesto de revestimiento de acero aislado con una lámina mineral de 100 mm y sellado por asfalto, y una capa elastómera auto protegida. Se analizaron dos configuraciones del techo, una con la tecnología de recubrimiento reflectante y una sin ella. El estudio numérico se realizó en el software Trnsys. En el estudio se muestra que incluso para un clima moderado como Poitiers, parte central de Francia, el techo reflectante disminuye la temperatura media exterior de la superficie en más de 10 °C, con poca diferencias para temperaturas más bajas, pero un fuerte impacto en las temperaturas más altas. Finalmente, estos estudios pueden ayudar a optimizar el balance energético del edificio durante todo el año con la combinación adecuada de aislamiento de tejado y técnica de techo reflectante.

Kosny et al. (2012) realizaron un estudio experimental para evaluar el desempeño térmico de un techo solar con láminas fotovoltaicas y un disipador de material de cambio de fase (PCM). La construcción del techo consistió en una capa de PCM sobre una cubierta de tejado orientada, un aislamiento de fibra de vidrio y paneles de metal con láminas PV preinstaladas en la parte superior. Se realizaron dos configuraciones distintas de aislamiento, la primera consistió en una capa de fibra de madera y la segunda de fibra de vidrio, evaluadas en condiciones de invierno y verano respectivamente. Los resultados de las pruebas mostraron que el 30% de calentamiento y 50% de reducción de la carga de enfriamiento son posibles con la configuración experimental del techo. Los autores concluyeron que mediante datos registrados es posible mejorar el desempeño térmico del disipador de calor PCM y la modificación de las propiedades térmicas del aislante colocado encima del PCM.

Alqallaf y Alawadhi (2013) realizaron un estudio numérico-experimental para evaluar el desempeño térmico del techo de una edificación, en el cual el techo contiene material de cambio de fase (PCM). En el estudio se construyó un techo de losa de concreto con dimensiones de 1.5 m ancho x 1.5 m largo x 0.15 m de altura, el cual contiene veinticinco orificios cilíndricos. Se consideraron cinco geometrías para los orificios del techo, mediante la variación de sus diámetros y alturas, en los cuales se examinó tres tipos de parafina como PCM: A28, A32 Y A38. La losa de concreto se colocó en la parte superior de un recinto aislado de dimensiones de 1.5 m de ancho x 1.5 m largo x 1.5 m de altura. En el estudio numérico se utilizó el método de elemento finito (MEF). Los resultados muestran que la ganancia de calor se reduce cuando el PCM se incorpora en el techo y particularmente el A32 presentó un mejor comportamiento térmico entre los diferentes PCM examinados. Asimismo se encontró que la configuración cilíndrica con un diámetro de 0.1979 m y una altura de 0.0383 m es la mejor en términos de ganancia. Los autores concluyeron que el flujo de calor en el interior se puede reducir entre un 9 y 17.26 %.

Azemati et al. (2013) realizaron un estudio numérico para evaluar el efecto de la cubierta de pintura mineral en el desempeño térmico de una habitación. En el estudio se realizó un modelo de un cuarto de dimensiones de 1m x 1m. El aislamiento tiene un espesor de 400  $\mu\text{m}$  en las paredes y de 400  $\mu\text{m}$  a 1mm en el techo; la habitación se considera que está en climas moderados. Se utilizó el software GAMBIT para la geometría del modelo, y para la modelación de las ecuaciones de flujo se utilizó, el software FLUENT. Los resultados mostraron que el revestimiento con partículas minerales tiene un papel importante en el aislamiento térmico y conduce a una disminución del 17% en el consumo de energía. Los autores concluyeron que el uso de recubrimiento de partículas de cerámica hace que la temperatura ambiente sea realmente cercana a la temperatura de confort.

Dos Santos y Mendes (2013) realizaron un estudio numérico para evaluar el desempeño térmico de un sistema pasivo en el techo de un edificio, el cual está compuesto de arena porosa. En el estudio se utilizó el método de volumen finito (MVF). Se analizaron dos configuraciones del techo, la primera configuración consiste de una capa de arena de 5 cm de espesor, una capa de betún de 4 cm de espesor y una capa de concreto de 10 cm de espesor, la segunda configuración consiste de dos capas de arena de 5 y 10 cm de espesor, respectivamente, colocadas sobre una placa delgada de cobre la cual está en contacto con el aire ambiente. Los resultados mostraron que la capa de concreto y la capa de arena de 10 cm de espesor tienen un mejor desempeño térmico. Los autores concluyeron que debe realizarse una configuración experimental para validar un sistema de enfriamiento pasivo.

Chou et al. (2013) realizaron un estudio numérico-experimental para evaluar el comportamiento térmico de un techo de chapa metálica en una edificación, el cual el techo contiene material de cambio de fase (PCM). En el estudio se construyeron tres techos de dimensiones de 600 x 600 mm, en los cuales cada techo tiene una configuración distinta. La Configuración 1 consiste de una sola capa de techo corrugado de 0.5 mm de espesor, la Configuración 2 consiste de una capa de poliuretano de 15 mm de espesor entre dos capas de techo corrugado de 0.5 mm de espesor cada una, y la Configuración 3 consiste de una capa de PCM y una de poliuretano de 7 y 15 mm respectivamente, entre dos capas de techo corrugado, el cual contiene cuatro bolsas rectangulares de PCM, éstas se insertaron de forma separada y simétrica. Cada bolsa tenía dimensiones de 180 mm ancho x 240 mm largo x 7 mm altura. El estudio numérico se realizó con el software COMSOL Multiphysics. Los resultados muestran que el nuevo diseño (Configuración 3) puede reducir eficazmente el flujo térmico hacia abajo a través del techo en la edificación. Como consecuencia, la carga de enfriamiento de la casa puede ser menor y se puede ahorrar energía eléctrica para enfriamiento.

Kong et al. (2013) realizaron un estudio experimental para evaluar el desempeño térmico de las paredes y el techo de una edificación, los cuales contienen paneles con material de cambio de fase (PCM). En el estudio se construyeron tres habitaciones de ensayo idénticas de dimensiones de 2 m de ancho x 2 m de largo x 2.4 de altura, en las cuales se implementó una configuración distinta a cada una de ellas. En la Configuración 1, los paneles PCM se colocaron en el exterior de las paredes y el techo (PCMOW), la Configuración 2, los paneles PCM se colocaron en el interior de las paredes y el techo (PCMIW) y en la Configuración 3 sin paneles PCM. Los paneles tienen dimensiones de 40 x 40 cm. Los paneles exteriores contienen ácido caprico como PCM y los paneles interiores contienen una mezcla de ácido caprico y 1-Dodecanol como PCM. Las paredes tienen un espesor de 240 mm las cuales están compuestas de ladrillos perforados de dimensiones de 240mm de ancho x 115mm de largo x 90 mm de altura; el techo compuesto de un tablero de concreto de refuerzo de fibra de vidrio en la parte superior e inferior, y de un tablero de poliestireno en el centro de 12.55 y 90 mm,

respectivamente. Los resultados muestran que los paneles de material de cambio de fase utilizados en las habitaciones pueden cambiar el tiempo máximo y reducir la temperatura pico, lo que beneficia el ambiente térmico interior, en condiciones de verano en China.

Kong et al. (2014) realizaron un estudio numérico-experimental para evaluar el desempeño térmico en las paredes y el techo de un edificio, los cuales contienen material de cambio de fase (PCM). Se analizaron dos configuraciones de PCM, la primera configuración PCMOW consiste en paneles de PCM en las superficies exteriores de las paredes y el techo, la segunda PCMIW consiste en paneles de PCM en las superficies interiores de las paredes y el techo; y una configuración sin PCM. El estudio numérico se realizó utilizando el software FLUENT 6.3, mientras que en el estudio experimental se construyeron tres habitaciones idénticas de dimensiones de 2m de largo x 2m de ancho y 2.4m de altura. El análisis teórico de la variación de la temperatura en las paredes y el techo para los PCMOW y PCMIW muestran los mejores resultados en el desempeño térmico. Finalmente, la validación numérica indica que el modelo se puede utilizar para predecir teóricamente el comportamiento térmico de los sistemas PCM aplicados en otros lugares y zonas climáticas.

Lee et al. (2014) realizaron un estudio experimental para evaluar el desempeño térmico en las paredes orientadas al sur y oeste de un edificio, en la cual las paredes contienen líneas de paneles con una capa delgada de material de cambio de fase (PCM). En el estudio se implementó el método *plug-and-play Wall* (PPW) con el cual se realizaron las pruebas en las paredes del edificio. Se utilizaron 22 paneles situados a lo largo del medio y fondo de las líneas (10 paneles en la pared sur y 12 en la pared oeste), cada panel tiene un tamaño de 1.62 m x 0.88 m, un espesor de 76 mm y una resistencia térmica de 2.82 m<sup>2</sup>k/w. Sobre cada panel fue instalado el material de cambio de fase de tabla térmica (PCMTBs). Se observó que las reducciones promedio diarias de transferencia de calor fueron de 27,4 y 10,5% para las paredes orientadas al sur y al oeste, respectivamente. Las reducciones de flujo térmico promedio cuando los flujos de calor de las paredes de control se encuentran en sus picos fueron 67 y 80,2%, para las mismas orientaciones. Los autores concluyeron que la integración del PCMTB produjo reducciones promedio del 10,7% para la pared sur y del 8,5% para la pared oeste.

Dong et al. (2015) realizaron un estudio numérico para evaluar el comportamiento térmico en el techo de un edificio, en el cual contiene un material de cambio de fase (PCM). En el estudio se utilizó el método de volumen finito (MVF) en el software FLUENT. El techo se dividió en cuatro capas de superior a inferior, la primera con un espesor de 2 mm de aleación de aluminio, la segunda de 20 mm de cemento, la tercera de 100 mm de material de techo común y tejado PCM, es hormigón de piedra fina y PCM, respectivamente, y la cuarta de 100 mm de hormigón armado. Los resultados mostraron que el efecto de los tejados PCM sobre el retardo de temperatura en la sala es muy fuerte y el tiempo de retardo de las

temperaturas pico de la capa base en los tejados PCM son más de 3 h que el techo común. Los autores concluyeron que en la temperatura media, el flujo de calor de la superficie superior en la capa base y la fracción líquida de la capa de PCM disminuyen con la pendiente del techo aumentando. Finalmente, el efecto de la inclinación del techo sobre la temperatura media y el flujo de calor de la superficie superior es débil en comparación con la fracción líquida de la capa de PCM.

Guichard et al. (2015) realizaron un estudio numérico-experimental para evaluar el techo complejo de una edificación, el cual contiene un material de cambio de fase (PCM). En el estudio se construyó una celda de pruebas de dimensiones de 3m de ancho x 3m de largo x 3m de altura, en la celda se analizó un techo con una inclinación de 20°, el cual está compuesto de cuatro capas distintas: la primera capa de acero galvanizado corrugado de 1mm de espesor, la segunda una cavidad de aire con un espaciamiento de 280 mm, la tercera capa de PCM Energain de 5.26 mm de espesor y la cuarta capa de cartón de yeso de 12.55mm de espesor. En el estudio numérico se utilizó el software ISOLAB. Los resultados muestran que el PCM es capaz de reducir la transferencia de calor desde el exterior a interior de la celda de prueba bajo condiciones climáticas de la isla de Reunión.

Chung y Park (2016) realizaron un estudio experimental para evaluar el desempeño térmico en el techo de un edificio, el cual contiene un recubrimiento reflectivo con material de cambio de fase (PCM). En el estudio se construyó un modelo a escala de dimensiones de 600 mm de largo x 600mm de ancho x 600 mm de altura. Se analizaron cinco configuraciones del techo, la primera configuración consiste de caucho de uretano verde impermeable, la segunda consiste mortero gris impermeable, la tercera de pintura blanca, la cuarta de tejado dopado con PCM y la quinta de un tejado normal, las cuales fueron evaluadas en condiciones de invierno y verano respectivamente. Los resultados mostraron que las tejas dopadas con PCM producen una disminución de temperatura en la superficie, manteniendo la temperatura baja en la cámara en condiciones de verano. Finalmente, en condiciones de invierno el tejado dopado con PCM mantiene la temperatura de la superficie baja, asimismo en invierno la cámara se mantiene a temperaturas adecuadas con la pintura blanca.

Kibrian et al. (2016) realizaron un estudio numérico para evaluar y comparar el desempeño térmico de los recubrimientos reflectivos y los materiales de cambio de fase (PCM), en el techo de una edificación. En el estudio el techo fue seccionado en cuatro capas de inferior a superior respectivamente; la primera capa de metal, la segunda de un material aislador, la tercera de PCM, y la capa superior. En la tercera capa se examinó cinco diferentes PCM: BIOPCM, enerciel 22, ISH, CACI2.6H<sub>2</sub>O y parafina. Asimismo la capa superior se examinó cinco diferentes techos: metal, SPM, concreto, edificado y asfalto. Se utilizó el software DesingBuilder. Los resultados muestran que la parafina PCM presentó mejor comportamiento en comparación con los demás PCM examinados. El flujo máximo de

TRHG fue 54% menos para el techo PCM que el techo con recubrimiento reflectivo en una amplia gama de albedo. Los autores concluyeron que la tecnología de techos PCM es el futuro de ahorro de energía y la reducción de la isla de calor urbana (UHI).

Kharsen y Al-Khawaja (2016) realizaron un balance de energía para evaluar el desempeño energético de diferentes medidas de readaptación en una edificación residencial. El modelo de estudio tiene una superficie de piso de 144 m<sup>2</sup>, cuatro paredes externas idénticas (cada una con 12m de largo y 3m de altura) y una ventana en cada pared de 5 m<sup>2</sup> de área. Se analizaron cinco tipos de medidas de readaptación: (1) el coeficiente de transferencia de calor de las paredes, (2) la temperatura interior, (3) eficiencia de iluminación, (4) cantidad de ventanas y (5) el color de la capa externa. Los resultados mostraron que el ahorro de energía del 53% se obtiene en las condiciones climáticas de Qatar. Finalmente, el periodo de reembolso de las medidas examinadas es corto y varía entre 0.5 y 4 años. Los autores concluyeron que implementando todas las medidas de readaptación el periodo de reembolso puede ser de 1.5 años.

Lei et al. (2016) realizaron un estudio numérico-experimental para evaluar el desempeño térmico mediante la integración de revestimiento de color y material de cambio de fase (PCM) en edificios para reducir las cargas de enfriamiento en clima tropical en Singapur. Se analizaron cuatro configuraciones distintas de recubrimiento, la primera configuración tipo 1 (control) se recubre con pintura normal en la superficie, la segunda tipo 2(CP) se recubre con pintura blanca en la superficie, la tercera tipo 3(PCM) adopta el recubrimiento desnatado modificado con PCM con la pintura normal recubierta en la superficie y la cuarta tipo 4 (CP + PCM) es el sistema de revestimiento de color blanco PCM, en el cual la capa desnatada modificada PCM es recubierta con pintura blanca en la superficie. El estudio numérico se realizó utilizando el software Energy Plus, mientras que para el estudio experimental se utilizó una caja cúbica bien aislada de dimensiones 700mm x 200mm x 130mm. Los resultados mostraron que la aplicación del revestimiento de color blanco PCM propuesto en el envoltorio del edificio podría ser eficaz durante todo el año con un ahorro de energía mensual de 5 a 12% debido a la condición climática uniforme durante todo el año en la zona tropical de Singapur.

Liu et al. (2016) realizaron un estudio numérico para evaluar el desempeño térmico del techo de un edificio, el cual tiene un doble acristalamiento lleno de material de cambio de fase (PCM). Se estudiaron los efectos de la propiedad semi-transparente del acristalado del techo, el ángulo cenital y el espesor del sistema. En el estudio se utilizó un esquema explícito de diferencias finitas, en el cual la región de PCM y el acristalado se dividieron en 12 y 6 partes

iguales, respectivamente. Los resultados mostraron que la propiedad semi-transparente y el ángulo cenital tienen un efecto grande sobre el desempeño térmico, incluyendo el factor de retraso, la energía total transmitida y la energía solar transmitida. Los autores concluyeron que el valor de la temperatura del modelo de ángulo de dependencia es menor que el modelo de ángulo independiente. El efecto del espesor del techo de doble acristalamiento sobre el desempeño térmico es mayor excepto por la temperatura interior. Con el incremento del espesor, el factor de retraso se incrementa.

Lu et al. (2016) realizaron un estudio experimental para evaluar el desempeño térmico y la eficiencia energética de un techo nuevo, en el cual se implementa un material de cambio de fase (PCM) y materiales reflectivos. En el estudio se utilizaron tres configuraciones de techos distintas, la primera de un techo cubierto con PCM, la segunda de un techo CR cubierto con materiales reflectivos y la tercera de un techo cubierto con PCM y recubrimiento (PCR). Los resultados indicaron que el techo de PCR muestra mejor aislamiento térmico y desempeño de inercia térmica comparado con el techo CR. Finalmente, la aplicación de los materiales reflectivos en el techo PCM puede reducir la temperatura de la superficie exterior del techo. Los autores concluyeron que la aplicación del techo de PCR puede reducir la carga de acondicionamiento de aire y calefacción del edificio.

Marín et al. (2016) realizaron un estudio numérico para evaluar el desempeño energético en un prototipo de un edificio liviano desmontable, al cual se aplicó la tecnología de material de cambio de fase (PCM). En el estudio se utilizó el software Energy Plus. El prototipo de construcción de una sola zona tiene dimensiones de 2.4m de ancho, largo y altura, respectivamente, un acristalado de 1m de ancho x 1m de altura, y una puerta orientada al norte de 0.8m de ancho x 2m de altura. Se utilizaron dos configuraciones de prototipo, uno sin la inclusión de PCM y la otra con la inclusión de PCM de tabla de yeso en las componentes del mismo. Los resultados numéricos resaltaron el potencial de usar tableros de yeso mejorados por PCM en edificios ligeros para aumentar el rendimiento energético durante las estaciones de calefacción y enfriamiento en zonas climáticas cálidas y templadas. Los autores concluyeron que el uso de PCM en las componentes del edificio se maximiza cuando se aplica a edificios ligeros.

Muriel et al. (2016) realizaron un estudio numérico-experimental para evaluar el desempeño térmico de los sistemas pasivos y activos en las edificaciones. Se aplicaron los estudios y tecnologías del *air-PCM-TES*, para el enfriamiento y calentamiento de las edificaciones, en el cual se utilizaron los métodos pasivos y activos, respectivamente. Los resultados mostraron que para los métodos activos, el consumo de energía por enfriamiento en la noche fue de 0 a



100 W, y en el día de 0 a 300 W, además se observó que la temperatura en el interior fue de 26 °C y el flujo de calor varió entre 10 y 145 W. Los autores concluyeron que los métodos pasivos presentan ventajas como el bajo costo inicial, sin embargo el calor almacenado es limitado no operando efectivamente en muchos climas cálidos, en donde se requiere altas diferencias de temperaturas.

Elarga et al. (2017) realizaron un estudio numérico-experimental para evaluar el desempeño térmico del techo de una edificación, en el cual el techo contiene un material de cambio de fase (PCM). En el estudio se utilizó un techo inclinado de madera enmarcada, con rejillas de arcilla como cubierta exterior, el cual se dividió en tres secciones diferentes, en la que a cada sección se le instaló una configuración de techo. La Configuración 1 consta de cuatro capas: la primera capa de azulejo de tejas, la segunda de un espacio permeable de aire, la tercera de un aislamiento XPS y la cuarta una placa de yeso. Las Configuraciones 2 y 3 constan de las mismas capas de la Configuración 1, en donde a la Configuración 2 se adicionó un PCM RT28HC y a la configuración 3 un PCM RT35. En el estudio numérico se utilizó el método de diferencias finitas (MDF). Los resultados experimentales mostraron una reducción de la carga térmica entre el 13 y el 59% dependiendo de la tipología PCM, resaltando que para alcanzar el rendimiento esperado se deben seleccionar cuidadosamente los tipos de PCM adecuados.

### 1.2 Conclusión de la revisión del estado del arte

De acuerdo a la revisión bibliográfica, se concluye que se han realizado diferentes configuraciones de techo con la implementación del material de cambio de fase (PCM), pero hasta el momento no se ha analizado la configuración de techo de concreto de losa con diferentes materiales de cambio de fase para la reducción de la carga térmica total en el interior de la edificación para México.

### 1.3 Objetivo

Evaluar el comportamiento térmico de diferentes materiales de cambio de fase en techos de losa de concreto para edificaciones en un clima cálido de la república Mexicana.

#### 1.3.1 Objetivos específicos

- Aprender la técnica de volúmenes finitos.
- Desarrollar un código numérico para simular la transferencia de calor en un medio compuesto de techo de losa concreto con un material de cambio de fase (PCM).
- Seleccionar una ciudad con un clima cálido de la república Mexicana.
- Realizar el estudio paramétrico de un techo con y sin PCM, considerando 3 tipos diferentes de PCM para el día más cálido y más frío de una ciudad con clima cálido.

### 1.4 Alcance

Se desarrolló un código computacional para el modelado del sistema (techo con material de cambio de fase) en estado transitorio mediante la técnica de volúmenes finitos. Se realizará el estudio paramétrico con las condiciones climatológicas seleccionadas de la República Mexicana, dimensión del concreto, tipo y espesor de PCM. Mediante valores de fluxes de calor y temperatura se llevó a cabo la evaluación térmica para realizar una propuesta de techo. Para llevar a cabo este trabajo, se considera la plataforma computacional desarrollada en Cenidet, en el modelado numérico de techos.

# CAPÍTULO 2

## FUNDAMENTOS Y CONCEPTOS DE MATERIAL DE CAMBIO DE FASE (PCM)

En el presente capítulo se muestran los fundamentos y conceptos generales acerca de los PCM's, los cuales son necesarios para el uso de PCM en la aplicación de confort térmico en las edificaciones. La clasificación de los PCM's disponibles, ventajas y desventajas y el concepto de calor latente son descritos también. El objetivo de este capítulo es proporcionar información básica para esta tesis, y se concentra en un PCM sólido-líquido.

### 2.1 Cambio de Fase

En termodinámica, el término fase se refiere a la cantidad de materia que es homogénea en toda su extensión tanto en la composición química como en la estructura física. Homogeneidad en la estructura física significa que la materia es toda sólida, o toda líquida, o toda vapor (o equivalentemente, todo gas) o también llamados estados de la materia (Moran y Shapiro, 2004). El concepto de sólido y líquido está relacionado principalmente con la cinética (o energía) de las moléculas. El sólido consiste de una estructura molecular, en donde el movimiento de las moléculas queda restringido solo a vibraciones, mientras que en los líquidos sus moléculas tienen mayor movimiento que en los sólidos. De esta forma, las fuerzas de atracción molecular son capaces de mantenerlas juntos dentro de un volumen definido.

Una transición de una fase a otra es un cambio de fase. Para una presión dada, los cambios de fase se dan a una temperatura definida; el cambio entre una fase de baja energía y una fase de mayor energía requiere, por tanto, la adición o eliminación de energía. La adición de energía a un material que conduce a la fusión se conoce como proceso endotérmico, mientras que la eliminación de energía que conduce a la congelación se conoce como proceso exotérmico.

### 2.2 Almacenamiento de Energía Térmica

La energía térmica se puede almacenar aumentando o disminuyendo la temperatura de una sustancia (es decir, alterando su calor sensible), cambiando la fase de la sustancia (alterando su calor latente) o mediante una combinación de ambos (Dincer y Rosen, 2002). El almacenamiento de energía térmica generalmente posee los siguientes beneficios: a) reducción en el consumo de energía; b) aumento de la flexibilidad de la operación; c) reducción de los costos de mantenimiento; d) mejora de la eficiencia y eficacia de los sistemas operativos y e) disminución de los gases de efecto invernadero

### 2.2.1 Calor Sensible

El calor sensible es la forma más común de almacenamiento de energía térmica. El calor sensible es el calor absorbido o cedido por una sustancia para elevar o disminuir su temperatura, siempre y cuando en el transcurso del proceso no se produzcan ni cambios de estado ni reacciones químicas (Figura 2-1).

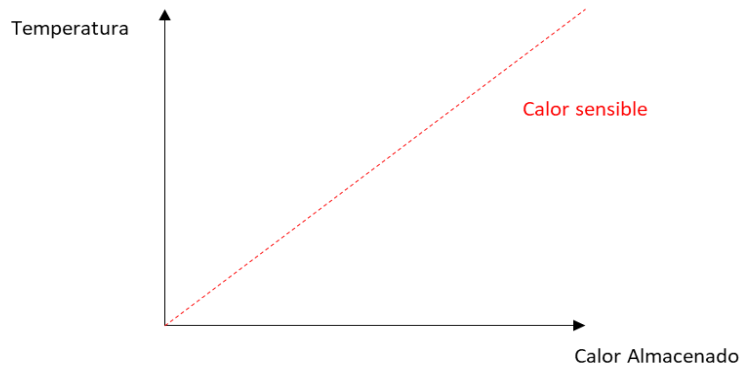


Figura 2-1 Almacenamiento de energía como calor sensible.

El calor sensible se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$Q_s = m C_p (T_2 - T_1) \quad (2.1)$$

Donde

$Q_s$  = Calor sensible

$m$  = Masa de la sustancia

$C_p$  = Calor específico

$T_2$  = Temperatura final

$T_1$  = Temperatura inicial

Los cambios sensibles de calor en un material dependen de su capacidad calor específica y del cambio de temperatura. El almacenamiento de calor sensible se utiliza a menudo con sólidos como piedra o ladrillo, o líquidos como el agua, como material de almacenamiento. Los gases tienen una capacidad calorífica volumétrica muy baja y, por lo tanto, no se utilizan para el almacenamiento de calor sensible.

### 2.2.2 Calor Latente

El calor latente es el calor absorbido o cedido por una sustancia cuando se produce un cambio de estado de la misma. Depende de su masa, su densidad y su calor específico. En partículas en las edificaciones, los edificios de gran inercia térmica tienen variaciones térmicas más estables ya que el calor acumulado durante el día se libera en el periodo nocturno, esto quiere decir que a mayor inercia térmica mayor estabilidad térmica. Además conlleva dos fenómenos, uno de ellos es el de la amortiguación en la variación de la temperatura y otro el retardo de la temperatura interior respecto a la exterior.

Por lo tanto, si el calor se almacena como calor latente, se utiliza un cambio de fase del material de almacenamiento. Hay varias opciones con ventajas y desventajas distintas. Los cambios de fase que pueden ocurrir en un material se muestran en la Figura 2-2.



Figura 2-2 Cambios de estado de la materia.

En las edificaciones es común encontrar las aplicaciones de PCM de sólido-líquido. El sólido-líquido de cambio de fase por fusión y solidificación puede almacenar grandes cantidades de calor o frío, si se selecciona un material adecuado. La fusión se caracteriza por un pequeño cambio de volumen, generalmente inferior al 10% (Mehling y Cabeza, 2008). Si un recipiente puede ajustar la fase con el volumen mayor, usualmente el líquido, la presión no cambia significativamente y consecuentemente la fusión y solidificación del material de almacenamiento se llevan a cabo a una temperatura constante.

Durante la fusión, mientras el calor se transfiere al material de almacenamiento, el material aún mantiene su temperatura constante a la temperatura de fusión, también llamada temperatura de cambio de fase (Figura 2-3).

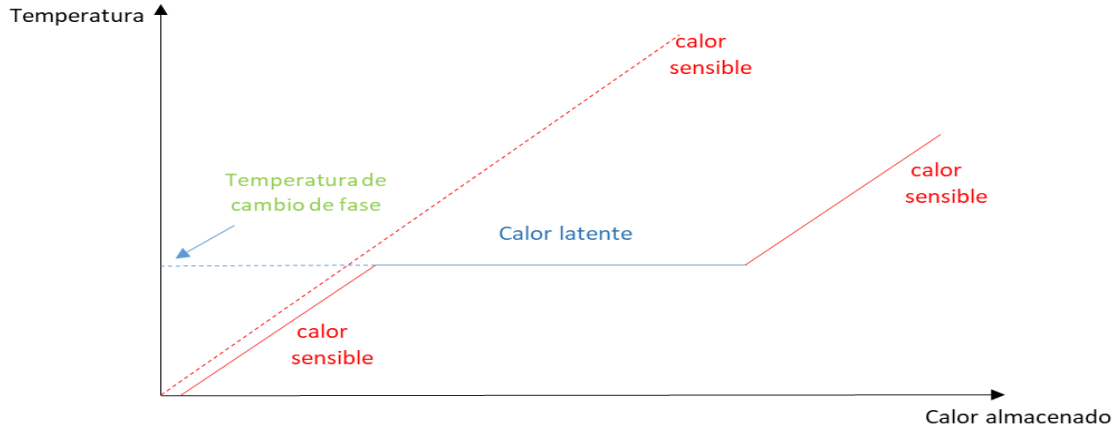


Figura 2-3 Almacenamiento de calor como calor latente para el caso de cambio de fase sólido-líquido.

### 2.3 Materiales de cambio de fase (PCM)

En general, el almacenamiento de calor latente de PCM puede lograrse mediante cambios de fase sólido-sólido, sólido-líquido, sólido-gas y líquido-gas. Sin embargo, el cambio de fase utilizado en la mayoría de las aplicaciones de envolvente de edificios es un proceso sólido-líquido. Generalmente los PCM conforme su composición química pueden clasificarse como orgánicos, inorgánicos y eutécticos. Cada una de estas clasificaciones contiene una subcategoría (Figura 2-4), las cuales muestran ventajas y desventajas según el tipo específico de PCM a utilizar.

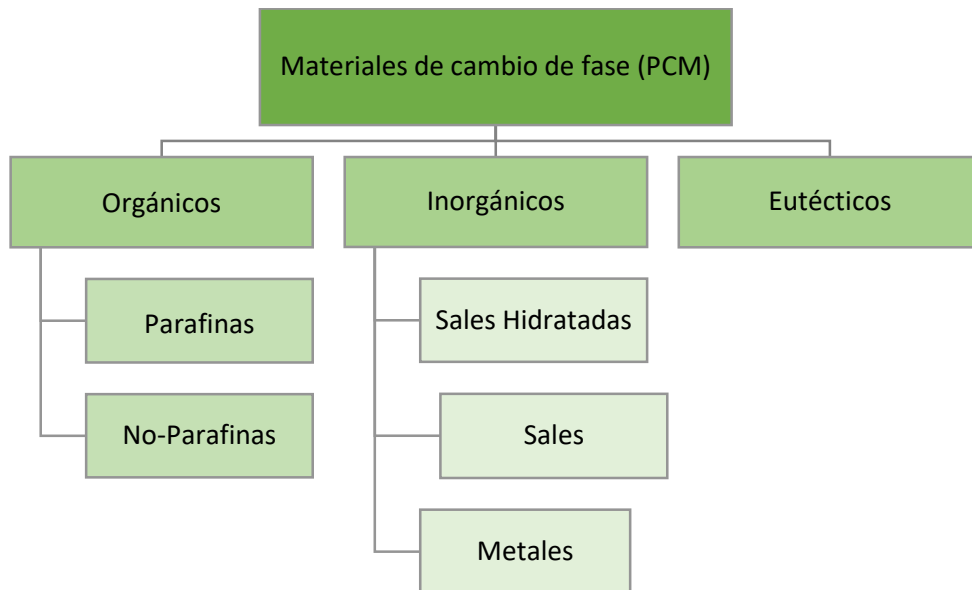


Figura 2-4 Clasificación de los materiales de cambio de fase (PCM's).

El principal enfoque en la presente tesis será sobre los PCM's sólido- líquido. Los PCM's más usados en las edificaciones para almacenamiento térmico son las parafinas y sales hidratadas debido a su gran disponibilidad en el mercado internacional y su bajo costo. Una comparación de las ventajas y desventajas de los PCM's han sido mostrados, Zeng et al. (2017), esta se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2-1 Comparación de PCM's orgánicos, inorgánicos y eutécticos. (Zeng et al., 2017)

	Orgánicos	Inorgánicos	Eutécticos
Ventajas	No corrosivos. Bajo/sin subenfriamiento.  Estabilidad química y térmica.  Compatibilidad con materiales de construcción	Mayor entalpia de cambio de fase.  Alta conductividad térmica. Económico.	Temperatura de fusión aguda.  Alta densidad volumétrica de almacenamiento térmico.
Desventajas	Baja conductividad térmica.  Inflamabilidad.	Súper enfriamiento.  Corrosivo.  Falta de estabilidad térmica.  Segregación.	Datos probados limitados disponibles, debido a propiedades termofísicas.

## 2.3.1 PCM's Orgánicos

Un material de cambio de fase que contiene compuesto de carbono se conoce como PCM orgánico. Estos PCM's son compuestos de parafinas, ácidos grasos, éster de ácidos grasos o alcoholes de azúcares. La ventaja más importante del uso de los PCM's orgánicos es su capacidad para fundir y solidificar rápidamente sin segregación de fase (lo que conduce a la degradación de su calor latente de fusión) y es un hecho que estos PCM's cristalizan con poco o sin superenfriamiento (Kosny, 2015). Estos materiales cubren un intervalo de temperatura entre 0° C y aproximadamente 200 °C. La mayoría de los PCM's orgánicos no son estables a temperaturas más altas a la de su intervalo dado, y asimismo la densidad de algunos es inferior a 103 Kg/m<sup>3</sup>, menor que la densidad de la mayoría de los PCM's inorgánicos (Mehling y cabeza, 2008).

## 2.3.1.1 Parafinas PCM

Los PCM's orgánicos más utilizados son las parafinas. En química orgánica, la parafina es el nombre común de los hidrocarburos de alcanos con la fórmula general  $C_nH_{2n+2}$ . El potencial de la parafina para aplicaciones de almacenamiento térmico proviene del hecho de que la cristalización de la cadena (CH<sub>3</sub>) libera una gran cantidad de calor latente durante los procesos de cambio de fase. Las parafinas de calidad comercial se obtienen de la destilación de petróleo y no son sustancias puras, sino una mezcla de diferentes hidrocarburos. La Tabla 2.2 resume las propiedades físicas básicas de las parafinas con números de carbono entre C (14) y C (33).

Tabla 2-2. Propiedades térmicas básicas de n-parafinas (Kosny, 2008).

Material	Número de carbón	Símbolo químico	Punto de Fusión	Calor de fusión	Peso molecular
Unidades			°C	KJ/Kg	g/ mole
n-Tetradecano	C(14)	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	6	228	198.39
n-Pentadecano	C(15)	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	10	205	212.42
n-Hexadecano	C(16)	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	18	237	226.44
n-Heptadecano	C(17)	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>	22	213	240.47
n-Octadecano	C(18)	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>	28	244	254.5
n-Nonadecano	C(19)	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>	32	222	268.53
n-Eicosano	C(20)	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>	37	246	282.55
n-Henicoso	C(21)	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>	40.5	200	296.58
n-Docosano	C(22)	C <sub>22</sub> H <sub>46</sub>	44.5	249	310.61
n-Tricosano	C(23)	C <sub>23</sub> H <sub>48</sub>	47.5	232	324.63
n-Tetracosano	C(24)	C <sub>24</sub> H <sub>50</sub>	52	255	338.66
n-Pentacosano	C(25)	C <sub>25</sub> H <sub>52</sub>	54	238	352.69



n-Hexacosano	C(26)	$C_{26}H_{54}$	56.5	256	366.71
n-Heptacosano	C(27)	$C_{27}H_{56}$	59	236	390.74
n-Octacosano	C(28)	$C_{28}H_{58}$	64.5	253	394.77
n-Nonacosano	C(29)	$C_{29}H_{60}$	65	240	408.79
n-Triacontano	C(30)	$C_{30}H_{62}$	66	251	422.82
n-Hentriacontano	C(31)	$C_{31}H_{64}$	67	242	436.85
n-Dotriacontano	C(32)	$C_{32}H_{66}$	69	170	450.87
n-Triatriacontano	C(33)	$C_{33}H_{68}$	71	268	464.9

Como se observa en la Tabla anterior, las temperaturas de fusión de los n-alcanos aumentan con el número creciente de átomos de carbono. Se puede observar que estas parafinas tienen puntos de fusión entre 6 y 71 ° C, el cual se encuentra en el intervalo de temperatura para aplicación de edificaciones (*Kosny, 2015*).

Las parafinas muestran una buena densidad de almacenamiento con respecto a la masa, y se funden y solidifican de forma congruente con poco o sin subenfriamiento. Asimismo, estas presentan gran estabilidad química y buenas propiedades de nucleación. Sin embargo, las parafinas también muestran algunas propiedades no deseables como: la baja conductividad térmica, flamabilidad relativamente alta y los productos de combustión parafínicos son tóxicos.

### 2.3.1.2 Parafinas PCM

Las no-parafinas PCM constituyen un grupo altamente diversificados de compuestos químicos. Cada uno de estos materiales tiene sus propias características físicas a diferencias de las parafinas que tienen propiedades muy similares. Las no-parafinas PCM's se obtienen a partir de grasa y vegetación animal como sebo de ternera, la manteca de cerdo, la palma, el coco y la soya. Son hidrocarburos hidrogenados, que son químicamente estables y no tóxicos. Ellos consisten de ésteres, ácidos grasos, alcoholes de azúcar y glicol los cuales se describen a continuación.

### 2.3.1.3 Ácidos Grasos

Un ácido graso se caracteriza por la fórmula  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2N}\text{COOH}$ . En contraste con una parafina, un extremo de la molécula termina con un grupo  $-\text{COOH}$  en lugar de un grupo  $-\text{CH}_3$ . Estos PCM realizan una solidificación con muy poco sobre enfriamiento y tienen un calor de fusión similar a las parafinas, que son ambas cualidades positivas. En la Tabla 2.3 se enumeran algunos de los ácidos grasos saturados más comunes.

Tabla 2-3 Ejemplos de ácidos grasos que se han investigado como PCM (Mehling y Cabeza, 2008).

Material	Temperatura de Fusión (°C)	Entalpia de Fusión (KJ/ Kg)	Conductividad Térmica (W/m K)	Densidad (Kg/ m <sup>3</sup> )
Ácido caprilico $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{COOH}$	16	149	0.149 (líquido, 38°C) -	901 (líquido, 30°C), 981 (sólido, 13°C)
Acido caprico $(\text{CH}_2)_8\text{COOH}$	32	153	0.149 (líquido, 40°C) -	886 (líquido, 40°C), 1004 (sólido, 24°)
Ácido laurico $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$	42-44	178	0.147 (líquido, 50°C) -	870 (líquido, 50°C), 1007 (sólido, 24°C)
Ácido mirístico $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$	58	186,204	- 0.17(sólido)	861 (líquido, 55°C), 990 (sólido, 24 °C)
Ácido palmítico $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$	61,64	185,203	- -	850 (líquido, 65 °C), 989 (sólido, 24°C)

2.3.1.4 Alcoholes de azúcar

Los alcoholes de azúcar son una forma hidrogenada de hidrocarburos. La estructura química general es HOCH<sub>2</sub> [CH (OH)]<sub>n</sub>CH<sub>2</sub>OH. Por lo general, tienen mayor calor y densidad latente que las parafinas y los ácidos grasos; sin embargo tienen temperaturas de fusión superiores a los 90°C, lo que limita sus aplicaciones de construcción. En la Tabla 2.4 se muestran algunos ejemplos de alcoholes de azúcar.

Tabla 2-4 Ejemplos de alcoholes de azúcar investigados como PCM (Mehling y Cabeza, 2008).

Material	Temperatura de Fusión (°C)	Entalpía de Fusión (KJ/ Kg)	Conductividad Térmica (W/m K)	Densidad (Kg/ m <sup>3</sup> )
Xylitol C <sub>5</sub> H <sub>7</sub> (OH) <sub>5</sub>	94	263	- -	- 1500 (sólido, 20°C)
D-Sorbitol C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> (OH) <sub>6</sub>	97	185	- -	- 1520 (sólido, 20°)
Erythritol C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> (OH) <sub>4</sub>	120	340	0.32 (líquido,140°C) 0.73 (sólido,20°C)	1300 (líquido, 140°C), 1480 (sólido, 20°C)
D-Mannitol C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> (OH) <sub>6</sub>	167	316	- -	- 1520 (sólido, 20 °C)
Galacticol C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> (OH) <sub>6</sub>	188	351	- -	- 1520 (sólido, 20°C)

2.3.1.5 Glicol

El poli etilenglicol, o PEG corto, es un polímero con la fórmula general C<sub>2</sub>nH<sub>4</sub>n + 2On + 1. Se produce a partir de etilenglicol C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (OH)<sub>2</sub>. Los poli etilenglicoles están disponibles en un peso molecular de 200 a 35.000. La temperatura de fusión de los PEGs con un peso molecular medioambiental comprendido entre 200 y 400 g / mol entre 17 y 22 ° C. Estos PEG se encuentran en una fase líquida a temperatura ambiente. Si se desea una temperatura de fusión más alta (comprendida entre los veinte y los cuarenta), pueden obtenerse PEGs con peso molecular comprendido entre 400 y 4000 g / mol. En la Tabla 2.5 se enumeran algunas propiedades de los PEG

Tabla 2-5 Ejemplos de PEGs y sus propiedades termofísicas (Mehling y Cabeza, 2008).

Material	Temperatura de Fusión (°C)	Entalpía de Fusión (KJ/ Kg)	Conductividad Térmica (W/m K)	Densidad (Kg/ m <sup>3</sup> )
Diethylene glicol C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	-10 a -7	-	- -	1120 (líquido, 20°C), -
Triethylene glycol C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O <sub>4</sub>	-7	-	- -	1120 (líquido, 20°C), -
PEG400	8	100	0.19 (líquido,38°C) -	1125 (líquido, 25°C), 1128 (sólido, 3°C)
PEG600	17-22	127	0.19 (líquido, 38°C) -	1126 (líquido, 25°C), 1232 (sólido, 4 °C)
PEG1000	35-40	-	- -	- -

### 2.3.2 PCM's Inorgánicos

Los PCM's inorgánicos son los materiales cuales consisten de hidratos de sal. Las sales inorgánicas son solubles en el agua y también forman hidratos salinos cristalinos. Los cristales liberan agua en el proceso del calentamiento durante la carga y las sales se disuelven en el agua formando una fase líquida. Este proceso se invierte durante el proceso de descarga, donde las sales disueltas cambian a cristales (*Sharma, 2015*). Los compuestos inorgánicos incluyen hidratos de sales, sales, metales y aleaciones. Los PCM's inorgánicos demuestran densidad de almacenamiento de calor relativamente alta, debido a que tienen un alto calor latente de fusión y alta conductividad térmica.

#### 2.3.2.1 Hidratados de sal

Los hidratos de sal son el grupo más importante de PCM inorgánicos. Los hidratos de sal son sales inorgánicas las cuales contienen una o múltiples moléculas de agua, de manera que el sólido cristalino resultante tiene una fórmula química AB (n H<sub>2</sub>O). Estos PCM son no tóxicos, no inflamables y moderadamente corrosivos; además poseen una conductividad térmica alta comparado con los PCM orgánicos. Sin embargo, los hidratos de sal en su mayoría son afectados por su incongruencia de fusión. En la Tabla 2.6 se muestran algunos ejemplos de hidratos de sal investigados como PCM

Tabla 2-6 Ejemplos de hidratos de sal investigados como PCM (Mehling y Cabeza, 2008).

Material	Temperatura de fusión (°C)	Entalpía de fusión (Kj/Kg)	Conductividad térmica (W/m K)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )
LiClO <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O	8	155	- -	1530 (líquido) 1720 (sólido)
KF·3H <sub>2</sub> O	18.5	231	- -	1447 (líquido, 20°C) 1455 (sólido, 18 °C)
CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	29, 30	171,190	0.540 (líquido, 39°C) 1.088 (sólido, 23 °C)	1562 (líquido, 32°C) 1710 (sólido, 25°C)
LiNO <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O	30	296	- -	- -
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O	32	254	- 0.514	- 1485 (sólido)
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O	35-44	280	- -	1442 (líquido) 1522 (sólido)
Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·5H <sub>2</sub> O	48-55	187, 209	- -	1670 (líquido) 1750 (sólido)

### 2.3.2.2 PCM Inorgánicos – Metales

Esta categoría incluye los metales de fusión a baja temperatura y los eutécticos metálicos. En las sustancias metálicas, los átomos se mantienen unidos por enlaces metálicos, que son mucho más fuertes que las fuerzas intermoleculares en otros tipos de compuestos químicos. Además, en los metales, los átomos están espaciados mucho más apretados que las moléculas en los sólidos moleculares. Puesto que los átomos pueden moverse sin interrumpir los enlaces, los metales tienen una amplia gama de puntos de fusión. Debido a su alto peso, los metales no se han considerado seriamente para las aplicaciones de construcción de PCM. Desafortunadamente, el rendimiento térmico de los metales, adecuado para aplicaciones de construcción, se ve a menudo comprometido por su gran efecto de superenfriamiento. Algunas de las características adicionales de los metales son el calor específico bajo y la presión de vapor relativamente baja. Una diferencia importante entre los metálicos y otros PCM's es su alta conductividad térmica.

## 2.3.3 PCM's Eutécticos

Los PCM's se pueden usar en una forma de compuesto químico individual o en una mezcla eutéctica de varios componentes (mezcla de múltiples componentes que actúa como un componente único). Las composiciones eutécticas son mezcla de dos o más componentes químicos, los cuales se solidifican simultáneamente fuera del líquido en un punto de solidificación mínimo. Los PCM's eutécticos pueden agruparse en dos categorías: "PCM's eutécticos orgánicos" y "productos a base de sal". Sin embargo, también hay un tercer grupo de "mezclas eutécticas orgánico-inorgánicas". Los requisitos fundamentales de rendimiento para PCM eutécticos pueden clasificarse en las siguientes tres categorías: (i) solución estable (sin separación o degradación a largo plazo), (ii) sobre-enfriamiento mínimo, y finalmente (iii) temperaturas de congelación y fusión cercanas para todos los componentes de la composición eutéctica. En la Tabla 2-7 se muestran algunos ejemplos de soluciones eutécticas de agua-sal que han sido investigados.

Tabla 2-7 Ejemplos de soluciones eutécticas agua-sal que han sido investigadas como PCM (Mehling y Cabeza, 2008).

Material	Temperatura de Fusión (°C)	Entalpía de Fusión (KJ/ Kg)	Conductividad Térmica (W/m K)	Densidad (Kg/ m <sup>3</sup> )
Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (30.5 wt. %)/ -30.6 H <sub>2</sub> O	-30.6	131	- -	1283 (líquido), 1251 (sólido)
NaCl (22.4 wt. %)/ -21.2 H <sub>2</sub> O	-21.2	222	- -	1165 (líquido), 1108 (sólido)
KCl (19.5 wt. %)/ H <sub>2</sub> O- 10.7	-10.7	283	- -	1126 (líquido), 1105 (sólido)
H <sub>2</sub> O	0	333	0.6 (líquido, 20 °C) 2.2 (sólido)	998 (líquido, 20°C) , 917 (sólido, 0 °C)

## 2.4 Criterios de selección de PCM

Una temperatura de cambio de fase adecuada y una entalpía de fusión grande son dos requisitos obvios sobre un material de cambio de fase. Tienen que cumplirse con el fin de almacenar y liberar el calor en absoluto. Sin embargo, hay otros requisitos para la mayoría de los PCM, pero no para todas las aplicaciones. Estos requisitos pueden agruparse en requisitos físicos, técnicos y económicos. Estos se resumen a continuación:

Requisitos físicos, relativos al almacenamiento y liberación de calor (Mehling y, 2008):

- Temperatura de cambio de fase adecuada.
- Entalpía de cambio de fase.
- Cambio de fase reproducible.
- Poco o sin subenfriamiento: esto para asegurar que la fusión y la solidificación puedan proceder en un estrecho intervalo de temperatura.
- Buena conductividad térmica.

Requisitos técnicos, relativos a la construcción de un almacén (Mehling y Cabeza, 2008):

- Baja presión de vapor.
- Cambio de volumen pequeño.
- Estabilidad química del PCM: para asegurar una larga vida del PCM si está expuesto a temperaturas más altas, radiación, gases.
- Compatibilidad del PCM con otros materiales.
- Restricciones de seguridad.

Requisitos económicos, relativos al desarrollo de un producto comercializable:

- Bajo precio
- Buena reciclabilidad
- Disponibilidad en el mercado

Una primera selección de un material se hace generalmente con respecto a los requisitos físicos temperatura de cambio de fase, entalpía, estabilidad de ciclo y subenfriamiento. Por lo general, un material no es capaz de cumplir todos los requisitos mencionados anteriormente. Por ejemplo, la conductividad térmica de un PCM orgánico suele ser pequeña, PCM inorgánica a menudo muestran subenfriamiento, y la compatibilidad con el material del recipiente no siempre se cumple.

## 2.5 Encapsulación PCM

En muchos casos, excepto para algunas aplicaciones de agua-hielo, los PCM necesitan ser encapsulados. Las dos razones principales son para sostener la fase líquida del PCM, y evitar el contacto del PCM con el medio ambiente, el cual podría dañar el ambiente o cambiar la composición química del PCM. Algunos PCM inorgánicos también pueden causar corrosión de materiales de construcción. El encapsulado también protege al PCM de reaccionar con el entorno exterior y, a veces proporciona rigidez mecánica para el producto PCM. Asimismo se pueden considerar varias funciones adicionales de empaquetado o encapsulación de PCM:

- Mejoramiento de las características de transferencia de calor de todo el conjunto (el material de envasado o encapsulante puede contener aditivos potenciadores de la conducción de calor).
- El encapsulante puede contener retardador de fuego en el material.
- El material de empaque puede ser parte de la membrana de sellado de humedad y aire del edificio.
- La superficie reflectante del paquete PCM puede servir como barrera radiante.

Las encapsulaciones se clasifican generalmente por su tamaño en macro y micro encapsulado, las cuales se describen a continuación:

### 2.5.1 Macro- encapsulado

Macro-encapsulación significa llenar el PCM en un contenedor macroscópico que se ajustan a cantidades de varios mililitros hasta varios litros. La macro encapsulación utiliza diferentes geometrías tridimensionales para evitar que PCM entre en contacto con el entorno exterior. Con mayor frecuencia, los PCM macro encapsulados se fabrican en forma de pequeños recipientes rectangulares, tubos y productos esféricos. La piel del contenedor proporciona una estructura auto portante aislando PCM del entorno circundante. Si el contenedor es lo suficientemente rígido, la encapsulación también puede añadir estabilidad mecánica a un sistema. Generalmente los productos de PCM macro-encapsulados varían entre 1 y 10 cm, por lo cual en ciertas ocasiones existe dificultad en aplicarlos en los edificios (Kosny, 2015).

La macro-encapsulación es, con mucho, el tipo de encapsulación más utilizado. Al encapsular los PCM, es necesario tener en cuenta varios aspectos. En primer lugar, el material de la pared del recipiente debe ser compatible con el PCM. Entonces, teniendo en cuenta el material de pared seleccionado, la pared del recipiente tiene que ser suficientemente gruesa para asegurar la estanqueidad de difusión necesaria. Finalmente, la encapsulación debe estar

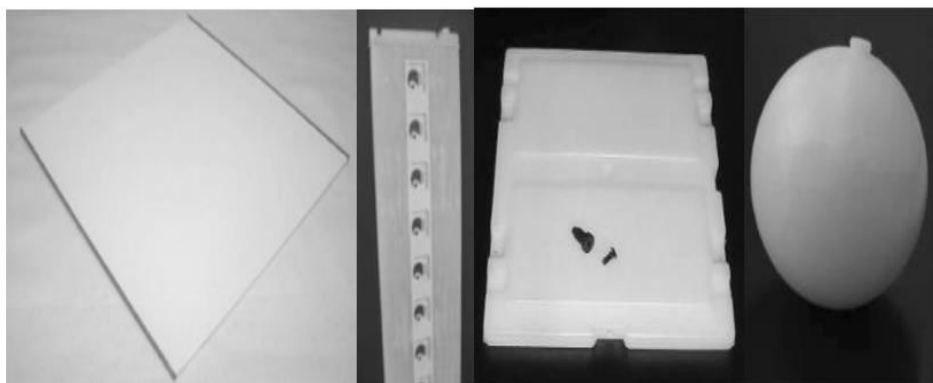


diseñada de manera que sea capaz de hacer frente a la tensión mecánica sobre las paredes del recipiente causado por el cambio de volumen del PCM.

### 2.5.2 Ejemplos de macro encapsulación

Para encapsular hidratos de sal, normalmente se seleccionan recipientes de plástico debido a la compatibilidad del material. Los plásticos no están corroídos por los hidratos de sal; sin embargo, se debe prestar atención a la hermeticidad al agua del material de la pared de la cápsula. Las encapsulaciones de plástico también se pueden usar para el PCM orgánico, pero la combinación de PCM y material de encapsulación debe elegirse con mucho cuidado porque los materiales orgánicos pueden suavizar los plásticos.

En la Figura 2-5 se muestran varios ejemplos de macro-encapsulación en envases plásticos de diferentes empresas. Muchas empresas producen una selección de encapsulaciones diferentes. Debido a que los recipientes de plástico se pueden producir hoy en día fácilmente en una gran variedad de formas, hay pocas restricciones en la geometría de la encapsulación.



*Figura 2-5 Macro-encapsulación en envases plásticos. De izquierda a derecha: paneles de doble barra de Dörken (imagen Dörken), panel de PCP (imagen: PCP), contenedor plano de Kissmann y bolas de Cristopia, también llamadas módulos.*

Otra forma de macro encapsulación se muestra en la Figura 2-6. En este caso, las hojas de plástico forman pequeños contenedores para el PCM que se sellan con una lámina de plástico. Tales encapsulados llamados rayas de cápsula o hojas de hoyuelos son útiles para cubrir grandes superficies y pueden ser fabricados en una línea de producción totalmente automatizada (Mehling y Harald, 2008).



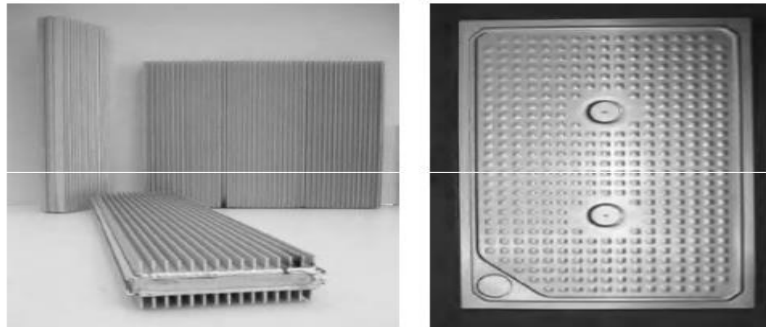
*Figura 2-6 Macro encapsulación en rayas de cápsulas producida por PCP y Dörken para PCM inorgánico (imagen: ZAE Bayern).*

De igual manera, es posible utilizar sólo láminas como material de pared, el producto resultante es PCM encapsulado en bolsas. La Figura 2-7 muestra dos ejemplos. Para asegurar la estanqueidad de la bolsa con respecto al agua, usualmente se usan láminas de plástico combinadas con una capa metálica.



*Figura 2-7 Macro encapsulación en bolsas; izquierda, producido por Climator (imagen: Climator), y a la derecha, producido por Dörken (foto: Dörken).*

Los contenedores con paredes metálicas es otra opción a elegir para el macro encapsulado. Las paredes metálicas también tienen una mejor estabilidad mecánica si se elige un grosor de pared suficiente. Sin embargo, es necesario seleccionar un metal adecuado que no esté corroído por el PCM. Esta selección también debe tener en cuenta que dependiendo del metal existen diferentes opciones y restricciones para conformar, soldar, etc. La Figura 2-8 muestra dos ejemplos de recipientes metálicos usados para encapsular PCM.



*Figura 2-8 Macro encapsulación en contenedores metálicos: izquierda, perfiles de aluminio con aletas para mejorar la transferencia de calor de Climator (imagen: Climator) y chapa de aluminio recubierta derecha de Rubitherm Technologies GmbH (foto: Rubitherm Techno).*

### 2.5.3 Micro-encapsulado

La micro-encapsulación de PCM es una técnica mediante la cual un material activo sólido o líquido con capacidad de cambio de fase está encerrado dentro de un segundo material. Las partículas del material activo tienen un intervalo de 1  $\mu\text{m}$  a 1000  $\mu\text{m}$  de diámetro. El propósito principal de este proceso es blindar el PCM del entorno circundante. Otras ventajas del micro-encapsulación con respecto al PCM, son la mejora de la transferencia de calor a los alrededores debido a la relación superficie a volumen de las cápsulas y la mejora en la estabilidad del ciclo puesto que la separación de fases está restringida a distancias microscópicas.

La micro-encapsulación puede lograrse mediante procesos físicos o químicos. Las partículas de cambio de fase encerradas de tal manera pueden introducirse en prácticamente cualquier material de soporte utilizado en edificios (por ejemplo, materiales compuestos de cemento o yeso, aislantes térmicos, membranas de construcción y láminas, revestimientos, tableros de partículas). Sin embargo, un inconveniente potencial de micro-encapsulación es que aumenta la posibilidad de subenfriamiento. Además, para micro-encapsular los hidratos de sales hay un problema adicional: el sellamiento del material de la envoltura a las moléculas de agua pequeñas tiene que ser suficiente para evitar cambios en la composición de la sal hidratada.

La micro-encapsulación de PCM es técnicamente factible hoy en día sólo para materiales orgánicos. Los productos comerciales parecen utilizar exclusivamente parafinas. La Figura 2-9 muestra una parafina micro-encapsulada comercial, con un diámetro de cápsula típico en el intervalo de 2-20  $\mu\text{m}$ , producido por la compañía BASF.

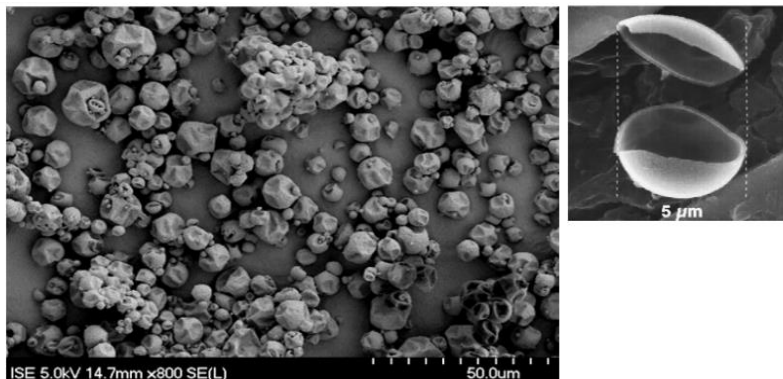


Figura 2-9 Imagen de microscopio electrónico de muchas cápsulas (foto: FhG-ISE) y una micro-cápsula abierta (foto: BASF).

El PCM micro-encapsulado está disponible como dispersión fluida o como polvo seco Figura 2.10



*Figura 2-10 Parafina micro-encapsulada producida por BASF, a la izquierda como dispersión fluida, ya la derecha como polvo seco (imágenes: BASF).*

Las micro-cápsulas se venden bajo la marca Micronal® como Micronal® DS 5000 (dispersión de fluido) y 5001X (polvo seco) con una temperatura de fusión de 26 ° C y como Micronal® DS 5007 (dispersión de fluido) 5008X (polvo seco) con una temperatura de fusión de 23 ° C (<http://www.micronal.de>). Otra fuente de un producto comercial es la empresa Microtek en los EE.UU., que vende PCM micro-encapsulado con una amplia gama de temperaturas de fusión.

## 2.6 Solución numérica de problemas de cambio de fase

La transferencia de calor durante el proceso de cambio de fase puede ser resuelta mediante el método de malla fija, método de deformación de malla, o método híbrido. El método de la malla fija es simple comparado con los otros, más versátil, conveniente, adaptable y fácilmente programable (Al saadi y Zhai, 2015). Utilizando el método de la malla fija, se utilizan varios modelos matemáticos para simular la transferencia de calor asociada con el cambio de fase: método de entalpía, método de capacidad calorífica fracción líquida, flujo de calor ficticio y el método de Carman- Kosny. Sin embargo, el método de capacidad calorífica y entalpía son los métodos que han sido ampliamente utilizados en la investigación (Alawadi y Alqallaf., 2011, Al-Saadi y Zhai., 2015, Dong et al., 2015, Liu et al., 2016). Ambos métodos permiten utilizar las mismas ecuaciones de gobierno para las dos fases y evitar resolver la posición frontal de la fusión.

### 2.6.1 Método de Entalpía

En los modelos de entalpía, la entalpía se utiliza como valor de variable dependiente junto con la temperatura. Al introducir un método de entalpía, el problema de cambio de fase se vuelve mucho más simple ya que las ecuaciones gobernantes son las mismas para las dos fases. Las condiciones de interfaz se consiguen automáticamente y se crea una región suave entre las dos fases. Esta región de interfaz evita discontinuidades bruscas que pueden crear cierta inestabilidad numérica. Por lo tanto, los métodos de entalpía son más atractivos y comúnmente utilizados para manejar problemas de cambio de fase. La ecuación gobernante para el método de entalpía se muestra en la Ec. (2.2)

$$\rho \frac{\partial(H)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] \quad (2.2)$$

Donde, H es la Entalpía (J/Kg), T es la temperatura (K),  $\rho$  es la densidad (Kg/m<sup>3</sup>), y  $\lambda$  es la conductividad térmica (W/m K).

### 2.6.2 Método de capacidad calorífica

El término de capacidad calorífica en la ecuación gobernante imita el efecto de la entalpía (calor sensible y latente) aumentando el valor de la capacidad calorífica durante la fase de cambio de fase. En el método de capacidad calorífica, el calor latente se aproxima por una gran capacidad térmica sobre el intervalo de cambio de fase, (T<sub>2</sub>-T<sub>1</sub>). La capacidad térmica del PCM es directamente proporcional a la energía almacenada y liberada durante el proceso de cambio de fase, pero inversamente proporcional al intervalo del intervalo de temperaturas de fusión o solidificación. Tihonov y Samarskii (Tihonov y Samarskii, 1953) y Albasiny (Albasiny, 1956) propusieron por primera vez el método de la capacidad calorífica efectiva. La ecuación gobernante (2.3) se escribe en términos de una única variable desconocida con un coeficiente no lineal (es decir, la capacidad calorífica aparente).

$$\rho \underbrace{\left( C_p + \frac{h_{ls}}{\Delta T} \right)}_{C_{p \text{ efectivo}}} \frac{\partial(T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] \quad (2.3)$$

Donde, C<sub>p</sub> es el calor específico (J/Kg K), T es la temperatura (K), ρ es la densidad (Kg/m<sup>3</sup>), λ es la conductividad térmica (W/m K) y h<sub>ls</sub> es el calor latente (J/Kg).

Durante el proceso de cambio de fase el calor específico del PCM es:

$$C_{Peff} = \left( \frac{h_{ls}}{T_2 - T_1} \right) + C_{PS} \quad (2.4)$$

La siguiente es una definición de la capacidad térmica efectiva para cada período de cambio de fase.

$$C_{Peff} = \begin{cases} C_{PS} & \text{Sólido} \\ \frac{h_{ls}}{T_2 - T_1} + C_{PS} & \text{Mezcla} \\ C_{PL} & \text{Líquido} \end{cases} \quad (2.5)$$

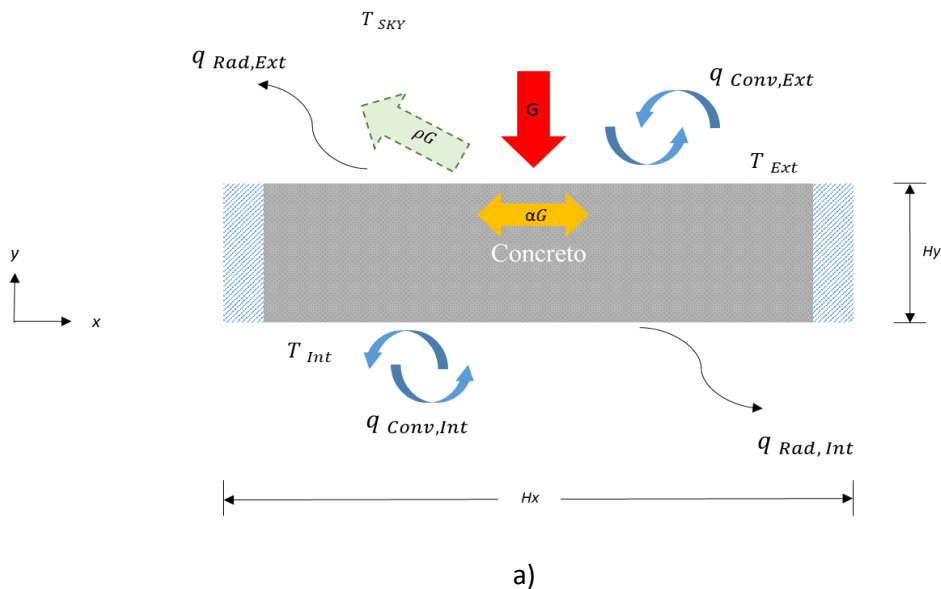
# CAPÍTULO 3

## MODELO FÍSICO Y MATEMÁTICO

En el presente capítulo se muestra el modelo físico representativo del techo, las consideraciones realizadas y su formulación matemática. El modelo físico se define como la representación geométrica que se realiza de un objeto o de un sistema real, de esta manera el problema se plantea de una forma más simplificada. En primer lugar se presenta el modelo físico, el cual consta de dos configuraciones. La configuración a) un techo convencional de losa de concreto, y la configuración b) un techo compuesto de una losa de concreto y un PCM; ambas configuraciones son para el análisis de la transferencia de calor conductiva. Posteriormente, se realizan las consideraciones para definir el modelo matemático, y se establecen las condiciones de frontera del sistema.

### 3.1 Modelo físico

El modelo físico del techo se muestra en la Figura (3.1), este consiste de un techo de losa de concreto. La configuración a) es un techo simple de losa de concreto con un espesor de  $H_y$ ; la configuración b) es un techo compuesto de espesor  $H_y$ , el cual está conformado por una losa de concreto y un material de cambio de fase (PCM) con espesores de  $H_1$  y  $H_2$ , respectivamente. El ancho del techo se consideró de una longitud de  $H_x$ . Las paredes verticales en cada configuración se consideran adiabáticas.





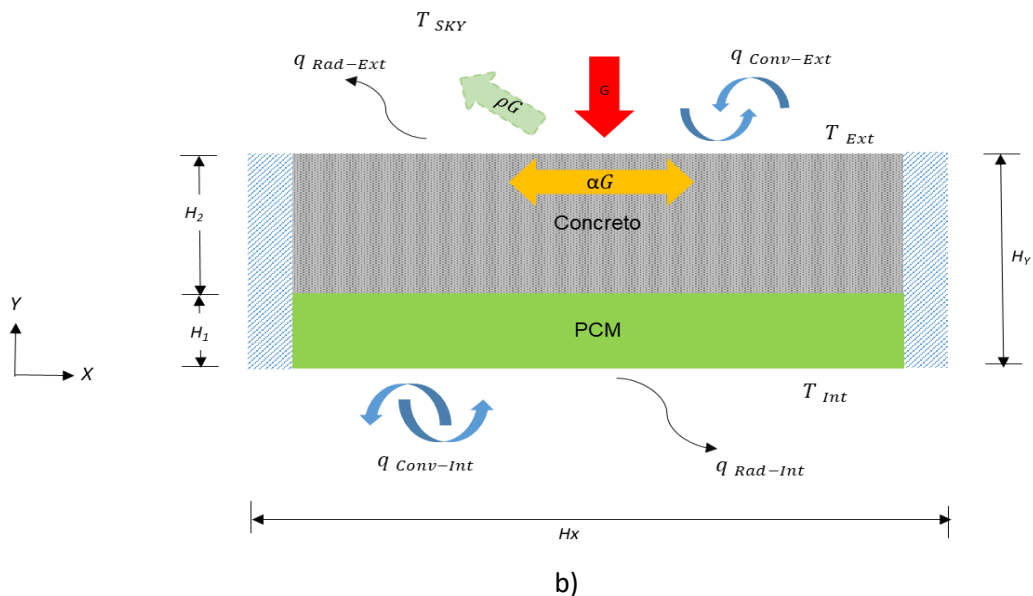


Figura 3-1 Modelo físico, a) techo convencional y b) techo compuesto.

El modelo físico del sistema compuesto se considera no homogéneo, esto debido a que está compuesto de distintos materiales, por lo cual sus propiedades físicas de cada material es diferente una de otra, aunque cada material individual es homogéneo. Así mismo las paredes verticales en  $x = 0$  y  $x = Hx$  están completamente aisladas.

La transferencia de calor del techo se puede modelar a partir de la ecuación de conducción de calor en estado transitorio. Para obtener el modelo matemático de la losa de concreto y el PCM, respectivamente, se realizaron las siguientes consideraciones:

#### Losa de concreto

- Sólido ( $u, v = 0$ )
- Modelo bidimensional
- Las propiedades físicas del concreto se consideran constantes, esto debido a que no depende del espacio ni el tiempo.

- Las paredes verticales están aisladas, lo que implica que el flujo de calor en estas paredes sea cero.
- La temperatura ambiente, radiación y velocidad del viento se obtuvieron de una estación meteorológica
- Estado transitorio, esto con base a que los datos climatológicos son variables a lo largo del día, por lo tanto, los datos deben ser medidos en intervalos de tiempo y de esta manera poder usar esta información para modelar el sistema en diferentes tiempos.

Material de cambio de fase.

- El PCM se considera homogéneo e isotrópico.
- El punto de fusión, solidificación y el calor latente se consideran constantes.
- La conductividad térmica y la densidad, de las fases líquida y sólida del PCM son diferentes, y no cambian con la temperatura.
- La generación de calor, la transferencia de calor por radiación y la convección natural en los materiales no se toma en cuenta.
- La temperatura al interior de la habitación se considera constante a 24°C.

### 3.2 Modelo matemático

En esta sección, se muestra el modelo matemático del concreto y el PCM, respectivamente. Con base a estos modelos se pretende describir la transferencia de calor por conducción en un techo compuesto; de igual manera se presentan sus respectivas condiciones de frontera, a las cuales está sometido el sistema.

#### 3.2.1 Modelo matemático: Losa de concreto

La ecuación gobernante de conducción de calor para una losa de concreto bidimensional en estado transitorio se representa en la siguiente ecuación.

$$\frac{\partial(\rho_c c_p T_c)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial y} \right] \quad (3.1)$$

Donde  $T_C$  es la temperatura,  $\lambda_C$  es la conductividad térmica,  $C_{pC}$  es el calor específico y  $\rho_C$  es la densidad del concreto. En la Tabla 3-1 se muestran las propiedades físicas del concreto y sus respectivos valores (ASHRAE, 2001).

Tabla 3-1 Propiedades Termofísicas del Concreto.

Propiedades	Valores
$\lambda_C$	1.7 W/m <sup>2</sup>
$C_{pC}$	2240 Kg/m <sup>3</sup>
$\rho_C$	880 J/Kg K

### 3.2.2 Modelo matemático: Material de cambio de fase (PCM)

De igual manera, la ecuación gobernante de conducción de calor para el PCM en dos dimensiones y en estado transitorio, se representa mediante la siguiente ecuación.

$$\frac{\partial(\rho_{PCM}C_{pPCM}T_{PCM})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_{PCM} \frac{\partial T_{PCM}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda_{PCM} \frac{\partial T_{PCM}}{\partial y} \right] \quad (3.2)$$

Donde  $T_{Pcm}$  es la temperatura,  $\lambda_{Pcm}$  es la conductividad térmica,  $C_{pPcm}$  es el calor específico y  $\rho_{Pcm}$  es la densidad, son las propiedades físicas del PCM. En la Tabla 3.2 se muestran algunos PCM's encontrados en la literatura.

Tabla 3-2 Propiedades Físicas de algunos PCM's.

Material	Punto de Fusión (°C)	Conductividad Termica (W/m°C)		Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )		Cp (J/Kg K)		Calor Latente (J/Kg )
		$\lambda_s$	$\lambda_l$	$\rho_s$	$\rho_l$	$C_{p_s}$	$C_{p_l}$	
PCM-MG29 (Liu et al. 2016)	27-29	0.21	0.21	850	850	2230	2230	205,000
N-Eicosano (Pal y Joshi, 2018)	37	0.39	0.157	1900	2200	810	770	241,000
Hidrato de Sal (Hale, 1971)	35	0.514	0.476	1700	1950	1520	1442	281,000

### 3.3 Condiciones de Frontera

Las condiciones de contorno matemático para el dominio de cálculo se dan de la siguiente manera:

En la superficie exterior de la losa de concreto, la cual está expuesta a la radiación solar, en donde, este efecto se considera solo durante las horas de sol. La superficie externa ( $y=hy$ ) recibe un flujo de calor ( $q$ ) por la radiación solar ( $G_{solar}$ ) y un intercambio de calor por radiación y convección hacia el medio ambiente exterior, esto debido a las condiciones climatológicas de la República Mexicana. La condición de frontera está dada como:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha G + h_{ext}(T_{s,ext} - T_{amb}) + \epsilon\sigma(T_{s,ext}^4 - T_{SKY}^4) \quad \text{en } 0 \leq x \leq Hx \quad (3.3)$$

En donde,  $h_{ext}$  y  $T_{s,ext}$ , es el coeficiente de transferencia de calor convectivo de la losa de concreto de la superficie exterior ( $W/m^2$ ) y la temperatura de la superficie exterior, respectivamente.  $\epsilon$  es la emisividad de la superficie,  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann y  $T_{sky}$  es la temperatura de la bóveda celeste.

En la superficie interior ( $y = 0$ ) el techo intercambia calor por convección y radiación hacia el interior, respectivamente. El interior de la habitación se considera a una temperatura  $T_{int}= 24$  °C. La condición de frontera está dada como:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = h_{int}(T_{s,int} - T_{int}) + \epsilon\sigma(T_{s,int}^4 - T_{int}^4) \quad \text{en } 0 \leq x \leq Hx \quad (3.4)$$

En donde,  $h_{int}$  y  $T_{s,int}$ , es el coeficiente de transferencia de calor convectivo de la losa de concreto de la superficie interior ( $W/m^2$ ) y la temperatura de la superficie interior (K), respectivamente.

Las superficies laterales ( $x = 0$  y  $x = Hx$ ) se consideran adiabáticas. Esto implica que el flujo de calor que entra al sistema es igual a cero. Por lo tanto, las Ecs. (3.5) y (3.6) representan las condiciones de frontera de las paredes en  $x = 0$  y  $x = Hx$ , respectivamente. Para la solución del modelo matemático se utilizó el método del volumen finito (MVF).

Para  $x = 0$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \text{en } 0 < y < Hy \quad (3.5)$$

Para  $x = Hx$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \text{en } 0 < y < Hy \quad (3.6)$$

Donde el valor de la constante de Stefan-Boltzmann tiene el siguiente valor:

$$\sigma = 5.670373 \times 10^{-08} \quad \left( \frac{W}{m^2 K^4} \right)$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección  $h_{ext}$  de la Ec (3.1) se calcula con base en (Duffie y Beckman, 1980):

$$h_{ext} = 2.8 + 3.0 * V \quad (3.7)$$

Donde  $V$  es la velocidad del aire que está en m/s. El intercambio de calor por radiación entre el techo y la superficie es la  $T_{sky}$ , la cual se calcula en función de la temperatura del aire exterior, (Nowak, (989).

$$T_{sky} = 0.0552 * T_{amb}^{1.5} \quad (3.8)$$

Donde  $T_{sky}$  y  $T_{amb}$  están en Kelvin. El coeficiente de transferencia de calor  $h_{int}$  es igual a  $9.26 \frac{W}{m^2 K}$  para la dirección ascendente del flujo de calor, y para la dirección descendente del flujo de calor  $h_{int}$  es igual  $6.13 \frac{W}{m^2 K}$ , es decir (ASHRAE, 2001):

$$T_{S,int} > T_{int} \Rightarrow h_{int} = 6.13 \frac{W}{m^2 K}$$

$$T_{S,int} < T_{int} \Rightarrow h_{int} = 9.26 \frac{W}{m^2 K}$$

### 3.4 Condición inicial

La temperatura inicial del sistema de techo plano, se presenta en la siguiente ecuación:

$$T(x, y, t = 0) = F(x, y) \quad 0 \leq x \leq H_x; \quad 0 \leq y \leq H_y, \quad t = 0 \quad (3.9)$$

En donde,  $F(x, y)$  será la temperatura ambiente a las 12:00 a.m. para el día más cálido y el más frío, respectivamente.

# CAPÍTULO 4

## METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN NUMÉRICA Y VERIFICACIÓN

En el presente capítulo se describe la metodología de solución numérica, en la cual, para la solución de las ecuaciones diferenciales parciales se utiliza el Método de Volumen Finito (MVF). En este capítulo, se presenta la discretización de los modelos matemáticos de la losa de concreto y el PCM, respectivamente, asimismo se hace una breve descripción del algoritmo de solución. Posteriormente se realiza las verificaciones correspondientes para la presente tesis, y por último la independencia de malla espacial y temporal para el sistema en estudio, respectivamente.

### 4.1 Metodología de solución numérica

La ecuación gobernante de conducción de calor se puede resolver de manera analítica o numérica, dependiendo de la complejidad del problema, en este caso se resolverá de manera numérica, debido a la dificultad para resolverlo de manera analítica.

Para el presente trabajo se seleccionó el método de volumen finito (MVF), debido a que es un método flexible, el más utilizado en la dinámica de fluido computacional (CFD), la característica más atractiva del MVF es la solución numérica para la variable de estudio, ya que satisface en forma exacta la ecuación de conservación sobre cualquier grupo de volumen de control.

La solución del MVF empleado en el trabajo se realiza de la siguiente manera:

1. Generación de la malla computacional.
2. Discretizar la ecuación gobernante de conducción de calor para un sistema bidimensional en estado transitorio.
3. Se selecciona un método de solución del sistema de ecuaciones algebraicas.

El MVF se caracteriza porque se divide en un número de volúmenes de control sin traslape, de tal manera que a cada volumen puede asignarse un nodo computacional

4.1.1 Generación de la malla computacional

Para llevar a cabo la construcción de la malla computacional para el modelo físico, este se divide en volúmenes de control de manera ordenada sin traslape y cubriendo todo el dominio. De esta manera, se determina las características geométricas del sistema bajo estudio. Estas son: las coordenadas de los nodos discretos ( $x, y$ ), los espesores del volumen de control ( $\Delta x, \Delta y$ ) y las distancias entre nodos ( $\delta x, \delta y$ ).

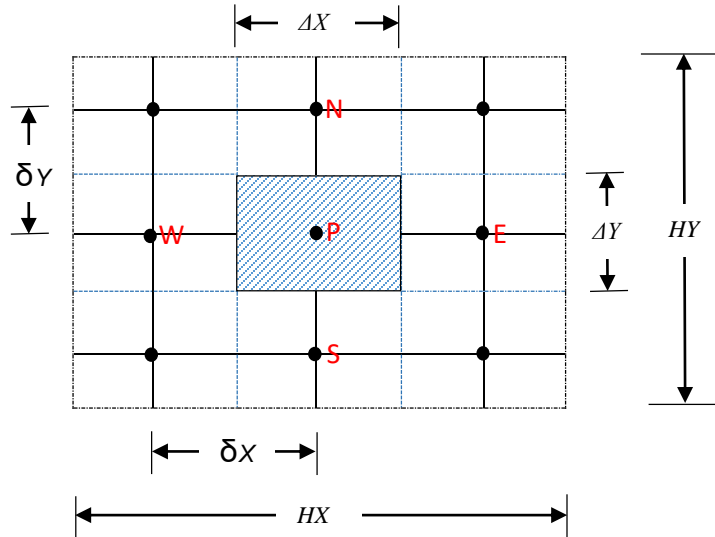


Figura 4-1 Representación de los volúmenes de control en 2-D.

En el análisis del presente estudio, los nodos discretos o nodos computacionales se ubican en el centro de cada volumen de control tal como se aprecia en la Figura (4.1). Así mismo se utiliza un arreglo de contacto con la frontera (Figura 4.2), la cual se puede usar para mallas con volúmenes de control del mismo espesor o mallas con volúmenes de control de distintos espesores.

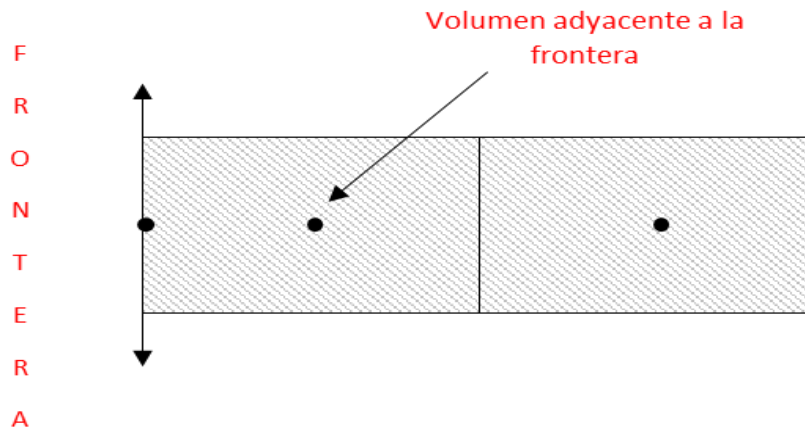


Figura 4-2 Arreglo de malla: contacto con la frontera.



Los espesores del volumen de control  $\Delta x$  y  $\Delta y$ , se determinan mediante las Ecuaciones (4.1) y (4.2), respectivamente.

$$\Delta x = \frac{Hx}{Nx - 2} \quad (4.1)$$

$$\Delta y = \frac{Hy}{Ny - 2} \quad (4.2)$$

Donde  $Hx$  es la longitud del sistema y  $Nx$  es el número máximo de nodos en dirección  $-x$ , mientras que  $Hy$  es la altura del sistema y  $Ny$  el número máximo de nodos en dirección  $-y$ .

La Ecuación (4.3) describe la distribución de los nodos discretos en dirección  $-x$ , la cual a su vez proporciona las coordenadas en esta dirección.

$$x_i = (i - 2)\Delta x_{i-1} + \frac{\Delta x_i}{2} \quad (4.3)$$

Los nodos discretos y las coordenadas en dirección  $-y$ , se determinan por la Ecuación (4.4).

$$y_j = (j - 2)\Delta y_{j-1} + \frac{\Delta y_j}{2} \quad (4.4)$$

De igual manera, la distancia entre nodos discretos, en dirección  $-x$  y dirección  $-y$ , se determina por las siguientes Ecuaciones (4.5) y (4.6), respectivamente.

$$\delta x_i = x_i - x_{i-1} \quad (4.5)$$

$$\delta y_j = y_j - y_{j-1} \quad (4.6)$$

#### 4.1.2 Discretización de la ecuación gobernante de conducción de calor bidimensional en estado transitorio.

La Discretización es cambiar todos los términos diferenciales por medio de las matemáticas a expresiones algebraicas. Para discretizar las Ec. (3.1) y (3.2), las cuales representan los modelos matemáticos de la losa de concreto y PCM (Capítulo 3), respectivamente, se utiliza el método de volumen finito, el cual consiste en los siguientes pasos:

1. Integrar la ecuación gobernante de conducción de calor.
2. Realizar un esquema de interpolación centrado para los términos difusivos y los gradientes de temperatura.
3. Seleccionar un esquema de discretización temporal.
4. Obtención de la ecuación general discreta para nodos internos.

Dado que el análisis del presente estudio es un medio compuesto, se realiza la discretización para el material de losa de concreto, y asimismo para el PCM. A continuación se explica de forma detallada el desarrollo de discretización para cada material.

##### 4.1.2.1 Discretización losa de concreto

Para obtener la ecuación discretizada de la Ec (3.1) es necesario realizar la integración espacial sobre el volumen de control. Asimismo la integración en el tiempo  $t = t_0$  hasta  $t = t + \Delta t$  obteniéndose como resultado:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e \frac{\partial(\rho_c C p_c T_c)}{\partial t} dx dy dt = \int_t^{t+\Delta t} \left( \int_s^n \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda \frac{\partial T_c}{\partial x} \right] dx dy + \int_s^n \int_w^e \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda \frac{\partial T_c}{\partial y} \right] dx dy \right) dt \quad (4.7)$$

Realizando la integración espacial sobre las fronteras “w”, “e”, “n” y “s” del volumen de control nos queda como:

$$\int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial(\rho_c C p_c T_c)}{\partial t} \Delta x \Delta y dt = \int_t^{t+\Delta t} \left( \left[ \left[ \lambda \frac{\partial T_c}{\partial x} \right]_e - \left[ \lambda \frac{\partial T_c}{\partial x} \right]_w \right] \Delta y + \left[ \left[ \lambda \frac{\partial T_c}{\partial y} \right]_n - \left[ \lambda \frac{\partial T_c}{\partial y} \right]_s \right] \Delta x \right) dt \quad (4.8)$$

Considerando que el flux difusivo que sale de la cara “e” menos el flux de la cara “w”, y asimismo el flux de difusivo que sale de la cara “n” menos el flux que sale de la cara “s” es igual a la generación de T. De esta manera se representa el balance de T sobre el volumen de control.

Para obtener una ecuación discreta útil se considera que el término difusivo  $\lambda$ , y los gradientes de temperatura  $\frac{\partial T}{\partial x}$  y  $\frac{\partial T}{\partial y}$  en las fronteras del volumen de control “w”, “e”, “s” y “n”. Los gradientes  $\frac{\partial T}{\partial x}$  se calculan en las fronteras “w” y “e” mientras que los gradientes  $\frac{\partial T}{\partial y}$  en las fronteras “n” y “s”. Por lo tanto se usara una aproximación lineal para calcular los gradientes de temperatura en las interfaces.

Para evaluar los términos difusivos en la interface se utilizara una aproximación usando la serie de Taylor, en el cual el término de alto orden se desprecia y por lo tanto nos queda:

Esquema de interpolación centrada

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_e = \frac{T_E - T_P}{\delta X_{PE}} + \quad (4.9) \qquad \qquad \qquad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_w = \frac{T_P - T_W}{\delta X_{WP}} \quad (4.10)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_n = \frac{T_N - T_P}{\delta X_{Pn}} \quad (4.11) \qquad \qquad \qquad \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_s = \frac{T_P - T_S}{\delta y_{Ps}} \quad (4.12)$$

La discretización temporal, de igual manera que la discretización espacial se puede realizar en intervalos de tiempo relativamente pequeños, de esta manera, pueden utilizarse intervalos de tiempo variables (paso de tiempo no-uniforme), tal como se muestra en la Figura 4.3.

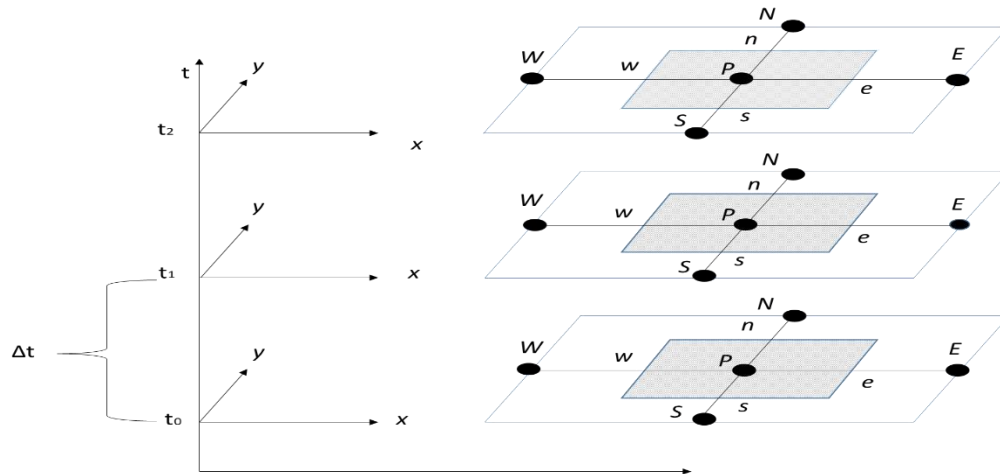


Figura 4-3 Malla temporal del volumen de control P en 2-D.

Debido a que la Ecuación (4.8) no ha sido integrada aun en el tiempo, para ello hay que tomar en cuenta la variación de la temperatura con respecto al tiempo  $t = t_0$  a  $t + \Delta t$ . Varias consideraciones pueden hacerse para ello, pero los más relevantes pueden generalizarse mediante la expresión siguiente:

$$[\phi]dt = f[\phi + (1 - f)\phi^0]\Delta t$$

Donde f denota un factor de peso ponderado que varía en 0 y 1. Por lo tanto sí:

$f = 0$  es un Esquema Explícito.

$f = 0.5$  es un Esquema Crank – Nicolson.

$f = 1$  es un esquema Implícito.

En el presente estudio se trabaja con un esquema implícito, debido a que se necesita estabilidad numérica en el tiempo, y este esquema cumple con ello. Asimismo para asegurar la exactitud de los resultados se requieren de pasos pequeños de tiempo, esto como consecuencia del error de truncamiento para este esquema.

Por lo tanto la Ecuación (4.8), se convierte en:

$$(\rho_c C p_c T_c - \rho C p T_c^0) \Delta y \Delta x = \left\{ \left[ \left[ \lambda \frac{\partial T_c}{\partial x} \right]_e - \left[ \lambda \frac{\partial T_c}{\partial x} \right]_w \right] \Delta y + \left[ \left[ \lambda \frac{\partial T_c}{\partial y} \right]_n - \left[ \lambda \frac{\partial T_c}{\partial y} \right]_s \right] \Delta x \right\} \Delta t \quad (4.13)$$

Dividiendo la Ec. (4.13) entre  $\Delta t$  la ecuación nos queda:

$$(\rho_c C p_c T_c - \rho C p T_c^0) \frac{\Delta y \Delta x}{\Delta t} = \left[ \left[ \lambda \frac{\partial T_c}{\partial x} \right]_e - \left[ \lambda \frac{\partial T_c}{\partial x} \right]_w \right] \Delta y + \left[ \left[ \lambda \frac{\partial T_c}{\partial y} \right]_n - \left[ \lambda \frac{\partial T_c}{\partial y} \right]_s \right] \Delta x \quad (4.14)$$

Sustituyendo la interpolación centrada en los términos difusivos y agrupando términos, la ecuación de coeficientes agrupados nos queda como:

$$a_p T_p = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + B \quad (4.15)$$

La Ec. (4.15) es la ecuación general para cualquier nodo interno del dominio físico.

En donde:

$$a_E = \frac{\lambda_e}{\delta X_{PE}} \Delta y \quad a_W = \frac{\lambda_w}{\delta X_{PW}} \Delta y$$

$$a_N = \frac{\lambda_n}{\delta Y_{PN}} \Delta x \quad a_S = \frac{\lambda_s}{\delta Y_{PS}} \Delta x$$

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S + \rho^0 C p^0 \frac{\Delta y \Delta x}{\Delta t} T_{PC}^0$$

$$b = \rho^0 C p^0 \frac{\Delta y \Delta x}{\Delta t} T_{PC}^0$$

#### 4.1.2.2 Discretización PCM (Phase Change Material)

Para obtener el desempeño térmico del PCM, se utilizan métodos de solución tales como el método de malla fija, método de deformación de malla, o método híbrido. Los métodos de malla fija comprende los métodos de Cp efectivo, fracción líquida, Entalpia, flujo de calor ficticio y el método de Carman- Koseny.

En el presente estudio se utiliza el método de Cp efectivo, esto debido, a los datos con los que se cuentan de los materiales de cambio de fase (PCM. Por tal motivo, la Ecuación (3.2) se reescribirá para poder tratar el PCM con este método.

Partiendo de la Ec. (3.2), y utilizando la regla de la cadena sólo en el término temporal de la ecuación, nos queda:

$$\frac{\partial(\rho C_p T_{PCM})}{\partial t} = T \frac{\partial(\rho C_p)}{\partial t} + \rho C_p \frac{\partial(T_{PCM})}{\partial t} \quad (4.16)$$

Considerando propiedades constantes  $\rho$  y  $C_p$  en el tiempo, el primer término del lado derecho de la igualdad se vuelve cero por lo que la ecuación se convierte en:

$$\frac{\partial(\rho C_p T_{PCM})}{\partial t} = \rho C_p \frac{\partial(T_{PCM})}{\partial t} \quad (4.17)$$

Sustituyendo la Ec. (4.17) en la Ec. (3.2) se obtiene:

$$\rho C_p \frac{\partial(T_{PCM})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda \frac{\partial T_{PCM}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda \frac{\partial T_{PCM}}{\partial y} \right] \quad (4.18)$$

Agregando sólo en el término temporal  $\rho h_{ls} \frac{\partial(F_{pcm,l})}{\partial t}$ , el cual se representa por la Ecuación (4.18) y se convierte en:

$$\rho C_p \frac{\partial(T_{PCM})}{\partial t} + \rho h_{ls} \frac{\partial(F_{pcm,l})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda \frac{\partial T_{PCM}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda \frac{\partial T_{PCM}}{\partial y} \right] \quad (4.19)$$

En donde  $f_{pcm,l}$  es la fracción líquida de cambio de fase

$$F_{pcm,l} = \left( \frac{T - T_S}{T_L - T_S} \right)^m \quad \text{si } m = 1 \text{ es el modelo lineal,} \quad 0 \leq f_{pcm,l} \leq 1$$

Para simplificar la Ecuación (4.19), en el término  $\frac{\partial(f_{pcm,l})}{\partial t}$  se aplica la regla de la cadena, por lo tanto, el término queda de la siguiente forma:

$$\frac{\partial(f_{pcm,l})}{\partial t} = \frac{\partial(f_{pcm,l})}{\partial T} \frac{\partial T_{PCM}}{\partial t} \quad (4.20)$$

Donde

$$\frac{\partial(f_{pcm,l})}{\partial T} = \frac{1}{\Delta T} = \frac{1}{T_L - T_S} \quad (4.21)$$

Sustituyendo las Ecs. (4.20) y (4.21) en la Ec. (4.19), la ecuación para el modelo matemático del Método de Calor Especifico Efectivo se convierte en:

$$\rho \underbrace{\left( Cp + \frac{h_{ls}}{\Delta T} \right)}_{Cp \text{ efectivo}} \frac{\partial(T_{PCM})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda \frac{\partial T_{PCM}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda \frac{\partial T_{PCM}}{\partial y} \right] \quad (4.22)$$

La Ecuación (4.22) representa el modelo matemático para el método de Cp Efectivo del PCM. Para obtener la ecuación discretizada de esta, es necesario realizar la integración espacial sobre el volumen de control. Asimismo la integración en el tiempo  $t = t_0$  hasta  $t = t + \Delta t$  obteniéndose como resultado:

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e \rho \underbrace{\left( Cp + \frac{h_{ls}}{\Delta T} \right)}_{Cp \text{ efectivo}} \frac{\partial(T_{PCM})}{\partial t} dx dy dt \\ = \int_t^{t+\Delta t} \left( \int_s^n \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda \frac{\partial T_{PCM}}{\partial x} \right] dx dy + \int_s^n \int_w^e \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda \frac{\partial T_{PCM}}{\partial y} \right] dx dy \right) dt \end{aligned} \quad (4.23)$$

Realizando la integración espacial sobre las fronteras “w”, “e”, “n” y “s” del volumen de control nos queda como:

$$\int_t^{t+\Delta t} \rho \left( \underbrace{Cp + \frac{h_{ls}}{\Delta T}}_{Cp \text{ efectivo}} \right) \frac{\partial(T_{PCM})}{\partial t} \Delta x \Delta y \quad (4.24)$$

$$= \int_t^{t+\Delta t} \left( \left[ \left[ \lambda \frac{\partial T_{PCM}}{\partial x} \right]_e - \left[ \lambda \frac{\partial T_{PCM}}{\partial x} \right]_w \right] \Delta y + \left[ \left[ \lambda \frac{\partial T_{PCM}}{\partial y} \right]_n - \left[ \lambda \frac{\partial T_{PCM}}{\partial y} \right]_s \right] \Delta x \right) dt$$

Ahora integrando en el tiempo la Ecuación (4.24), y utilizando un esquema de discretización temporal implícito. Esto para mantener la estabilidad en el tiempo del PCM, ya que estos son muy inestables. De esta forma la ecuación nos queda como:

$$\rho \left( \underbrace{Cp + \frac{h_{ls}}{\Delta T}}_{Cp \text{ efectivo}} \right) (T_{PPCM} - T_{PPCM}^0) \Delta y \Delta x \quad (4.25)$$

$$= \left\{ \left[ \left[ \lambda \frac{\partial T_{PCM}}{\partial x} \right]_e - \left[ \lambda \frac{\partial T_{PCM}}{\partial x} \right]_w \right] \Delta y + \left[ \left[ \lambda \frac{\partial T_{PCM}}{\partial y} \right]_n - \left[ \lambda \frac{\partial T_{PCM}}{\partial y} \right]_s \right] \Delta x \right\} \Delta t$$

Ahora sustituyendo las ecuaciones (4.9) a (4.12) en la Ec (4.25) y agrupando términos, la ecuación de coeficientes agrupados para el PCM, nos queda como:

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + B \quad (4.26)$$

En donde:

$$a_E = \frac{\lambda_e}{\delta X_{PE}} \Delta y \quad a_W = \frac{\lambda_w}{\delta X_{PW}} \Delta y$$

$$a_N = \frac{\lambda_n}{\delta Y_{PN}} \Delta x \quad a_S = \frac{\lambda_s}{\delta Y_{PS}} \Delta x$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + \rho \left( \underbrace{Cp + \frac{h_{ls}}{\Delta T}}_{Cp \text{ efectivo}} \right) \frac{\Delta y \Delta x}{\Delta t} T_P$$

$$b = \rho \left( \underbrace{Cp + \frac{h_{ls}}{\Delta T}}_{Cp \text{ efectivo}} \right) \frac{\Delta y \Delta x}{\Delta t} T_P^0$$



#### 4.1.2.3 Nodos Frontera

Para solucionar de forma numérica una ecuación diferencial, es necesario fijar algunas condiciones (como el valor de la función o de sus derivadas en algún lugar de la variable independiente) de modo que al forzar a la solución, a esta satisfaga, tales condiciones en puntos específicos.

Generalmente el MVF, en problemas de fluidos y fenómenos relacionados, las condiciones de frontera más comunes son:

- Condición de Dirichlet (condición de primera clase)
- Condición de Von Neumann (condición de segunda clase)
- Condición de Robín (condición de tercera clase)

En los nodos ubicados en las fronteras no se considera la masa, ni el volumen. En el presente se utilizan condiciones de frontera de segunda y tercera clase, respectivamente.

#### *Condición de Dirichlet*

En fronteras de primera clase se fija un valor de la variable  $\phi$ , el cual es independiente de los nodos vecinos y permanece constante a lo largo del proceso. De esta manera para generalizar el sistema de ecuaciones, la ecuación discreta en la frontera también debe de ser de la forma

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + b$$

En donde:

$$a_p = 1 ; \quad a_e = 0 ; \quad a_s = 0 ; \quad a_n = 0$$

$$a_w = 0 ; \quad b = T_{FRONTERA}$$

Por lo tanto, se deduce que:

$$\phi_p = \phi_{frontera}$$

### Condición de Von Neumann

En la condición de frontera de segunda clase o de Neumann se conoce el gradiente de la variable en dirección normal a la frontera igual a una función del espacio y/o tiempo; también es posible, simplemente tener el gradiente igual a un valor constante.

Esta condición se puede expresar como:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = A$$

Donde  $n$  representa la dirección normal a la frontera y  $A$  es un valor constante conocido. En cualquiera de las situaciones, el gradiente se conoce. Un caso particular en transferencia de calor, es cuando el gradiente es igual a cero y es conocida como una condición *adiabática*.

### Condición de Robín

Esta condición de frontera se usa para problemas relacionados con la transferencia de calor. Se consideran la disipación o ganancias por convección hacia el exterior por medio de las fronteras, esto a través de un balance termodinámico ( $q_{Cond} = q_{Conv}$ ). Por medio de la ley de Fourier y la ley de enfriamiento de Newton.

Esta condición se puede expresar como:

$$-\lambda \frac{\partial \phi}{\partial n} = h(T - T_{amb})$$

En donde  $\lambda$  es la conductividad térmica,  $h$  el coeficiente convectivo de transferencia de calor,  $T$  y  $T_{amb}$ , son las temperaturas del sistema y el medio ambiente, respectivamente.

### Condición Inicial

En problemas dependientes del tiempo; los valores de la variable, (en este caso la temperatura) al tiempo cero ( $t = 0$ ) necesitan ser especificados en todos los puntos del dominio físico. Este hecho, es lo que se llama condición inicial de la variable y el tiempo cero se refiere al tiempo previo en que el sistema físico de estudio deje su estado de equilibrio. La condición inicial de la variable puede ser una función del espacio.

Discretización de nodos frontera

En esta sección, se muestra la discretización de las fronteras del presente estudio, en donde de acuerdo con el modelo físico (Figura 3-1) en las paredes verticales ( $x=0$  y  $x=Hx$ ) se encuentran aisladas (condición de Von Neumann), mientras que en la superficie exterior e interior se consideran las pérdidas o ganancias por convección y radiación (Condición de Robín), respectivamente.

Frontera oeste

Ambas paredes verticales ( $x=0$  y  $x=Hx$ ), están totalmente aisladas. Esto implica que el flujo de calor que entra al sistema es igual a cero. Considerando primero la pared *oeste*; se realiza un balance termodinámico en el cual no se considera almacenamiento de energía, por lo que  $q_{entra} = q_{sale}$  tal como se muestra en la figura 4.4.

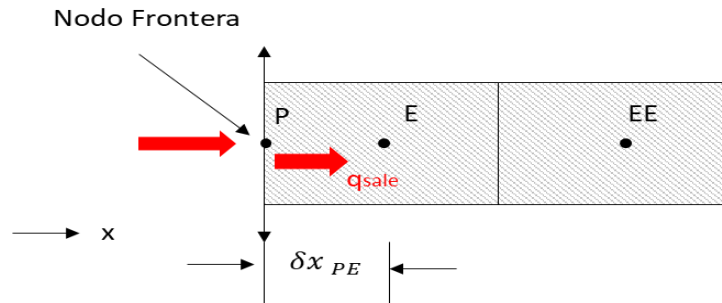


Figura 4-4 Nodo frontera oeste con condición de segunda clase.

Por lo tanto, esta condición (Condición de Von Neumann) se puede expresar como:

$$q_{entra} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \tag{4.27}$$

Para obtener la discretización de la frontera, se utiliza una diferencia adelantada para la derivada, esta nos queda de la siguiente manera:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_w = -\lambda \frac{T_E - T_P}{\delta X_{PE}} \tag{4.28}$$

Por sustituir en la Ec.(4.27), la Ec(4.28), y despejando  $T_p$  nos queda:

$$-\lambda \frac{T_E - T_P}{\delta X_{PE}} = q_{entra} \Rightarrow T_P = T_E + \frac{q_{entra}}{\lambda} \delta x_{PE}$$

De esta manera, los valores de los coeficientes en la frontera oeste, son:

$$a_P = 1 ; \quad a_E = 1 ; \quad a_W = 0 ; \quad a_N = 0$$

$$a_S = 0 ; \quad b = q_{entra} * \delta x_{pe}$$

Frontera este

De igual manera que la pared Oeste, esta pared se encuentra totalmente aislada, lo cual implica que el flujo de calor que entra al sistema es cero (Figura 4.5). Para obtener la ecuación discreta de dicha frontera, se considera el mismo procedimiento que la pared oeste.

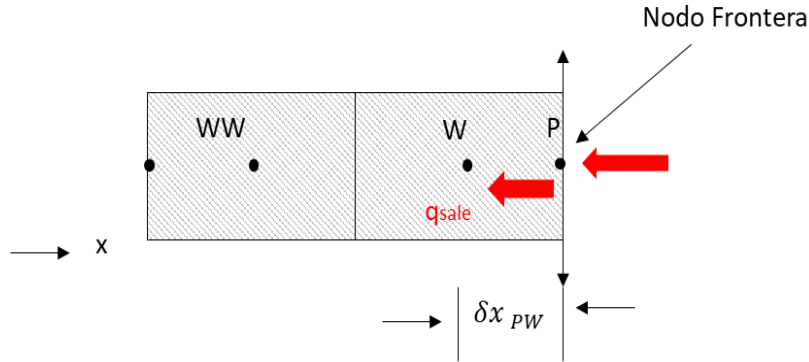


Figura 4-5 Nodo frontera Este con condición de segunda clase.

La condición de frontera (Condición de Von Neumann) para la pared este, se expresa como:

$$q_{entra} = \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.29)$$

Si se utiliza una diferencia adelantada para la deriva, esta nos queda de la siguiente manera:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_e = \lambda \frac{T_P - T_W}{\delta X_{PW}} \quad (4.30)$$

Si se sustituye en la Ec. (4.30), la Ec. (4.29), y despejando  $T_p$  nos queda:

$$\frac{T_P - T_W}{\delta X_{PW}} = q_{entra} \Rightarrow T_p = T_W + \frac{q_{entra}}{\lambda} \delta x_{PE}$$

De esta manera, los valores de los coeficientes en la frontera este, son:

$$a_P = 1 ; \quad a_E = 0 ; \quad a_W = 1 ; \quad a_N = 0$$

$$a_S = 0 ; \quad b = \frac{q_{entra}}{\lambda} * \delta x_{pe}$$

Frontera norte

En la pared superior, debido a que está expuesta de manera directa a la radiación solar, parte de esta energía al interactuar con el sistema es absorbida. Esto provoca que exista un flujo conductivo al interior del sistema, y asimismo las perdidas convectivas y radiativas, al exterior, respectivamente; tal como se muestra en la figura 4.6.

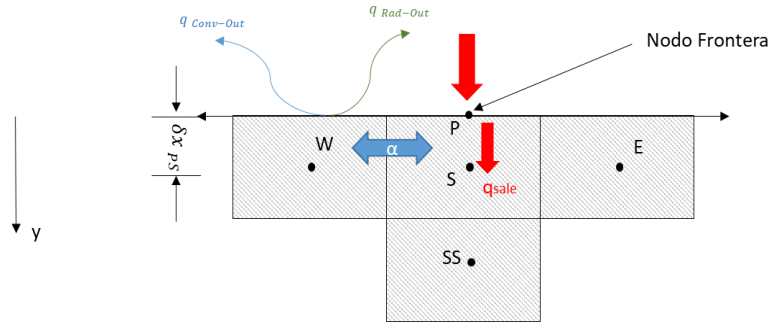


Figura 4-6 Nodo frontera Norte con condición de tercera clase.

De esta manera se realiza un balance termodinámico en el sistema, considerando la energía que entra y sale del sistema, respectivamente. Por lo tanto, esta condición (Condición de Robín) se puede expresar de la siguiente manera:

$$q_{Cond} = q_{Conv} + q_{Rad} + \alpha G$$

Similarmente se utiliza una diferencia adelantada para la derivada (flujo conductivo); en el flujo convectivo se considera, el coeficiente de transferencia de calor convectivo  $h$ , la temperatura de la superficie  $T_p$  y la temperatura exterior. Asimismo para el flujo radiativo se considera la constante de Stefan-Boltzmann, la emisividad, y las temperaturas de la superficie y la  $T_{Sky}$ , nos queda:

$$-\lambda \frac{T_s - T_p}{\delta y_{PS}} = h_{ext}(T_{ext} - T_p) + \sigma \epsilon (T_{Sky}^4 - T_p^4) + \alpha G$$

Por realizar las operaciones correspondientes y despejando los términos de  $T_p$  la ecuación nos queda de la siguiente manera:

$$\left[ \frac{\lambda}{\delta y_{PS}} + h_{ext} \right] T_p = \alpha G + \frac{\lambda}{\delta y_{PS}} T_s + \sigma \epsilon (T_{Sky}^4 - T_p^4) + h_{ext} T_{ext}$$

Por lo tanto, los coeficientes para la superficie exterior son:

$$a_P = \frac{\lambda}{\delta y_{PS}} + h_{ext} ; \quad a_S = \frac{\lambda}{\delta y_{PS}} ; \quad a_E = 0 ; \quad a_W = 0$$

$$a_N = 0 ; \quad b = \frac{(1 - \rho)G}{\alpha G} + \sigma \epsilon (T_{Sky}^4 - T_p^4) + h_{ext} T_{ext}$$

Frontera sur

En la pared inferior (sur), se considera un flujo conductivo hacia el interior de la habitación, y de igual manera, los flujos convectivos y radiativos, respectivamente (figura 4.7).

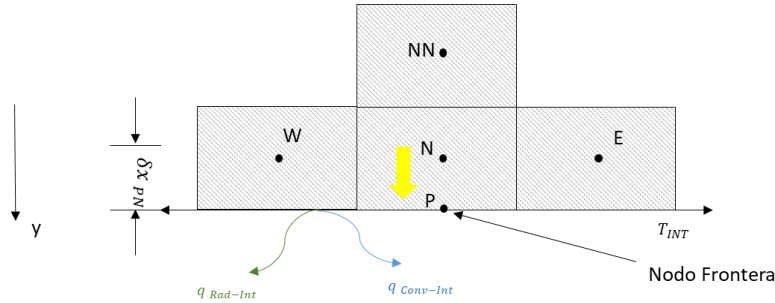


Figura 4-7 Nodo frontera sur con condición de tercera clase.

Por lo tanto, por realizar un balance termodinámico, la condición de frontera (Condición de Robín) queda de la siguiente manera:

$$q_{Cond} = q_{Conv} + q_{Rad} \tag{4.31}$$

Dizcretizando la Ec (4.31), del nodo frontera:

$$-\lambda \frac{T_N - T_P}{\delta y_{PN}} = +h_{int}(T_{int} - T_P) + \sigma \varepsilon (T_{int}^4 - T_P^4)$$

Realizando las operaciones correspondientes y despejando los términos de  $T_p$ , la ecuación nos queda de la siguiente manera:

$$\left[ \frac{\lambda}{\delta y_{PN}} + h_{int} \right] T_P = \frac{\lambda}{\delta y_{PN}} T_N + h_{int} T_{int} + \sigma \varepsilon (T_{int}^4 - T_P^4)$$

Por lo tanto, los coeficientes para la superficie interior son los siguientes:

$$a_P = \frac{\lambda}{\delta y_{PS}} + h_{int} ; \quad a_S = 0 ; \quad a_E = 0 ; \quad a_W = 0$$

$$a_N = \frac{\lambda}{\delta y_{PN}} ; \quad b = h_{int} T_{int} + \sigma \varepsilon (T_{int}^4 - T_P^4)$$

### 4.1.3 Método de solución del sistema de ecuaciones algebraica

Una vez aplicado el método de discretización a la ecuación de conducción de calor en estado transitorio y a sus respectivas condiciones de frontera, este puede ser aproximado mediante un sistema de ecuaciones algebraicas. De esta manera, para obtener los valores discretos de la variable T, el sistema de ecuaciones debe ser resuelto, a través de un método de solución. El método de solución del sistema de ecuaciones algebraicas es independiente del método de discretización.

#### Método TDMA

El sistema de ecuaciones algebraicas discretas obtenida mediante el MVF presentan una estructura tridiagonal, pentadiagonal o hep-tadiagonal. El algoritmo de Thomas (TDMA-Tridiagonal-Matriz Algorithm, en inglés) se muestra particularmente eficiente y por ello es ampliamente usado en los problemas de CFD, para resolver sistemas de ecuaciones algebraicas tridiagonal.

En el caso unidimensional, el algoritmo se aplica de forma directa para calcular el valor en cada nodo computacional, de la siguiente forma:

- i) Partiendo de la ecuación de coeficientes para nodos internos en su forma unidimensional en su forma matricial

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E(i + 1) + a_W \phi_W(i - 1) + B(i)$$

- ii) Se calculan los parámetros P y Q en el primer nodo en dirección X:

$$P(1) = \frac{a_E(1)}{a_P(1)} \quad ; \quad Q(1) = \frac{b(1)}{a_P(1)}$$

- iii) Se aplican las relaciones presentadas en la ecuación para los nodos:  $i = 2$ , hasta  $i = Nx$

$$P(i) = \frac{a_E(i)}{a_P(i) - a_W(i) - P(i - 1)} \quad ; \quad Q(i) = \frac{b(i) + a_W(i) * Q(i - 1)}{a_P(i) - a_W(i) - P(i - 1)}$$

- iv) Se asigna el valor del parámetro Q del último nodo computacional a la variable incógnita en dicho nodo

$$\phi(Nx) = Q(Nx)$$

- v) Se aplica la relación para obtener el valor de la variable incógnita desde  $i = Nx - 1$ , hasta  $i = 1$

$$\phi(i, j) = P(i) * \phi(i + 1, j) + Q(i)$$

Para llevar a cabo la solución numérica del sistema de techo con PCM, se utiliza el método de línea por Gauss-Seidel en direcciones alternantes (LGS-ADI). Este método, surge de la modificación del método iterativo de Jacobi. El método de línea por Gauss, parte del método de TDMA, existen variaciones de línea por línea, tales como el LBL-x, LBL-y, LBL-ADI, LGS-x Y el LBL-y. El método LGS-ADI es la combinación del método iterativo LGS-x y LGS-y. Se inicia con cualquiera de los dos métodos y estos te darán un valor de salida de la variable a calcular, para todo el dominio de la solución y estos valores resultantes se utilizan para aplicar el segundo método y así sucesivamente hasta que converge el sistema. Los pasos para desarrollar el algoritmo son:

1. Estimar los valores para todos los puntos de la variable T
2. El cálculo inicia con los valores inventados para determinar una primera aproximación para los valores de la variable T sobre su diagonal principal. Posteriormente, los valores resultantes se utilizan para una segunda ronda de iteraciones, es decir se toman los valores calculados para las siguientes iteraciones.
3. Se renombra la variable  $T_{old} = T_{new}$ , este método es aplicado a lo largo de las líneas horizontales y verticales hasta lograr satisfacer el criterio de convergencia para la variable T
4. Se resuelve el LGS-X y al terminar una primera corrida los valores que salen del programa como  $T_{new}$ , posteriormente se resuelve el LGS - y, al terminar de calcular los valores termina la primera iteración.
5. Se repite el paso anterior hasta que se satisface el criterio de paro de la variable T.



Diagrama de flujo en estado de transitorio

En la figura 4-8 se muestra el diagrama de flujo utilizado en el presente estudio, con el cual se pretende analizar, la ecuación bidimensional de conducción de calor en estado transitorio. Primero se asignan los parámetros (propiedad física, criterios de convergencia, temperaturas de frontera, etc.), se genera una malla computacional, a continuación se supone un valor de temperatura para todo el campo a una temperatura inicial. Posteriormente, se realiza el cálculo de coeficientes, una vez obtenidos los valores de los coeficientes, se aplica el método de solución de ecuaciones algebraicas, el cual si cumple el criterio de conservación en cada tiempo, imprime resultados y sino renombra la variable. El código termina hasta cumplir con el tiempo máximo establecido.

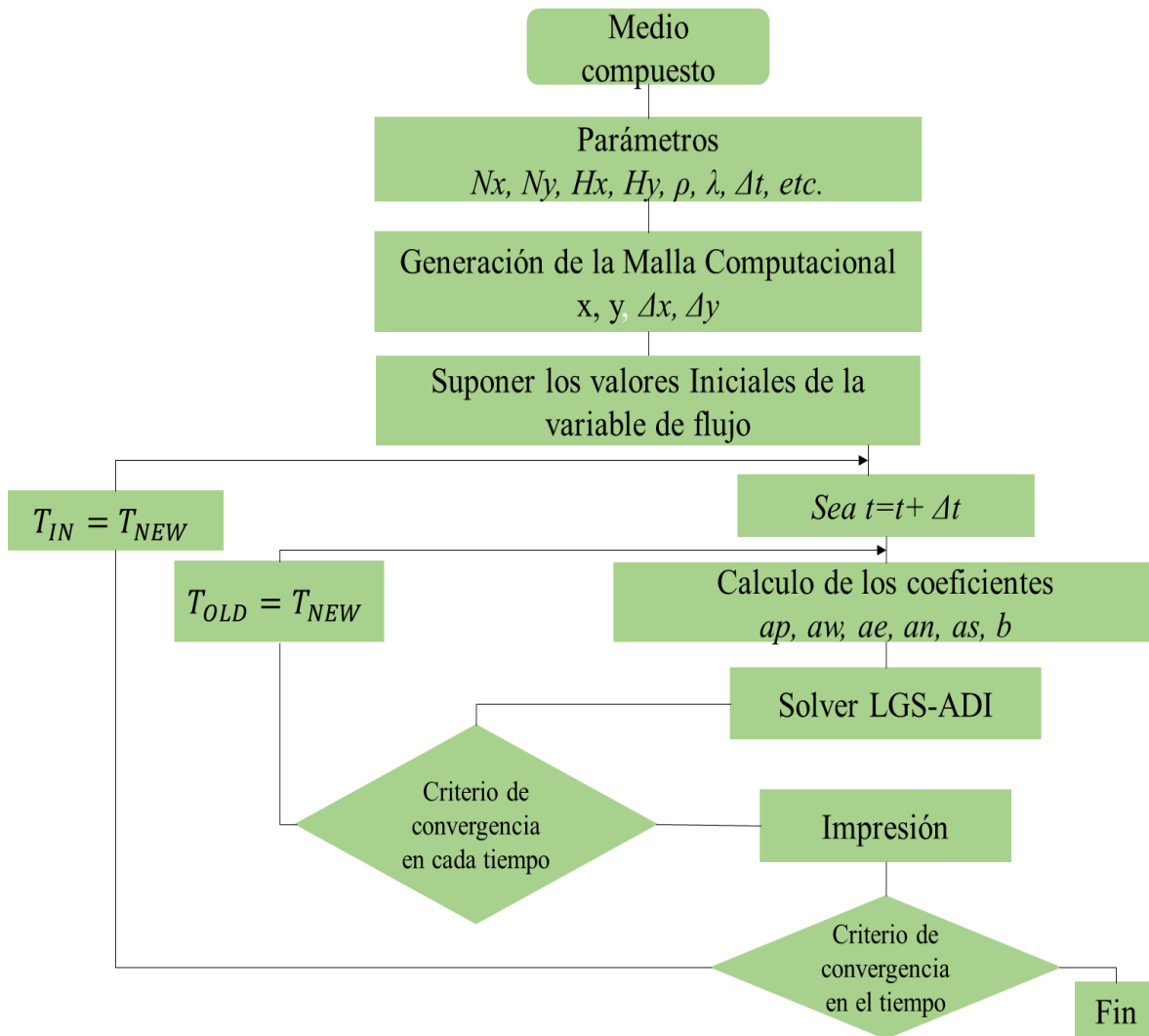


Figura 4-8 Diagrama de flujo en estado transitorio.

## 4.2 Verificación

### 4.2.1 Medio compuesto

El código numérico desarrollado en Fortran se valida comparando los resultados con la solución analítica para una placa compuesta del artículo reportado por Chang y Payne (1991). El modelo físico del sistema de la placa compuesta se muestra en la Figura 4-9, la cual está sujeta a condiciones de frontera de primera y segunda clase, respectivamente. El problema fue resuelto de manera analítica y numérica, respectivamente. Para el método numérico se utilizó una malla computacional de 51 x 51 nodos, una interpolación armónica para las interfaces de los materiales.

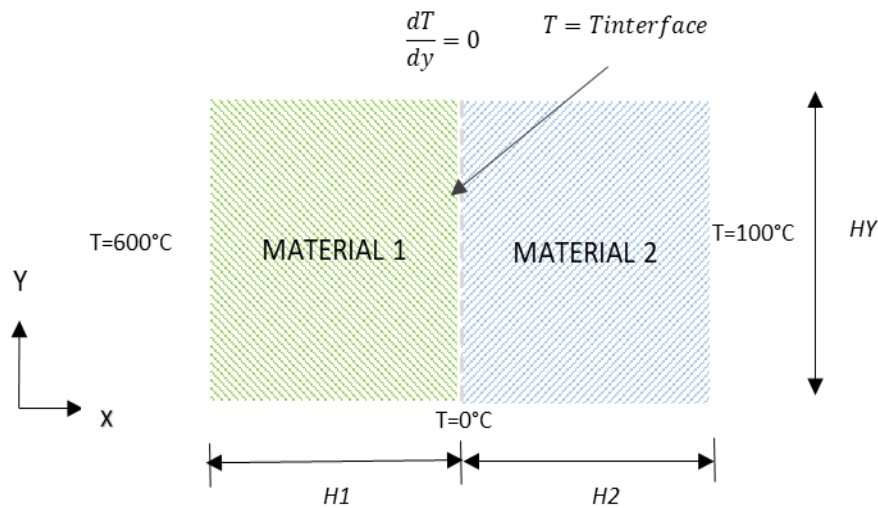


Figura 4-9 Modelo Físico del Medio Compuesto.

En la figura 4-10 se observa la comparación entre el método analítico y el numérico. A partir de los 300 °C, se observa una ligera desviación entre las isothermas de la solución analítica y la numérica, esto se debe a la precisión de los datos utilizados. En la Figura 4.10 se muestra el comportamiento térmico de la placa, en ella se observa que en su pared izquierda, las isothermas tienen la mayor temperatura del sistema y a su vez esta se distribuye. En la pared superior las isothermas son perpendiculares, esto debido al aislamiento. En la interfaz del sistema la temperatura hace un cambio radical en el sistema, esto es ocasionado debido a que cada material tiene conductividades térmicas distintas. La diferencia máxima fue de 3.0%.

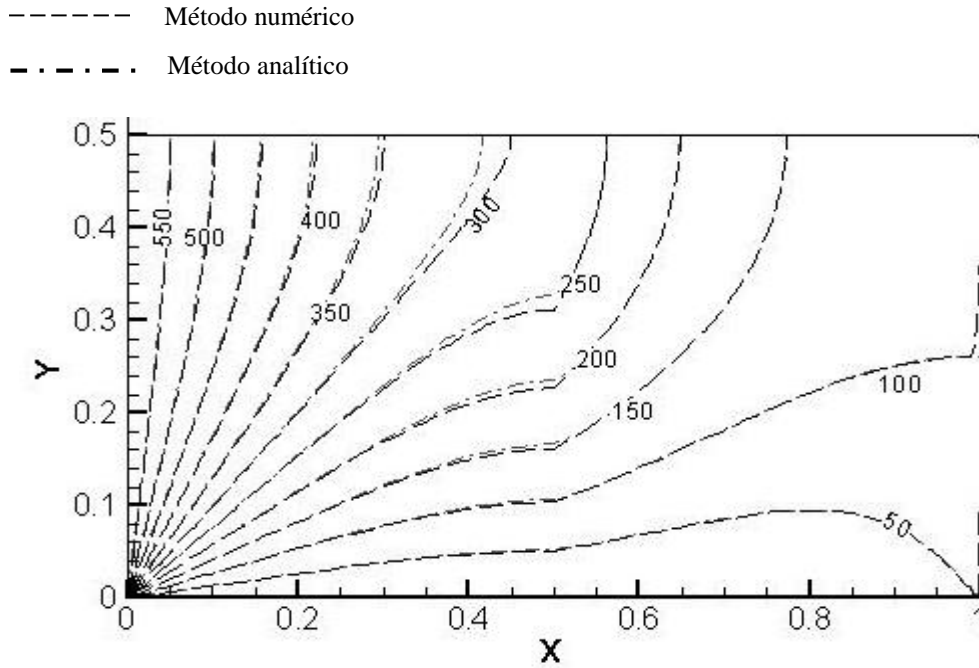


Figura 4-10 Comparación de Isotermas entre el Método Numérico y el Analítico.

#### 4.2.2 Verificación transitoria

Para la verificación transitoria se plantea un ejemplo, el cual consiste en determinar el perfil de temperatura  $T(x, t)$  en un medio sólido homogéneo de dimensiones  $0 \leq x \leq Hx$ . En el medio no existe generación de calor y se encuentra inicialmente a una temperatura  $T(x, t = 0) = F(x)$ . Las condiciones de frontera del sistema en  $x = 0$  y en  $x = Hx$ , son de primera clase, ambas C.F. son homogéneas (Necati Ozisik, 1985). En la Figura 4-11 se muestra el modelo físico del sistema.

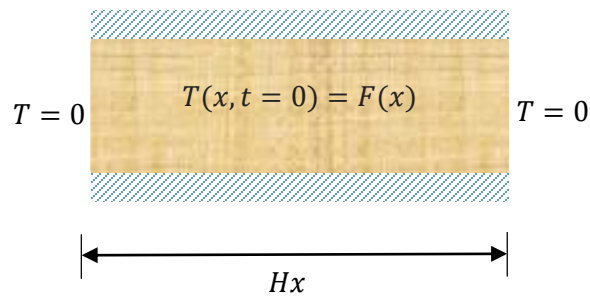


Figura 4-11 Modelo Físico representativo del sistema unidimensional.

En la tabla 4-1 se muestran los resultados que se obtuvieron resolviendo el problema de manera analítica, y numérica. Para la solución numérica se utilizaron distintos pasos de tiempo, un criterio de convergencia de conservación y uno temporal de  $\xi_{estable} = 10^{-12}$  y  $\xi_{Temporal} = 10^{-5}$ , respectivamente.

Tabla 4-1 Resultados obtenidos de forma numérica y analítica, para el problema transitorio.

nodos \	1	2	3	4	5
T °C analítica	0.86	2.25	2.78	2.25	0.86
T °C Numérica $\Delta t=0.001s$	0.87	2.29	2.83	2.29	0.87
Error (%)	1.1	1.7	1.75	1.7	1.1
T °C Numérica $\Delta t=0.0001s$	0.86	2.26	2.79	2.26	0.86
Error (%)	0	0.45	0.35	0.45	0

4.2.3 Verificación del PCM

De igual manera, para analizar la transferencia de calor para un PCM, se desarrolló un código numérico. Para el análisis de la transferencia de calor del PCM, se utilizó el método de fracción líquida. El modelo físico del PCM se muestra en la Figura 4-12. El problema se resuelve de manera numérica, en el cual, se usó una malla computacional de 5 x 12 nodos, y una interpolación lineal para tratar la fracción líquida a diferentes temperaturas.

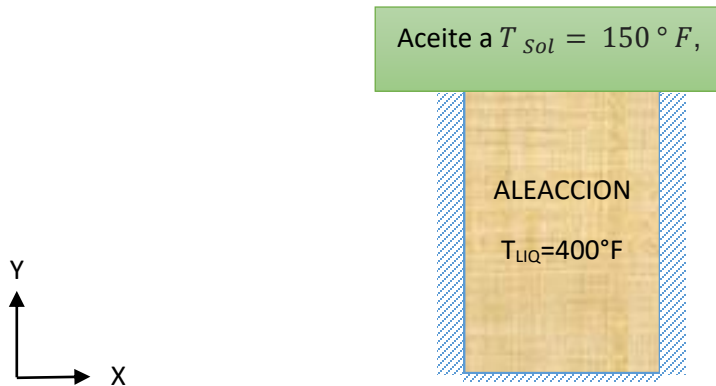


Figura 4-12 Modelo Representativo de PCM.

En la Figura 4.13 se muestra el comportamiento térmico del PCM dentro del molde cilíndrico. Se observa que mientras transcurre el tiempo, los cambios de fase se van produciendo hasta llegar a la zona sólida, esto es después de los 80 segundos aproximadamente.

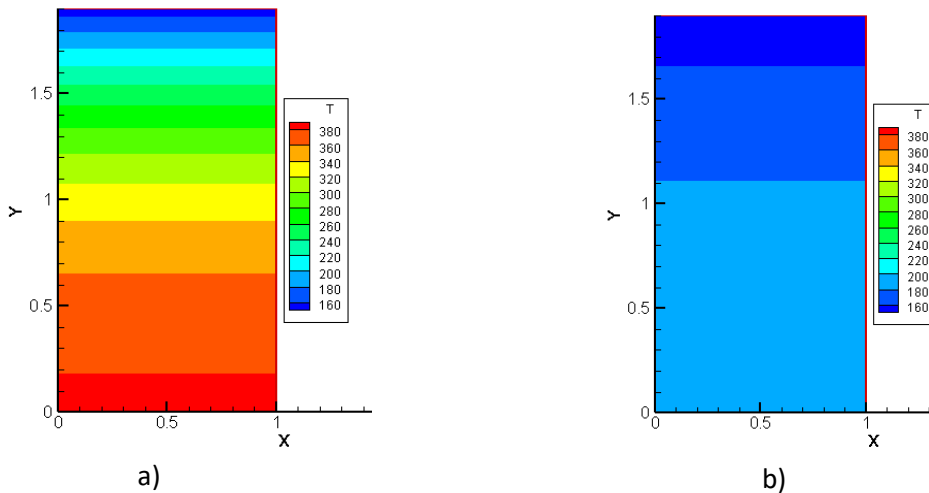


Figura 4-13 Perfil de temperaturas del PCM a) 20 s, b) 80 s.

En la Tabla 4.2 se realiza una comparación de los datos de temperatura reportados por Carnahan, y los datos obtenidos en el presente estudio. En este estudio, se utiliza una función de interpolación lineal, un método de solución algebraica TDMA y un paso de tiempo de 5 segundos. En esta tabla se muestran los datos de temperatura a los 20 y 80 segundos, respectivamente. De igual manera, se presenta la desviación porcentual que existe entre los datos de la literatura contra los obtenidos en el presente estudio.

Tabla 4-2 Datos de Temperatura a 20 y 80 segundos.

Tiempo (s)	Temperatura Literatura (°F)	Temperatura Presente estudio (°F)	Error (%)
<b>20</b>	176.93	176.80	0.07
	201.65	201.52	0.06
	223.56	223.46	0.04
	242.50	242.43	0.02
	258.45	258.41	0.01
	271.44	271.41	0.01
	281.50	281.48	0.007
	288.65	288.64	0.003
	292.94	292.92	0.007
	294.36	294.35	0.003
<b>80</b>	157.95	157.91	0.025
	165.56	165.51	0.030
	172.61	172.54	0.040
	178.92	178.85	0.190
	184.39	184.32	0.037
	188.94	188.86	0.042
	192.52	192.44	0.041
	195.09	195.02	0.035
	196.65	196.57	0.040
	197.16	197.09	0.035

### 4.3 Independencia de malla espacial y temporal.

En la presente sección, se realiza un análisis para establecer una malla numérica, la cual se utiliza en el estudio numérico del problema de material de cambio de fase (PCM) en techos planos. Para ello es necesario establecer el nivel de su calidad de la malla numérica, en cuanto el número de nodos computacionales, esto con el objetivo de que los resultados sean lo suficientemente precisos, sin tener que recurrir a altos costos de tiempo computacional.

Para determinar una malla numérica adecuada para el sistema, se llevó a cabo el estudio de independencia de malla espacial y temporal, respectivamente. El estudio espacial consiste en comparar las predicciones del modelo computacional para diferentes términos de mallas numéricas, hasta encontrar el tamaño de malla adecuado, dada la diferencia entre el valor de las variables, no sea significativa. Mientras que el estudio temporal consiste en comparar las predicciones del modelo computacional, a diferentes pasos de tiempo.

#### 4.3.1 Techo convencional (Losa de Concreto)

##### 4.3.1.1 Independencia temporal

En primer lugar, se analiza la transferencia de calor por conducción en un sistema de losa de concreto. Por lo tanto, una vez completado y verificado, el código computacional, se realiza un análisis de independencia de malla temporal. Con base a este análisis, se busca obtener un paso de tiempo adecuado, en el cual, los resultados obtenidos no muestren un cambio significativo.

Para llevar a cabo la independencia temporal se propone una malla espacial fina para el sistema en estudio (Figura 3.1 a)), esta consta de 101 x 41 nodos computacionales. El objetivo de proponer esta malla es que los resultados obtenidos solo dependan de la parte temporal, y no sea afectada por la parte espacial.

En el estudio, se utiliza ocho pasos de tiempo distintos, los cuales fueron: 1, 3, 5, 10, 15, 20, 30 y 40 segundos, respectivamente. Los datos que se comparan son el flujo de calor total y la temperatura, al exterior e interior de la superficie de la losa de concreto, respectivamente.

Este análisis fue sometido a las condiciones climatológicas de la ciudad de Mérida, Yucatán. Se seleccionó el día más cálido (7 abril 2014). En donde, para llevar a cabo dicho análisis se consideró el caso con mayor radiación solar en el día, el cual tiene un valor de 1001 W/m<sup>2</sup>. La modelación se realizó a partir de las 11:00 a.m. – 1:00 p.m.; la temperatura inicial es de 36.3 °C, este corresponde a la temperatura de las 11:00 a.m.

El sistema de techo de losa de concreto, se analiza durante un tiempo de 120 minutos. En donde, en intervalos de 10 minutos, se analizan los flujos de calor y temperaturas promedio, respectivamente; y asimismo el error porcentual que existe entre estos datos a diferentes pasos de tiempo. En la Tabla 4-3 se muestran los resultados obtenidos y su desviación porcentual. Con la finalidad de apreciar estos resultados, se presentan dos intervalos de tiempos diferentes.

Tabla 4-3 Comparación de resultados a 60 y 70 minutos, con diferentes pasos de tiempo

Tiempo (Min)	DT (s)	$Q_{Total,Ext.}$ (W/m <sup>2</sup> )	Error (%)	$Q_{Total,Int.}$ (W/m <sup>2</sup> )	Error (%)	$T_{sext.}$ (°C)	Error (%)	$T_{sint.}$ (°C)	Error (%)
60	1	288.374		120.620		50.878		34.256	
	3	288.360	0.005	120.627	0.006	50.878	0.001	34.256	0.002
	5	288.346	0.005	120.633	0.006	50.877	0.001	34.257	0.002
	10	288.312	0.012	120.650	0.014	50.875	0.004	34.258	0.004
	15	288.277	0.012	120.667	0.014	50.873	0.004	34.260	0.004
	20	288.243	0.012	120.684	0.014	50.871	0.004	34.261	0.004
	30	288.174	0.024	120.718	0.028	50.867	0.007	34.264	0.008
	40	288.104	0.024	120.752	0.028	50.864	0.007	34.267	0.008
70	1	272.592		125.527		51.768		34.662	
	3	272.596	0.002	125.531	0.003	51.768	0.000	34.663	0.001
	5	272.598	0.001	125.535	0.003	51.768	0.000	34.663	0.001
	10	272.595	0.001	125.546	0.008	51.768	0.000	34.664	0.003
	15	272.586	0.003	125.556	0.008	51.767	0.001	34.665	0.003
	20	272.574	0.004	125.567	0.008	51.767	0.001	34.666	0.003
	30	272.543	0.011	125.588	0.017	51.765	0.003	34.668	0.005
	40	272.507	0.013	125.610	0.017	51.763	0.004	34.669	0.005

La desviación porcentual que existe entre en los diferentes pasos de tiempo que se utilizaron para el análisis, son menores del 1 %. Por lo tanto, se asegura que si se utiliza un paso de tiempo de 30 segundos para el presente estudio, los resultados que se obtendrán serán confiables.



4.3.1.2 Independencia espacial en dirección “y”

Una vez realizada la independencia de malla temporal, y que se obtuvo el paso de tiempo adecuado, el cual, servirá para el análisis del presente estudio; se procede a realizar la independencia de malla espacial. Este análisis consiste en ir variando los nodos computacionales en ambas direcciones “x” y “y”, esto con la finalidad de encontrar un malla adecuada, en la cual los resultados obtenidos no tengan un cambio significativo, y el mejorar el tiempo de computo.

En primer lugar, se varía los nodos computacionales en dirección “y”, en 11, 21, 31, 41, 51 y 61 nodos, respectivamente. Mientras que en la dirección “x” se mantiene constante a 101 nodos. El sistema está sometido a los mismos datos climatológicos que en la independencia de malla temporal. Los datos que se comparan son el flujo de calor total y la temperatura, al exterior e interior de la superficie de la losa de concreto, respectivamente. El sistema de techo de losa de concreto, se analiza durante un tiempo de 120 minutos.

En la Tabla 4-4 se muestran los resultados obtenidos y su desviación porcentual. En donde, con la finalidad de apreciar los resultados se presentan dos intervalos de tiempo.

Tabla 4-4 Malla de NX=101 y NY= 11, 21, 31, 41, 51 y 61, a los 70 y 80 minutos.

Tiempo (Min)	Malla Numérica	Q Total,Ext. (W/m <sup>2</sup> )	Error (%)	Q Total,Int. (W/m <sup>2</sup> )	Error (%)	T sext. (°C)	Error (%)	T sint. (°C)	Error (%)
80	101 x 11	271.552		130.216		52.536		35.050	
	101 x 21	271.358	0.071	130.623	0.312	52.525	0.021	35.084	0.096
	101 x 31	271.333	0.009	130.770	0.112	52.523	0.003	35.096	0.035
	101 x 41	271.329	0.001	130.846	0.057	52.523	0.000	35.102	0.018
	101 x 51	271.330	0.000	130.891	0.035	52.523	0.000	35.106	0.011
	101 x 61	271.332	0.001	130.922	0.023	52.523	0.000	35.109	0.007
90	101 x 11	288.918		135.566		53.197		35.492	
	101 x 21	289.206	0.100	136.044	0.351	53.213	0.030	35.532	0.111
	101 x 31	289.286	0.028	136.209	0.121	53.217	0.008	35.545	0.038
	101 x 41	289.322	0.012	136.292	0.061	53.219	0.004	35.552	0.019
	101 x 51	289.341	0.007	136.342	0.037	53.220	0.002	35.556	0.012
	101 x 61	289.354	0.004	136.375	0.025	53.221	0.001	35.559	0.008

4.3.1.3 Independencia espacial en dirección “x”

Una vez obtenido el número de nodos computacionales en la dirección “y”, se procede a realizar la independencia espacial en dirección “x”. Para realizar este análisis se variaron los nodos en 41, 51, 61, 71, 81, 91, 101, 111 y 121, respectivamente.

En la Tabla 4-5 se muestran los resultados obtenidos y la desviación porcentual para diferentes mallas numéricas.

Tabla 4-5 Malla de NX=41, 51, 61, 71, 81, 91,101, 111 y 121, NY= 31, a los 70 y 80 minutos.

Tiempo (Min)	Malla Numérica	$Q_{Total,Ext.}$ (W/m <sup>2</sup> )	Error (%)	$Q_{Total,Int.}$ (W/m <sup>2</sup> )	Error (%)	$T_{sext.}$ (°C)	Error (%)	$T_{sint.}$ (°C)	Error (%)
80	41 x 31	271.333		130.770		52.523		35.096	
	51 x 31	271.333	1.07E-11	130.770	3.37E-11	52.523	3.14E-12	35.096	1.05E-11
	61 x 31	271.333	1.40E-11	130.770	5.13E-11	52.523	3.88E-12	35.096	1.61E-11
	71 x 31	271.333	7.56E-12	130.770	1.86E-11	52.523	1.70E-12	35.096	5.49E-12
	81 x 31	271.333	1.13E-11	130.770	2.22E-12	52.523	3.02E-12	35.096	6.68E-13
	91 x 31	271.333	1.19E-11	130.770	1.92E-11	52.523	3.57E-12	35.096	6.82E-12
	101 x 31	271.333	2.21E-11	130.770	2.90E-11	52.523	6.06E-12	35.096	6.64E-12
	111 x 31	271.333	1.71E-11	130.770	8.87E-12	52.523	6.17E-12	35.096	2.45E-12
	121 x 31	271.333	9.24E-12	130.770	1.50E-11	52.523	1.08E-12	35.096	7.45E-12
90	41 x 31	289.286		136.209		53.217		35.545	
	51 x 31	289.286	9.35E-12	136.209	4.32E-11	53.217	3.08E-12	35.545	1.39E-11
	61 x 31	289.286	1.58E-11	136.209	6.35E-11	53.217	4.81E-12	35.545	2.03E-11
	71 x 31	289.286	1.13E-11	136.209	1.31E-11	53.217	3.74E-12	35.545	3.66E-12
	81 x 31	289.286	1.25E-11	136.209	1.46E-13	53.217	3.52E-12	35.545	1.80E-13
	91 x 31	289.286	7.88E-12	136.209	1.69E-11	53.217	2.99E-12	35.545	4.78E-12
	101 x 31	289.286	2.55E-11	136.209	3.41E-11	53.217	6.62E-12	35.545	1.19E-11
	111 x 31	289.286	2.18E-11	136.209	1.64E-11	53.217	6.94E-12	35.545	5.26E-12
	121 x 31	289.286	7.96E-12	136.209	1.08E-11	53.217	8.55E-13	35.545	2.70E-12

4.3.2 Techo Compuesto (Losas de concreto con PCM)

4.3.2.1 Independencia temporal

De igual manera que para el sistema de techo de losa de concreto, se realizó un análisis de independencia de malla temporal, para el sistema de losa de concreto con la implementación de un PCM. Con base a este análisis, se busca obtener un paso de tiempo adecuado, en el cual, los resultados obtenidos no muestren un cambio significativo.

Para llevar a cabo la independencia temporal se propone una malla espacial fina para el sistema en estudio Figura 3-1 (b), en el cual, la losa de concreto consta de 61 x 31 nodos computacionales, mientras que el PCM de 61 x 61 nodos computacionales. El objetivo de proponer esta malla es que los resultados obtenidos solo dependan de la parte temporal, y no sea afectada por la parte espacial.

En el estudio, se utiliza cinco pasos de tiempo distintos, los cuales fueron: 1, 3, 5, 10 y 15 segundos, respectivamente. Los datos que se comparan son la temperatura y el flujo de calor total, al exterior e interior de la superficie del techo compuesto, respectivamente. De igual manera se compara el flujo de calor en la interface.

Este análisis fue sometido a las condiciones climatológicas de la ciudad de Mérida, Yucatán. Se seleccionó el día más cálido (7 abril 2014). En donde, para llevar a cabo dicho análisis se consideró el caso con mayor radiación solar en el día, el cual tiene un valor de 1001 W/m<sup>2</sup>. La modelación se realiza a partir de las 11:00 a.m. – 1:00 p.m.; la temperatura inicial es de 24. ° C, este corresponde a la temperatura al interior de la habitación.

El comportamiento térmico del sistema de techo compuesto se analiza durante 120 minutos. En donde, los flujos y temperaturas promedio, se analizan en intervalos de 10 minutos, y asimismo la desviación porcentual que existe entre ellos, en diferentes pasos de tiempo. En la Tabla 4-5 se muestran los resultados y las desviaciones porcentuales, de dos diferentes intervalos de tiempo. Estos, con la finalidad de apreciar dichos resultados.

Tabla 4-6 Comparación de resultados a 50 y 60 minutos, con diferentes pasos de tiempo.

Tiempo (Min)	DT (s)	Q <sub>Total,Ext.</sub> (W/m <sup>2</sup> )	Error (%)	Q <sub>Total,Int.</sub> (W/m <sup>2</sup> )	Error (%)	T <sub>sext.</sub>	Error (%)	T <sub>sint.</sub>	Error (%)	Q <sub>interface.</sub> (W/m <sup>2</sup> )	Error (%)
50	1	368.652		19.373		54.973		25.681		-305.499	
	3	368.733	0.0221	19.373	0.002	54.977	0.008	25.681	0.000	-305.417	0.027
	5	368.783	0.0135	19.372	0.003	54.980	0.005	25.681	0.000	-305.368	0.016
	10	368.862	0.0215	19.369	0.020	54.984	0.008	25.681	0.001	-305.288	0.026
	15	368.907	0.0123	19.361	0.040	54.986	0.004	25.680	0.003	-305.288	0.000
60	1	377.015		20.232		55.647		25.755		-297.867	
	3	377.024	0.002	20.233	0.005	55.647	0.001	25.756	0.000	-297.858	0.003
	5	377.028	0.001	20.234	0.003	55.647	0.000	25.756	0.000	-297.854	0.001
	10	377.004	0.006	20.234	0.001	55.646	0.002	25.756	0.000	-297.878	0.008
	15	376.985	0.005	20.231	0.017	55.645	0.002	25.755	0.001	-297.878	0.000

Con base a los datos mostrados en la tabla anterior, se aprecia que la desviación porcentual que existe entre los diferentes pasos de tiempo que se utilizaron para el análisis, son menores del 1 %. Por lo tanto, se asegura que si se utiliza un paso de tiempo de 10 segundos para el estudio del techo de losa de concreto con PCM, los resultados que se obtendrán serán confiables.

4.3.2.2 Independencia Espacial en dirección “y”

Una vez realizada la independencia de malla temporal, y que se obtuvo el paso de tiempo adecuado, el cual, servirá para el análisis del presente estudio; se procede a realizar la independencia de malla espacial. Este análisis consiste en ir variando los nodos computacionales en ambas direcciones “x” y “y”, esto con la finalidad de encontrar una malla adecuada, en la cual los resultados obtenidos no tengan un cambio significativo, y el mejorar el tiempo de computo.

Sin embargo, para el presente estudio solo se realizó la independencia espacial en la dirección “y” para el PCM. Esto debido a que en la dirección “x” se considera la misma cantidad de nodos que para la losa de concreto. La variación de los nodos en la dirección “y” fueron de 21, 31, 41, 51, 61 y 71 nodos, respectivamente.

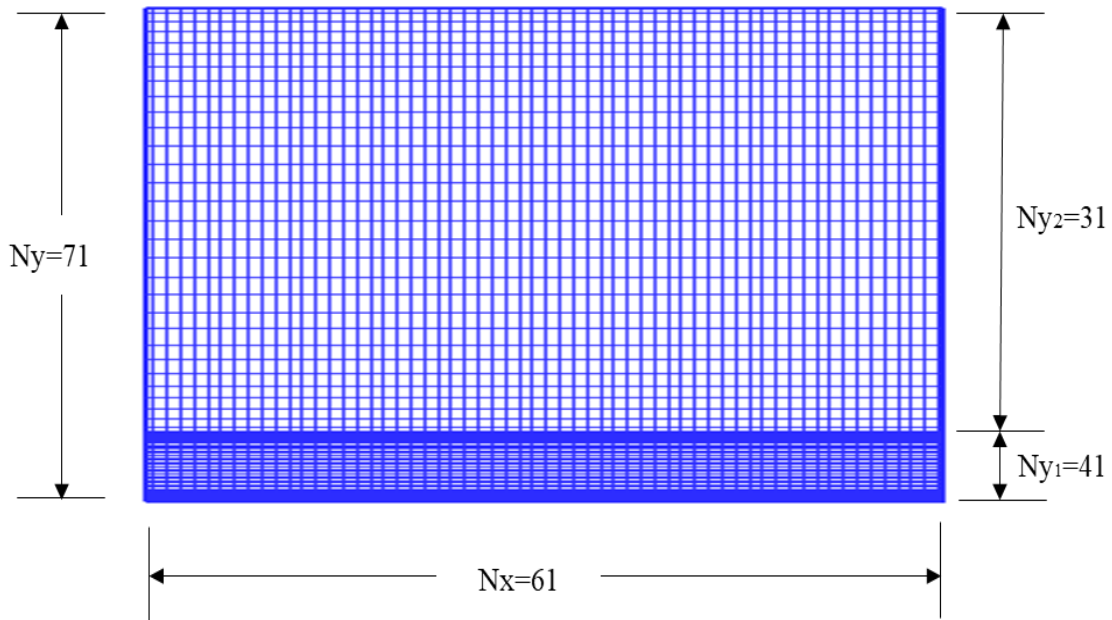
El sistema está sometido a los mismos datos climatológicos que en la independencia de malla temporal. Los datos que se comparan son la temperatura y el flujo de calor total, al exterior e interior del sistema del techo compuesto, respectivamente.

En la siguiente tabla, se muestran los resultados obtenidos para diferentes mallas numéricas y asimismo su desviación porcentual.

Tabla 4-7 Malla Numérica PCM de  $N_x=61$  y  $N_y= 21, 31, 41, 51, 61$  y  $71$  a los 50 y 60 minutos, respectivamente.

Tiempo (Min)	Malla numerica PCM	$Q_{Total,Ext.}$ ( $W/m^2$ )	Error (%)	$Q_{Total,Int.}$ ( $W/m^2$ )	Error (%)	$T_{sext.}$ ( $^{\circ}C$ )	Error (%)	$T_{sint}$ ( $^{\circ}C$ )	Error (%)	$Q_{interface.}$ ( $W/m^2$ )	Error (%)
50	61 x 21	369.918		19.442		55.040		25.687		-304.233	
	61 x 31	369.261	0.178	19.386	0.289	55.005	0.064	25.682	0.019	-304.890	0.216
	61 x 41	369.057	0.055	19.377	0.049	54.994	0.020	25.681	0.003	-305.094	0.067
	61 x 51	368.948	0.030	19.373	0.019	54.988	0.011	25.681	0.001	-305.203	0.036
	61 x 61	368.862	0.023	19.369	0.021	54.984	0.008	25.681	0.001	-305.288	0.028
	61 x 71	368.829	0.009	19.366	0.015	54.982	0.003	25.681	0.001	-305.322	0.011
60	61 x 21	377.918		20.290		55.695		25.760		-296.963	
	61 x 31	376.842	0.286	20.252	0.188	55.637	0.103	25.757	0.013	-298.040	0.361
	61 x 41	377.178	0.089	20.243	0.043	55.655	0.032	25.756	0.003	-297.704	0.113
	61 x 51	376.830	0.092	20.239	0.021	55.637	0.033	25.756	0.001	-298.052	0.117
	61 x 61	377.004	0.046	20.234	0.025	55.646	0.017	25.756	0.002	-297.878	0.058
	61 x 71	376.819	0.049	20.230	0.018	55.636	0.018	25.755	0.001	-298.063	0.062

Con base a los resultados obtenidos del estudio de independencia de malla espacial y temporal, respectivamente, se estableció un tamaño adecuado de la malla numérica, para el estudio numérico del techo compuesto. La malla numérica que se utilizara será de 61 x 71 nodos computacionales (Figura 4-14), mientras que el paso de tiempo será de 10 segundos.



*Figura 4-14 Malla numérica del sistema de techo compuesto.*

# CAPÍTULO 5

## RESULTADOS DE TECHOS PARA LA REPÚBLICA MEXICANA.

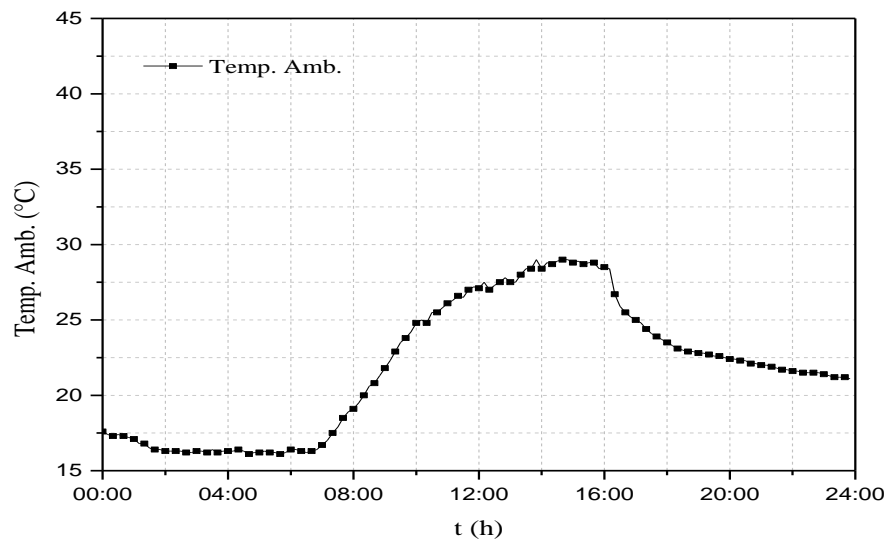
En este capítulo se presenta el análisis de los resultados numéricos de la transferencia de calor para un techo plano con la implementación de un material de cambio de fase (PCM). En la primera sección, se muestra el clima seleccionado y la ciudad representativa, asimismo se muestran los datos climatológicos obtenidos de estaciones meteorológicas que se utilizaron para el análisis del estudio numérico. En la segunda sección, se estudia la transferencia de calor de un techo típico de losa de concreto, y un techo compuesto de losa de concreto con PCM. Ambos casos se analizaron durante el día más cálido y más frío, respectivamente.

### 5.1 Parámetros de estudio

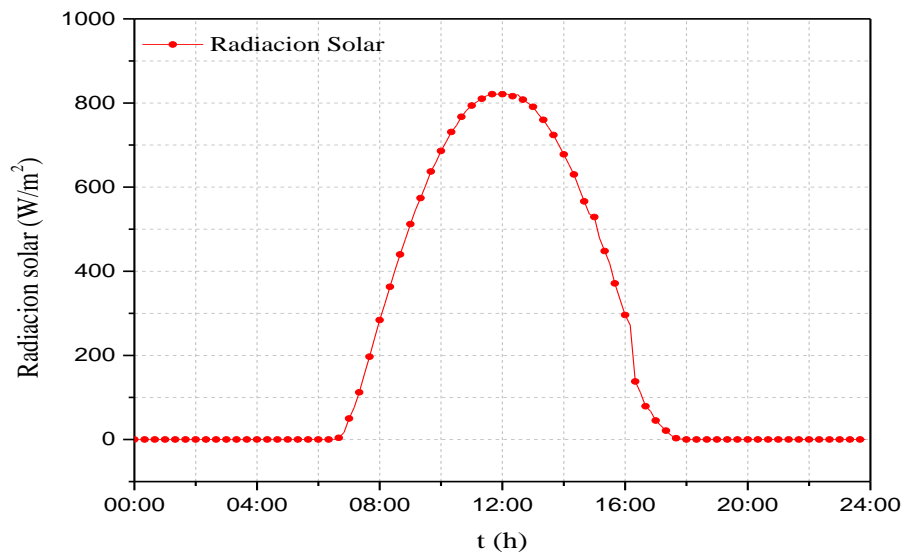
Con base al objetivo general de la presente tesis, el cual demanda la evaluación del comportamiento térmico de un techo plano de losa de concreto con la implementación de un PCM, bajo condiciones de clima cálido; para el cual se eligió la ciudad de Mérida, Yucatán, como representativo de este clima. Los datos climatológicos fueron proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en Mérida, Yucatán, los cuales pertenecen al año 2014. Dentro de los datos proporcionados se encuentran la temperatura del medio ambiente, la radiación solar y la velocidad del viento.

Para el presente estudio se seleccionó el día más cálido y el más frío del año, estos fueron seleccionados con respecto a la temperatura máxima y mínima. Los datos climatológicos fueron obtenidos de estaciones meteorológicas en intervalos de 10 minutos, para ambos días, los cuales serán implementados para obtener el presente estudio del sistema de techo compuesto, en esta región. Las siguientes figuras muestran los datos del día más frío, y el día más cálido, los cuales corresponden a los días 23 de enero y 7 de abril, respectivamente.

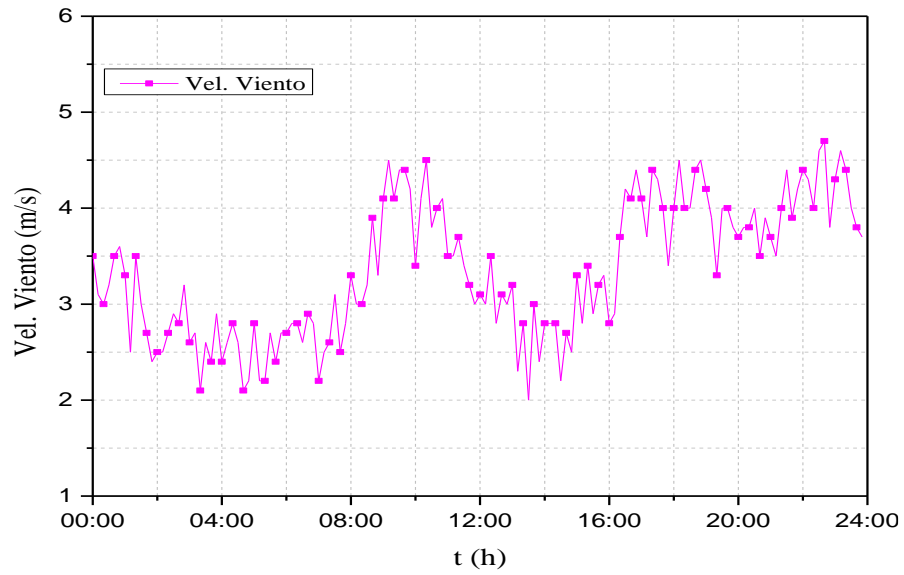
La Figura 5-1, muestra el comportamiento de la radiación solar, temperatura ambiente y la velocidad del viento, respectivamente, los cuales corresponden al día más frío. En donde, los valores máximos obtenidos para estas variables durante este día fueron,  $821 \text{ W/m}^2$ ,  $29 \text{ }^\circ\text{C}$ , y  $4.7 \text{ m/s}$ .



a)



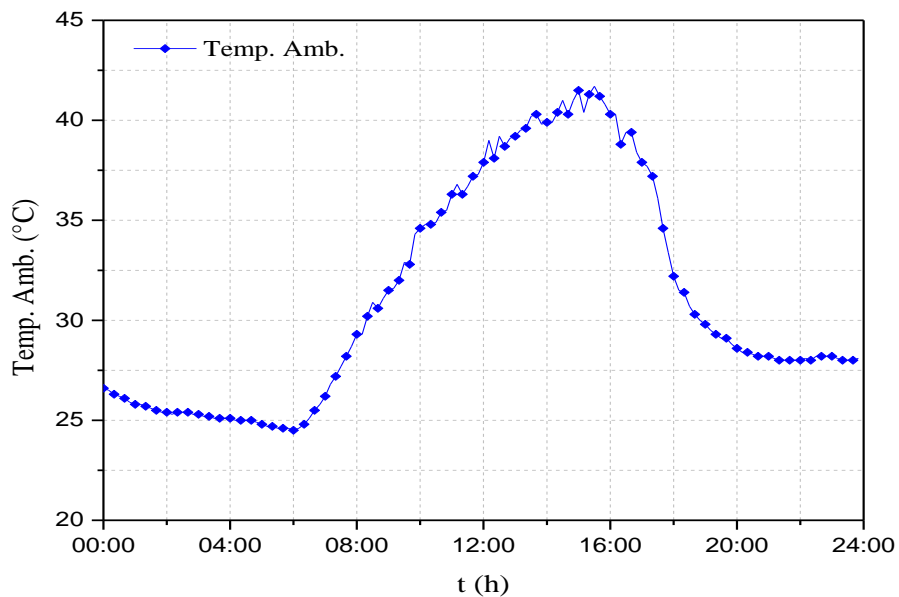
b)



c)

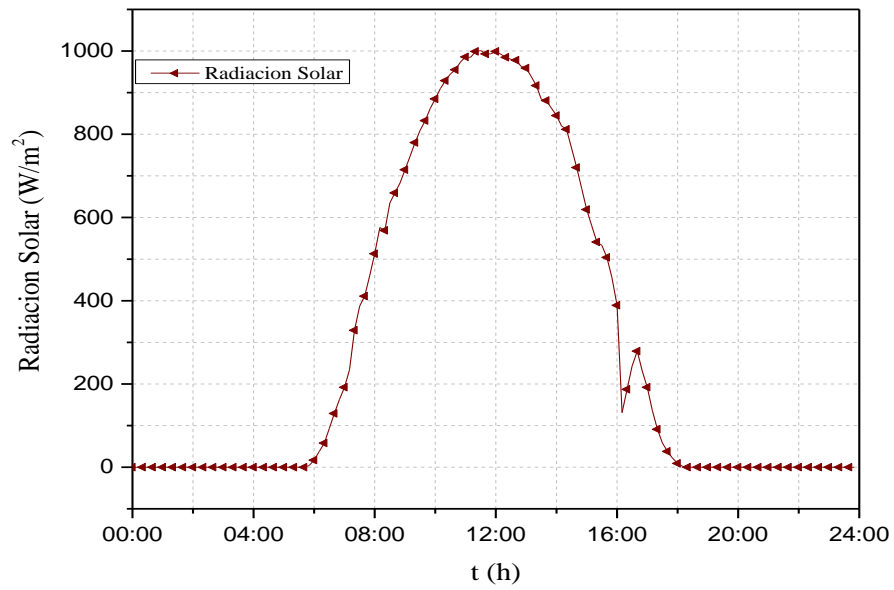
Figura 5-1 Comportamiento: a) Temperatura ambiente, b) Radiación Solar y C) velocidad del viento, durante el día frío.

Asimismo, en la Figura 5-2, muestra el comportamiento de la radiación solar, temperatura ambiente y la velocidad del viento, respectivamente, los cuales corresponden al día más cálido. En donde, los valores máximos obtenidos para estas variables durante este día fueron,  $1001 \text{ W/m}^2$ ,  $41.7 \text{ }^\circ\text{C}$ , y  $5.0 \text{ m/s}$ .

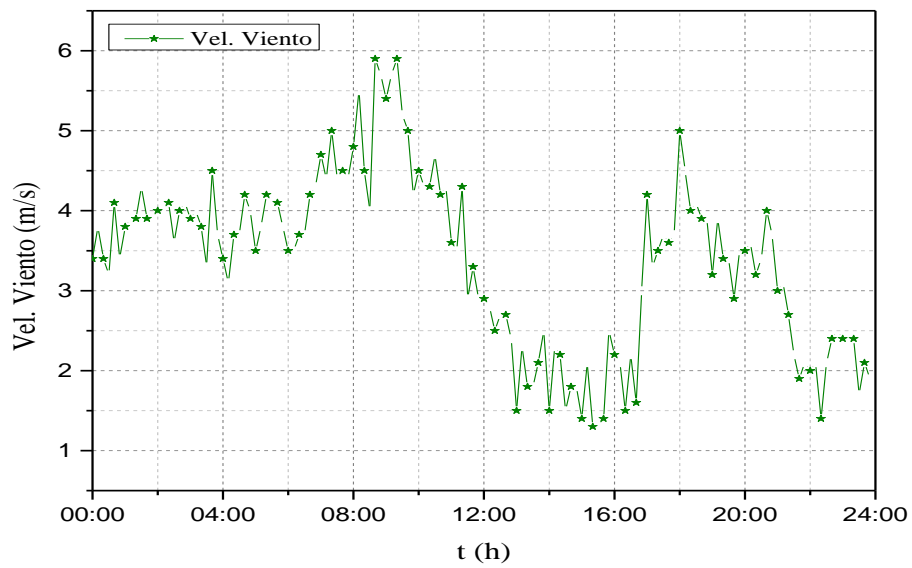


a)





b)



c)

Figura 5-2 Comportamiento: a) Temperatura ambiente, b) Radiación Solar y C) velocidad del viento, durante el día cálido.

En la presente tesis se pretende analizar el desempeño térmico de un techo de losa de concreto con PCM, mientras este evoluciona en el tiempo. Por lo tanto, se requiere de intervalos de tiempos pequeños. De esta manera y con base a los datos experimentales obtenidos cada 10 minutos, se obtuvieron ecuaciones en función del tiempo, para la temperatura ambiente y radiación solar. Mientras que para la velocidad se considera los valores durante cada diez minutos.

En las Tablas (5-1) y (5-2), se muestran las funciones de temperatura ambiente y radiación solar, respectivamente, del día frío.

Tabla 5-1 Funciones de temperatura ambiente del día frío.

Intervalo de tiempo (s)	Funciones de Temperatura
$0 \leq t < 14400$	$T(t) = -2.865E - 16 t^4 + 8.683E - 12 t^3 - 7.309E - 08 t^2 + 2.071E - 06 t + 17.507$
$14400 \leq t < 28800$	$T(t) = -1.097E - 20 t^5 + 1.0129E - 15 t^4 - 3.156E - 11 t^3 + 3.54E - 07 t^2 + 6.641E - 11 t$
$28800 \leq t < 39600$	$T(t) = -8.3643E - 17 t^4 + 7.777E - 12 t^3 - 2.3666E - 07 t^2 + 0.00305 t + 0.0644$
$39600 \leq t < 54000$	$T(t) = -1.8248E - 17 t^4 + 2.6668E - 12 t^3 - 1.3757E - 07 t^2 + 0.00306 t - 0.10813$
$54000 \leq t < 64800$	$T(t) = 3.8344E - 21 t^5 - 6.7482E - 16 t^4 + 3.907E - 11 t^3 - 7.36424E - 07 t^2 - 4.970E - 11 t$
$64800 \leq t < 79200$	$T(t) = -1.584E - 22 t^5 + 3.768E - 17 t^4 - 3.1022E - 12 t^3 + 9.14E - 08 t^2 + 5.905E - 12 t$
$79200 \leq t \leq 86400$	$T(t) = 9.1969E - 23 t^5 - 2.204E - 17 t^4 + 1.6713E - 12 t^3 - 3.631E - 08 t^2 - 1.7554E - 12 t$

Tabla 5-2 Funciones de radiación solar del día frío.

Intervalo de tiempo (s)	Funciones de Radiación Solar
$25200 \leq t < 36000$	$G_{sun}(t) = -2.8154E - 15 t^4 + 1.628E - 10 t^3 - 3.683E - 07 t^2 - 0.04744 t + 2.808$
$36000 \leq t < 50400$	$G_{sun}(t) = 1.2311E - 15 t^4 - 2.1367E - 10 t^3 + 1.1115E - 05 t^2 - 0.16151 t - 1.4891$
$50400 \leq t \leq 64800$	$G_{sun}(t) = 8.644E - 15 t^4 - 1.4556E - 09 t^3 + 8.030E - 05 t^2 - 1.443 t + 2.5729$

En las tablas 5-3 y 5-4 se muestran las funciones de temperatura ambiente y radiación solar, respectivamente, del día cálido.

Tabla 5-3 Funciones de temperatura ambiente del día cálido.

Intervalo de tiempo (s)	Funciones de temperatura
$0 \leq t < 10800$	$T(t) = 1.845E - 16 t^4 + 3.9131E - 12 t^3 - 1.241E - 08 t^2 - 2.091E - 04 t + 26.599$
$10800 \leq t < 25200$	$T(t) = 4.079E - 16 t^4 - 2.5865E - 11 t^3 + 6.016E - 07 t^2 - 0.00615 t + 48.526$
$25200 \leq t < 43200$	$T(t) = -1.0769E - 17 t^4 + 1.06E - 12 t^3 - 4.348E - 08 t^2 + 0.00164 t - 0.01849$
$43200 \leq t < 64800$	$T(t) = -4.4943E - 17 t^4 + 6.727E - 12 t^3 - 3.460E - 07 t^2 + 0.00691 t - 0.0441$
$64800 \leq t \leq 86400$	$T(t) = -1.857E - 17 t^4 + 4.532E - 12 t^3 - 3.725E - 07 t^2 + 0.01066 t + 0.03814$

Tabla 5-4 Funciones de Radiación Solar del Día Cálido.

Horario	Funciones de Radiación Solar
$21600 \leq t < 43200$	$G_{sun}(t) = 1.307E - 19 t^5 - 1.648E - 14 t^4 + 6.675E - 10 t^3 - 8.082E - 06 t^2 - 1.0261E - 09 t$
$43200 \leq t \leq 64800$	$G_{sun}(t) = 5.6926E - 20 t^5 - 8.784E - 15 t^4 + 4.199E - 10 t^3 - 5.809E - 06 t^2 - 4.3465E - 10 t$

## 5.2 Evaluación Térmica

En esta sección se presenta la evaluación térmica para la configuración de un techo convencional y un techo compuesto, los cuales, se llevan a cabo para el día más cálido y más frío del año en estudio. En esta, se muestran las temperaturas superficiales y flujos de calor, al exterior e interior, respectivamente.

### 5.2.1 Techo convencional

En primer lugar, se analiza el desempeño térmico de la configuración del techo convencional (Figura 3.1 (a)) para el día frío y cálido. Las dimensiones del techo son: 1m de ancho x 0.12 m de espesor. En la Figura 5-3 se muestran las temperaturas superficiales promedio obtenidas al exterior e interior de la losa de concreto, durante las 24 horas de modelación. Donde la temperatura máxima de la superficie al exterior fue de 41.7 °C, mientras que la temperatura máxima al interior fue de 33.4 °C para el día frío, las cuales se alcanzaron en los horarios de 13:40 y 15:15 horas, respectivamente. Similarmente para el día cálido, la temperatura máxima superficial al exterior fue de 56.5 °C, a las 13:40 horas, mientras que la temperatura máxima al interior fue de 40.7°C, la cual se presentó a las 15:25 horas.

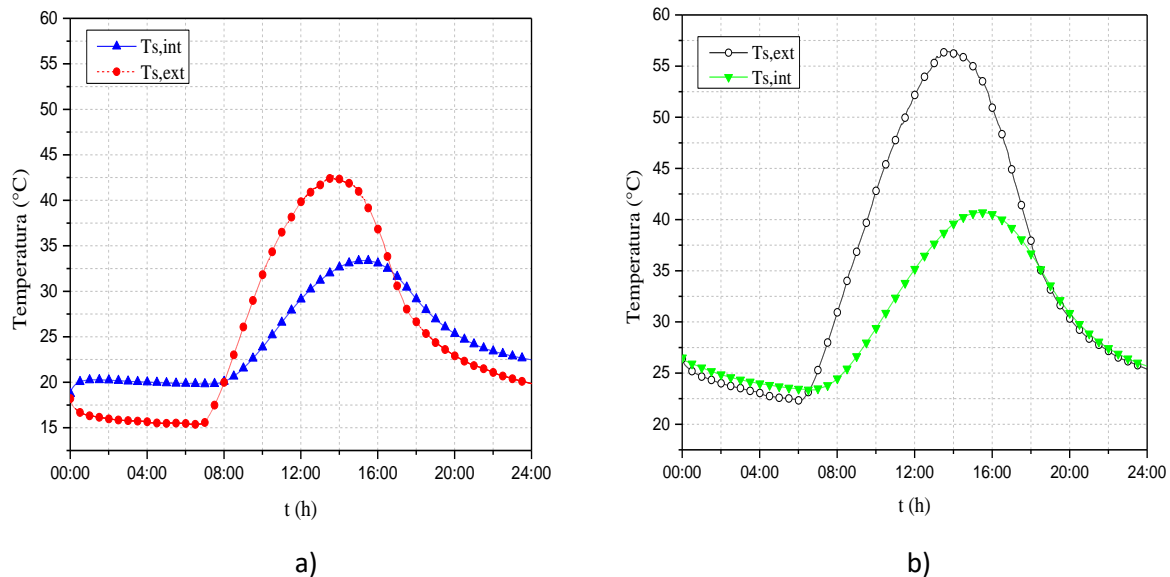


Figura 5-3 Comportamiento de las temperaturas promedio al exterior e interior del techo convencional: a) día frío, b) día cálido.

De igual manera, se realizó los cálculos de los flujos de calor promedios, al exterior e interior de la superficie de la losa de concreto. En la Figura 5-4 se presenta el comportamiento obtenido de estos flujos de calor durante las 24 horas de modelación para ambos días.

El flujo de calor máximo al exterior fue de  $328.7 \text{ W/m}^2$ , y para el interior fue de  $110.1 \text{ W/m}^2$ , los cuales se obtuvieron a las 12:30 y 15:20 horas, respectivamente, para el día frío. Asimismo para el día cálido, el flujo de calor máximo en la superficie exterior fue de  $334 \text{ W/m}^2$ ; mientras que en la superficie interior fue de  $199.5 \text{ W/m}^2$ , los cuales se presentaron durante los horarios de 11:30 y 15:25 horas.

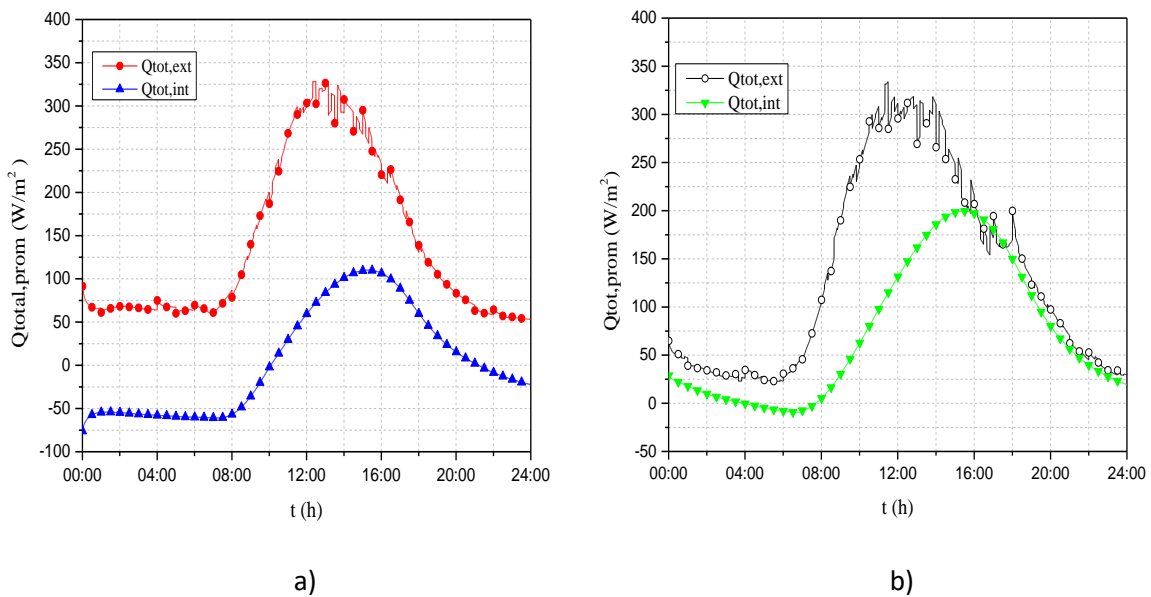


Figura 5-4 Comportamiento del flujo de calor promedio al exterior e interior del techo convencional: a) día frío y b) día cálido.

### 5.2.2 Techo compuesto

El análisis de la transferencia de calor por conducción del sistema de techo compuesto (Losa de concreto con la implementación de un PCM), se llevó a cabo para el día más cálido y el más frío, del año en estudio.

Con la finalidad de obtener el desempeño térmico del sistema de techo compuesto, durante las 24 horas de ambos días, tres tipos de PCM's fueron adheridos a la superficie interior de la losa de concreto (Figura 3.1 (b)). Estos PCM's son: PCM-MG29, N-Eicosano y un Hidrato de Sal ( $\text{NA}_2\text{HPO}_4, 12\text{H}_2\text{O}$ ), en el cual, sus propiedades físicas se mostraron en la tabla 3.3 (Capítulo 3). Asimismo, se variaron los espesores de estos PCM's en 0.5, 1 y 1.5 cm, respectivamente.

La efectividad del sistema de techo compuesto es evaluada comparando la temperatura y el flujo de calor, en la superficie interior del sistema del techo convencional.

#### 5.2.2.1 Efecto del espesor de los diferentes PCM en la losa de concreto.

El primer PCM que se modelo en el presente estudio, fue el PCM-MG29, al cual, se varió su espesor en 0.5, 1 y 1.5 cm, como se mencionó anteriormente. La figura 5-5 muestra la comparación del comportamiento entre las temperaturas superficiales al interior del sistema de techo compuesto, utilizando los diferentes espesores y la temperatura superficial al interior del techo convencional, durante las 24 horas de modelación durante el día frío y cálido.

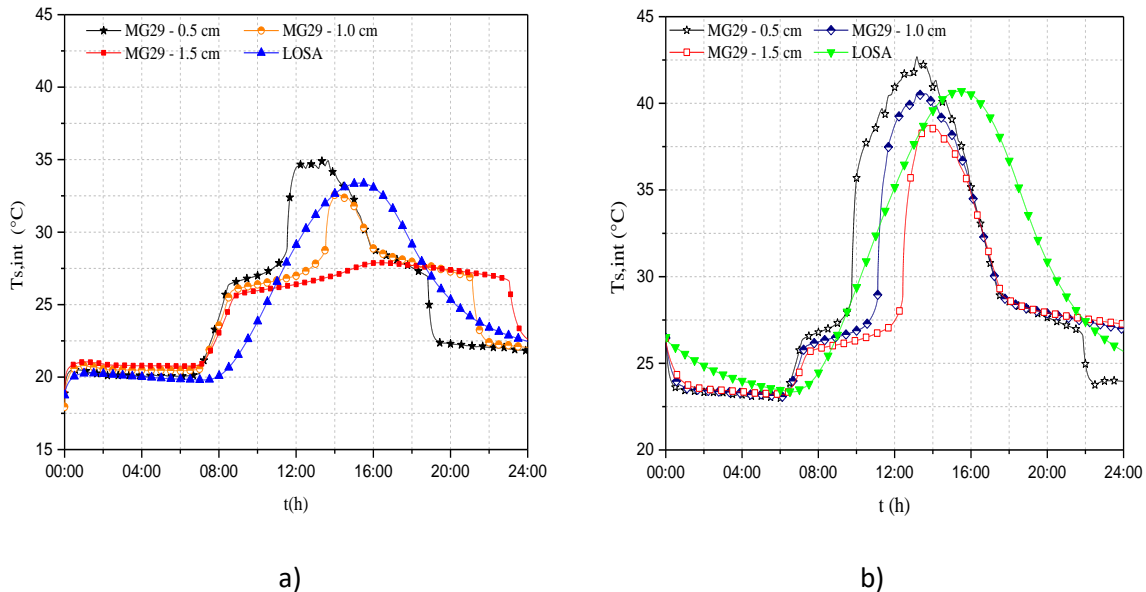


Figura 5-5 Comportamiento de las temperaturas superficiales al interior del techo compuesto (PCM-MG29) a) día frío y b) día cálido.

Para el día frío, las temperaturas máximas superficiales que se obtuvieron al interior del sistema fueron, 34.9, 32.6 y 27.9 °C, para los espesores de 0.5, 1 y 1.5 cm, respectivamente. En la Figura 5-6 (a), se observa que el PCM-MG29 con espesor de 0.5 cm, fue ineficiente en reducir la temperatura en la superficie interior, mientras que con los espesores de 1 y 1.5, se redujo 0.8 y 5.5 °C, en la superficie interior, respectivamente. Por lo tanto, el PCMmg29 con espesor de 1.5 fue el que tuvo mejor comportamiento, teniendo una temperatura de retraso de 3 horas (la temperatura de retraso es la diferencia entre en el tiempo en donde se alcanzó la temperatura máxima en la superficie exterior y el tiempo donde se alcanza la temperatura máxima en la superficie interior)

De igual manera, para el día cálido, las temperaturas máximas superficiales al interior que se obtuvieron en el sistema compuesto, con espesores de 0.5, 1 y 1.5 cm, fueron de 42.6, 40.6 y 38.7 °C, respectivamente. La Figura 5-6 (b) muestra el comportamiento obtenido durante las 24 horas de modelación, en ella se observa que el PCM-MG29 con espesores de 0.5 y 1 cm, no logran reducir la temperatura en la superficie interior, por lo cual, son ineficientes. Sin embargo, el PCM-MG29 con espesor de 1.5 cm, logro reducir la temperatura en 2 °C, respecto a la obtenida en un techo convencional (40.7°C), asimismo se tiene una temperatura de retraso de 36 min.

La Figura 5-12 presenta los flujos de calor obtenidos durante las 24 horas de modelación para el techo de losa con la implementación del PCMmg29 y el techo convencional. Para el día frío, el flujo de calor en el techo convencional, aumenta de 2.3 W/m<sup>2</sup> a las 7:00 horas., hasta alcanzar su máximo de, 110.1 W/m<sup>2</sup> a las 15:20 horas. Como se observa en la figura, durante las horas de trabajo (de 7:00 a 18:00 horas) el PCM-MG29 con espesor de 0.5 cm fue ineficiente para reducir los flujos de calor en la superficie interior, mientras que con espesores de 1 y 1,5, el flujo se redujo en un 7.7 y 59 %, respectivamente, en comparación con el techo convencional.

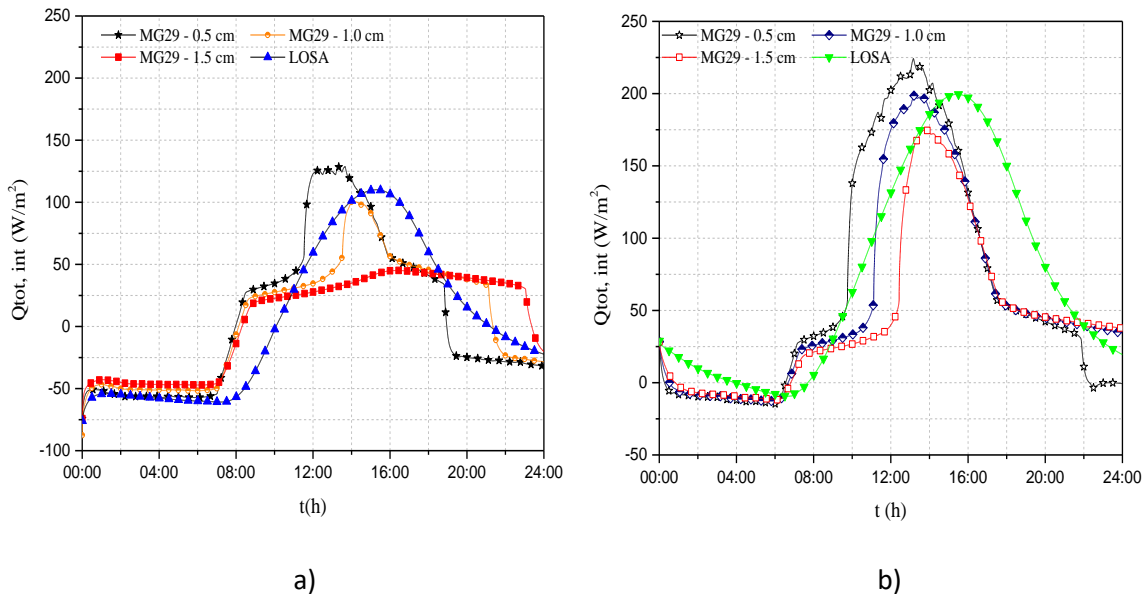


Figura 5-6 Comportamiento de los flujos de calor al interior del techo compuesto (PCMMG29) durante el a) día frío y b) día cálido.

Similarmente, para el día cálido, el flujo de calor en el techo convencional, este aumenta de  $-7.9 \text{ W/m}^2$  a las 6:00 horas, hasta alcanzar su pico,  $199.6 \text{ W/m}^2$  a las 15:25 horas. El PCM-MG29 redujo un 12 % el flujo de calor en la superficie interior con un espesor de 1.5cm, mientras que los otros dos espesores fueron ineficientes para reducir los flujos de calor.

El segundo PCM modelado para el presente estudio fue el N-Eicosano, el cual tiene una temperatura de fusión de  $37 \text{ }^\circ\text{C}$ . De igual manera, se varió su espesor en 0.5, 1 y 1.5 cm, para llevar a cabo el análisis.

La figura 5-13 presenta los resultados obtenidos de las temperaturas superficiales al interior durante las 24 horas de modelación para el día frío y cálido. En la figura 5-7 (a), se observa que el comportamiento de las temperaturas obtenidas para cada espesor del N-Eicosano en el techo compuesto, es similar al comportamiento de la temperatura del techo convencional.

Las temperaturas máximas al interior para el techo compuesto fueron de  $35.3$ ,  $34$  y  $33 \text{ }^\circ\text{C}$ , para los espesores de PCM de 0.5, 1 y 1.5, respectivamente. De esta manera, se determina que los espesores de 0.5 y 1 cm, son ineficientes en la reducción de la temperatura. Sin embargo, el PCM N-Eicosano con espesor de 1.5 logro reducir  $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Sin embargo, para el día cálido, el PCM N-Eicosano con espesor de 1 y 1.5, lograron reducir la temperatura en la superficie interior del sistema compuesto (Figura 5-7 (b)),  $3.7$  y  $3.8 \text{ }^\circ\text{C}$ , respectivamente, mientras que el N-Eicosano con espesor de 0.5 cm tuvo un comportamiento similar al del techo convencional, lo que ocasiono que no lograra reducir la temperatura al interior. Las temperaturas de retraso con espesor de 1 y 1.5 cm, son de 105 y 106 minutos, respectivamente.



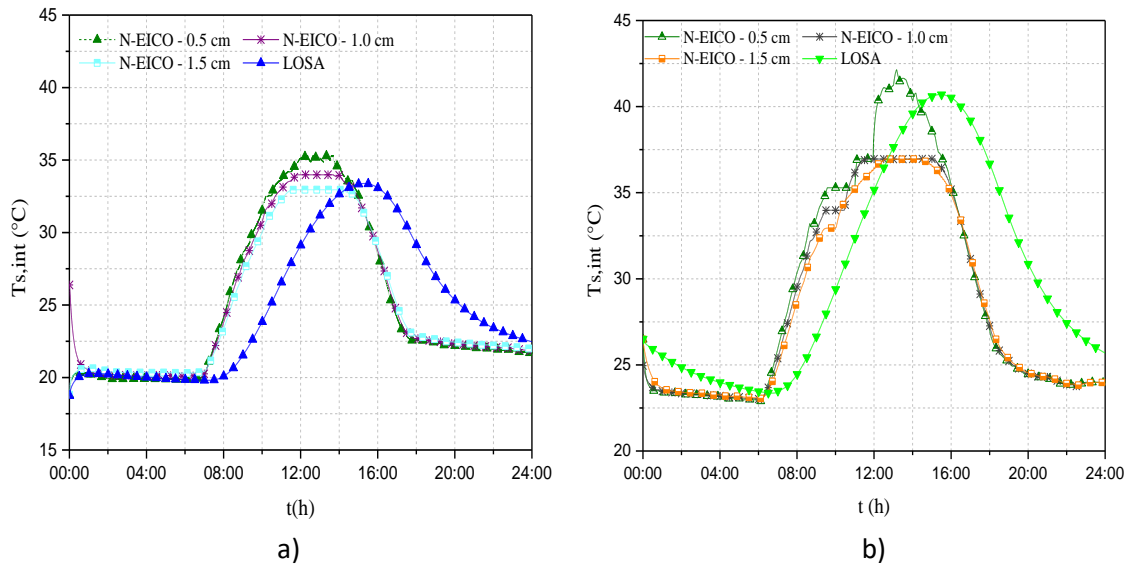


Figura 5-7 Comportamiento de las temperaturas superficiales al interior del techo compuesto (N-EICOSANO) durante a) día frío y b) día cálido.

Para el día frío, el PCM N-Eicosano con espesores de 0.5 y 1 cm, no logran reducir el flujo de calor en la superficie interior, lo que provoca que estas configuraciones sean ineficientes. El flujo de calor con un espesor de 1.5 cm, se reduce en un 5 % en horas de trabajo (6:00 - 18:00 horas) en comparación con el techo convencional (figura 5-8 (a)).

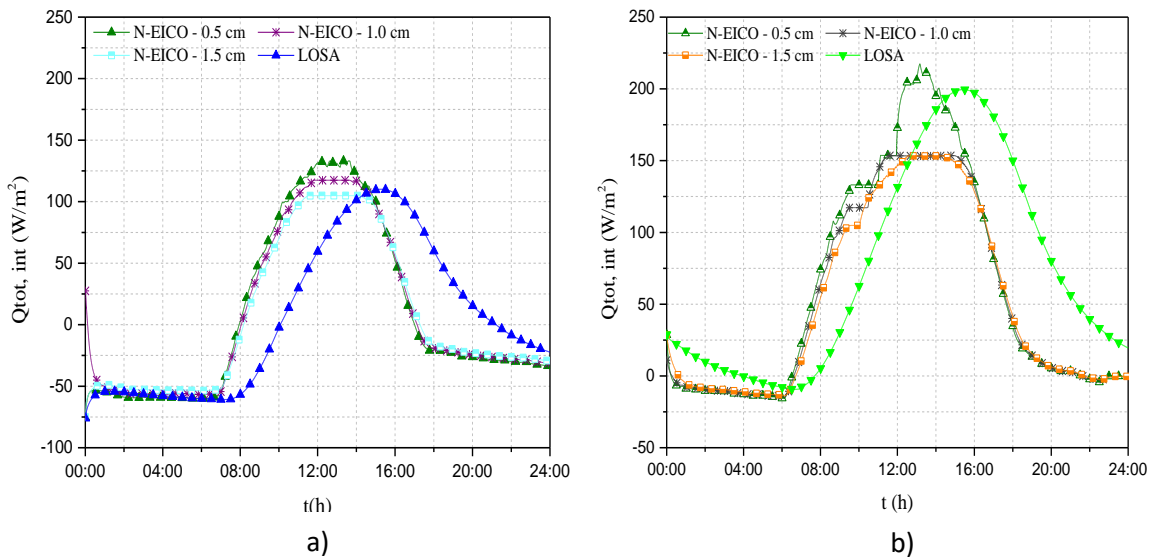


Figura 5-8 Comportamiento de los flujos de calor al interior del techo compuesto (N-EICOSANO) durante a) día frío y b) día cálido.

Para el día cálido, en la Figura 5-8 (b) se observa que utilizando la configuración del PCM N-Eicosano con espesores de 1 y 1.5 cm, se logra reducir los flujos de calor en la superficie interior del sistema, en 23.0 y 23.1 %, respectivamente, en comparación con el techo convencional.

De manera similar, se realizó el análisis para el modelado de un tercer PCM, el cual es un hidrato de sal (formula), este, tiene una temperatura de fusión de 35 °C. En la figura 5-9 se muestra el comportamiento obtenido para este PCM. Se observa que para los tres espesores modelados, la temperatura es similar a la temperatura obtenida a la del techo convencional, para el día frío y cálido.

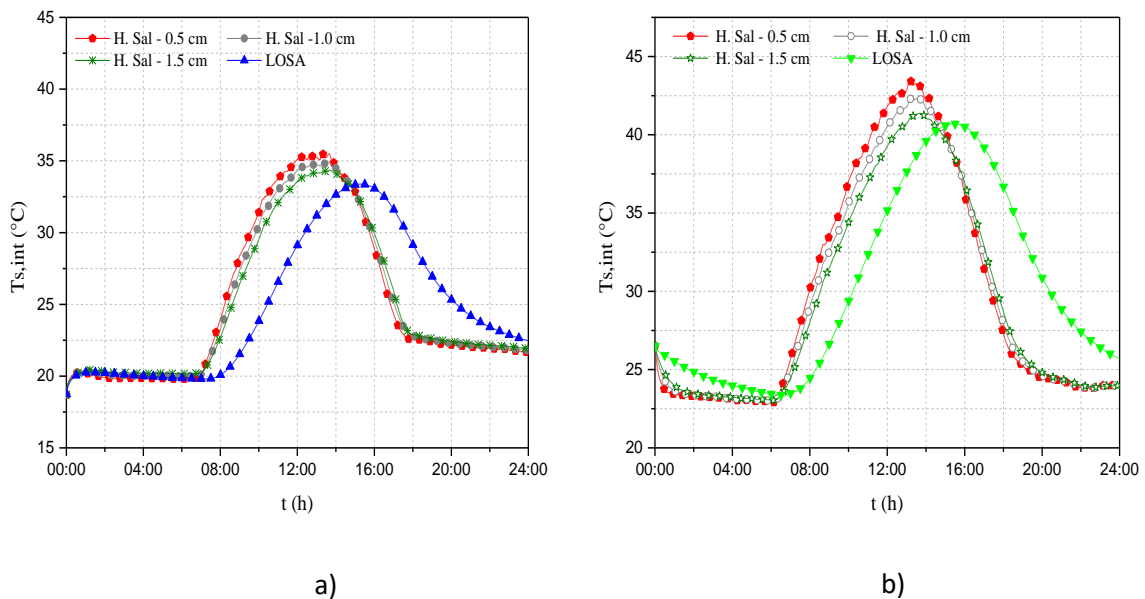


Figura 5-9 Comportamiento de las temperaturas superficiales al interior del techo compuesto (Hidrato de sal) durante a) día frío y b) día cálido.

Para el día frío, las temperaturas máximas que se alcanzaron en la superficie interior del techo compuesto fueron de 35.5, 34.9 y 34.4 °C, para los espesores de PCM de 0.5, 1 y 1.5, respectivamente. Estas temperaturas son mayores que la obtenida con el techo convencional, lo que provocaría un desconfort térmico al interior de la edificación. En el día cálido, las temperaturas máximas superficiales obtenidas para los espesores de 0.5, 1 y 1.5 cm fueron de 43.5, 42.1 y 41.3 °C, respectivamente.

Asimismo, para el día cálido en la Figura 5-9 (b) se observa que a partir de las 10:13 a.m. el hidrato de sal alcanza su punto de fusión. A partir de este punto el hidrato empieza almacenar energía como calor latente, durante un intervalo de 20 minutos; y luego el sistema solo almacena energía como calor sensible hasta las 16:13 horas, horario en que la temperatura viene descendiendo a su mínimo valor. Por lo tanto, el hidrato de sal no logra reducir la temperatura en la superficie interior del sistema.

En la Figura 5-10 se muestran los flujos de calor en la superficie interior del sistema compuesto, se observa que con ninguno de los tres espesores del hidrato de sal, se logró reducir los flujos de calor, haciendo de este PCM ineficiente para el día frío.

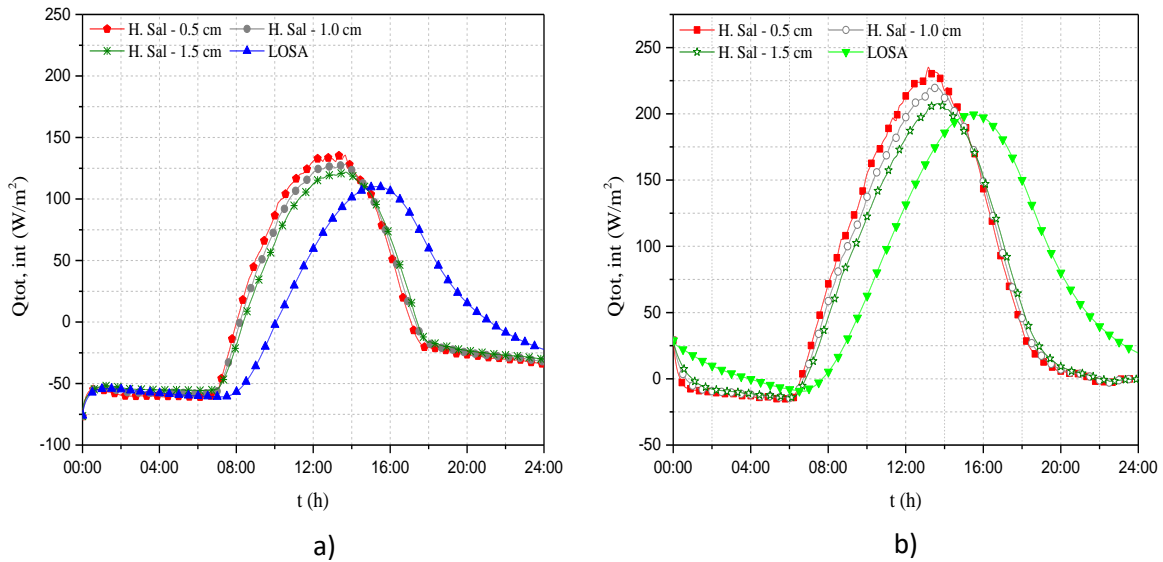


Figura 5-10 Comportamiento de los flujos de calor al interior del techo compuesto (Hidrato de Sal) durante a) día frío y b) día cálido.

En resumen, en la Figura 5-11 se muestran las curvas de temperatura superficiales obtenidas al interior del sistema de techo compuesto para los tres PCM's modelados con espesor de 0.5 cm, durante el día frío y cálido. Las temperaturas máximas que se obtuvieron para el PCM-MG29, N-Eicosano y el hidrato de sal fueron de 34.9, 35.3 y 35.5 °C, respectivamente. La temperatura máxima en la superficie interior del techo convencional es de 33.4 °C.

El PCM-MG29 alcanza su punto de fusión a las 10:00 horas y a las 11:30 horas sucede su cambio de fase; el N-Eicosano no logro alcanzar su punto de fusión, por lo cual, se mantuvo en su fase solida durante todo el proceso. El hidrato de sal logro alcanzar su punto de fusión a las 12:00 horas, sin embargo su punto de fusión está por encima de la temperatura en la superficie interior del techo convencional.

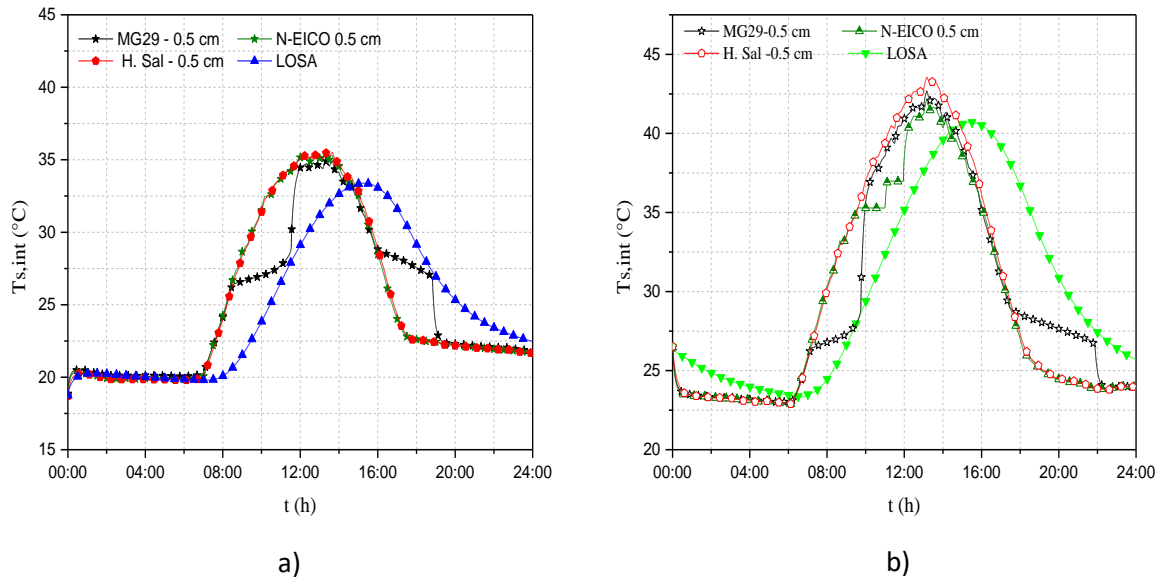


Figura 5-11 Comportamiento de la temperatura en la superficie interior de 3 PCM's diferentes con un espesor de 0.5 cm, durante a) día frío y b) día cálido.

Esta configuración del techo compuesto con PCM's de espesor de 0.5 cm, son ineficientes a la hora de reducir la temperatura en la superficie interior del sistema, esto podría llegar a provocar un discomfort térmico al interior de la habitación.

Para el día cálido, se observa en la Figura 5-11 (b) que el comportamiento de las curvas de temperaturas de los tres diferentes PCM's con 0.5 cm de espesor, es similar a la curva de temperatura obtenida con el techo convencional, tal como se observa en la Figura 5-29. Por lo tanto, esta configuración con 0.5 cm de espesor, es ineficiente para reducir la temperatura en la superficie interior. Las temperaturas máximas superficiales fueron de 42.6, 42.2 y 43.6

°C, para el PCM-MG29, N-Eicosano y el Hidrato de sal, respectivamente. Asimismo, la temperatura máxima en la superficie interior del techo convencional es de 41.7 °C.

Para la comparación de los resultados obtenidos de los 3 diferentes PCM's analizados con espesor de 1 cm, para ambos días. En la Figura 5-12 se presentan las temperaturas superficiales al interior del sistema compuesto. Como se observa en la Figura 5-12 (a), la configuración del techo compuesto con el N-Eicosano y el hidrato de sal, tienen un comportamiento similar al techo convencional. Mientras que el PCM-MG29 redujo 0.8 °C, respecto a la temperatura máxima obtenida del techo convencional, el cual es de 33.4 °C.

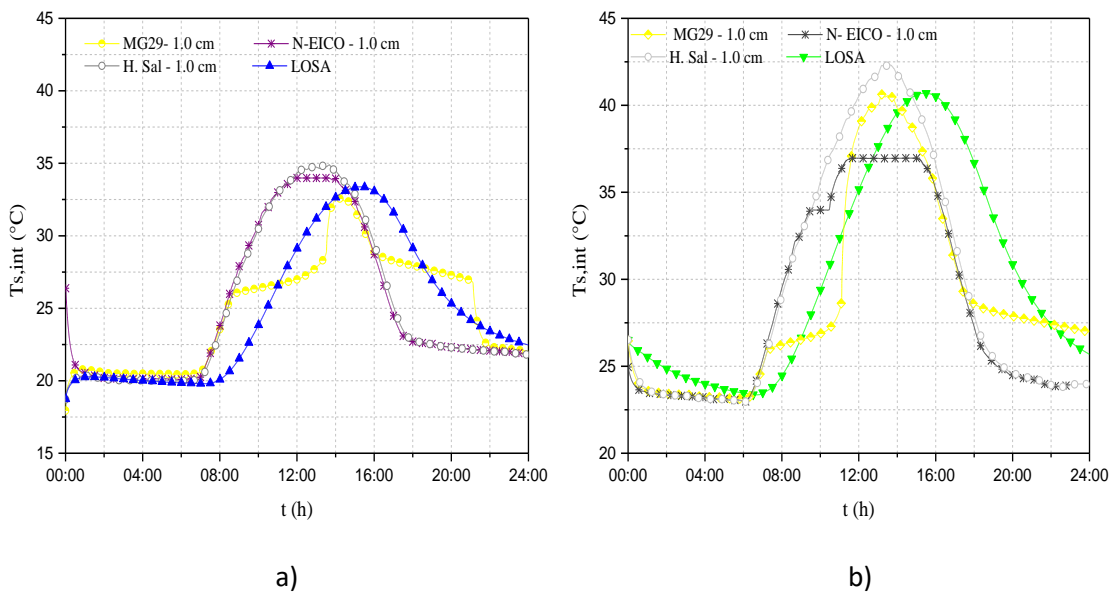


Figura 5-12 Comportamiento de la temperatura de 3 PCM's diferentes con un espesor de 1.0 cm, durante a) día frío y b) día cálido.

El PCMMg29 alcanzó su punto de fusión a las 10:00 horas y almacena energía como calor latente durante 90 min, pasado este tiempo sucede el cambio de fase (fase líquida), el cual se mantiene hasta las 16:00 horas, esto debido a que la radiación solar y la temperatura ambiente empiezan a decrecer.

Por otro lado, para el día cálido, en la Figura 5-12 (b) se observa que el PCM N-Eicosano logra reducir la temperatura en la superficie interior en 3.7 °C, respecto a la temperatura máxima del techo convencional. Este PCM, no logró su cambio de fase durante el proceso de modelación, se mantuvo en su fase sólida; mientras que los otros dos PCM's no redujeron la temperatura en la superficie interior. Las temperaturas máximas superficiales que se alcanzaron fueron 40.6, 36.9 y 42.1 °C, para el PCM-MG29, N-Eicosano y el Hidrato de Sal,

respectivamente. La temperatura máxima en la superficie interior del techo convencional es de 41.7 °C.

Finalmente, en la figura 5-13, se muestra la temperatura en la superficie interior del sistema compuesto, para ambos días de modelación. Las temperaturas máximas superficiales el PCM-MG29, N-Eicosano y el hidrato de sal fueron 27.9, 33 y 34.3 °C, respectivamente. Mientras que el techo convencional alcanza una temperatura máxima en la superficie interior de 33.4 °C.

El PCM-MG29 redujo 5.5 °C la temperatura en la superficie interior, respecto a la temperatura del techo convencional. Este PCM logra su punto de fusión a partir de las 14:00 horas y se mantiene en su fase de mezcla hasta las 22:00 horas. Asimismo, se obtuvo una temperatura de retraso de 3 horas.

De igual manera, el PCM N-Eicosano logra reducir 0.5 °C la temperatura en la superficie interior, respecto a la temperatura obtenida en el techo convencional. Este PCM, se mantuvo en su fase sólida durante todo el proceso de modelación. Sin embargo, el hidrato de sal resultó ineficiente para reducir la temperatura en la superficie interior.

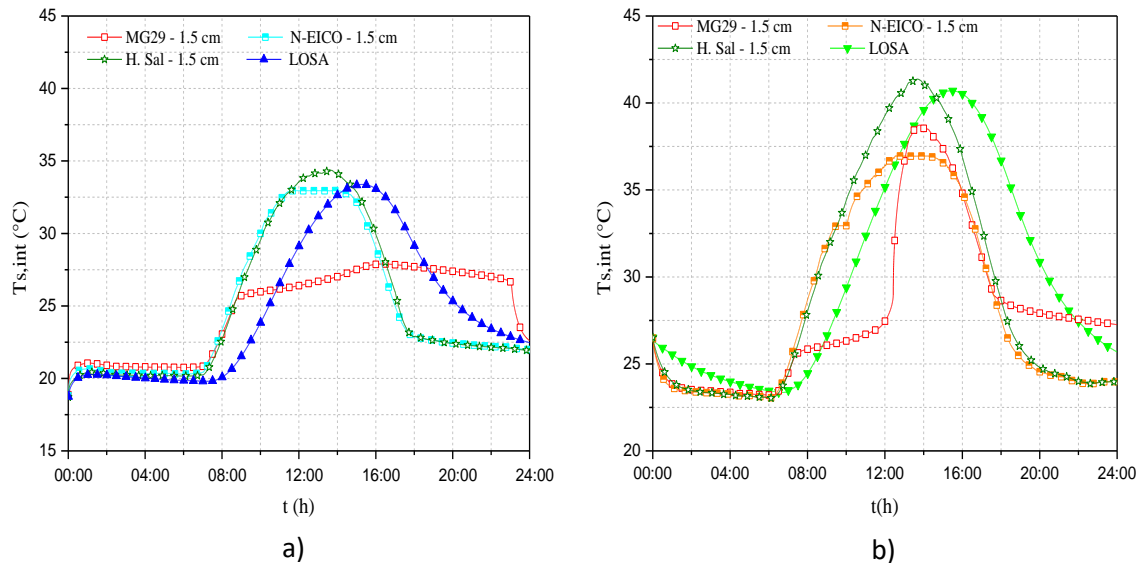


Figura 5-13 Comportamiento de la temperatura de 3 PCM's diferentes con un espesor de 1.5 cm, durante a) día frío y b) día cálido.

Por último, para el día cálido, en la Figura 5-13 (b) se observa que los tres diferentes PCM's con un espesor de 1.5 cm. La temperatura máxima para el PCM-MG29, N-Eicosano y el hidrato de sal, de 38.7, 36.9 y 41.4 °C, respectivamente. En donde, el Hidrato de sal tuvo un comportamiento similar al techo convencional. Mientras que el PCM-MG29 y el N-

Eicosano, redujeron la temperatura en 2.5 y 3.7 °C, respecto a la temperatura máxima del techo convencional, respectivamente.

### 5.3 Integración numérica para el flujo de calor de la superficie interior

Con el objetivo de conocer las cargas térmicas al interior de la edificación para el clima modelado en el presente estudio, se realizó una integración numérica. Esta integración, fue mediante el método trapezoidal compuesto (Ec. 5.1)

$$\int_{t=1}^{t=n} q_{tot,int}(t)dt = \frac{\Delta t}{2} \left[ q_{tot,int}(1) + \sum_{t=2}^{t=n-1} 2 * q_{tot,int}(t) + q_{tot,int}(n) \right] \quad (5.1)$$

En la Tabla 5-5 se muestran los flujos de calor obtenidos en la superficie interior para la configuración del techo convencional y el techo compuesto, durante las horas de trabajo del día frío, las cuales corresponden a partir de las 7:00 a 18:00 horas. En esta tabla, se presentan los valores obtenidos durante cada hora para cada configuración que se utilizó en el presente estudio. Asimismo se presentan los valores de flujo obtenidos al realizar la integración, durante el periodo señalado como las horas de trabajo.

Para el día frío, se observa que el flujo de calor total durante las horas de trabajo es de 485.4 W-h/m<sup>2</sup>, para la configuración del techo convencional. Respecto al uso del PCM-MG29 el flujo de calor total, es de 669.3, 449 y 276.7 W-h/m<sup>2</sup>, con espesor de 0.5, 1.0 y 1.5 cm, respectivamente. De esta manera, con espesores de 0.5 y 1.0 cm del PCM-MG29, se reduce en un 7.5 y 43 %, respectivamente, el flujo de calor total en la superficie interior respecto al flujo de calor del techo convencional, esto es debido a que la energía que proviene del exterior es retenida por el PCM como energía de calor latente; mientras que con espesor de 0.5 cm, el flujo de calor aumento en un 38%.

Tabla 5-5 Flujos de Calor Totales para el día frío.

DIA FRIO											
t(h) \ Δesp.	TC	TC + MG29 (W/m <sup>2</sup> )			TC + N-Eicosano (W/m <sup>2</sup> )			TC + Hidrato de Sal (W/m <sup>2</sup> )			
		0.5 cm	1.0 cm	1.5 cm	0.5 cm	1.0 cm	1.5 cm	0.5 cm	1.0 cm	1.5 cm	
7	-60.73	-54.37	-49.82	-45.94	-57.02	-54.34	-51.88	-58.22	-56.35	-54.44	
8	-56.83	1.52	-6.64	-13.89	2.85	-2.97	-9.38	-0.49	-10.52	-18.85	
9	-36.08	30.23	24.30	19.58	54.00	45.12	36.51	50.86	39.00	27.73	
10	-2.48	34.60	27.59	22.70	87.78	78.66	69.85	86.37	75.43	64.29	
11	29.49	43.09	30.70	25.01	113.67	105.31	96.90	114.18	104.74	94.62	
12	59.52	122.96	34.56	27.71	131.53	117.35	104.93	130.87	121.54	112.29	
13	83.82	124.90	44.15	31.07	131.03	117.36	104.94	132.70	126.38	119.64	
14	101.22	119.03	100.34	34.80	124.43	116.90	104.96	127.14	123.55	119.09	
15	109.55	96.45	91.24	40.62	100.35	98.06	95.43	103.85	104.17	103.90	
16	106.58	56.06	56.61	44.81	51.92	54.96	58.04	56.54	63.35	69.15	
17	89.13	49.04	49.51	44.54	0.38	5.62	11.54	3.79	13.20	22.81	
18	60.08	41.22	45.74	42.88	-20.21	-18.91	-16.31	-20.54	-17.31	-16.62	
$\int_t^{t+\Delta t} q_{int}$	485.40 (W-h/m <sup>2</sup> )	669.30 (W-h/m <sup>2</sup> )	449.0 (W-h/m <sup>2</sup> )	276.70 (W-h/m <sup>2</sup> )	758.0 (W-h/m <sup>2</sup> )	699.0 (W-h/m <sup>2</sup> )	641.80 (W-h/m <sup>2</sup> )	765.90 (W-h/m <sup>2</sup> )	724.80 (W-h/m <sup>2</sup> )	678.50 (W-h/m <sup>2</sup> )	

El flujo de calor total con el PCM N-Eicosano con espesores de 0.5, 1.0 y 1.5 cm, es de 758, 699, y 641.8 W-h/m<sup>2</sup>, respectivamente. Por lo tanto, el N-Eicosano aumento el flujo de calor al interior en 56.1, 44 y 40 %, con respecto al techo convencional. Asimismo, el flujo de calor obtenido al utilizar el PCM Hidrato de sal, de 765.9, 724.8 y 678.5 W-h/m<sup>2</sup>, con espesores de 0.5, 1.0 y 1.5 cm, los cuales son mayores al obtenido con el techo convencional.

Similarmente para el día cálido, en la Tabla 5-6 se muestra el flujo de calor total en la superficie interior para la configuración del techo convencional y el techo compuesto, durante las horas de trabajo para el día cálido, el cual corresponde en el horario de las 6:00 a las 18:00 horas.

Para este día, la configuración del techo convencional obtuvo un flujo de calor total durante las horas de trabajo de 1316 W-h/m<sup>2</sup>. El PCM-MG29 con espesores de 0.5, 1.0 y 1.5 cm, se obtuvieron flujos de calor de 1418.1, 1132.7 y 867.4 W-h/m<sup>2</sup>, respectivamente. Se observa que el flujo calor total en la superficie interior se redujo en un 14 y 35 % con espesores de 1.0 y 1.5 cm del PCM-MG29, respecto al flujo de calor en el techo convencional.

Con el uso del PCM N-Eicosano se obtuvieron flujos de calor de 1475, 1291.1 y 1239.8 W-h/m<sup>2</sup> durante las horas de trabajo, para espesores de 0.5, 1.0 y 1.5 cm, respectivamente; en donde con un espesor de 0.5 cm el flujo de calor total aumento en un 12 %, mientras que con los espesores de 1.0 y .15 cm, el flujo de calor se redujo en un 3 y 6 %.

Por último, se tiene el PCM Hidrato de sal, el cual obtuvo flujos de calor de 1642.9, 1555.9 y 1470.9 W-h/m<sup>2</sup>, con espesores de 0.5, 1.0 y 1.5 cm, respectivamente. Se observa que con cada configuración de este PCM el flujo de calor total aumenta, respecto al flujo de calor del techo convencional.



Tabla 5-6 Flujos de Calor Totales para el día cálido.

DÍA CÁLIDO												
t(h) \ Δesp.	TC	TC + MG29 (W/m <sup>2</sup> )				TC + N-Eiosano (W/m <sup>2</sup> )				TC + Hidrato de Sal (W/m <sup>2</sup> )		
	-	0.5 cm	1.0 cm	1.5 cm		0.5 cm	1.0 cm	1.5 cm		0.5 cm	1.0 cm	1.5 cm
6	-7.92	-14.62	-12.91	-11.52		-15.46	-14.36	-13.37		-15.58	-14.59	-13.69
7	-8.67	20.00	11.53	5.38		22.33	15.83	10.25		19.14	10.95	5.18
8	5.14	32.18	25.79	21.26		74.27	64.28	54.53		71.46	58.55	46.63
9	30.43	38.36	29.21	23.90		111.83	102.01	92.21		111.50	99.95	87.53
10	62.38	137.67	33.28	26.72		133.09	117.27	104.93		154.65	137.14	122.36
11	97.63	173.16	48.90	31.14		133.05	143.50	132.05		182.99	168.55	153.83
12	131.31	202.32	175.23	39.97		172.29	153.39	146.91		213.39	197.37	181.83
13	161.57	213.16	191.49	149.72		206.02	153.32	153.28		225.80	213.02	199.84
14	185.63	202.44	188.73	172.86		195.16	153.39	153.28		217.19	212.04	204.18
15	198.18	179.43	168.43	158.48		173.17	153.48	148.59		192.31	190.24	187.08
16	197.28	131.71	129.63	127.38		135.16	131.97	128.55		143.59	149.12	152.74
17	180.85	131.71	129.63	127.38		81.64	83.62	86.36		86.94	95.06	104.06
18	150.04	52.86	53.11	53.81		34.99	37.85	41.71		38.51	45.92	54.51
$\int_t^{t+\Delta t} q_{int}$	1316.00 (W-h/m <sup>2</sup> )	1418.10 (W-h/m <sup>2</sup> )	1132.70 (W-h/m <sup>2</sup> )	867.40 (W-h/m <sup>2</sup> )		1475.00 (W-h/m <sup>2</sup> )	1291.10 (W-h/m <sup>2</sup> )	1239.80 (W-h/m <sup>2</sup> )		1642.90 (W-h/m <sup>2</sup> )	1555.90 (W-h/m <sup>2</sup> )	1470.90 (W-h/m <sup>2</sup> )

# CAPÍTULO 6

## CONCLUSIONES

En el presente capítulo se presentan las conclusiones sobre el análisis de la transferencia de calor en techos planos con la implementación de un material de cambio de fase (PCM), bajo condiciones climáticas de Mérida, Yucatán. Asimismo, se realizan recomendaciones para trabajos futuros.

En la presente tesis se realizó un estudio numérico para evaluar el desempeño térmico del techo de una edificación con la implementación de un PCM. Para llevar a cabo el análisis, el sistema fue sometido a condiciones de un clima cálido, para el cual se eligió a la ciudad de Mérida, Yucatán, como representativo de este clima. De esta manera, se seleccionó el día más frío y el más cálido del año, estos fueron seleccionados respecto a la temperatura máximas y mínimas.

En primer lugar, se llevó a cabo el análisis de la transferencia de calor para un techo convencional, el cual tiene un espesor de 12 cm. En donde, para el día frío se obtuvo una temperatura máxima de 41.7 y 33.4 °C, al exterior e interior de la superficie, respectivamente. Mientras que para el día cálido la temperatura máxima al exterior e interior, es de 56.5 y 40.7 °C.

Con base a las temperaturas obtenidas al interior del techo convencional, se seleccionaron tres diferentes PCM's: PCM-MG29, N-Eicosano y el Hidrato de sal, los cuales se utilizaron para el sistema de techo compuesto. Asimismo, se varió los espesores de cada PCM, en 0.5, 1.0 y 1.5 cm.

Por lo tanto, con base a los resultados obtenidos en esta tesis, se concluye lo siguiente:

- La configuración del techo de losa de concreto con la implementación del PCM-MG29, es la que mejor comportamiento térmico obtuvo para ambos días de modelación. Para el día frío, con espesores de 1.0 y 1.5 cm, se redujo la temperatura en 0.8 y 5.5 °C, respectivamente, con respecto a la temperatura máxima al interior del techo convencional. De igual manera, estos espesores contribuyeron a la reducción de los flujos de calor total en la superficie interior en 7.5 y 43 %, respecto al flujo de calor obtenido en el techo convencional durante las horas de radiación solar. Similarmente para el día cálido, el PCM-MG29 con 1.5 cm de espesor redujo la temperatura al interior en 2°C. Mientras que el flujo de calor total en la superficie interior se redujo en un 14 y 35 % con espesores de 1.0 y 1.5 cm del PCM-MG29, respecto al flujo de calor en el techo convencional.

- La configuración del techo de losa de concreto con la implementación del PCM N-Eicosano, mostró un mejor comportamiento térmico para el día cálido. Para este día el N-Eicosano logró una reducción en la temperatura de 3.7 y 3.8 °C, con espesores de 1.0 y 1.5 cm. El flujo de calor total se redujo en un 3 y 6%, con respecto al flujo de calor en el techo convencional.
- El uso del PCM de Hidrato de sal fue ineficiente al reducir el flujo de calor y temperaturas en la superficie interior del sistema para ambos días de modelación.
- Se observó que el espesor del PCM juega un papel importante para reducir los flujos de calor al interior de la edificación. Y de igual forma que la entalpía y temperatura de fusión son dos criterios importantes para seleccionar un PCM.

### 6.1 Recomendaciones para trabajos futuros.

Con la finalidad de ampliar el conocimiento en este tema y dar continuidad al presente trabajo de investigación, a continuación se mencionan las siguientes recomendaciones para trabajos futuros:

- Realizar la modelación numérica bajo condiciones climatológicas de otros estados de la República Mexicana.
- Realizar estudios experimentales con el propósito de validar los resultados obtenidos del estudio numérico.
- Seleccionar otros materiales de cambio fase (PCM) para evaluar el desempeño térmico de un techo compuesto.
- Realizar un estudio numérico acoplado dos o más materiales de cambio de fase al techo de losa de concreto.
- Implementar el PCM en diferentes configuraciones de techo por ejemplo, techo de vigueta y bovedilla, techo compuesto con aislamiento, techo ventilado, etc.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al Saadi S., Zhai Z., “Systematic evaluation of mathematical methods and numerical schemes for modeling PCM-enhanced building enclosure” *Energy and Buildings*, Vol. 92, Págs. 373-388, (2015).

Alawadhi Esam, “Thermal analysis of building brick containing phase change material”, *Energy and Buildings*, Vol. 40, Págs. 351-357, (2008).

Alawadhi M., Alqallaf J., “Building roof with conical holes containing PCM to reduce the cooling load: Numerical study”, *Energy conversion and Management*, Vol.52, Págs 2952-2964, (2011).

Alqallaf H., Alawadhi E., “Concrete roof with cylindrical holes containing PCM to reduce the heat gain”, *Energy and Building*, Vol.61, Págs. 73-80, (2013).

Azematia A., Hadavandc B. S., Hosseinib H., Tajarrodd A. S. “Thermal modeling of mineral insulator in paints for energy saving”, *Energy and Buildings*, Vol.56, Págs. 109-114, (2013).

Bozonnet E., Doya M., Allard F., “Cool roofs impacts on building thermal response: A French case study”, *Energy and Buildings*, Vol. 43, Págs 3006-3012, (2011).

Cheng Z., Shuli L., Ashish S., “Adaptability research on phase change materials based technologies in China”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 73, Págs. 145-158, (2017).

Chung H. M., Park C. J., “Development of PCM cool roof system to control urban heat island considering temperate climatic conditions”, *Energy and Buildings*, Vol. 116, Págs. 341-348, (2016).

Dincer I., Rosen M. A., *Thermal Energy Storage Systems and Applications*, Ed. Wiley, (2002).

Dong L., Yumeng Z., Changyu L., Gouzhong W., Numerical analysis on thermal performance of roof contained PCM of a single residential building. *Energy conversion and Management*. Vol. 100 Págs. 147-156, (2015)

Dos Santos H., Mendes N., “Numerical analysis of passive cooling using a porous sandy roof”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 51, Págs. 25-31, (2013).

Hale D. V., Hoover M. J., O'Neill M. J., *PHASE CHANGE MATERIALS HANDBOOK*, NASA Contractor Report NASA CR- 61363, NASA Marshall Space Flight Centre, Alabama (1971).

Kharsen M., Al-Khawaja M., “Retrofitting measures for reducing buildings cooling requirements in cooling-dominated environment: Residential house”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 98, Págs. 352-356, (2016).

Kibria B., Timothy O., Jedediah B., Ohjin W., “ Simulating the effects of cool roof and PCM( phase change materials) based roof in mitigate UHI(urban heat island) in prominent US cities”, *Energy*, Vol. 96, Págs. 103-117, (2016).

Kong X., Lu S., Li Y., Huang., Liu S., “Numerical study on the thermal performance of building wall and roof incorporating phase change material panel for passive cooling application”, *Energy and Buildings*, Vol.81, Págs. 404-415, (2014).

Kosny J., Biswas K., Miller W., Kriner S., “Field thermal performance of naturally ventilated solar roof whit PCM heat skin”. *Solar energy*, Vol. 86, Págs. 2504-2514, (2012).

Kosny J., *PCM-Enhanced building components*, Ed. Springer, (2015).

Lee K., Medina M., Sun X. On the use of plug-and-play walls (PPW) for evaluating thermal enhancement technologies for building enclosures: Evaluation of a thin phase change material (PCM) layer. *Energy and Buildings*, Vol. 86, Págs. 86-92, (2015).

Lei J., Kumarasamy K., Zingre T., Yang J., Wand M.P., Yang E., “Cool colored coating and phase change materials as complementary cooling strategies for building cooling load reduction in tropics”, *Applied Energy*, Vol.190, Págs. 57-63, (2016).

Liu C., Zhou Y., Dong L., Meng F., Zheng Y., Liu X., “ Numerical analysis on thermal performance of a PCM-filled double glazing roof “ *Energy and Buildings*, Vol. 125, Págs. 267-275, (2016).

Lu S., Chen Y., Liu S., Kong X., “Experimental research on a novel energy efficiency roof coupled with PCM and cool materials”, *Energy and Buildings*, Vol. 127, Págs. 159-169, (2016).

Marin P., Saffari M., Gracia A., Zhu X., Farid M., Cabeza L., Ushak S., “Energy savings due to the use of PCM for relocatable lightweight buildings passive heating and cooling in different weather conditions”, *Energy and Buildings*, Vol. 129, Págs. 274-283, (2016).

Mehling H., Cabeza L. F., *Heat and Cold storage with PCM*, Ed. Springer, (2008).

Muriel I., Shuli L., Ashish S. “A review on the air-PCM-TES application for free cooling and heating in the buildings “, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 61, Págs. 175-186, (2016).

Necati Ozisik M., Heat Transfer A Basic Approach, Ed. Mc-Graw-Hill Book, (1985).

Pasupathy A., Verla J., “Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management”, Energy and Building, Vol 40, Págs. 193-203, (2008).

Payne UJ Chang KC. Analytical solution for heat conduction in two material layer slab with linearly temperature dependent conductivity. Heat Transfer, Vol. 113, Págs.237-239, (1991).

Suhas V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Ed. Mc Graw Hill (1980).

Xaman J., Gijón M., Dinámica de Fluidos Computacionales para Ingenieros, Ed. Palibrio. (2016)

Yongcai Li, “Thermal performance analysis of a PCM combined solar chimney system for natural ventilation and heating/ cooling Thermal Performance Analysis of a PCM combined solar Chimney System for Natural Ventilation and Heating/ Cooling”, PHD *thesis*, (2014).

Tabla 7-1 Datos climatológicos (radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento), para el día frío.

23/Enero/2014 (Día frío)											
Hora min	$T_{amb}$ °C	$G_{solar}$ $W/m^2$	$Vel_{aire}$ m/s	Hora min	$T_{amb}$ °C	$G_{solar}$ $W/m^2$	$Vel_{aire}$ m/s	Hora min	$T_{amb}$ °C	$G_{solar}$ $W/m^2$	$Vel_{aire}$ m/s
00:00	17.6	0	3.5	04:00	16.3	0	2.4	08:00	19.1	284	3.3
00:10	17.4	0	3.1	04:10	16.3	0	2.6	08:10	19.5	323	3.0
00:20	17.3	0	3	04:20	16.4	0	2.8	08:20	20.0	363	3.0
00:30	17.4	0	3.2	04:30	16.3	0	2.6	08:30	20.6	403	3.2
00:40	17.3	0	3.5	04:40	16.1	0	2.1	08:40	20.8	440	3.9
00:50	17.2	0	3.6	04:50	16.2	0	2.2	08:50	21.3	476	3.3
01:00	17.1	0	3.3	05:00	16.2	0	2.8	09:00	21.8	512	4.1
01:10	16.8	0	2.5	05:10	16.3	0	2.2	09:10	22.3	546	4.5
01:20	16.8	0	3.5	05:20	16.2	0	2.2	09:20	22.9	574	4.1
01:30	16.5	0	3	05:30	16.2	0	2.7	09:30	23.5	605	4.4
01:40	16.4	0	2.7	05:40	16.1	0	2.4	09:40	23.8	637	4.4
01:50	16.4	0	2.4	05:50	16.2	0	2.7	09:50	24.2	659	4.2
02:00	16.3	0	2.5	06:00	16.4	0	2.7	10:00	24.8	686	3.4
02:10	16.3	0	2.5	06:10	16.4	0	2.8	10:10	25.0	708	4.1
02:20	16.3	0	2.7	06:20	16.3	0	2.8	10:20	24.8	731	4.5
02:30	16.3	0	2.9	06:30	16.2	0	2.6	10:30	25.5	746	3.8
02:40	16.2	0	2.8	06:40	16.3	4	2.9	10:40	25.5	767	4.0
02:50	16.2	0	3.2	06:50	16.4	17	2.8	10:50	25.8	783	4.1
03:00	16.3	0	2.6	07:00	16.7	50	2.2	11:00	26.1	794	3.5
03:10	16.3	0	2.7	07:10	17	76	2.5	11:10	26.3	803	3.5
03:20	16.2	0	2.1	07:20	17.5	112	2.6	11:20	26.6	810	3.7
03:30	16.4	0	2.6	07:30	17.9	156	3.1	11:30	26.5	818	3.4
03:40	16.2	0	2.4	07:40	18.5	197	2.5	11:40	27.0	821	3.2
03:50	16.3	0	2.9	07:50	18.9	241	2.8	11:50	27.2	821	3.0

Tabla 7-2 Continuación: Datos climatológicos (radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento), para el día frío.

23/Enero/2014 (Día frío)											
Hora min	$T_{amb}$ °C	$G_{solar}$ W/m <sup>2</sup>	$Vel_{aire}$ m/s	Hora min	$T_{amb}$ °C	$G_{solar}$ W/m <sup>2</sup>	$Vel_{aire}$ m/s	Hora min	$T_{amb}$ °C	$G_{solar}$ W/m <sup>2</sup>	$Vel_{aire}$ m/s
12:00	27.1	821	3.1	16:00	28.5	296	2.8	20:00	22.4	0	3.7
12:10	27.5	821	3.0	16:10	28.4	272	2.9	20:10	22.4	0	3.8
12:20	27.0	816	3.5	16:20	26.7	138	3.7	20:20	22.3	0	3.8
12:30	27.3	820	2.8	16:30	25.9	112	4.2	20:30	22.3	0	4.0
12:40	27.5	808	3.1	16:40	25.5	79	4.1	20:40	22.1	0	3.5
12:50	27.8	800	3.0	16:50	25.2	67	4.4	20:50	22.1	0	3.9
13:00	27.5	791	3.2	17:00	25.0	45	4.1	21:00	22.0	0	3.7
13:10	27.5	774	2.3	17:10	24.8	33	3.7	21:10	22.0	0	3.5
13:20	28.0	760	2.8	17:20	24.4	21	4.4	21:20	21.9	0	4.0
13:30	28.4	742	2.0	17:30	24.1	10	4.3	21:30	21.8	0	4.4
13:40	28.4	724	3.0	17:40	23.9	3	4.0	21:40	21.7	0	3.9
13:50	29.0	701	2.4	17:50	23.7	1	3.4	21:50	21.7	0	4.2
14:00	28.4	678	2.8	18:00	23.5	0	4.0	22:00	21.6	0	4.4
14:10	28.8	654	2.8	18:10	23.3	0	4.5	22:10	21.6	0	4.3
14:20	28.7	630	2.8	18:20	23.1	0	4.0	22:20	21.5	0	4.0
14:30	28.9	598	2.2	18:30	23.0	0	4.0	22:30	21.5	0	4.6
14:40	29.0	566	2.7	18:40	22.9	0	4.4	22:40	21.5	0	4.7
14:50	29.0	536	2.5	18:50	22.9	0	4.5	22:50	21.5	0	3.8
15:00	28.8	529	3.3	19:00	22.8	0	4.2	23:00	21.4	0	4.3
15:10	28.9	479	2.8	19:10	22.8	0	3.9	23:10	21.3	0	4.6
15:20	28.7	448	3.4	19:20	22.7	0	3.3	23:20	21.2	0	4.4
15:30	28.8	418	2.9	19:30	22.6	0	4.0	23:30	21.2	0	4.0
15:40	28.8	371	3.2	19:40	22.6	0	4.0	23:40	21.2	0	3.8
15:50	28.4	334	3.3	19:50	22.5	0	3.8	23:50	21.1	0	3.7



Tabla 7-3 Datos climatológicos (radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento), para el día cálido.

07/Abril/2014 (Día Cálido)											
Hora min	$T_{amb}$ °C	$G_{solar}$ W/m <sup>2</sup>	$Vel_{aire}$ m/s	Hora min	$T_{amb}$ °C	$G_{solar}$ W/m <sup>2</sup>	$Vel_{aire}$ m/s	Hora min	$T_{amb}$ °C	$G_{solar}$ W/m <sup>2</sup>	$Vel_{aire}$ m/s
00:00	26.6	0	3.4	04:00	25.1	0	3.4	08:00	29.3	513	4.8
00:10	26.5	0	3.8	04:10	25	0	3.1	08:10	29.3	576	5.5
00:20	26.3	0	3.4	04:20	25	0	3.7	08:20	30.2	569	4.5
00:30	26.2	0	3.2	04:30	25	0	3.7	08:30	30.9	635	4.0
00:40	26.1	0	4.1	04:40	25	0	4.2	08:40	30.6	401	5.9
00:50	25.9	0	3.4	04:50	24.9	0	4.0	08:50	31.1	683	5.7
01:00	25.8	0	3.8	05:00	24.8	0	3.5	09:00	31.5	715	5.4
01:10	25.8	0	3.9	05:10	24.7	0	3.8	09:10	31.6	747	5.7
01:20	25.7	0	3.9	05:20	24.7	0	4.2	09:20	32	780	5.9
01:30	25.6	0	4.3	05:30	24.6	0	4.1	09:30	32.9	810	5.2
01:40	25.5	0	3.9	05:40	24.6	0	4.1	09:40	32.8	833	5.0
01:50	25.4	0	3.9	05:50	24.6	4	3.8	09:50	34.3	862	4.2
02:00	25.4	0	4.0	06:00	24.5	17	3.5	10:00	34.6	885	4.5
02:10	25.3	0	4.0	06:10	24.6	38	3.5	10:10	34.8	910	4.3
02:20	25.4	0	4.1	06:20	24.8	58	3.7	10:20	34.8	929	4.3
02:30	25.4	0	3.6	06:30	25.1	93	3.7	10:30	34.9	945	4.7
02:40	25.4	0	4.0	06:40	25.5	129	4.2	10:40	35.4	955	4.2
02:50	25.3	0	4.1	06:50	25.8	163	4.3	10:50	35.5	974	4.3
03:00	25.3	0	3.9	07:00	26.2	192	4.7	11:00	36.3	986	3.6
03:10	25.2	0	4.0	07:10	26.8	234	4.4	11:10	36.8	985	3.5
03:20	25.2	0	3.8	07:20	27.2	329	5.0	11:20	36.3	999	4.3
03:30	25.1	0	3.3	07:30	27.7	387	4.4	11:30	36.7	1001	2.9
03:40	25.1	0	4.5	07:40	28.2	411	4.5	11:40	37.2	993	3.3
03:50	25.1	0	3.7	07:50	28.7	460	4.4	11:50	37.3	993	2.9

Tabla 7-4 Continuación: Datos climatológicos (radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento), para el día cálido.

07/Abril/2014 (Día Cálido)											
Hora min	$T_{amb}$ °C	$G_{solar}$ W/m <sup>2</sup>	$Vel_{aire}$ m/s	Hora min	$T_{amb}$ °C	$G_{solar}$ W/m <sup>2</sup>	$Vel_{aire}$ m/s	Hora min	$T_{amb}$ °C	$G_{solar}$ W/m <sup>2</sup>	$Vel_{aire}$ m/s
12:00	37.9	999	2.9	16:00	40.3	389	2.2	20:00	28.6	0	3.5
12:10	39	992	2.8	16:10	40.3	131	2.1	20:10	28.4	0	3.6
12:20	38.1	985	2.5	16:20	38.8	58	1.5	20:20	28.4	0	3.2
12:30	39.2	980	2.7	16:30	39.4	243	2.2	20:30	28.3	0	3.4
12:40	38.7	978	2.7	16:40	39.4	279	1.6	20:40	28.2	0	4.0
12:50	39.1	963	2.4	16:50	38.4	231	3.0	20:50	28.2	0	3.7
13:00	39.2	959	1.5	17:00	37.9	192	4.2	21:00	28.2	0	3.0
13:10	39.5	939	2.3	17:10	37.7	137	3.3	21:10	28.1	0	3.1
13:20	39.6	917	1.8	17:20	37.2	91	3.5	21:20	28	0	2.7
13:30	40.2	884	1.8	17:30	36.1	58	3.7	21:30	28	0	2.2
13:40	40.3	881	2.1	17:40	34.6	38	3.6	21:40	28	0	1.9
13:50	39.8	506	2.5	17:50	33.4	22	3.7	21:50	28	0	2.1
14:00	39.9	845	1.5	18:00	32.2	9	5.0	22:00	28	0	2.0
14:10	39.9	820	2.3	18:10	31.5	2	4.5	22:10	28.1	0	2.1
14:20	40.4	812	2.2	18:20	31.4	0	4.0	22:20	28	0	1.4
14:30	41	767	1.5	18:30	30.7	0	4.1	22:30	28.2	0	2.1
14:40	40.3	720	1.8	18:40	30.3	0	3.9	22:40	28.2	0	2.4
14:50	41	518	1.8	18:50	30	0	3.9	22:50	28.2	0	2.5
15:00	41.5	619	1.4	19:00	29.8	0	3.2	23:00	28.2	0	2.4
15:10	40.4	480	2.1	19:10	29.5	0	3.9	23:10	28.1	0	2.4
15:20	41.3	541	1.3	19:20	29.3	0	3.4	23:20	28	0	2.4
15:30	41.7	533	1.3	19:30	29.1	0	3.4	23:30	28	0	1.7
15:40	41.2	504	1.4	19:40	29.1	0	2.9	23:40	28	0	2.1
15:50	40.8	456	2.5	19:50	28.8	0	3.5	23:50	28.1	0	1.9

Tabla 7-5 Propiedades de Materiales de Cambio de Fase.

Material	Punto de Fusión (°C)	Conductividad Termica (W/m°C)		Densidad (Kg/m³)		Cp (J/Kg °K)		Calor Latente (J/Kg )
		$\lambda_s$	$\lambda_l$	$\rho_s$	$\rho_l$	$Cp_s$	$Cp_l$	
	<i>Temp.</i>							$h_{ls}$
Parafina RT-25 Yongcai Li (2014)	22.01- 26.01	0.19	0.18	880	760	2900	2110	148,000
Parafina RT-27 (Jin et al. 2016)	27	0.20	0.20	880	760	2000	2000	179, 000
Parafina MG29 (Liu et al. 2016)	27-29	0.21	0.21	850	850	2230	2230	205,000
Parafina n- Octadecano (Hale, 1971)	28	0.15	0.15	814	774	2160	2160	243000
Hidrato de Sal (Abhat, 1982)	35	0.514	0.476	1700	1950	1520	1442	281,000
N-Eicosano (Pal y Joshi, 2018)	37	0.39	0.157	1900	2200	810	770	241,000
Parafina RT-42 Yongcai Li (2014)	38-43	0.2	0.2	880	760	1800	2400	174,00
P116 ( Laouadi et al. 1999)	47	0.24	0.24	830	773	2400	1900	225,000