



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA – DISEÑO BIOCLIMÁTICO

**ANÁLISIS DE TRANSPORTE DE CALOR A TRAVÉS DE UN SISTEMA CONSTRUCTIVO
CON CAMBIO DE FASE**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
MIRIAM QUEZADA GARCÍA

TUTOR PRINCIPAL
DAVID MORILLÓN GÁLVEZ, UNAM – INSTITUTO DE INGENIERÍA
COMITÉ TUTOR
VÍCTOR HUGO HERNÁNDEZ GÓMEZ, FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES DE
CUAUTITLAN
JOSÉ DIEGO MORALES RAMÍREZ, UNAM – FACULTAD DE ARQUITECTURA
ARTURO GUILLERMO REINKING CEJUDO, UNAM – FACULTAD DE INGENIERÍA
AUGUSTO SÁNCHEZ CIFUENTES, UNAM – FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO, MARZO 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Reinking Cejudo Arturo Guillermo

Secretario: Dr. Hernández Gómez Víctor Hugo

Vocal: Dr. Morillón Gálvez David

1^{er.} Suplente: M en I. Sánchez Cifuentes Augusto

2^{do.} Suplente: Dr. Morales Ramírez José Diego

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: FACULTAD DE INGENIERÍA

TUTOR DE TESIS:

DAVID MORILLÓN GÁLVEZ

FIRMA

Índice

Resumen/Abstract

Introducción

Capítulo 1. Antecedentes (8)

Capítulo 2. Transferencia de calor en materiales y sistemas constructivos para edificios (15)

Capítulo 3. Características de los modelos (Propuesta de sistema constructivo con cambio de fase) (26)

Capítulo 4. Análisis de los modelos con material de cambio de fase en Construcción (35)

Capítulo 5. Construcción y análisis del modelo obtenido (41)

Capítulo 6. Método de solución numérico (Volumen de control) (46)

Capítulo 7. Resultados (55)

Conclusiones (62)

Apéndice (63)

Referencias (68)

Resumen Abstract

En el presente trabajo se clasifican los materiales de cambio de fase, los cuales se consideran como una posible solución para reducir el consumo de energía en los edificios, mediante el almacenamiento y la liberación de calor dentro de un cierto rango de temperaturas y con ello mejorar el confort térmico de los habitantes del edificio.

Se propone validar el sistema con el modelo del volumen de control, el cual plantea condiciones de frontera diferentes a las tradicionales, las condiciones del experimento son tomadas de la literatura, el modelo se integró en un código de simulación y los resultados obtenidos en la validación del mismo son muy cercanos a los brindados en la literatura, siendo capaz de predecir la temperatura de los elementos constructivos y el impacto térmico de los PCM instalados en el edificio.

Palabras clave: Material con cambio de fase, modelos numéricos, volumen de control

Abstract

In this paper the phase change materials, which are considered as a possible solution to reduce energy consumption in buildings, by storing and releasing heat within a temperature range are classified and thus improve thermal comfort of the building's inhabitants.

It is proposed to validate the system to model the control volume, which poses conditions different border to the traditional conditions of experiment are taken from the literature, the model is integrated into a simulation code and the results of the validation thereof they are very close to those provided in the literature, being able to predict the temperature of the construction elements and the thermal impact of the PCM installed in the building.

Keywords: Phase Change material, Numerical models, volumen control

Introducción

La conservación medioambiental cobra cada día mayor importancia y de hecho cada vez se emplean más recursos en ello. Uno de los temas más sensibles es la contaminación debida al consumo energético en la climatización de edificios. [1]

Actualmente la construcción de edificaciones modernas requiere cumplir con altas expectativas, pues no solo es necesario ofrecer un alto grado de confort, también es necesario cumplir con todos los lineamientos de seguridad y promover la eficiencia energética. Un requerimiento de gran importancia es el cuidado del medio ambiente, dando lugar al desarrollo de la construcción sustentable. Esto conlleva a su vez, a un uso eficiente de la energía eléctrica, el objetivo de las nuevas construcciones radica en conseguir la reducción de impactos ambientales durante la construcción y vida de los edificios.

En 2015 el Consejo Estadounidense de Edificación Sustentable calcula que en la actualidad, en promedio la edificación eficiente reduce 30 % el uso de energía, 35 % las emisiones de carbono y de 30 a 50% el consumo de agua, además genera ahorros de 50 a 90 % de los desechos [2]. Por tal motivo surge el interés por estudiar materiales que sean capaces de brindar confort dentro de un edificio, pensando en aprovechar la inercia térmica de los materiales para disminuir los consumos energéticos. En la actualidad se ha intentado la acumulación de calor estacional y, salvo en casos muy aislados, no se ha conseguido una disminución del consumo energético en climatización, sin embargo se ha demostrado que utilizando acumulación de calor por cambio de fase, con muy pequeños volúmenes, se puede almacenar mucha energía a una determinada temperatura, y por lo tanto se puede conseguir el aprovechamiento deseado [3]. Por estas razones en el presente trabajo se realiza un estudio del amortiguamiento que brindan los materiales de cambio de fase en la construcción, para ello se desarrolla un modelo matemático el cual permite conocer las condiciones de frontera dentro del material, lo anterior asegura la caracterización del flujo de calor en estos materiales, y a su vez se puede predecir el tipo de material de cambio de fase que más conviene en determinado clima y se puede estimar el amortiguamiento de calor ofrecido.

El presente trabajo estudia el comportamiento de los materiales con cambio de fase en los sistemas constructivos, estos materiales permiten amortiguar el calor dentro de un edificio. [1]

Sin embargo, no existen ecuaciones adecuadas que describan el transporte de energía con sistemas de cambio de fase en modelos constructivos, por lo cual para poder comparar estos sistemas con los convencionales o con algún otro sistema es necesario realizar experimentos a pequeña y gran escala, pero lo anterior lleva mucho tiempo. Por ello se propone realizar un balance microscópico, con una fase sólida-gas en el sistema heterogéneo, es decir Sistemas con Cambio de Fase y los huecos de aire, en esta zona no se tiene forma de medir por que la escala es muy pequeña, los balances se plantean para una esfera, pero las condiciones de frontera aun son desconocidas.

Por ello se usa un método de escalamiento para homogenizar al sistema, utilizando propiedades efectivas que consideran ambos materiales, para después aplicar un método semejante para el sistema completo aire – burbujas – pared, con este modelo matemático se puede evaluar el desempeño del material antes de ser colocado. Con ello se puede asegurar la temperatura dentro del edificio, y con base en esto se puede analizar que material es idóneo para cada clima del país.

De igual manera el modelo permite medir propiedades térmicas de las diferentes mezclas, para encontrar la mejor combinación en cada clima.

Objetivo

Elaborar modelos matemáticos, a diferentes escalas (micro y macro) para predecir la transferencia de calor a través de un envolvente del edificio que cuente con un sistema de cambio de fase, mediante el desarrollo de modelos macro y microscópicos.

Objetivos particulares

- Al desarrollar modelos macro y microscópicos, se puede garantizar la eficiencia energética de los materiales con cambio de fase.
- Determinar cómo se lleva a cabo el transporte de calor en los materiales con cambio de fase, la elección de estos en la construcción se puede determinar, dependiendo de las necesidades de confort que se requieran en determinado clima.
- Al modelar un sistema constructivo, en el muro o pared, con materiales de cambio de fase, se pretende conocer cómo se lleva a cabo la transferencia de calor en cada material, esto permite caracterizar los materiales de cambio de fase en base al clima de cada región.

Justificación

En la actualidad la sociedad enfrenta dos grandes problemas, la crisis energética y la contaminación ambiental.[1]

A nivel mundial el consumo de energía primaria en edificios representa un 40% del consumo total en la Unión Europea (UE). En el “Internacional Energy Outlook 2010”, se estimó un incremento del 58% del consumo energético mundial entre 2001 y 2008. Si nos referimos al panorama nacional, se sabe que:

En México, no todos los edificios comerciales presentan comportamientos similares, pues existen zonas al Norte y al Sureste del país, donde el uso de sistemas de climatización artificial es una necesidad para alcanzar el confort térmico, llegando a representar cerca del 45% del gasto energético total en el edificio. Los sistemas de climatización, como los chillers y los aires acondicionados, son un tipo de uso final de gran emisión de gases de efecto invernadero, sobre todo de gases cloroFluroCarbonados (CFC), donde se producen alrededor de 5000 toneladas anualmente en nuestro país [4].

Con la finalidad de minimizar la demanda de energía provocada por la climatización en los edificios, surge la necesidad de buscar formas de acondicionamiento pasivo, en el que el ahorro energético sea fundamental, ya que no solo permite reducir gastos, sino también limitar el uso de los combustibles tradicionales [5]. Así surge el estudio de Materiales con Cambio de Fase, sustancias que requieren gran energía térmica para cambiar de fase, en particular pasar de sólido a líquido y viceversa, ese calor o frío necesario se puede aprovechar para regresarlo en el momento adecuado, estos materiales en la envolvente del edificio, pueden mejorar el confort térmico dentro del edificio garantizando con ello un ahorro de energía por concepto de climatización.

Hipótesis

Los sistemas constructivos con cambio de fase pueden proporcionar un importante amortiguamiento de calor dentro de la habitación, con la finalidad de mejorar el confort térmico y el ahorro de energía en sistemas de climatización.

Contenido

En el presente trabajo se desarrolla un modelo para sistemas con cambio de fase, en construcciones, se sabe que este tipo de materiales ya son utilizados como aislantes térmicos, no solo en construcción, sino en diferentes ramas de la industria, es cierto que utilizándolos como materiales constructivos amortiguan el calor, lo anterior nos da la ventaja de poderlos utilizar en los climas cálidos extremos del país y con ello reducir el consumo de aire acondicionado en dichas edificaciones.

Para construir el modelo matemático, primero se revisaron las aportaciones hechas hasta este momento en dicho tema, posteriormente se realizara el modelo microscópico de calor a través de la pared compuesta donde se incluye el material con cambio de fase, cabe señalar que dicha pared se analizara de dos maneras distintas, pues primero se hará un balance considerando una fase heterogénea, es decir, la fase sólida-gas la cual está comprendida por el Sistema con Cambio de Fase y los huecos de aire; una vez hecho este balance microscópico heterogéneo, se usará un método de escalamiento para homogenizar al sistema, para ello se utilizan propiedades efectivas que consideran el uso de todos los materiales, y después aplicaremos un método semejante para el sistema completo aire – burbujas – pared, lo que se pretende con este modelo, es observar el desempeño del material antes de ser colocado en un edificio, lo anterior nos dará los parámetros para calcular la temperatura dentro del edificio al utilizarlo en la construcción y nos permitirá caracterizar el Sistema constructivo ideal, para cada zona del país.

Con lo anterior se garantiza conocer las condiciones en la que operará el Sistema con Cambio de Fase, antes de ser colocado, y nos dará información de que tan rentable es el sistema, comparado con el uso del aire acondicionado.

Capítulo I. Antecedentes

Los Materiales de Cambio de Fase son una de las formas más eficientes de almacenamiento térmico, se conocen internacionalmente por su acrónimo en inglés PCM Phase Change Material y en adelante se denominaran (PCM). [5]

Telkes, M [1948] ,construyo una casa de una planta climatizada por ocho colectores solares en cubierta. El calor se almacenaba en cinco bidones llenos de sal de Glauber.

L. Gardenhire [1953], realizo un experimento similar al de Telkes en Las Cruces, Nuevo México. En este caso se mezcló la sal de Glauber con bórax como agente nucleador.

Lee and Wu [1980], presentaron un estudio sobre la transmisión térmica con PCM, contenidos en pipetas, la investigación se basó en una cera de parafina (Sun-P 116). Se utilizó un termosifón de agua, cuyas dimensiones eran 22.2mm de diámetro interior y 610 mm de longitud, se observó un aumento del coeficiente de transmisión térmica del sistema con los siguientes parámetros:

Aumento del sobrecalentamiento del PCM (lo que permitió superar la temperatura de saturación)

Aumento del coeficiente de transmisión térmica en las partes de evaporación y condensación

Schroeder and Gawron [1981], analizaron las características de los materiales con cambio de fase orgánicos en algunos elementos constructivos para almacenamiento de calor latente, ya que son químicamente más estables que las sustancias inorgánicas y no necesitan de agentes nucleadores, sin embargo su costo es elevado.

Abhat [1983], propone una clasificación de las sustancias utilizadas para el almacenamiento térmico, evaluando el calor latente de las parafinas y las sales hidratadas.

Lee [1983], investiga la capacidad de almacenamiento de bloque de hormigón impregnado con PCM. En este estudio se evaluó el comportamiento de almacenamiento térmico de un bloque de hormigón convencional y otro impregnado con dos tipos diferentes de PCM. Uno es butil estearato (BS), disponible comercialmente y el otro es una parafina comercial (p), el tamaño y forma de los bloques utilizados es el convencional 20 X20 X40cm.

Hawe [1984], investigó los métodos de incorporación de PCM en los materiales constructivos y numero los más prometedores: Incorporación directa, encapsulado e inmersión, aunque pocos de ellos cuidan el aspecto estético.

Feldman, Shapiro et al. [1989], investigaron composiciones basadas en compuestos de ácidos grasos producidos por Henkel Canadá.

Salyer and Sicar. [1990], escriben un artículo en el que enumeran las aplicaciones de los PCM en el campo de refrigeración y calefacción. En él se presenta una revisión de materiales, ventajas, inconvenientes y características para una serie de sustancias PCM aplicables para el

almacenamiento térmico en la construcción. Entre cuatro posibles tipos de PCM analizados, los que mayores ventajas presentan son las parafinas (hidrocarburos -60 a 80°C), cuyo origen puede ser a partir de la polimerización del etileno.

Feldman D. [1991], además de la reducción energética, los materiales de almacenamiento térmico poseen un gran potencial de desplazamiento de carga.

Peippo K. [1991], identificó un proceso que podría utilizarse para elegir un PCM con un punto de fusión predecible para ajustarse a la temperatura óptima de aplicación. Esta investigación se realizó primero con ácidos grasos y mezclas de los mismos, observando un elevado calor de fusión, dichas mezclas se utilizaron en los cerramientos de los edificios.

Barrio M. [1992] investigaron la utilización del PCM sólido-orgánico- neopentaglicol, para un sistema de calefacción por suelo radiante.

Kaasinen [1992], realizó investigaciones de la absorción de algunos PCM orgánicos dentro de una amplia gama de materiales constructivos entre los cuales se incluyen tableros, madera y ladrillos.

Abhat [1978]; Himran [1994], presentan una evaluación global de los diversos materiales con cambio de fase, comparando los ácidos grasos y la parafina.

Hasan and Saying [1994] , realizan una evaluación de materiales de cambio de fase orgánicos, encontrando que estos no presentan problemas de subenfriamiento y son más estables que los compuestos inorgánicos, actualmente los materiales orgánicos, especialmente sustancias como las ceras, grasas y sus ésteres han sido recomendados como acumuladores de calor y se han estudiado sus principales propiedades.

Cuevas-Diarte, Haget et al [1996], escribieron de materiales orgánicos denominados MCPAM (Materiales con cambio de fase constituidos por aleaciones moleculares), formados por aleaciones a base de alcanos, que presentan la ventaja de ser termoajustables, es decir, que permiten modular la temperatura de cambio de fase a partir de su composición, sin embargo esta clase de materiales no están completamente caracterizados.

Athientis A.K [1997], desarrollaron un estudio de simulación numérica y experimental con ensayo sobre un modelo a escala real, con tableros de yeso con PCM como recubrimiento interior. Los tableros de yeso que utilizaron contenían aproximadamente el 25% en peso de BS. Se desarrolló un método de diferencias finitas para simular el proceso migratorio de transferencia térmica en los muros. Se demostró que la utilización de los tableros de PCM y yeso podrían reducir alrededor de 4°C, la temperatura durante el día así como reducir la carga térmica nocturna de manera significativa.

Fieback.[1998], realiza un estudio y concluye que los materiales de almacenamiento térmico pueden convertirse en una característica propia de edificios autónomos, los cuales no necesitan de una gran instalación para mantener un ambiente confortable.

Hauer, Laevemann et al.[1998], construyen un panel de almacenamiento térmico, una de las primeras aplicaciones con PCM, el panel consiste en una plancha acrílica con un muro poliédrico, una cámara de aire y un gran aislamiento. En la cámara de aire, se coloca una matriz de tubos que contienen PCM, el panel se utiliza para calentar por absorción de la radiación solar durante el día y recuperar este calor durante la noche colocando el gran aislamiento entre el panel y el ambiente exterior, haciendo circular aire entre los tubos y el interior de la habitación, sin embargo no se conoce cuanto calor se logra amortiguar con este sistema.

Salzer [1998], afirma que compuestos de polímero y PCM de baja densidad y elevada capacidad de almacenamiento térmico podrían utilizarse como materiales constructivos en forma de panel, como el fabricado con recipientes alojados en el interior de un muro de hormigón.

Domínguez, García et al. [2000], estudiaron que los módulos de PCM mantienen la temperatura interior constante por un período largo de tiempo. Se utilizan para acondicionamiento de espacios especialmente los sensibles a los cambios de temperatura.

Hadjieva, Stoykov et al. [2000], realizaron un análisis del método por inmersión, el cual se utiliza principalmente con materiales de construcción porosos (placas de yeso, ladrillos o bloques de hormigón). Estos se sumergen en el PCM derretido en caliente, que se absorbe y rellena los poros del material por capilaridad. El material poroso se rellena con PCM líquido y se deja enfriar permaneciendo el PCM en los poros del material constructivo. Este método convierte un panel ordinario en un panel de PCM, ya que la impregnación puede hacerse en cualquier lugar y momento, sin embargo el tiempo de inversión para el hormigón resulta excesivo.

Neeper.[2000], estudio la regulación de la temperatura en una estancia utilizando PCM y encontró que su punto de fusión y de congelación debe estar de 1 a 3 K sobre la temperatura media de la habitación, sin embargo se desconoce la manera de controlarlo.

Py.Olives et al [2001], estudio la encapsulación de los PCM, en unidades de almacenamiento que mejoren la conductividad de la unidad de almacenamiento. Esta es muy baja en la cera de parafina, aproximadamente 0.24 W/mK, a menudo se necesita que la unidad de almacenamiento sea rápida para lo cual se necesitan materiales con muy buena conductividad térmica en los encapsulados de PCM. Uno de estos materiales es el grafito, con el se construyó una matriz porosa que contiene una cera de parafina como PCM.

Zhang [2001], desarrollaron y probaron un armazón de muro que integraba parafina altamente cristalina macroencapsulada. Los resultados demostraron que el muro reducía los flujos picos de calor por encima del 38%. Sin embargo el macroencapsulado tiene la desventaja de necesitar protección y mucho más trabajo para integrarlo en cualquier material o sistema constructivo del

edificio, por lo que se encarece el proceso. Otro problema es la disminución de la tasa de transferencia de calor durante el proceso de solidificación con los pobres coeficientes de transmisión térmica de los PCM en estado sólido.

Fieback.[1998], Dominguez [1999], Yamaha [2002], estudiaron cada uno en su tiempo un sistema de techo frío, el cual no solo aprovecha las características de almacenamiento de calor latente del PCM, sino que además a través de su diseño logra mejorar la efectividad de la masa térmica de un edificio. Se considera además muy apropiado por su facilidad de reparación y restauración en muchos edificios comerciales donde se produce sobrecalentamiento, porque no necesita de grandes espacios para la instalación y utiliza los espacios disponibles en los falsos techos o en suelos sobre-elevados.

Nagano, Mochida et al.[2003], estudiaron diferentes materiales, encontraron que el nitrato de manganeso hexahidratado puede servir de base de desarrollo de nuevos materiales de almacenamiento compuestos. Su rango de fusión se encuentra ente 7.7 y 23.3°C y el calor de fusión es de 125KJ/Kg. Sus propiedades térmicas le confieren un elevado potencial de seguridad y buena presentación de PCM para almacenamiento térmico.

Hawlader, Uddin et al [2003], investigaron la influencia de los diferentes parámetros en las características y comportamiento de un microencapsulado en términos de eficiencia de encapsulado, almacenamiento térmico y capacidad de intercambio. Los resultados obtenidos de un DSC mostraron que las micro capsulas preparadas tienen una capacidad de almacenamiento – cesión térmica de 145-250 Kj/Kg. Aquí las ceras de parafina microencapsuladas tienen un buen potencial como material de almacenamiento de energía.

Onishi, Soeda et al. [2003] Investigaron numéricamente los efectos de los PCM, como un almacenamiento térmico en el comportamiento de un sistema híbrido de calefacción. Los resultados simulados indicaron la efectividad de los PCM y sugirieron la posibilidad de desarrollar casas de baja energía con el sistema híbrido introducido en este estudio.

Belusko,Saman et al. [2004], estudiaron mediante simulación que los sistemas refrigerantes pueden fabricarse con paneles de almacenamiento térmico, donde las bolsas de aluminio rellenas de PCM se colocan en un intercambiador de calor de aire y se exponen a la refrigeración nocturna, que se utiliza para refrescar el edificio durante el día cuando los PCM se derriten. La simulación además confirmó que este sistema sería más efectivo en una estructura ligera, que experimentaba mayor sobrecalentamiento debido a la baja inercia térmica.

Hong H. [2004], realizo un estudio con ácidos grasos, observó que estos desprenden un fuerte olor, por lo que se han desestimado para utilizarlos como paneles de materiales de cambio de fase. Algunos n-alcanos, presentan cambio de fase en estado sólido.

Koschenz and Lehmann [2004], desarrollaron un panel de techo térmicamente activado con PCM (parafina) para su aplicación en edificios ligeros y reformas. Su simulación y resultados de

ensayo demostraron que 5 cm de capa de PCM microencapsulado (25% en peso) y yeso, son suficientes para mantener la temperatura de la habitación en nivel confortable en los edificios y oficinas convencionales. Las condiciones térmicas para las placas se determinaron mediante simulación numérica.

Heimand and Clarke [2004], realizaron simulaciones numéricas para un edificio solar pasivo con multizona, altamente refrigerada y ventilada naturalmente. Tableros de yeso impregnados en PCM se utilizaron como revestimiento interior de las habitaciones. Los resultados mostraron que la energía solar almacenada en los paneles podía reducir la demanda de calefacción por encima del 90% a veces durante la estación cálida.

Saman, Bruno et al. [2005] demostraron mediante experimentos comparativos de suelo radiante convencional y uno modificado con PCM que se utiliza como material macro-encapsulado, demostraron que la variación de la temperatura de superficie de suelo se reducía notablemente utilizando PCM.

Weinländer, Beck et al. [2005], investigaron las propiedades de un doble acristalamiento combinado con PCM. La transmitancia de la luz en el rango de 0.4 puede alcanzarse con esos paneles de fachada. Comparando con un doble acristalamiento convencional, las pérdidas energéticas en la fachada sur eran del 30%. Las ganancias solares se redujeron en un 50%.

Zalba [2005], realiza una recopilación sobre almacenamiento de energía térmica con cambio de fase sólido-líquido. El trabajo se centra en materiales, transmisión de calor y sus aplicaciones y enumera 150 materiales utilizados en investigación con materiales de cambio de fase.

Zhang, Medina et al [2005] realizaron estudios de la incorporación de los PCM en diversos elementos constructivos, para la mejora del comportamiento térmico de un muro estructural frame- Wall, en el que se observaron que se podía reducir flujos de demanda pico hasta un 38%.

Domínguez M, García Carmen et al [2009] se realizó un estudio de la acumulación del frío en instalaciones de climatización, cuando se emplean materiales acumuladores de cambio de fase a temperaturas positivas, permiten ahorros importantes de energía, al trabajar las máquinas de producción de frío por la noche, cuando baja la temperatura de condensación facilitando el empleo de mejores máquinas al aumentar su potencia.

Baetens R, Born Petter, et al [2010] realizó un estudio sobre PCM y su clasificación en base a sus propiedades químicas, por otro lado hablo del uso de un coeficiente de almacenamiento de calor y de la inercia que presentan estos materiales para estabilizar el clima en el interior de una habitación, sin embargo este factor no es único pues el confort dentro del edificio también depende de la temperatura óptima de transición abordada en este artículo.

Lei Cao, Fang Tang et al [2013], realizaron un estudio con parafina microencapsulada con dióxido de titanio y se utilizó como material de almacenamiento de forma estabilizada en los edificios, se hicieron análisis de Transformación de Fourier espectroscopio de infrarrojos (FT-IR), de rayos X de difracción de Tometer (DRX) y microscopio electrónico de barrido (SEM) se utilizaron para determinar la estructura química , la fase de cristaloides y microestructura . Las propiedades y la estabilidad térmica, con lo anterior se encontró que la parafina resulta ser mejor material de cambio de fase al estar microencapsulada con el dióxido de titanio.

Chen Lin, Wang Tin et al [2013], investigaron y caracterizaron materiales de cambio de fase microencapsulados (MPCS), proponen que se utilicen en la transferencia y almacenamiento de calor. Estos compuestos son capaces de mantener alto calor latente y una tasa de transferencia de bajo control, sus condiciones de operación son seguras. El artículo resume las propiedades y las características de la transferencia de calor, la estabilidad y las aplicaciones.

Okyoung Chung, Su Gwang et al [2013], se prepara un material de cambio de fase compuesto de forma estable de PCM, para el calor latente de almacenamiento de energía térmica en los edificios. Se utilizó octadecano parafínico y BioPCM, se utilizaron en el experimento como tipos de PCM orgánicos por impregnación al vacío, se concluye que este material posee buen almacenamiento térmico.

Nithyanadam K, Pitchumani R [2013], realizaron un análisis computacional transitorio de un material de cambio de fase encapsulado, funcionando como un sistema de almacenamiento de energía térmica, el cual opera en una planta de concentración de energía solar. El calor almacenado en forma de calor latente de fusión, aumenta significativamente la capacidad de almacenamiento y reduce el tamaño del sistema.

Zhoung Limin, Zhang Xiaowei, et al [2014], se midieron las propiedades térmicas de materiales porosos heterogéneos de cambio de fase, preparados con diversas sales fundidas de Litio, se encontró que las mezclas pueden ser tan eficientes como los materiales puros de cambio de fase, y se demostró que el encapsulamiento en una malla tipo panel de abeja, resulta muy eficiente para este tipo de sales. El artículo proporciona datos experimentales de entalpía de la mezcla, conductividad y de la eficiencia de impregnación sobre el panel de abeja.

Elmozughi Ali, Salomon Lura, et al [2014], se considera al nitrato de sodio como un material con alto potencial de almacenamiento de energía térmica, por este motivo se analiza la carga y descarga desde la pared de la cápsula y se simula para diferentes límites y condiciones, se considera flujo turbulento y laminar, el modelo computacional se lleva a cabo mediante la aplicación del método entalpía – porosidad y volumen del método fluido para calcular los fenómenos de transporte dentro de la cápsula. El modelo planteado en este artículo, considera el vacío que existe entre las cápsulas, estudia la transferencia de calor en tres dimensiones.

Xiangfei Kong, Shilei Lu, et al [2014], investigaron dos nuevos sistemas de PCM , PCMOW (ácido caprico contenido en un panel instalado en la superficie exterior de un edificio) y el

PCMIW (ácido capríco y el 1-dodecanol, contenidos en los paneles instalados en la parte interior del edificio). Es decir, estos materiales se utilizaron en la envolvente de un edificio y se demostró numéricamente que los paneles pueden disminuir el consumo de energía mejorando el confort térmico mediante la capacidad de almacenamiento de energía térmica en la pared y en el techo. Tal modelo se instaló y se modeló en Tianjin China, para un clima típicamente cálido.

Marshed Alam, Hasnat Jamil, et al [2014], se analizó la eficiencia que presentan los PCM, al ser instalados en diferentes casas residenciales de ocho ciudades diferentes de Australia, las cuales representan seis zonas climáticas de ese país, la eficiencia de los PCM se calculó utilizando Energy Plus, y se encontró que dicha eficiencia depende fuertemente del tiempo local y del espesor de la capa del PCM en el edificio.

Chi-ming Lai, Schui Chi, et al [2014], se investigó el efecto térmico de colocar materiales con cambio de fase en un panel de aluminio. Los resultados indicaron que el nido de abeja de aluminio utilizado para el soporte estructural y la mejora de la conductividad térmica, en el prototipo transfirió rápidamente el flujo de calor en el PCM.

De lo anterior se puede concluir que la utilización de PCM para almacenamiento energético ha crecido rápidamente y se han introducido al mercado muchos productos basados en esta técnica.

Se han realizado estudios de PCM orgánicos e inorgánicos e incluso de una variante de los mismos encapsulándolos en diferentes materiales, con la finalidad de obtener una mayor acumulación térmica dentro de los mismos.

En la construcción se han desarrollado sistemas de calentamiento de suelo radiante, y enfriamiento pasivo en oficinas y otros edificios, utilizando sistemas de almacenamiento energético con materiales de cambio de fase. Y la utilización de la refrigeración nocturna, para la refrigeración diurna se ha implementado en varios países.

Se ha dicho que resultan ser mejores PCM los compuestos orgánicos debido a su disponibilidad en el mercado, por su inocuidad, su entalpía, sus temperaturas de fusión, próximas a la temperatura de confort, se han elegido las ceras de parafina, como los mejores PCM orgánicos.

Son numerosas las aplicaciones de PCM en la industria de la construcción, sistemas híbridos, sistemas de aislamiento transparente, paneles de sándwich, entre otros, sin embargo estos procesos requieren un alto nivel de tecnificación para desarrollar el elemento constructivo, cabe señalar que se han realizado algunas simulaciones del funcionamiento de estos materiales, los autores intentan describir como ocurre el flujo de calor dentro del sistema constructivo, sin embargo aún faltan cosas por estudiar en este ramo.

Capítulo II. Transferencia de calor en materiales y sistemas constructivos para edificios

Podemos definir la transferencia de calor como la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas. Siempre que exista una diferencia de temperaturas en un cuerpo o entre cuerpos, debe ocurrir una transferencia de calor.

Generalmente nos referimos a los diferentes tipos de procesos de transferencia de calor como modos. Cuando existe un gradiente de temperatura en un medio estacionario que puede ser un sólido o un fluido utilizamos el término *conducción* para referirnos a la transferencia de calor que se producirá a través del medio. En cambio, el término *convección* se refiere a la transferencia de calor que ocurrirá entre una superficie y un fluido en movimiento cuando están a diferentes temperaturas.

El tercer modo de transferencia de calor se denomina *radiación térmica*. Todas las superficies con temperatura finita emiten energía en forma de ondas electromagnéticas. Por tanto en ausencia de un medio, existe una transferencia neta de calor por radiación entre dos superficies a diferentes temperaturas.

Conducción

Se considera como la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia debido a las interacciones entre las mismas.

Las temperaturas más altas se asocian con las energías moleculares más altas y, cuando las moléculas vecinas chocan, como lo hacen constantemente, debe ocurrir una transferencia de energía de las moléculas más energéticas a las menos energéticas. En presencia de un gradiente de temperatura, la transferencia de energía por conducción debe ocurrir entonces en la dirección de la temperatura decreciente.

Es posible cuantificar los procesos de transferencia de calor en términos de las ecuaciones o modelos apropiados. Estas ecuaciones sirven para calcular la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo. Para la conducción de calor, la ecuación o modelo se conoce como *Ley de Fourier*. Para la pared plana unidimensional, la ecuación o modelo se expresa como:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

El flujo de calor o transferencia de calor por unidad de área q'' (W/m^2) es la velocidad con la que se transfiere el calor en la dirección x por área unitaria perpendicular a la dirección de transferencia, y es proporcional al gradiente de temperatura, dT/dx en esta dirección. La

constante de proporcionalidad k , es una propiedad de transporte conocida como conductividad térmica ($\text{W/m}\cdot\text{K}$) y es una característica del material de la pared. El signo menos es una consecuencia del hecho de que el calor se transfiere en la dirección de la temperatura decreciente.

Si la distribución de temperatura es lineal, en condiciones estables, entonces la temperatura se expresa como:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2)$$

Y el flujo de calor entonces es:

$$q_x'' = -k \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (3)$$

Esta ecuación proporciona un flujo de calor, es decir, la velocidad del cambio de calor transferido por unidad de área. El calor transferido por producción por unidad de tiempo q_x (W), a través de una pared plana de área A , es entonces el producto del flujo y el área, $q_x = q_x'' \cdot A$

Si aceptamos que el flujo de calor es una cantidad vectorial, es posible escribir un planteamiento más general de la ecuación de conducción (Ley de Fourier), como sigue:

$$q_n'' = -k \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3a)$$

Donde q_n es el flujo de calor en una dirección n , que es normal a una isoterma, en un caso bidimensional. La transferencia de calor se sostiene por un gradiente de temperatura a lo largo de n . La expresión 3a relaciona el flujo de calor a través de una superficie con el gradiente de temperatura en una dirección perpendicular a la superficie.

La ecuación 3a no es una expresión que se derive de principios fundamentales; es en cambio, una generalización que se basa en pruebas experimentales. Es también una expresión que define una propiedad material importante, la conductividad térmica, por otro lado la Ley de Fourier es una expresión vectorial que indica que el flujo de calor es normal a una isoterma y en la dirección de la temperatura decreciente. Finalmente la Ley de Fourier se aplica para toda la materia sin importar su estado: sólido, líquido o gaseoso.

Convección

El modo de transferencia de calor por convección se compone de dos mecanismos. Además de la transferencia de energía debida al movimiento molecular aleatorio (difusión), la energía también se transfiere mediante el movimiento global, o macroscópico del fluido. El movimiento del fluido se asocia con el hecho de que, en cualquier instante, grandes números de moléculas se

mueven de forma colectiva o como agregados. Tal movimiento, en presencia de un gradiente de temperatura, contribuye a la transferencia de calor. Como las moléculas en el agregado mantienen su movimiento aleatorio, la transferencia total de calor se debe entonces a una superposición de transporte de energía por el movimiento aleatorio global del fluido.

El término convección se utiliza cuando se hace referencia a este transporte acumulado y el término advección cuando se habla del transporte debido al movimiento volumétrico del fluido.

Resulta muy interesante estudiar la transferencia de calor por convección que ocurre entre un fluido en movimiento y una superficie limitante cuando estos tienen diferentes temperaturas. El modo de transferencia de calor por convección se sustenta tanto en el movimiento molecular aleatorio como en el movimiento volumétrico del fluido en la capa límite. La contribución debida al movimiento molecular aleatorio (difusión) domina cerca de la superficie donde la velocidad del fluido es baja.

La transferencia de calor por convección se clasifica de acuerdo con la naturaleza del flujo. Se tiene convección forzada cuando el flujo es causado por medios externos, como un ventilador, una bomba o vientos atmosféricos. La convección libre o natural, es el flujo inducido por las fuerzas de empuje que surgen a partir de diferencias de densidad ocasionadas por variaciones de temperatura en el fluido.

Hasta aquí hemos descrito el modo de transferencia de calor por convección como la transferencia de energía que ocurre dentro de un fluido debido a los efectos combinados de conducción y movimiento global del fluido. Por lo general la energía que se transfiere es la energía sensible o energía térmica interna del fluido, sin embargo hay procesos de convección en los que existen, además, intercambio de calor latente. Éste generalmente se asocia con un cambio de fase entre los estados líquido y vapor del fluido, por ejemplo la condensación y la ebullición.

Sin importar la naturaleza particular del proceso de transferencia de calor por convección, la ecuación o modelo apropiado es el siguiente:

$$\dot{q}'' = h(T_s - T_\infty) \quad (4a)$$

Donde \dot{q}'' el flujo de calor por convección (W/m^2), es proporcional a la diferencia de temperaturas entre las temperaturas de la superficie y del fluido, T_s y T_∞ , respectivamente, la ecuación 4 se conoce como Ley de enfriamiento de Newton y la constante de proporcionalidad h ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$) se denomina coeficiente de transferencia de calor por convección. Este depende de las condiciones en la capa límite, en las que influyen la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido y una variedad de propiedades termodinámicas de fluido y de transporte.

Cuando se utiliza la ecuación 4, se supone que el flujo de calor por convección es positivo si el calor se transfiere desde la superficie ($T_s > T_\infty$) y negativo si el calor se transfiere hacia la

superficie ($T_{\infty} > T_s$). Sin embargo, si $T_{\infty} > T_s$, no hay nada que nos impida expresar la ley de enfriamiento de Newton como:

$$q'' = h(T_{\infty} - T_s) \quad (4b)$$

En cuyo caso la transferencia de calor es positiva si es hacia la superficie.

Radiación

La radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita, sin importar la forma de la materia la radiación se puede atribuir a cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constitutivos. La energía del campo de radiación es transportada por ondas electromagnéticas (o alternativamente, fotones). Mientras la transferencia de energía por conducción o por convección requiere la presencia de un medio material, la radiación no lo precisa. De hecho, la transferencia de radiación ocurre de manera más eficiente en el vacío. La radiación que una superficie emite se origina a partir de la energía térmica de la materia limitada por la superficie, y la velocidad a la que libera energía térmica de la materia limitada por la superficie, y la velocidad a la que libera energía por unidad de área (W/m^2) se denomina la potencia emisiva superficial E . Hay un límite superior para la potencia emisiva, que es establecida por la ley de Stefan- Boltzman

$$E_b = \gamma T_s^4 \quad (5)$$

Donde T_s es la temperatura absoluta (K) de la superficie y γ es la constante de Stefan Boltzman ($\gamma = 5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$). Dicha superficie se llama radiador ideal o cuerpo negro.

El flujo de calor emitido por una superficie real es menor que el de un cuerpo negro a la misma temperatura y está dado por:

$$E = \epsilon \gamma T_s^4 \quad (6)$$

Donde ϵ es una propiedad radiativa de la superficie denominada emisividad. Con valores en el rango $0 \leq \epsilon \leq 1$, esta propiedad proporciona una medida de la eficiencia con que una superficie emite energía en relación con un cuerpo negro. Esto depende marcadamente del material de la superficie y del acabado.

La radiación también puede incidir sobre una superficie desde sus alrededores. La radiación se origina desde una fuente especial, como el sol, o de otras superficies a las que se expone la superficie de interés. Sin tener en cuenta la fuente, designamos la velocidad a la que toda esa radiación incide sobre un área unitaria de la superficie como la irradiación G .

Una parte de la irradiación, o toda, tal vez sea absorbida por la superficie y así se incrementaría la energía térmica del material. La velocidad a la que la energía radiante es absorbida por área

superficial unitaria se evalúa a partir del conocimiento de una propiedad radiativa de la superficie denominada absorptividad α . Es decir,

$$G_{abs} = \alpha G \quad (7)$$

Donde $0 \leq \alpha \leq 1$. Si $\alpha < 1$ y la superficie es opaca, partes de irradiación se reflejan. Si la superficie es semitransparente, partes de la irradiación también se transmiten. Sin embargo, mientras la radiación es absorbida y emitida aumenta y disminuye, respectivamente, la energía térmica de la materia, la radiación reflejada y transmitida no tiene ningún efecto sobre esta energía. Pues el valor de α depende de la naturaleza de la irradiación así como de la superficie misma.

Si se supone que la superficie es tal que $\alpha = \varepsilon$ (superficie gris), la velocidad neta de transferencia de calor por radiación desde la superficie, expresada por unidad de área de la superficie, es:

$$\dot{q}_{rad} = \frac{q}{A} = \varepsilon E_b(T_s) - \alpha G = \varepsilon \gamma (T_s^4 - T_{alr}^4) \quad (8)$$

Esta expresión proporciona la diferencia entre la energía térmica que se libera debido a la emisión por radiación y la que se gana debido a la absorción de radiación.

En algunas aplicaciones conviene expresar el intercambio neto de calor por radiación en la forma

$$q_{rad} = h_r A (T_s - T_{alr}) \quad (9)$$

El coeficiente de transferencia de calor h_r , está dado por:

$$h_r \equiv \varepsilon \gamma A (T_s + T_{alr}) (T_s^2 + T_{alr}^2) \quad (10)$$

En la ecuación 10, se modela la radiación de forma similar a la convección. En este sentido linealizamos la ecuación de la velocidad de radiación, haciéndola proporcional a la diferencia de temperaturas a la cuarta potencia. Observe, sin embargo, que h_r depende marcadamente de la temperatura, mientras que la dependencia de la temperatura del coeficiente de transferencia de calor por convección h es por lo general débil.

En una superficie se pueden presentar los tres fenómenos juntos y la ecuación de la velocidad total de transferencia de calor desde la superficie es entonces:

$$q = q_{conv} + q_{rad} = h A (T_s - T_\infty) + \varepsilon A \gamma (T_s^4 - T_{alr}^4) \quad (11)$$

Conductividad térmica

Por la ley de Fourier ecuación 3a, la conductividad térmica se define:

$$k \equiv - \frac{q_x}{\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)} \quad (12)$$

Se sigue que para un flujo de calor establecido, el flujo de calor por conducción aumenta con el incremento de la conductividad térmica. Recordando el mecanismo físico asociado con la conducción, se tiene que en general la conductividad térmica de un sólido es mayor que la de un líquido, que a su vez es mayor que la de un gas. La conductividad térmica de un sólido puede ser más de cuatro órdenes de magnitud más grande que la de un gas. Esta tendencia se debe en gran parte a las diferencias en el espacio intermolecular para los dos estados.

Estado sólido

Un sólido se compone de electrones libres y de átomos unidos en un arreglo periódico denominado estructura cristalina. Por consiguiente, el transporte de energía térmica se debe a dos efectos: la migración de electrones libres y las ondas vibracionales de la estructura cristalina. Estos efectos son aditivos de modo que la conductividad térmica k es la suma del componente electrónico k_e y el componente de la estructura cristalina k_l .

$$k = k_e + k_l \quad (13)$$

En una primera aproximación, k_e es inversamente proporcional a la resistencia eléctrica, para metales puros que son de baja resistencia, k_e es mucho mayor que k_l .

Sistemas aislantes

Los aislantes térmicos se componen de materiales de baja conductividad térmica combinados para lograr un sistema de conductividad térmica aún mas baja. En aislantes tipo fibra, polvo y escamas, el material sólido se dispersa finamente en el espacio de aire. Estos sistemas se caracterizan por una conductividad térmica efectiva, la cual depende de la conductividad térmica y de las propiedades radiativas de la superficie del material sólido, así como de la naturaleza y fracción volumétrica del aire o espacio vacío. Un parámetro especial del sistema es su densidad global (masa del sólido/volumen total), que depende en gran medida de la forma en la que se interconecta el material sólido.

Si se forman pequeños vacíos o espacios huecos al pegar o fundir partes del material sólido, se crea una matriz rígida. Cuando estos espacios se sellan, el sistema se denomina aislante celular. Ejemplos de estos aislantes rígidos son los sistemas de espuma, en particular los que se hacen con materiales plásticos y de vidrio. Los aislantes reflectores se componen de láminas u hojas delgadas multicapa paralelas de alta reflexividad, que están espaciadas para reflejar el calor

radiante de regreso a su fuente. En todos los tipos de aislantes, la evacuación del aire en el espacio vacío reduce la conductividad térmica del sistema.

Cabe señalar que la transferencia de calor a través de cualquiera de estos sistemas aislantes incluye varios modos: conducción por los materiales sólidos; conducción o convección a través del aire en los espacios vacíos; y si la temperatura es suficientemente alta, intercambio de radiación entre las superficies de la matriz sólida.

En el análisis de problemas de transferencia de calor, será necesario utilizar muchas propiedades de la materia. Estas propiedades por lo general se denominan propiedades termofísicas e incluyen dos categorías distintas: las propiedades de transporte y las termodinámicas. Las propiedades de transporte incluyen coeficientes de velocidad de difusión como k , conductividad térmica (para la transferencia de calor) y ν , viscosidad cinemática (para transferencia de momento). Las propiedades termodinámicas se relacionan con el estado de equilibrio del sistema. La densidad (ρ) y el calor específico (cp), son dos de estas propiedades que se usan extensamente en el análisis termodinámico. El producto ρcp (J/m^3K), normalmente denominado capacidad térmica volumétrica, la cual mide la capacidad de un material para almacenar energía térmica. Las sustancias de densidad grande se caracterizan por pequeños calores específicos, muchos sólidos y líquidos que son excelentes medios de almacenamiento de energía térmica ($\rho cp \approx 1 kJ/m^3K$).

La difusividad térmica, se define como la razón de la transferencia de calor por la capacidad térmica, tiene unidades de m^2/s .

$$\alpha = \frac{k}{\rho cp} \quad (14)$$

La difusividad mide la capacidad de un material para conducir la energía térmica en relación con su capacidad para almacenar energía térmica. Materiales de α grande responderán rápidamente a cambios en su medio térmico, mientras que los materiales de α pequeña responden más lentamente y tardan más en alcanzar una nueva condición de equilibrio.

Otra propiedad importante por definir es la resistencia térmica, esta se define como la razón de un potencial de transmisión a la transferencia de calor correspondiente, la resistencia térmica para la conducción está dada por:

$$R_{t,cond} = \frac{T_{s1} - T_{s2}}{q_x} = \frac{L}{kA} \quad (15)$$

Una resistencia térmica también se asocia con la transferencia de calor mediante convección a una superficie. De la ley de enfriamiento de Newton

$$q = hA(T_s - T_\infty) \quad (16)$$

la resistencia térmica para convección es entonces

$$R_{t,conv} \equiv \frac{T_s - T_\infty}{q} = \frac{1}{hA} \quad (17)$$

Las representaciones de circuitos representan una herramienta útil para conceptualizar y cuantificar problemas de transferencia de calor. En términos de la diferencia total de temperatura $T_{\infty,1} - T_{\infty,2}$ y de la resistencia térmica total R_{tot} , la transferencia de calor también se expresa como:

$$q_{x=T_{\infty,1}-T_{\infty,2}} = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{tot}} \quad (18)$$

Como las resistencias de conducción y convección están en serie y pueden sumarse, se sigue que:

$$R_{tot} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2 A} \quad (19)$$

En particular, el intercambio de radiación entre la superficie y sus alrededores puede ser importante y la transferencia se establece con la siguiente ecuación

$$R_{t,rad} \equiv \frac{T_s - T_{alr}}{q_{rad}} = \frac{1}{h_r A} \quad (20)$$

Donde h_r , se determina a partir de la ecuación (10). Las resistencias de convección y radiación superficiales actúan en paralelo, y si $T_\infty - T_{alr}$, se combinan para obtener una sola resistencia efectiva de la superficie.

Pared compuesta

Los circuitos térmicos sirven para sistemas más complejos, como las paredes compuestas. Estas paredes incluyen cualquier número de resistencias térmicas en serie y en paralelo debido a capas de diferentes materiales. Si consideramos una pared compuesta en serie figura 1. La transferencia unidimensional de calor para este sistema se expresa como

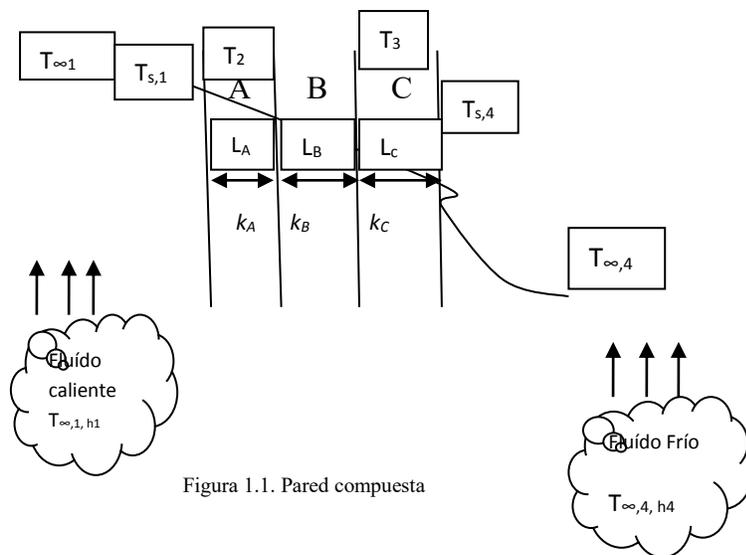


Figura 1.1. Pared compuesta

Donde $T_{\infty,1} - T_{\infty,4}$ es la diferencia total de temperatura, y la suma incluye todas las resistencias térmicas. Por lo tanto,

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{\left[(1/h_1A) + (L_A/k_A A) + (L_B/k_B A) + (L_C/k_C A) + (1/h_4A) \right]} \quad (21)$$

De manera alternativa, la transferencia de calor se relaciona con la diferencia de temperatura y la resistencia asociadas con cada elemento. Por ejemplo,

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{s,1}}{(1/h_1A)} = \frac{T_{s,1} - T_2}{(L_A/k_A A)} = \frac{T_2 - T_3}{(L_B/k_B A)} \quad (22)$$

Con sistemas compuestos suele ser conveniente trabajar con un coeficiente global de transferencia de calor U , que se define como una expresión análoga a la ley de enfriamiento de Newton. En consecuencia

$$q_x = UA\Delta T \quad (23)$$

Donde ΔT es la diferencia total de temperatura. El coeficiente global de transferencia de calor se relaciona con la resistencia térmica total, y de las ecuaciones 20 y 23 vemos que $UA = 1/R_{Tot}$. De aquí, para la pared compuesta de la figura 1.1

$$U = \frac{1}{R_{Tot}A} = \frac{1}{\left[(1/h_1) + (L_A/k_A) + (L_B/k_B) + (L_C/k_C) + (1/h_4) \right]} \quad (24)$$

En general se puede escribir

$$R_{Tot} = \sum R_t = \frac{\Delta T}{q} = \frac{1}{UA} \quad (25)$$

Cabe señalar que las paredes compuestas, presentan arreglos en serie y en paralelo, sin embargo no todas se modelan como sistemas unidimensionales.

Resistencia de contacto

En sistemas compuestos, la caída de temperatura a lo largo de la interfase entre los materiales puede ser grande. Este cambio de temperatura se atribuye a lo que se conoce como resistencia térmica de contacto R_{tc} , la cual se define como:

$$R''_{t,c} = \frac{T_A - T_B}{q_x} \quad (26)$$

La existencia de una resistencia de contacto finita se debe a los efectos de la rugosidad en la superficie, ya que se entre mezclan puntos de contacto, con huecos que en muchos casos se llenan de aire. La transferencia de calor se debe, por tanto, a la conducción a través de un área de contacto real y a la conducción o radiación por los huecos. La resistencia de contacto se considera como dos resistencias paralelas: la que se debe a los puntos de contacto y a los huecos. El área de contacto es normalmente pequeña y en especial para superficies rugosas, la contribución principal a la resistencia la realizan los huecos.

Para sólidos cuyas conductividades térmicas exceden la del fluido de la interfaz, la resistencia de contacto se reduce aumentando el área entre los puntos de contacto. Este aumento se genera mediante el incremento de la presión en la unión y reduciendo la rugosidad de las superficies acopladas. La resistencia de contacto también se reduce con la selección de un fluido en la interfaz de conductividad térmica grande. A este respecto, quitar el fluido (interfaz al vacío), elimina la conducción a través de un hueco, con lo que aumenta la resistencia de contacto.

Cualquier sustancia intersticial que llene un hueco entre superficies de contacto, y cuya conductividad térmica exceda la del aire, hará disminuir la resistencia de contacto. Dos clases de materiales adecuados para este propósito son los metales suaves y las grasas térmicas.

Por otra parte sabemos que las edificaciones están sujetas a fenómenos térmicos naturales, puesto que ganan o pierden calor por convección, conducción y radiación a través de muros, pisos, techos y partes transparentes [14,15]

Feng et al., (2010) proponen un balance unidimensional de energía para una pared compuesta. El balance de energía está dado por:

$$q_{sr} + q_{lr} + q_{cv} + q_{em} + q_{ss} + q_{tf} = 0 \quad (27)$$

donde q_{sr} es el calor ganado por radiación solar, q_{lr} es el calor ganado por radiación de onda larga, q_{cv} es el calor transferido por convección, q_{em} es el calor perdido por emisión, q_{ss} es el calor almacenado en el sólido y q_{tf} es el calor transferido al interior del cuarto.

El balance en el interior del cuarto está dado por:

$$\rho_r c_{pr} \frac{dT_R}{dt} = q_{tr} \quad (28)$$

Donde q_{trc} es el calor transferido al interior del cuarto y está dado por:

$$q_{trc} = U(T_a - T_{rc}) \quad (29)$$

Para calcular estas fuentes de calor se tiene:

Fuente	Método de cálculo
Radiación solar	$q_{lr} = \alpha_l \sigma (T_a + 273.15)^4 (0.802 + 0.004T_d)$
Radiación de onda larga	$q_{sr} = q_{sri} \alpha_s$
Convección	$q_{cv} = (5.7 + 3.8v)(T_p - T_a)$
Emisión	$q_{em} = \sigma \varepsilon (T_p + 273.15)^4$

En el presente capítulo se plasman las ecuaciones necesarias para realizar los balances microscópicos en paredes compuestas, dicha teoría se aplicará para realizar el balance de la pared compuesta con Materiales con Cambio de Fase.

Capítulo III. Características de los materiales de cambio de fase (PCM).

Los materiales de cambio de fase son compuestos capaces de almacenar y liberar energía térmica en forma latente cuando se cambia de un estado físico a otro, a una temperatura casi constante. En lugar de bloquear la transferencia de calor en el techo o en los muros, la solución podría ser aumentar la inercia térmica utilizando materiales de cambio de fase. [16]

Los materiales de cambio de fase son una de las formas más eficientes de almacenamiento térmico. Se conocen internacionalmente por su acrónimo en inglés PCM Phase Change Material y en adelante así los denominaremos en el presente trabajo.

Un material de cambio de fase (PCM) es aquel que experimenta un cambio de estado (sólido- líquido- gaseoso) a una temperatura determinada. [17]

La cantidad de calor necesario para aumentar un grado la temperatura de un material (calor sensible) es muy inferior a la que hace falta suministrar en el caso del calor latente. Los cambios producidos en los diferentes materiales debidos al calor latente se dan a una temperatura determinada que es característica de cada material. [18]

Para las aplicaciones de PCM, en elementos constructivos, se considera únicamente el cambio de fase de sólido a líquido, este es el que requiere menor cantidad de energía, presentando unas variaciones de volumen menores en comparación con los otros dos cambios.

Tipos de Materiales de Cambio de Fase

Los materiales de cambio de fase líquido- sólido más comunes en el rango de temperaturas de 20 a 80°C, son las ceras de parafina, sales hidratadas, mezclas eutécticas y ácidos grasos. [19]

En la figura 3.1, se muestra la clasificación de las sustancias para almacenamiento térmico, según Abhat.

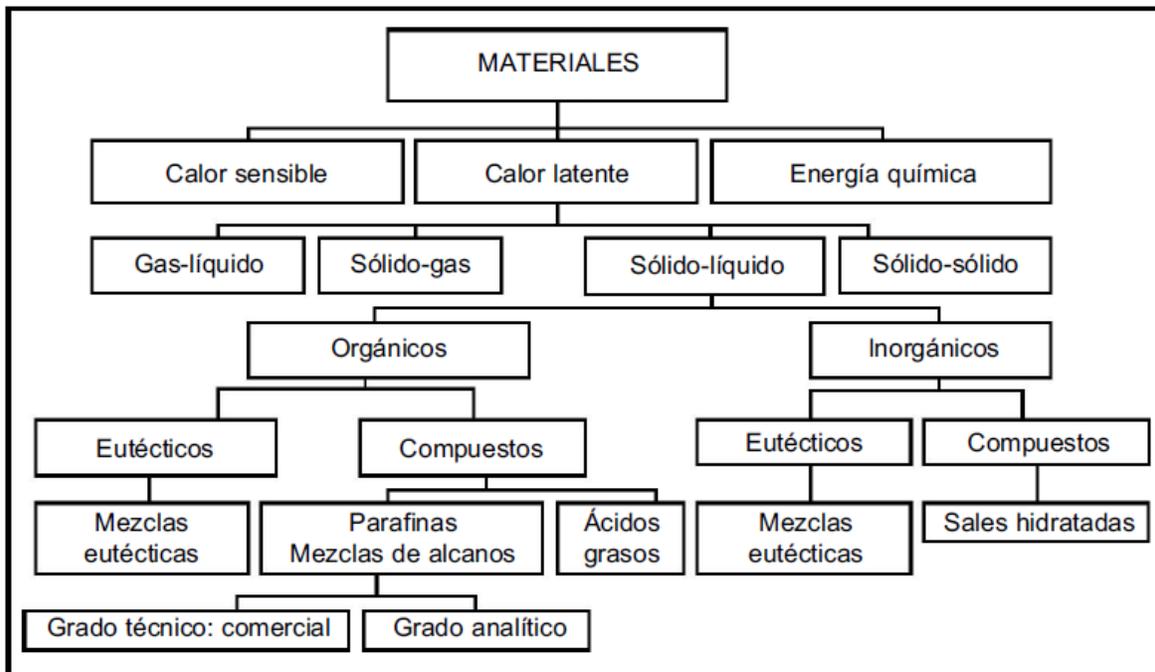


Figura 3.1 Clasificación de las sustancias usadas para el almacenamiento térmico (Abhat 1983)

Las ceras de parafina, se encuentran disponibles en el mercado, sin embargo su calor latente (hasta 200 KJ/Kg), es solo la mitad de las sales hidratadas. [20]

Las sales hidratadas son más económicas que las ceras de parafina, se encuentran disponibles en el mercado, sin embargo sus principales desventajas son su bajo punto de fusión y la corrosión que presentan al estar en contacto con metales. [20,21]

Las mezclas eutécticas se forman de dos componentes con punto de fusión (solidificación), más bajo que el que poseen los compuestos individualmente. Esto hace que la mezcla alcance el punto de congelación más bajo posible y ambos se solidifiquen a esa temperatura eutéctica. [21]

Los ácidos grasos presentan, al igual que las ceras de parafina, un calor latente de aproximadamente 200KJ/Kg, pero son muy caros. [19]

PCM Inorgánicos

Los primeros materiales de almacenamiento térmico utilizaban PCM inorgánicos, principalmente las sales hidratadas como la sal de Glauber, fueron muy estudiadas en las primeras etapas de investigación, por su bajo costo y su capacidad de almacenamiento de grandes cantidades de calor por unidad de volumen, en comparación con las sustancias orgánicas, que las convierten en sustancias idóneas para sus múltiples aplicaciones en el ámbito de almacenamiento de energía solar.

Ninguna sal hidratada solidifica en su punto de congelación, aunque estén sub- enfriadas varios grados por debajo de éste. Así, el líquido sub-enfriado permanece en un estado meta-estable. La introducción de un núcleo cristalino en el PCM, produce una cristalización espontanea en todo el material.

Se han desarrollado técnicas de encapsulado de sales hidratadas, a través de las cuales las partículas de la emulsión o los gránulos se encapsulan en resinas flexibles de poliéster. Y a partir de este diseño se realizan los balances de calor para PCM, [23] como se abordará más adelante.

PCM Orgánicos: Parafinas, ácidos grasos y mezclas orgánicas

Los PCM orgánicos poseen características que los hacen muy útiles en la aplicación de determinados elementos constructivos de almacenamiento de calor latente. Son más estables químicamente que las sustancias inorgánicas, funden y solidifican, sin la necesidad de agentes nucleadores, no sufren sub enfriamiento o histéresis. Se ha demostrado que son más compatibles y más adecuados, para la adsorción en varios modelos constructivos. Aunque el costo inicial de un PCM orgánico es superior al de un inorgánico (los ácidos grasos cuestan el doble de las parafinas) [27].

Sin embargo estos materiales presentan algunas desventajas. La más significativa es que son inflamables y que emiten gases nocivos durante su combustión.

Un importante número de autores han basado su trabajo en materiales orgánicos tales como alcanos, ceras o parafinas [28],[29] y [30]. Dentro de los materiales orgánicos, existe una clase llamada MCPAM (materiales de cambio de fase constituidos por aleaciones moleculares), formado por aleaciones de alcanos que presentan la ventaja de ser termo ajustables [31], es decir que permiten alteraciones a la temperatura de cambio de fase a través de su composición. Existe bastante información sobre este tema en la literatura [32],[33],[34],[35],[36] y [37].

Por lo que se refiere a la temperatura de almacenamiento o de cambio de fase, la transferencia de calor en los acumuladores se puede mejorar la elección del PCM, de tal manera que su temperatura de cambio de fase optimice el gradiente térmico con respecto a la sustancia con la que se intercambia el calor. Farid, Hassan [39]. Por ejemplo, con parafinas y alcanos es posible variar el número de átomos de carbono o formar diferentes aleaciones moleculares que permiten una variación prácticamente continua de la temperatura de cambio de fase en ciertos rangos.

Dentro de los PCM orgánicos se pueden encontrar tres grupos de sustancias diferentes: parafinas, ácidos grasos y mezclas orgánicas.

Las parafinas, son esencialmente un alquino sólido refinado. Presentan dos rangos de enfriamiento, un rango más estrecho para un breve periodo de tiempo, y un rango más extenso que ocurre durante un período más amplio. Ambos se interpretan como una transición de líquido a amorfo-sólido y de sólido amorfo a cristalino sólido, respectivamente [40]. Parte del calor

latente total de fusión se almacena en la sustancia durante cada una de las transiciones. Es importante destacar la diferencia entre el rango de temperatura de congelación medido experimentalmente y los datos disponibles. El resultado es de gran importancia para diseñar y operar sistemas LTES (Latent Thermal Energy Storage, sistemas de almacenamiento de calor latente), que exigen un conocimiento exacto de la temperatura de cambio de fase del material de almacenamiento térmico. [41]

Los ácidos grasos, son derivados de productos animales y vegetales, están constituidos por una larga cadena alifática, más de 12 carbonos. Su cadena alquílica puede ser saturada o insaturada, su fórmula general es $R-COOH$, donde R es el radical alquílico de una cadena larga.

La mayoría de los ácidos grasos naturales poseen un número par de átomos de carbono, esto se debe a que son biosintetizados a partir de acetato ($CH_3CO_2^-$), el cual posee dos átomos de carbono. [42]

En general muestran excelentes características térmicas, el rango de temperatura de refrigeración es amplio, y no se produce sub enfriamiento. Sin embargo estos materiales no han suscitado mucho interés en cuanto a su uso de LTES, por su costo elevado, pudiéndose utilizar en dispositivos especiales de almacenamiento de calor o frío. [43]

Las mezclas de los ácidos grasos son más atractivas para fabricar y comercializar que las mezclas eutécticas. Así (Feldman, Shapiro, et al 1989) han investigado muchas composiciones basadas en los compuestos de ácidos grasos producidos por Henkel Canadá.

Algunas mezclas con ácidos grasos desprenden un fuerte olor, por lo que se han desestimado para utilizarlos como PCM en los paneles. Algunos n – alcanos presentan cambio de fase en estado sólido. El calor de fusión del dodecano, calculado por (Hong H. 2004), es sustancialmente menor que el aportado por (Himran S).

Dentro de los trabajos realizados con materiales orgánicos, existe un conjunto de materiales denominados MCPAM (Materiales de Cambio de Fase Constituidos por Aleaciones Moleculares), formados por aleaciones a base de alcanos, que tienen la ventaja de ser termo ajustables, es decir, que permiten modular la temperatura de cambio de fase a partir de su composición. [44]

La aleación molecular es el material orgánico lo que en una aleación clásica sería el metal. Se trata de una fase única, solución sólida o cristal mixto entre dos o más constituyentes. El elemento básico de la aleación es la molécula, las diferentes moléculas ocupan aleatoriamente los nudos de una red cristalina única. Las moléculas del componente A sustituyen total o parcialmente a las moléculas del componente B (en el caso de una aleación binaria). Para que la aleación sea estable, sus componentes deben responder a criterios estrictos de similitud. [45]

Si los componentes de una aleación presentan calores latentes de transición de fases de primer orden elevados, entonces las aleaciones moleculares elaboradas a partir de ellos presentan a su vez, propiedades muy interesantes para el almacenamiento de energía térmica, por tanto, se trata de un material “termoajustable”, que permite modular la temperatura de almacenamiento y restitución de la energía a partir de su composición. Sobre este aspecto se encuentra bastante información en [46],[47], [48] y [49].

Las principales características que debe cumplir un PCM, para almacenamiento energético son [49]:

FISICAS

- La densidad del líquido y del sólido deben ser similares y preferiblemente elevadas, para poder almacenar mayor cantidad de calor por unidad de volumen.
- Variación de volumen – en el cambio de fase – pequeños, para lograr una fácil incorporación en los materiales.

CINÉTICAS

- Evitar el problema de histéresis, subenfriamiento o retardo al inicio de la solidificación, como ocurre en los PCM inorgánicos, que se produce al no ceder el calor latente de un PCM pese a que su temperatura sea inferior al punto de congelación.
- Poseer suficiente tasa de cristalización: en los PCM inorgánicos se necesitan agentes nucleadores aditivos para que comience a solidificar la sustancia.

QUÍMICAS

- El proceso de cambio de fase debe ser totalmente reversible y solo dependiente de la temperatura.
- Ser químicamente estables en el tiempo evitando su descomposición y contaminación.
- No presentar segregación de fases.
- Ser compatibles con los materiales de encapsulado y otros con los que está en contacto: estabilidad química, para evitar oxidación, descomposición térmica, hidrólisis, corrosión y otras reacciones.
- No inflamables y resistentes al fuego.

TÉRMICAS

- La temperatura de cambio de fase, debe ser adecuada a cada aplicación particular.
- Presentar una temperatura de fusión definida o al menos, el cambio de fase debe producirse en un valor discreto (sustancia pura) o en un pequeño intervalo de temperaturas denominado ventana térmica [45].
- Poseer una gran capacidad de almacenamiento de calor sensible (calor específico) en estado sólido y líquido, una elevada entalpía de cambio de fase, calor latente.
- Poseer una alta conductividad térmica para facilitar la transferencia de calor.

Aplicaciones de los PCM

En general los PCM, tienen múltiples y variados usos, desde la electrónica (para mantener a una temperatura adecuada el dispositivo) [50], hasta la botánica se utilizan como protección térmica de plantas, para evitar heladas invernales [51], también se utilizan para transportar mercancías sensibles a los cambios de temperatura (material sanitario) para la industria alimentaria, en la industria textil se utilizan en la elaboración de prendas deportivas.

Los PCM utilizados como elementos constructivos.

La principal propiedad de los PCM (Baetens, R. 2010) es el almacenamiento de energía térmica en forma latente, lo que lleva a una mejor capacidad de almacenamiento de calor por unidad de volumen que el de los materiales de construcción convencionales. Cuando la temperatura aumenta, los enlaces químicos del material se rompen, y el material cambia de sólido a líquido. Este cambio es un proceso endotérmico y como resultado adsorbe calor, cuando la temperatura baja, el PCM puede volver a recuperar su estado sólido y emite el calor absorbido. Este ciclo estabiliza la temperatura interior y disminuye la carga de energía en horas pico.

Actualmente los gradientes de temperatura asimétricos son una preocupación para garantizar un adecuado confort térmico en el interior de una habitación y se elevan en muchos casos debido a la fluctuación de aire caliente creada por calor convectivo [52].

Los módulos de PCM mantienen la temperatura interior constante por un largo período de tiempo. Se utilizan para acondicionamiento de espacios especialmente sensibles a los cambios de temperatura (Domínguez, García 2000)

Los sistemas de almacenamiento de energía térmica TES acumulan calor, para usarlo en otro momento diferente, logrando con ello equilibrar la demanda energética, estos pueden utilizarse para almacenar frío o calor, y pueden acoplarse con un colector solar y una bomba de calor. Actualmente es un tema de mucho interés en el mercado [53],[54],[55],[56] y [57].

La tendencia a aligerar el peso de los materiales y de los sistemas constructivos, para abaratar costos de producción, tiempos de ejecución, facilitar su manejo y reutilización ha suscitado, el interés de la incorporación de PCM en los sistemas de construcción, con el fin de aumentar su capacidad de almacenamiento térmico, y con ello reducir las elevadas variaciones de temperatura y el consumo energético en los edificios. Sin embargo existen algunas condiciones que limitan la selección de PCM como el calor de fusión, la compatibilidad con los materiales de construcción y la resistencia al fuego (Elmozugui F, Salomon L, et al 2014).

Los PCM se pueden utilizar como envolventes de un edificio, o bien como tipo paneles, una de las primeras aplicaciones en este contexto la realizó Feldman [58], calefacción solar por absorción. El panel consiste en una plancha acrílica con un muro poliédrico, una cámara de aire y un gran aislamiento. En la cámara de aire, se coloca una matriz de tubos que contienen PCM con sal de Glauber. El panel se utiliza para calentar por absorción de la radiación solar durante el día, y recuperar este calor durante la noche colocando un aislamiento entre el panel y el ambiente exterior, haciendo circular el aire entre los tubos y el interior de la habitación.

Se han investigado varios métodos para la incorporación de los PCM en la literatura [59], el autor considera tres métodos prometedores de incorporación: incorporación directa, encapsulado e inmersión, aunque pocos de ellos cuidan el aspecto estético.

Algunos investigadores impregnaron hormigón directamente en el material de cambio de fase, sin embargo puede resultar muy inflamable, ya que algunos PCM, como las ceras de parafina son combustibles (Sayer y Sicar 1990).

El método de inmersión se utiliza principalmente con materiales de construcción porosos (como placas de yeso, ladrillos y hormigón). Estos se sumergen en el PCM derretido en caliente, que absorbe y rellena los poros por capilaridad. El material poroso rellena con PCM líquido y se deja enfriar, permaneciendo el PCM en los poros del material constructivo. La ventaja de este método es que permite convertir un panel ordinario en un panel de PCM, ya que la impregnación puede hacerse prácticamente en cualquier lugar y en cualquier momento. El principal inconveniente de este proceso es el tiempo necesario de inmersión del hormigón en el PCM, ya que dura varias horas. (Hadjieva, Stoykov et al. 2000).

Para evitar inconvenientes de los PCM en los materiales constructivos, pueden encapsularse antes de ser incorporados. En los últimos años se han desarrollado investigaciones sobre el encapsulamiento de los PCM en polímeros. La propuesta de extender las aplicaciones de los PCM de los sistemas de encapsulación térmica, encapsulando PCM es quizá una solución al problema de transmisión térmica en el medio de almacenamiento.

Para contener los PCM, los polímeros pueden presentarse en forma de macro o micro encapsulados.

Limin Zhong and Xiaowei Zhang [2014], en el presente trabajo, tres tipos de materiales compuestos hechos de grafito expandido y sales fundidas binarias se prepararon por el método de impregnación en solución como una especie de mezcla heterogénea porosa, materiales de cambio de fase de material compuesto. Se usó el grafito expandido como la matriz porosa para mejorar la conductividad y prevenir la fuga del líquido en sales fundidas, los resultados mostraron que los materiales compuestos preparados, porosos y heterogéneos poseen excelentes propiedades de cambio de fase. Y realizaron un modelo (ver ecuación 30), en el que relacionan el cambio de entalpía de la mezcla (calor latente de fusión) y el cambio de entalpía del PCM puro (entalpía de cristalización), y describen a los materiales con una eficiencia de impregnación, la cual se encuentra en función del cambio de las entalpías de los PCM puros y compuestos (ver ecuación 31).

$$q_{\text{en sales binarias}} = \frac{\Delta H_{m \text{ Compuesto PCM}}}{\Delta H_{m \text{ puro de PCM}}} \quad (30)$$

Donde:

$q_{\text{en sales binarias}}$ = Calor intrínseco de los materiales

$\Delta H_{m \text{ compuesto con PCM}}$ = Calor latente de fusión del material compuesto con PCM

$\Delta H_{m \text{ puro con PCM}}$ = Entalpía de cristalización del material puro de PCM

Entonces la eficiencia de impregnación R, ésta dada por la siguiente ecuación:

$$R = \frac{\Delta H_{m \text{ Compuesto PCM}} + \Delta H_{c \text{ compuesto del PCM}}}{\Delta H_{m \text{ puro de PCM}} + \Delta H_{c \text{ puro de PCM}}} \quad (31)$$

Con este modelo se calculó el calor y la eficiencia de los PCM, compuestos de sales binarias, al crear un panal tipo nido de abeja por impregnación.

Pincemin et al. [2008], calcula la intensidad de la conductividad térmica por impregnación como la intensidad de la conductividad térmica del material compuesto, sobre la conductividad térmica pura del PCM, esta ecuación fue tomada por Zhong en el análisis de su modelo. Con ellos se concluye que la impregnación de material de cambio de fase, genera una estructura de nido de abeja, la cual posee gran estabilidad térmica.

K. Nithyanandam and R. Pitchumani [2014], en general, este estudio ilustra una metodología para el diseño y optimización de encapsulado en un sistema de almacenamiento de energía térmica, el cual considera las propiedades del material, tales como: la densidad, la conductividad y la temperatura, se considera al PCM encapsulado y se toma en cuenta su calor latente de fusión

con respecto al tiempo. Estos autores en su modelo consideran el factor de la porosidad (ϵ), el cual introdujeron en un artículo previo.

Ali F. Elmozughi and Laura Solomon [2014] sugieren un efecto de expansión térmica y de volumen debido al cambio de energía durante el proceso de almacenamiento, por tal razón sugieren un modelo, que considera la entalpía, la porosidad y el volumen del fluido, con ello se calculan los efectos de transporte dentro de la capsula de PCM, incluyendo el vacío. La introducción del vacío tiene profundos efectos en la respuesta térmica del PCM en el almacenamiento de energía y en el proceso de recuperación. Debido a que el proceso de fusión solidificación lleva más tiempo cuando el vacío está presente.

Xiangfei Kong and Shilei Lu [2014], realizan un análisis teórico de las variaciones de la temperatura en la pared y el techo, donde se tienen paneles de ácido caprico instalados, como material de cambio de fase. Koo et al.[2011] valida experimentalmente una simulación para una pared de PCM, con la finalidad de encontrar los efectos de diversos parámetros de estos materiales, incluyendo la temperatura nominal promedio de cambio de fase y los coeficientes de transferencia de calor por convección. Lamberg et al. [2004] estudiaron y compararon dos métodos generales, es decir, el método de entalpía y el método de capacidad de calor, encontraron que los métodos numéricos tuvieron un buen desempeño en los procesos de cambio de fase, pero el método de la capacidad efectiva del calor genero un resultado más preciso. Zalba et al. [2003] revisaron las teorías y simulaciones para la transferencia de calor de los materiales de cambio de fase, y presentaron las ventajas de utilizar el método de entalpía en el modelo de simulación para las ecuaciones de energía en el trato con la fusión del PCM y la solidificación.

Chen et al. [2008] utiliza el método de la capacidad efectiva del calor un modelo matemático no lineal unidimensional de calor con conducción del acumulador de energía PCM paneles de yeso, el autor ha indicado que la pared norte es la mejor opción para colocar el panel con material de cambio de fase.

Capítulo IV. Análisis de modelos con material de cambio de fase en construcción

Para cuantificar la viabilidad técnica y económica en aplicaciones de construcción, se han desarrollado modelos computacionales, mismos que se pueden integrar en simulaciones energéticas, con la finalidad de estudiar el proceso de cambio de fase de una manera más integral.

En el presente capítulo se revisan los diferentes métodos de modelado que generalmente se utilizan para simulaciones de PCM. Son pocos los métodos que describe la literatura estos incluyen el método de la entalpía, el método de la capacidad de calor, el modelo transformado de la temperatura y el método de la fuente de calor . Algunos de estos métodos han sido integrados a programas computacionales como EnergyPlus, TRNSYS, ESP-r, entre otros, cabe señalar que algunos son más precisos que otros como se verá más adelante.

El almacenamiento de energía térmica o masa térmica es una propiedad de los materiales, la cual describe su capacidad para absorber, almacenar y liberar calor dependiendo de las condiciones ambientales que lo rodean. La arquitectura tradicional, por ejemplo se distingue por su gran peso y los elementos constructivos térmicamente masivos, para modelar los extremos interiores del entorno en días calurosos o fríos. Las propiedades térmicas de los elementos de construcción ha mejorado significativamente el confort térmico mediante la manipulación de la temperatura interior del aire, sin la necesidad de sistemas mecánicos de aire acondicionado [60]

Una masa térmica dinámica, como los materiales de cambio de fase (PCM), ha sido considerada una tecnología prometedora para reducir la deficiencia heredada en los edificios de peso ligero.

La principal ventaja del uso de PCM es la cantidad de calor latente, que este puede almacenar en una delgada capa, en comparación a la de un material de almacenamiento de calor sensible como el hormigón. Sin embargo han surgido varios desafíos al utilizar PCM en edificios, tales como la variedad de materiales disponibles, la responsabilidad del material, el costo y la viabilidad económica y configuraciones de diseño, integración con otras tecnologías de energía sustentable, impacto en el rendimiento térmico y la energía. El problema puede ser considerado como un dilema de optimización, donde todos estos desafíos se están convirtiendo en el punto crítico del diseño, razón por la cual los modelos computacionales son una herramienta eficaz para comprender cuantitativamente, el problema de optimización.

En el presente capítulo se revisan sistemáticamente las teorías y las técnicas de modelado generales para los PCM, con énfasis en modelos específicos que se utilizan para simular el comportamiento térmico.

El método de la entalpía

En este método, el calor latente y específico se combinan en un término, es decir, la entalpía la cual genera una ecuación de gobierno. Dicho método fue propuesto por Eyres [61] para hacer frente a las variaciones de las propiedades térmicas respecto a la temperatura. La transferencia de calor por conducción – está dada, por las ecuaciones

La transferencia de calor en la fase sólida

$$(\rho)(C_s)\left(\frac{\partial T_s}{\partial t}\right) = \frac{\partial}{\partial x}\left[(K_s)\left(\frac{\partial T_s}{\partial x}\right)\right] \quad (32)$$

La transferencia de calor en la fase líquida

$$(\rho)(C_L)\left(\frac{\partial T_L}{\partial t}\right) = \frac{\partial}{\partial x}\left[(K_L)\left(\frac{\partial T_L}{\partial x}\right)\right] \quad (33)$$

La condición de Stefan, que rige el balance de calor en la interfase sólido - líquido es:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[(K_s)\left(\frac{\partial T_s}{\partial x}\right)\right](n) - \frac{\partial}{\partial x}\left[(K_L)\left(\frac{\partial T_L}{\partial x}\right)\right](n) = \rho L V n \quad (34)$$

Donde: ρ = densidad, C = capacidad de calor específica, T = temperatura, t =tiempo, K = Conductividad térmica, n = vector normal sobre la interfaz de la fase, V = Velocidad de la interface y L = calor latente de fusión. Los subíndices s y l se utilizan para identificar la fase líquida o la sólida.

El problema puede ser reformulado en una sola ecuación en la que el calor latente se absorbe en el término entalpía de la siguiente manera:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(K \frac{\partial T}{\partial x}\right) \quad (35)$$

Dónde: h = entalpía

La ecuación anterior se discretiza utilizando el método de volumen de control, para una red típica, obteniendo la siguiente ecuación:

$$h_p^{n+1} = h_p^n + a_w^{n+1} x T_w^{n+1} + a_p^{n+1} x T_p^{n+1} + a_e^{n+1} x T_e^{n+1} \quad (36)$$

De la ecuación anterior se puede observar que la entalpía actual, depende del valor actual de la temperatura, por lo tanto el término de la entalpía es no lineal, la ecuación no puede resolverse sin la necesidad de utilizar técnicas numéricas adecuadas para manejar esta no linealidad. Lo

anterior debe ser resuelto ya sea por solucionadores no lineales tales como el método de Newton o linealizando los términos no lineales y la utilización de métodos iterativos.

Alexiades Y Salomón [62], han descrito esquemas numéricos para la solución de problemas con cambio de fase con el método de la entalpía utilizando enfoques lineales y no lineales para resolver el problema de Stefan.

La última ecuación nos muestra un análisis nodal para el sistema con PCM. Shamsunder [63] propuso un esquema iterativo de Gauss-Seidel, donde la solución va de lado a lado para determinar el estado de cambio de fase y posteriormente determinar el nuevo estado nodal de la entalpía – temperatura.

El método de la capacidad de Calor

El método de la capacidad de calor aparente se introdujo por Hashemi y Sliepceovich [64], para resolver la transferencia de calor unidimensional con cambio de fase en una región blanda. La ecuación unidimensional de transferencia de calor por conducción dominante, que incluye la capacidad de calor aparente puede ser escrita como:

$$\rho x C^A (T) x \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (37)$$

Donde: ρ = densidad, C^A = capacidad de calor aparente, T = temperatura, t = tiempo, x = distancia

Como se observa en la ecuación anterior la temperatura es la única variable, que necesita ser resuelta en forma discretizada. La clave de este enfoque radica en la aproximación de la capacidad de calor aparente de la ecuación (37): las relaciones analíticas / empíricos y las aproximaciones numéricas.

Las relaciones analíticas /empíricos

La capacidad calorífica de un PCM se puede determinar a partir de los datos de las pruebas con calorímetros de exploración diferencial (DSC). Los fabricantes de PCM, normalmente proporcionan datos limitados de sus propiedades tales como la temperatura de fusión, el calor de fusión y la capacidad de calor en estado sólido y líquido. Con estos mínimos datos se puede aproximar la capacidad calorífica de un PCM, mediante una simple relación directa, con una introducción ficticia de un rango de temperatura de fusión [65 y 66].

Las aproximaciones numéricas

La aproximación numérica es una alternativa cuando la información detallada acerca de los comportamientos térmicos de los PCM están disponibles. Se han propuesto muchas aproximaciones numéricas en la literatura [67, 68 y 69]. Por ejemplo, Comini [68] aplica una técnica numérica con el método de elemento finito, donde la capacidad calorífica se determinó

usando un derivado de la entalpía con respecto a la temperatura. Más tarde Morgan [69] mejoró la relación para evitar problemas de convergencia. Cuando se utiliza un esquema iterativo, la capacidad de calor se puede aproximar utilizando las soluciones sucesivas de temperatura entalpía. El promedio temporal propuesto por Morgan [69] se ilustra en la figura 4.1, y está representado con la siguiente ecuación:

$$C^A = \frac{\Delta h}{\Delta T} = \frac{h^n - h^{n-1}}{T^n - T^{n-1}} \quad (38)$$

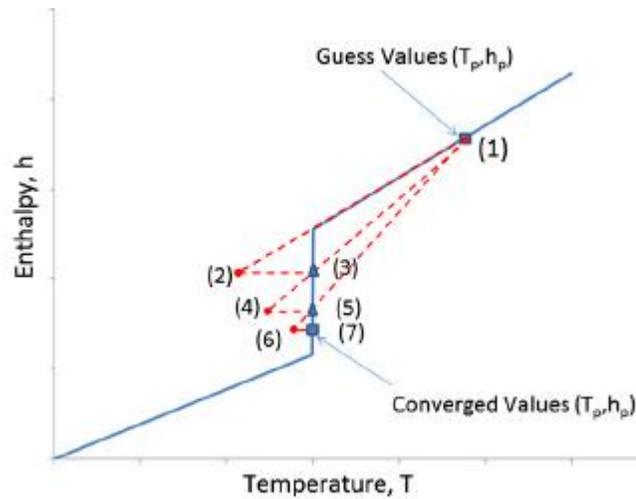


Figura 4.1. Soluciones sucesivas de Temperatura – Entalpía

Por otro lado, Lemmon [70] propone una aproximación basada en la media del espacio en lugar del enfoque del tiempo promedio, sin embargo estas aproximaciones presentan algunos problemas en la convergencia, si no se toman algunas precauciones [71]

Modelo de la transformación de la temperatura

Fue desarrollado por Cao y Faghri [72] para superar el tiempo y las limitaciones espaciales en el método de la capacidad de calor. El modelo ha sido utilizado por Faghri y sus compañeros de trabajo en algunas aplicaciones [73,74]. El método también es llamado “Método mejorado basado en la temperatura de la capacidad térmica equivalente” [75]. El método fue probado contra varios ejemplos de referencia, se ha observado que produce resultados inconsistentes

especialmente cuando se considera la transferencia de masa a través de los PCM. Se propusieron correcciones para mejorar la precisión [76]. La clave de este método es que la ecuación (35) la de energía se transforme en una ecuación no lineal, con una sola variable dependiente “ La Temperatura”, como se muestra a continuación:

$$\rho x C_{eff}(T) x \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \rho x \frac{\partial S}{\partial t} \quad (39)$$

Donde: ρ = densidad, C_{eff} = Capacidad Calorífica efectiva, T =temperatura, t = tiempo, K = conductividad térmica, S = término fuente.

El término fuente está representado por la siguiente ecuación

$$S(T) = \left\{ \begin{array}{l} C_s x \varepsilon \quad T < T_m - \varepsilon \\ \left(\frac{C_s + C_1}{2} \right) x \varepsilon + \frac{L}{2} \quad T_m - \varepsilon < T < T_m + \varepsilon \\ C_1 + \varepsilon + L \quad T > T_m + \varepsilon \end{array} \right\} \quad (40)$$

El calor latente durante la etapa de cambio de fase está representado por un término fuente (S), el cual gobierna el término de la capacidad de calor, muy similar a lo que ocurre en el método de la capacidad de calor aparente. Sin embargo el método no se utiliza comúnmente, pero ofrece una solución alternativa en comparación con el método de la capacidad de calor aparente.

El método de la fuente de calor

Utilizando el método de la fuente de calor, la entalpía total, que rige la ecuación (32). Se divide en calor específico y calor latente, donde el calor latente actúa como un término fuente [77 y 78], convirtiendo así la ecuación (35) en:

$$\rho x C_{avg} x \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \rho x L x \frac{\partial f_1}{\partial t} \quad (41)$$

El método se le atribuye a Eyres [61] a mediados de 1940. En los esquemas populares, el frente de cambio de fase se realiza un seguimiento de la evaluación de un campo de fracción líquida nodal que tiene un valor de 0 para el sólido y de 1 para el líquido, por lo tanto se tendrá un rango de [0-1] en la región blanda [79 y 80]. Bajo este enfoque se linealiza la fracción fluida y la ecuación puede resolverse de forma iterativa con la temperatura. La fracción líquida se puede aproximar utilizando la siguiente ecuación auxiliar

$$f_l = \left\{ \begin{array}{l} 0 \quad \text{si } T \leq T_m - \varepsilon \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} \quad \text{si } T_m - \varepsilon < T < T_m + \varepsilon \\ 1 \quad \text{si } T \geq T_m + \varepsilon \end{array} \right\} \quad (42)$$

Al discretizar la ecuación 42, con un esquema totalmente implícito y linealizar el término de “la fracción líquida”, en el paso de la hora actual, la ecuación discretizada se convierte en una ecuación lineal, la cual necesita ser resuelta para la temperatura de manera iterativa con la fracción líquida. Costa [81] ha utilizado este método para simular numéricamente el almacenamiento térmico de calor latente.

Como se puede observar a lo largo de este capítulo en la actualidad existen una variedad de modelos para diferentes tipos de construcción, los cuales han sido desarrollados utilizando enfoques simples, intermedios y sofisticados. Sin embargo se han sugerido muy pocos modelos simplificados, debido a la complejidad de aproximar el proceso de transferencia de calor asociado con un cambio de fase.

Hasta ahora todos los modelos presentan deficiencias, es decir, no existe un modelo con el cual se puedan resolver todos los problemas con cambio de fase, todos presentan limitaciones, en las condiciones de frontera o en el tamaño de paso a elegir, durante el proceso.

Por tales razones, se propone en el presente documento, modelar el cambio de fase, con el método del volumen de control (El cual se encuentra especificado en el capítulo VI)

El método de volumen de control, considera a los diferentes materiales de la pared compuesta, como una misma pared, es decir, la ecuación que rige el modelo no se acopla a ninguna otra, por ejemplo, el método toma las características y propiedades de un material, una vez que se ha cambiado de material en la pared, el método vuelve a considerar las características y las propiedades del nuevo material, esto se logra en un sistema de nodos, es decir, donde termina un material empieza un nuevo nodo, para que esto sea posible se debe considerar el espesor de cada material en la pared compuesta. Esta condición de frontera no es clásica, debido a que las condiciones de frontera clásicas suelen fallar, tal y como se ha descrito en el presente capítulo.

La condición propuesta en el método del volumen de control se aplica de manera más real a lo que ocurre en la interface de los materiales.

Capítulo V. Construcción y análisis del modelo obtenido

A continuación se presentan las ecuaciones instantáneas locales para el sistema constructivo, planteado, al inicio de esta tesis.

Está integrada principalmente por PCM y aire, a continuación se presentan las ecuaciones que describen la transferencia de calor a través de estos materiales.

El cambio de temperatura en el material con cambio de fase está dado por:

$$(\rho Cp)_{pcm} \frac{\partial T_{pcm}}{\partial t} = k_{pcm} \nabla^2 T_{pcm} + q''' \quad (43)$$

Donde $(\rho Cp)_{pcm}$ es la densidad y el calor específico del PCM, T_{pcm} es la temperatura del PCM, t es el tiempo, k_{pcm} es la conductividad térmica del PCM y q''' es la suma de las fuentes de calor.

El cambio de temperatura en el aire está dado por:

$$(\rho Cp)_a \left(\frac{\partial T_a}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T_a \right) = k_a \nabla^2 T_a \quad (44)$$

Donde $(\rho Cp)_a$ es la densidad y el calor específico del aire, T_a es la temperatura del aire, \vec{v} es la velocidad del aire y k_a es la conductividad térmica del aire.

Las ecuaciones (43) y (44) están ligadas mediante la condición de frontera:

$$-\vec{n}_{pa} \cdot k_{pcm} \nabla T_{pcm} = -\vec{n}_{pa} \cdot k_a \nabla T_a \quad (45)$$

Donde \vec{n}_{pa} es el vector normal unitario.

Para la capa de concreto se tiene:

$$(\rho Cp)_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = k_c \nabla^2 T_c \quad (46)$$

Donde $(\rho Cp)_c$ es la densidad y el calor específico del concreto, T_c es la temperatura del concreto y k_c es la conductividad térmica del concreto. (norma)

Condición interfacial entre el concreto y el aire de la habitación:

$$-\vec{n} \cdot k_c \nabla T_c = h(T_c - T_\infty) \quad (47)$$

Método de Escalamiento

La temperatura promedio del PCM en el volumen de total (PCM+aire) es:

$$\langle T_{PCM} \rangle = \frac{1}{V} \int_{V_{pcm}} T_{pcm} dV \quad (48)$$

La temperatura promedio de la PCM en el PCM está dada por:

$$\langle T_{pcm} \rangle^P = \frac{1}{V_{pcm}} \int_{V_{pcm}} T_{pcm} dV \quad (49)$$

Estos dos promedios se relacionan por medio de:

$$\langle T_{pcm} \rangle = \varepsilon_{pcm} \langle T_{pcm} \rangle^P \quad (50)$$

Donde ε_p es la fracción volumen del PCM y se define como:

$$\varepsilon_p = \frac{\frac{1}{V} \int_{V_{pcm}} T_{pcm} dV}{\frac{1}{V_{pcm}} \int_{V_{pcm}} T_{pcm} dV} \quad (51)$$

Lado izquierdo ecuación (43):

$$\left\langle \frac{\partial T_{pcm}}{\partial t} \right\rangle = \frac{1}{V} \int_V \frac{\partial T_{pcm}}{\partial t} dV \quad (52)$$

Aplicando el teorema de Leibniz

$$\left\langle \frac{\partial T_p}{\partial t} \right\rangle = \frac{\partial \langle T_p \rangle}{\partial t} + \frac{1}{V} \int_{A_{pa}} T_p \vec{w} \cdot \vec{n}_{pa} dA \quad (53)$$

Pero si (coeficiente de expansión volumétrico) $\bar{w} = 0$:

$$\left\langle \frac{\partial T_{pcm}}{\partial t} \right\rangle = \frac{\partial \langle T_{pcm} \rangle}{\partial t} \quad (54)$$

O bien

$$\left\langle \frac{\partial T_{pcm}}{\partial t} \right\rangle = \varepsilon_p \frac{\partial \langle T_{pcm} \rangle^p}{\partial t} \quad (55)$$

Primer término (lado derecho) ecuación (54):

$$\nabla^2 T_{pcm} = \nabla \cdot (\nabla T_{pcm}) \quad (56)$$

$$\langle \nabla \cdot (\nabla T_{pcm}) \rangle = \frac{1}{V} \int_V \nabla \cdot (\nabla T_{pcm}) dV \quad (57)$$

$$\langle \nabla \cdot (\nabla T_{pcm}) \rangle = \nabla \cdot \langle \nabla T_{pcm} \rangle + \frac{1}{V} \int_{A_{pa}} (\nabla T_{pcm}) \cdot \bar{n}_{pa} dA \quad (58)$$

$$\langle \nabla \cdot (\nabla T_{pcm}) \rangle = \nabla \cdot \left\{ \nabla \langle T_{pcm} \rangle + \frac{1}{V} \int_{A_{pa}} T_p \cdot \bar{n}_{pa} dA \right\} + \frac{1}{V} \int_{A_{pa}} (\nabla T_{pcm}) \cdot \bar{n}_{pa} dA \quad (59)$$

$$\langle \nabla \cdot (\nabla T_{pcm}) \rangle = \nabla^2 \langle T_{pcm} \rangle + \nabla \cdot \left\{ \frac{1}{V} \int_{A_{pa}} T_{pcm} \cdot \bar{n}_{pa} dA \right\} + \frac{1}{V} \int_{A_{pa}} (\nabla T_{pcm}) \cdot \bar{n}_{pa} dA \quad (60)$$

Reescribiendo la ecuación (43) se tiene:

$$\begin{aligned} (\rho C p)_{pcm} \varepsilon_p \frac{\partial \langle T_{pcm} \rangle^p}{\partial t} = \\ k_{pcm} \left(\nabla^2 \langle T_p \rangle + \nabla \cdot \left\{ \frac{1}{V} \int_{A_{pa}} T_p \cdot \bar{n}_{pa} dA \right\} + \frac{1}{V} \int_{A_{pa}} (\nabla T_p) \cdot \bar{n}_{pa} dA \right) + \langle q^m \rangle \end{aligned} \quad (61)$$

Si se define una densidad de área interfacial como:

$$a_{pa} = \frac{A_{pa}}{V} \quad (62)$$

Entonces:

$$\frac{k_{pcm}}{V} \int_{A_{pa}} (\nabla T_{pcm}) \cdot \vec{n}_{pa} dA = \bar{q}_{pa} a_{pa} \quad (63)$$

por otro lado:

$$k_p \left(\nabla^2 \langle T_p \rangle + \nabla \cdot \left\{ \frac{1}{V} \int_{A_{pa}} T_p \cdot \vec{n}_{pa} dA \right\} \right) = k_p \nabla^2 \langle T_p \rangle + k_{pa} \nabla^2 \langle T_a \rangle \quad (64)$$

reescribiendo la ecuación (61):

$$(\rho C_p)_{pcm} \varepsilon_p \frac{\partial \langle T_{pcm} \rangle^p}{\partial t} = k_{pcm} \nabla^2 \langle T_{pcm} \rangle + k_{pa} \nabla^2 \langle T_a \rangle + \bar{q}_{pa} a_{pa} + \langle q''' \rangle \quad (65)$$

pero $\langle T_{pcm} \rangle = \varepsilon_p \langle T_{pcm} \rangle^p$, por lo tanto:

$$(\rho C_p)_{pcm} \varepsilon_p \frac{\partial \langle T_{pcm} \rangle^p}{\partial t} = k_{pcm} \varepsilon_p \nabla^2 \langle T_p \rangle^p + k_{pa} \varepsilon_a \nabla^2 \langle T_a \rangle^a + \bar{q}_{pa} a_{pa} + \varepsilon_p \langle q''' \rangle^p \quad (66)$$

Si realizamos el balance en la fase aire tenemos:

Aplicando el mismo procedimiento a la ecuación (44) se tiene:

$$(\rho C_p)_a \varepsilon_a \frac{\partial \langle T_a \rangle^a}{\partial t} = k_a \varepsilon_a \nabla^2 \langle T_a \rangle^a + k_{ap} \varepsilon_p \nabla^2 \langle T_{pcm} \rangle^p + \bar{q}_{ap} a_{ap} \quad (67)$$

Considerando equilibrio termodinámico, es decir $\langle T_{pcm} \rangle^p = \langle T_a \rangle^a = T_H$

Sumando las ecuaciones (66) y (67) se obtiene:

$$\left(\rho_{pcm} C_{p_{pcm}} \varepsilon_p + \rho_a C_{p_a} \varepsilon_a \right) \frac{\partial T_H}{\partial t} = (k_{pcm} \varepsilon_p + k_a \varepsilon_a) \nabla^2 T_H + k_{pa} \varepsilon_p \nabla^2 \langle T_a \rangle^a + k_{ap} \varepsilon_a \nabla^2 \langle T_{pcm} \rangle^p + \bar{q}_{pa} a_{pa} + \bar{q}_{ap} a_{ap} + \varepsilon_p \langle q''' \rangle^p \quad (68)$$

pero:

$$q_{pa} = \sigma \left(\langle T_{pcm} \rangle^p - \langle T_a \rangle^a \right) \quad (69)$$

pero se puede definir propiedades efectivas:

$$k_{ef} = (k_{pcm} \varepsilon_p + k_a \varepsilon_a) \quad (70)$$

$$(\rho Cp)_{ef} = (\rho_p Cp_p \varepsilon_p + \rho_a Cp_a \varepsilon_a) \quad (71)$$

y además el calor que gana o pierde el PCM es el calor que pierde o gana el aire:

$$\vec{q}_{pa} a_{pa} = -\vec{q}_{ap} a_{ap} \quad (72)$$

se tiene:

$$(\rho Cp)_{ef} \frac{\partial T_H}{\partial t} = k_{ef} \nabla^2 T_H + \varepsilon_p \langle q^m \rangle^p \quad (73)$$

Está ecuación es válida de (rango de temperatura, donde el límite superior es punto de fusión del PCM y el límite inferior es el punto de solidificación) después de este intervalo (ya sea hacia abajo o hacia arriba) la temperatura se mantiene constante hasta que se sale de la campana.

Con estas ecuaciones se validará el modelo propuesto, elaborando un programa en fortran, que nos permita observar el comportamiento del PCM, aún se evalúa el material para realizar la simulación debido a que se necesitan todas sus propiedades físicas, químicas y termodinámicas.

Capítulo VI. Método de solución numérico (Volumen de Control)

En ciencia y la tecnología se describen fenómenos reales mediante modelos matemáticos. El estudio y análisis de los modelos matemáticos permite un conocimiento más profundo de los fenómenos, así como de su evolución en el futuro o su historia en el pasado. Desafortunadamente, no siempre es posible aplicar métodos analíticos clásicos, para hallar la solución de los modelos, por diferentes razones:

- No se adecúan al modelo concreto.
- Su aplicación resulta excesivamente compleja.
- La solución formal es tan complicada que hace imposible cualquier interpretación posterior.
- Simplemente no existen métodos analíticos capaces de proporcionar soluciones al problema.

En estos casos son útiles los métodos numéricos, que mediante una labor de cálculo más o menos intensa, conducen a soluciones aproximadas. El importante esfuerzo de cálculo que implica la mayoría de estos métodos hace que su uso esté íntimamente ligado al empleo de computadoras.

Algunos de los métodos numéricos empleados para resolver modelos matemáticos que contienen ecuaciones diferenciales son: Euler, Taylor, Runge-Kutta, Adams-Bashford, Adams-Moulton, entre otros.

En la presente sección se estudia el método del volumen de control.

Método del volumen de control

En el método numérico de volumen de control consiste en dividir el dominio de cálculo en un cierto número de volúmenes que no se traslapan entre sí, de tal manera que se rodea a cada punto de la malla. El método consiste en la integración de la ecuación diferencial sobre el volumen de control con el fin de realizar ciertas suposiciones válidas a esa escala. Los segmentos de perfiles expresan la variación de algún parámetro entre los puntos de la malla, estos se usan para evaluar las integrales requeridas. A continuación se muestran algunos ejemplos.

Solución numérica en estado estacionario y unidimensional

A continuación se presenta como se aplica el método del volumen de control considerando conducción de calor en estado estacionario y en una dirección:

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) + S = 0 \quad (74)$$

donde k es la conductividad térmica, T es la temperatura y S es el calor generado por unidad de volumen.

Para derivar la forma discreta de la ecuación se emplea un esquema como el que se ilustra en la Figura 1 donde los puntos en la malla son nombrados según las coordenadas cardinales siendo el punto P el centro, la distancia que separa a W de P se denomina $(\delta x)_W$ y la distancia que separa P de E se denomina $(\delta x)_E$ asimismo los puntos de la cuadrícula w y e están separados entre sí una distancia Δx .

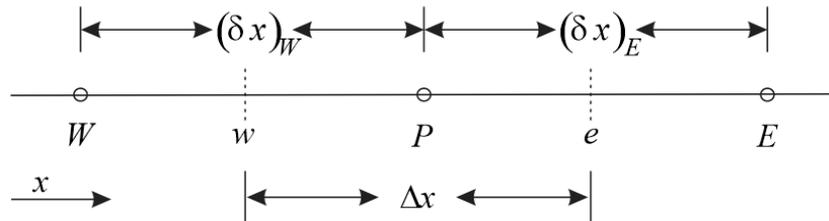


Figura 6.1. Esquema del volumen de control unidimensional.

Así al integrar la Ec. (74) sobre el volumen de control se tiene:

$$\int_w^e \frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) dx + \int_w^e S dx = 0 \quad (75)$$

Resolviendo la primera integral del lado izquierdo se tiene:

$$\left(k \frac{dT}{dx} \right)_e - \left(k \frac{dT}{dx} \right)_w + \int_w^e S dx = 0 \quad (76)$$

Sin embargo es posible sustituir los dos primeros términos de la Ec. (76) por una aproximación considerando que es válido geoméricamente lo que se muestra en la Figura 6.2.

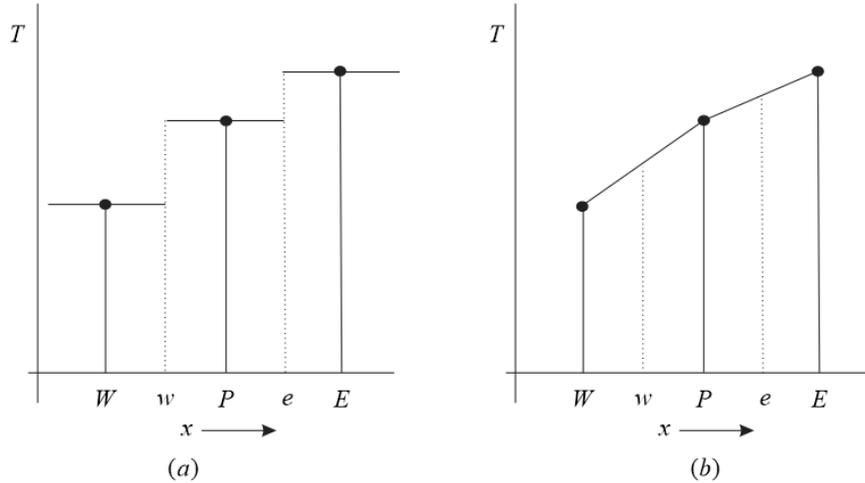


Figura 6.2. Dos ejemplos de perfiles (a) perfil escalonado, (b) perfil lineal por tramos.

En la Figura 6.2a se muestra un perfil escalonado, para este perfil la pendiente $\frac{dT}{dx}$ no está definida en las caras del volumen de control, es decir, en w o e . La Figura 6.2b no tienen la dificultad anterior ya que se emplea una función de interpolación lineal entre los puntos de la cuadrícula.

Por ejemplo, la derivada de la temperatura con respecto a x en el punto e puede ser aproximada por la diferencia de temperaturas entre los puntos E y P sobre la distancia que se encuentran separados estos dos puntos $(\delta x)_E$ (Figura 6.1). Un tratamiento similar se aplica para el punto w obteniéndose:

$$\left(k \frac{dT}{dx} \right)_e = \frac{k_e (T_E - T_P)}{(\delta x)_E} \quad (77)$$

$$\left(k \frac{dT}{dx} \right)_w = \frac{k_w (T_P - T_W)}{(\delta x)_W} \quad (78)$$

sustituyendo las Ecs. (77) y (78) en la Ec. (76) e integrando se tiene:

$$\frac{k_e (T_E - T_P)}{(\delta x)_E} - \frac{k_w (T_P - T_W)}{(\delta x)_W} + \bar{S} \Delta x = 0 \quad (79)$$

La Ec. (79) es la ecuación discretizada de conducción de calor en estado estacionario y una sola dirección. Renombrando los términos de la siguiente forma:

$$a_E = \frac{k_e}{(\delta x)_E} \quad (80)$$

$$a_W = \frac{k_w}{(\delta x)_W} \quad (81)$$

$$a_p = a_E + a_W \quad (82)$$

$$b = \bar{S} \Delta x \quad (83)$$

así desarrollando la Ec. (79) se tiene:

$$\frac{k_e T_e}{(\delta x)_E} - \frac{k_e T_p}{(\delta x)_E} + \frac{k_w T_w}{(\delta x)_W} - \frac{k_w T_p}{(\delta x)_W} + \bar{S} \Delta x = 0 \quad (84)$$

sustituyendo las Ecs. (80), (81) y (83) en (84) se tiene:

$$a_E T_e - a_E T_p + a_W T_w - a_W T_p + b = 0 \quad (85)$$

reacomodando la Ec. (85) se tiene:

$$a_E T_e + a_W T_w + (-a_E T_p - a_W T_p) + b = 0 \quad (86)$$

$$(a_E T_p + a_W T_p) = a_E T_e + a_W T_w + b \quad (87)$$

sustituyendo la Ec. (82) en la Ec. (87) se tiene finalmente:

$$a_p T_p = a_E T_e + a_W T_w + b \quad (88)$$

Solución numérica en estado transitorio y unidimensional

A continuación se presenta como se aplica el método del volumen de control para un caso unidimensional transitorio de conducción de calor:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) + S \quad (89)$$

Al integrar sobre el volumen de control en el tiempo t y $t + \Delta t$, considerando un valor de ρC_p constante se tiene:

$$\rho C_p \int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T}{\partial t} dt dx = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) dx dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e S dx dt \quad (90)$$

Integrando el término del lado izquierdo de la Ec. (90) se tiene:

$$\rho C_p \int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T}{\partial t} dt dx = \rho C_p \int_w^e \left(T_P^{t+\Delta t} - T_P^t \right) dx \quad (91)$$

pero considerando que $\left(T_P^{t+\Delta t} - T_P^t \right)$ es constante con respecto a x , al integrar el lado derecho de la Ec. (91) de e a w se tiene que la integral es igual a Δx , como se ilustra en la Figura 6.1, por lo tanto:

$$\rho C_p \int_w^e \left(T_P^{t+\Delta t} - T_P^t \right) dx = \rho C_p \left(T_P^{t+\Delta t} - T_P^t \right) \Delta x \quad (92)$$

ahora integrando el primer término del lado derecho de la Ec. (90) se tiene:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) dx dt = \int_t^{t+\Delta t} \left[\left(k \frac{dT}{dx} \right)_e - \left(k \frac{dT}{dx} \right)_w \right] dt \quad (93)$$

considerando que al igual que en el caso anterior son válidas las aproximaciones (77) y (78) se tiene:

$$\int_t^{t+\Delta t} \left[\left(k \frac{dT}{dx} \right)_e - \left(k \frac{dT}{dx} \right)_w \right] dt = \int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{k_e (T_E - T_P)}{(\delta x)_E} - \frac{k_w (T_P - T_W)}{(\delta x)_W} \right] dt \quad (94)$$

por otra parte se puede definir la integral de T_P de la siguiente forma:

$$\int_t^{t+\Delta t} T_P dt = \left[f T_P^{t+\Delta t} + (1-f) T_P^t \right] \Delta t \quad (95)$$

aplicando la Ec. (95) a la Ec. (94) se tiene:

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{k_e (T_E - T_P)}{(\delta x)_E} - \frac{k_w (T_P - T_W)}{(\delta x)_E} \right] dt = & f \left[\frac{k_e (T_E^{t+\Delta t} - T_P^{t+\Delta t})}{(\delta x)_E} - \frac{k_w (T_P^{t+\Delta t} - T_W^{t+\Delta t})}{(\delta x)_W} \right] \Delta t \\ & + (1-f) \left[\frac{k_e (T_E^t - T_P^t)}{(\delta x)_E} - \frac{k_w (T_P^t - T_W^t)}{(\delta x)_W} \right] \Delta t \end{aligned} \quad (95)$$

integrando el segundo término del lado derecho de la Ec. (90) se tiene:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_w^e S dx dt = \bar{S} \Delta x \Delta t \quad (96)$$

sustituyendo las Ecs. (92), (95) y (96) en la Ec. (90) se tiene:

$$\begin{aligned} \rho C_p (T_P^{t+\Delta t} - T_P^t) \Delta x = & f \left[\frac{k_e (T_e^{t+\Delta t} - T_P^{t+\Delta t})}{(\delta x)_E} - \frac{k_w (T_P^{t+\Delta t} - T_w^{t+\Delta t})}{(\delta x)_W} \right] \Delta t \\ & + (1-f) \left[\frac{k_e (T_e^t - T_P^t)}{(\delta x)_E} - \frac{k_w (T_P^t - T_w^t)}{(\delta x)_W} \right] \Delta t + [f \bar{S}^{t+\Delta t} + (1-f) \bar{S}^t] \Delta x \Delta t \end{aligned} \quad (97)$$

de forma general se tiene:

$$\begin{aligned} a_p T_P = & a_E [f T_E^{t+\Delta t} + (1-f) T_E^t] + a_W [f T_W^{t+\Delta t} + (1-f) T_W^t] \\ & + [a_P^0 - (1-f) a_E - (1-f) a_W] T_P^0 \end{aligned} \quad (98)$$

donde:

$$a_E = \frac{k_e}{(\delta x)_e} \quad (99)$$

$$a_W = \frac{k_w}{(\delta x)_w} \quad (100)$$

$$a_P^0 = \rho C_p \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (101)$$

$$a_P = f a_E + f a_W + a_P^0 \quad (102)$$

cuando $f = 0$ se tiene:

$$a_p T_P = a_E T_E^t + a_W T_W^t + (a_P^0 - a_E - a_W) T_P^0 \quad (103)$$

cuando $f = 1$:

$$a_p T_P = a_E T_E^{t+\Delta t} + a_W T_W^{t+\Delta t} + b \quad (104)$$

donde:

$$b = S_C \Delta x + a_P^0 T_P^t \quad (105)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_P^0 - S_P \Delta x \quad (106)$$

cuando $f = 0$ la Ec. (97) se reduce a:

$$\rho C_p (T_P^{t+\Delta t} - T_P^t) \Delta x = \left[\frac{k_e (T_e^t - T_P^t)}{(\delta x)_E} - \frac{k_e (T_P^t - T_w^t)}{(\delta x)_E} \right] \Delta t + \bar{S}^t \Delta x \Delta t \dots\dots (107)$$

Bidimensional transitorio

A continuación se presenta como se aplica el método del volumen de control para conducción de calor en estado transitorio y dos dimensiones:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(k \frac{dT}{dy} \right) + S \quad (108)$$

En la Figura 6.3 se muestra la cuadrícula empleada para discretizar la ecuación de conducción de calor en dos dimensiones aplicando el método del volumen de control.

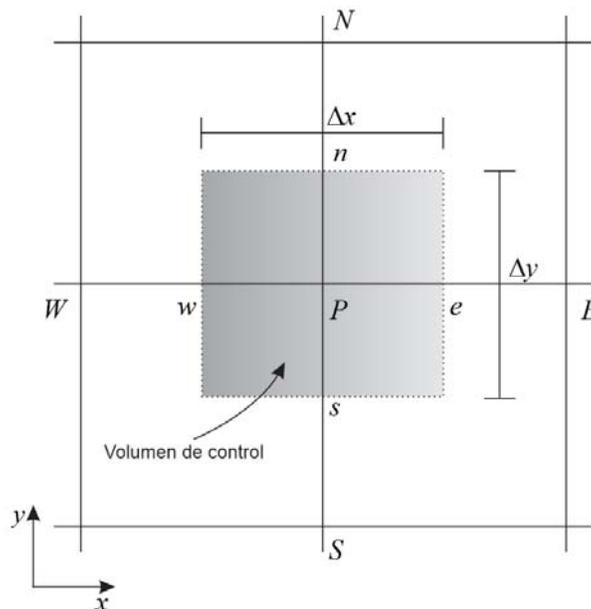


Figura 6.3. Volumen de control para el caso de conducción de calor en dos dimensiones.

Integrando sobre el volumen de control $\Delta x \Delta y$ y en el intervalo de tiempo t a $t + \Delta t$ se tiene:

$$\begin{aligned} \rho C_p \int_s^n \int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T}{\partial t} dt dx dy &= \int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e \frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) dx dy dt \\ &+ \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^n \frac{d}{dy} \left(k \frac{dT}{dy} \right) dy dx dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e S dx dy dt \end{aligned} \quad (109)$$

al integrar el término del lado izquierdo se tiene:

$$\rho C_p \int_s^n \int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T}{\partial t} dt dx dy = \rho C_p \left(T_P^{t+\Delta t} - T_P^t \right) \Delta x \Delta y \quad (110)$$

el primer del lado derecho queda:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e \frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) dx dy dt = \left[\left(k \frac{dT}{dx} \right)_e - \left(k \frac{dT}{dx} \right)_w \right] \Delta y \Delta t \quad (111)$$

$$\left[\left(k \frac{dT}{dx} \right)_e - \left(k \frac{dT}{dx} \right)_w \right] \Delta y \Delta t = \left[\frac{k_e (T_E - T_P)}{(\delta x)_E} - \frac{k_w (T_P - T_W)}{(\delta x)_W} \right] \Delta y \Delta t \quad (112)$$

para el segundo término del lado derecho se tiene:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^n \frac{d}{dy} \left(k \frac{dT}{dy} \right) dy dx dt = \left[\frac{k_n (T_N - T_P)}{(\delta x)_N} - \frac{k_s (T_P - T_S)}{(\delta x)_S} \right] \Delta x \Delta t \quad (113)$$

al integrar el tercer término del lado derecho se tiene:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e S dx dy dt = \bar{S} \Delta x \Delta y \Delta t \quad (114)$$

sustituyendo las Ecs. (110) (112) (113) (114) en la Ec. (109) se tiene:

$$\begin{aligned} \rho C_p \left(T_P^{t+\Delta t} - T_P^t \right) \Delta x \Delta y &= \left[\frac{k_e (T_E - T_P)}{(\delta x)_E} - \frac{k_w (T_P - T_W)}{(\delta x)_W} \right] \Delta y \Delta t \\ &+ \left[\frac{k_n (T_N - T_P)}{(\delta x)_N} - \frac{k_s (T_P - T_S)}{(\delta x)_S} \right] \Delta x \Delta t + \bar{S} \Delta x \Delta y \Delta t \end{aligned} \quad (115)$$

o bien puede expresarse como:

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + b \quad (116)$$

donde:

$$a_E = \frac{k_e \Delta y}{(\delta x)_e} \quad (117)$$

$$a_W = \frac{k_w \Delta y}{(\delta x)_w} \quad (118)$$

$$a_N = \frac{k_n \Delta x}{(\delta y)_n} \quad (119)$$

$$a_S = \frac{k_s \Delta x}{(\delta y)_s} \quad (120)$$

$$a_P^0 = \rho C_p \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} \quad (121)$$

$$b = S_C \Delta x \Delta y + a_P^0 T_P^0 \quad (122)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_P^0 - S_P \Delta x \Delta y \quad (123)$$

[82]

Capítulo VII. Resultados

Con la finalidad de validar el modelo planteado, en el capítulo V, las ecuaciones se programan en Fortran (Ver pseudocódigo apéndice 1), utilizando el método del volumen de control y se valida con el modelo ya probado de [83].

A continuación se describen las condiciones del experimento según el artículo de [Kuznik], se decide estudiar el comportamiento térmico de un material PCM utilizado en una celda de ensayo controlado, simulando las condiciones de verano, para la temperatura externa y la radiación solar.

El PCM utilizado se fue desarrollado por la Sociedad Dupont de Nemours. Esta constituido de 60% de PCM microencapsulado, su temperatura de fusión es de 22°C.

La forma del material del PCM son láminas flexibles de 5mm de espesor, la capacidad calorífica del material se ha medido usando un calorímetro de barrido diferencial, la figura 5.1 muestra los valores medidos experimentalmente de la capacidad de calor.

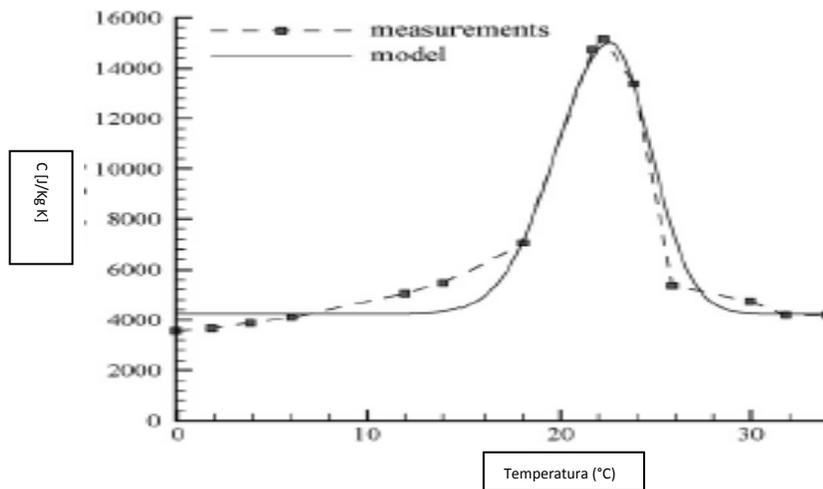


Figura 5.1. Modelo experimental y analítico de la capacidad calorífica del PCM [83]

La conductividad térmica del PCM, se midió utilizando un aparato de placa caliente, los resultados se muestran en la figura 5.2, en esta se puede observar el comportamiento de dicho parámetro.

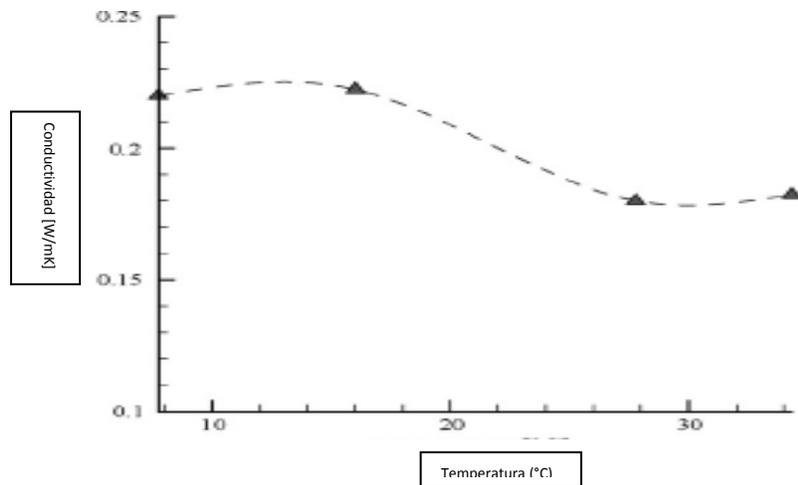


Figura 5.2. Conductividad térmica experimental del PCM [83]

El sistema de estudio

La instalación cuenta con dos celdas idénticas de las siguientes dimensiones 3.10, 3.10 y 2.50m, solamente a la celda 1, se le ha puesto una pared con PCM, mientras que la celda 2, está construida con materiales convencionales, como se muestra más adelante.

Las celdas se encuentran dentro de una cámara climática cuya temperatura se controla por medio de un sistema de tratamiento de aire, la temperatura de la cámara climática varía entre 10 y 40°C, como una función del tiempo. La figura 5.3, muestra las celdas experimentales.

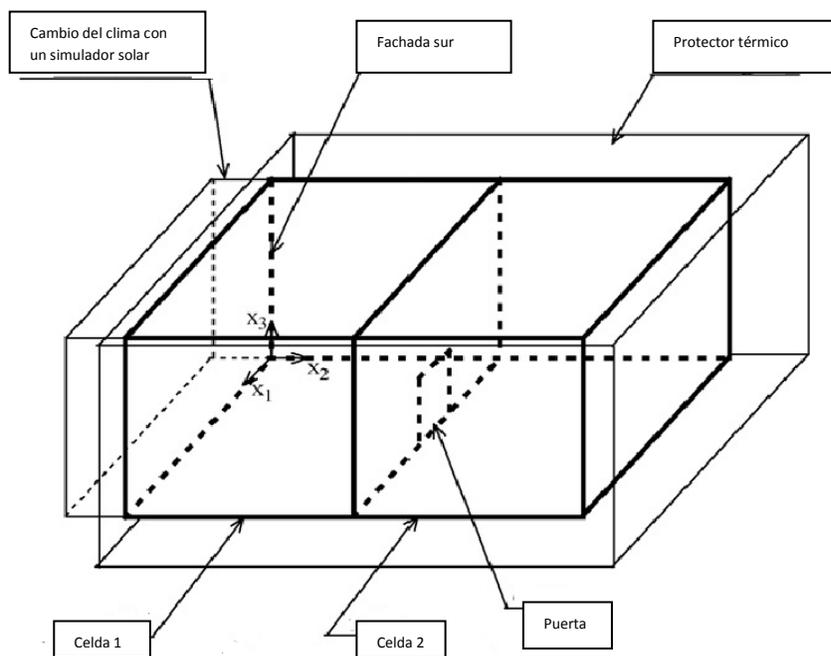


Figura 5.3. Celda experimental [83]

Las composiciones de las paredes se describen en la figura 5.4, mientras que las características físicas de los materiales utilizados en el sistema se resumen en la tabla 5.1

Tabla 5.1 Características físicas de los materiales

<i>Material</i>	<i>Densidad (Kg/m³)</i>	<i>Capacidad calorífica (J/KgK)</i>	<i>Conductividad Térmica (W/mK)</i>
Yeso	817	1620	0.35
Madera	544	1640	0.136
Poliestireno	35	1210	0.04
PCM	1019	362.8	0.06

En la figura 5.4 se describe la composición de las paredes de la celda sin PCM y con PCM. (1) 50mm de placa de madera, (2) 10 mm de yeso, (3) 50 mm de Poliestireno, (4) 13 mm de yeso y (5) 5mm de PCM.

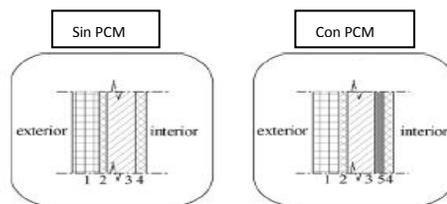


Figura 5.4. Composición de las paredes de la celda con y sin PCM [83]

Finalmente para simular la insolación artificial se coloca una batería con 12 focos de 1000 w, cada uno. Estos se colocan en tres líneas horizontales, tal y como se muestra la figura 5.6.

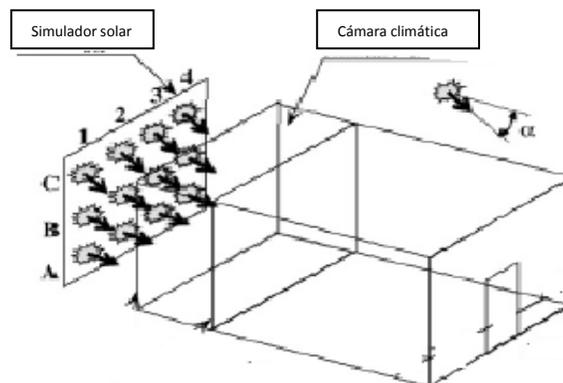


Figura 5.5. Panel de focos que simula la insolación artificial en la celda[83]

Todas las temperaturas interiores y exteriores se miden utilizando termopares de resolución de ± 0.4 °C, cada cara contiene nueve termopares.

Recordemos que la prueba se realiza en verano y la temperatura de la cámara climática varía entre 15 y 30 °C, la temperatura de la cámara climática y los flujos de radiación se presentan en la figura 5.6

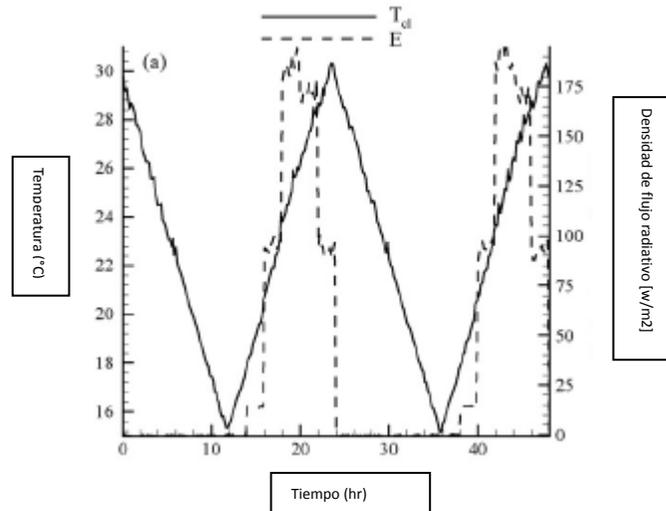


Figura 5.6. Temperatura experimental de la cámara climática y densidad del flujo radiativo [83]

Hasta ahora hemos visto de donde provienen todos los parámetros que se toman en cuenta en la simulación de este documento.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la literatura [83] y los resultados obtenidos con el simulador

La figura 5.7 describe las temperaturas en el exterior de la celda, la línea azul representa la temperatura de la literatura, mientras que la línea rosa representa la temperatura simulada, tal y como se puede observar, la $T_{simulada}$, está ligeramente por encima de la $T_{literatura}$, esto se debe a que las condiciones de frontera del artículo de Virgone y las condiciones de frontera del simulador, difieren un poco, por el tipo de solución dada en el simulador. (Volumen de control).

La figura 5.8 muestra las temperaturas interiores de la literatura y simuladas, al igual que las curvas de la figura 5.7 la $T_{interior\ simulada}$, se encuentra por encima de la $T_{interior\ literatura}$, esto ocurre por las diferencias en las condiciones de frontera en el método de volumen de control. (sin embargo este factor aún se puede corregir).

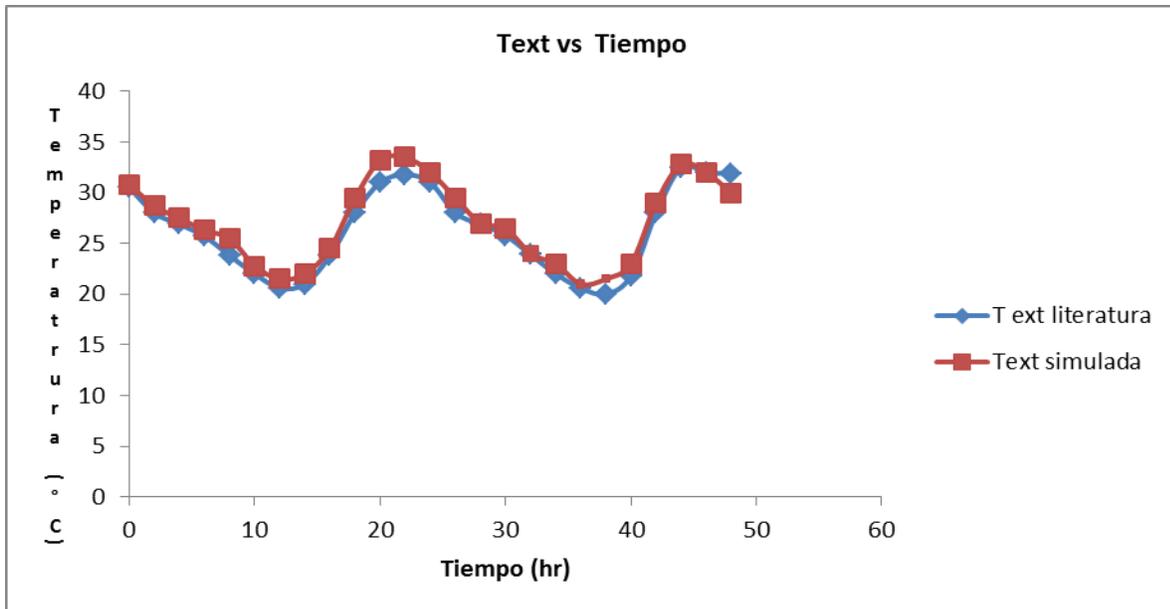


Figura 5.7. Temperatura exterior de la literatura [83] y simulada

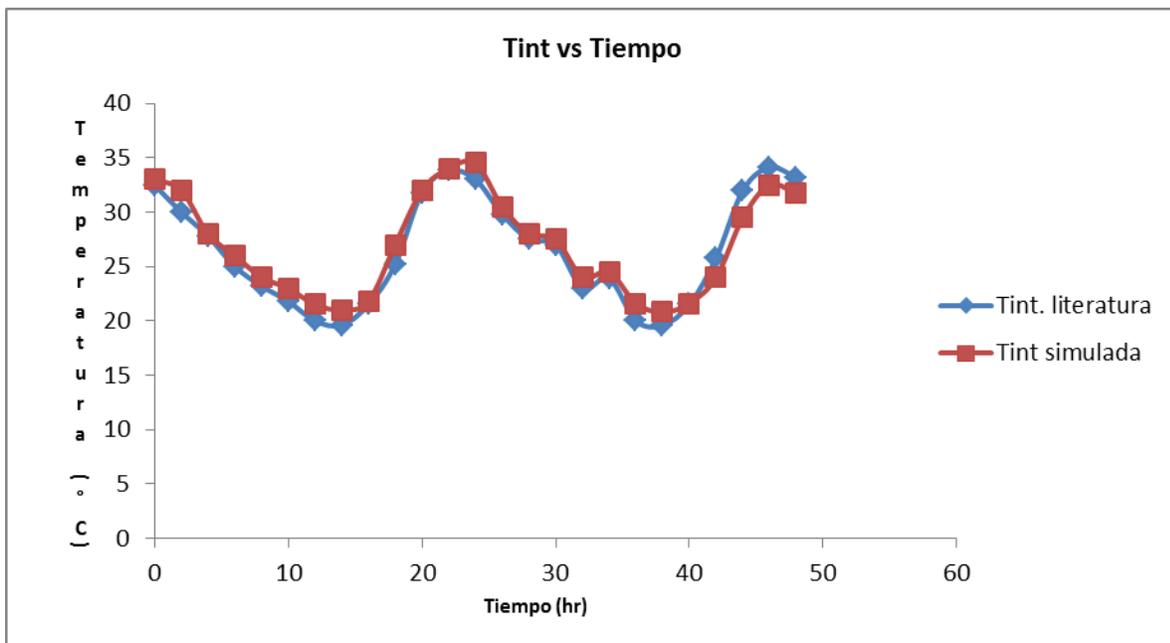


Figura 5.8 Temperatura interior de la literatura [83] y simulada

Como se puede observar los datos obtenidos en las figuras 5.7 y 5.8, se encuentran muy cercanos, por lo tanto podemos decir, que las Temperaturas simuladas, son muy cercanas a las temperaturas de la literatura, se puede decir, que el programa es muy preciso, porque para considerarlo exacto se tendría que medir.

El método del volumen de control, explicado en el capítulo VII, es novedoso y garantiza una mayor precisión en los resultados.

En las siguientes figuras se muestra el comportamiento de la pared con y sin PCM, lo anterior con la finalidad de demostrar, como se ha mencionado a lo largo de este documento, que el material PCM, reduce las fluctuaciones de la temperatura en el aire de la habitación.

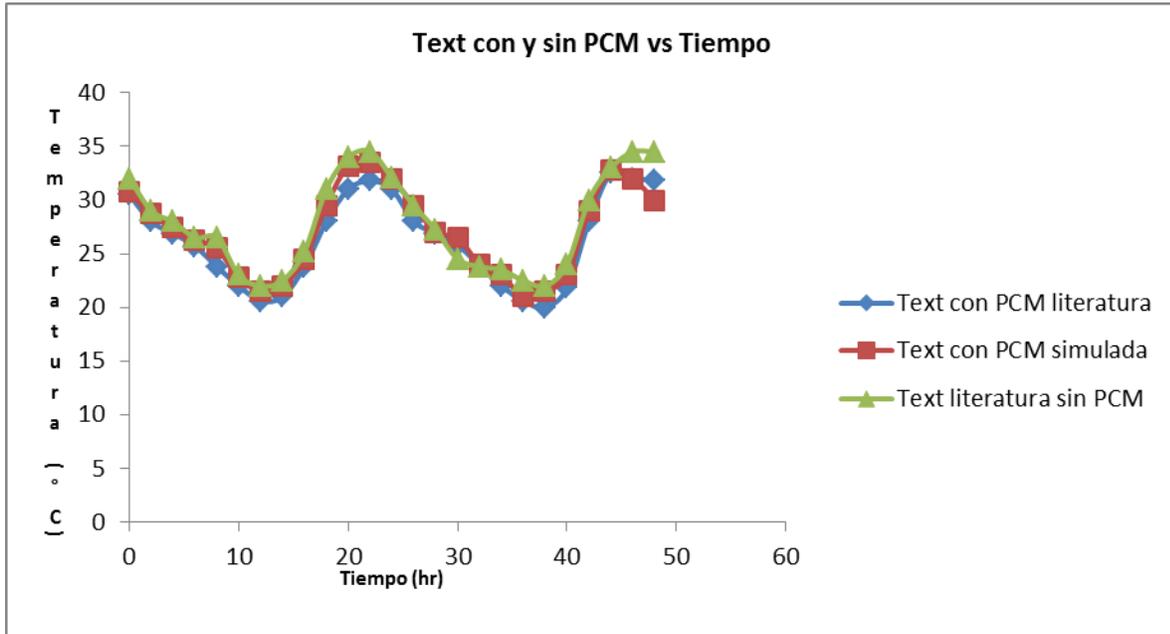


Figura 5.9 Temperatura exterior con y sin PCM de la literatura [83] y simulada

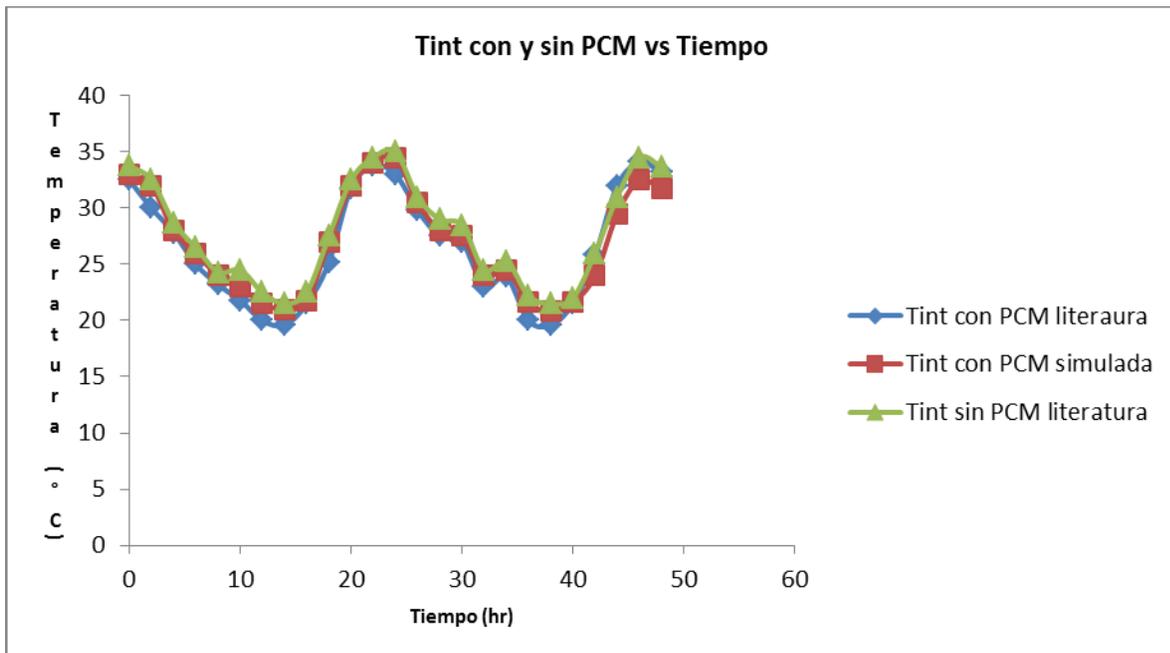


Figura 5.10 Temperatura interior con y sin PCM de la literatura [83] y simulada

Se puede observar en las figuras 5.9 y 5.10, que el efecto de sobrecalentamiento es menor con el PCM. Las temperaturas de las paredes de la superficie se reducen utilizando un material de PCM, reduciendo la temperatura interior de la habitación 2°C, por otro lado la convección natural del aire mejora en la pared con PCM, evitando estratificaciones térmicas incómodas.

La pared que contiene los 5mm de PCM, en la celda de prueba, mejora como se observa en las figuras 5.9 y 5.10, la inercia térmica del edificio.

Conclusiones

Los materiales con cambio de fase, son una buena medida para satisfacer disminuir las fluctuaciones de temperatura dentro de una habitación, estos materiales pueden ser instalados en las paredes o en el techo, actualmente existen PCM patentados, como el analizado en este documento, el cual como se observa en las figuras 5.9 y 5.10 amortiza de manera significativa la temperatura en el interior y en el exterior del edificio, en comparación con una pared tradicional. Esta disminución en la temperatura al implementarse paredes compuestas con PCM, puede verse reflejada en el ahorro de energía eléctrica al dejar de utilizar parcial o totalmente aire acondicionado.

Por otro lado es recomendable revisar los diferentes métodos y modelos matemáticos propuestos en la literatura para hacer frente a los problemas de cambio de fase, debido a que cada método posee características distintivas, ventajas y desventajas.

Por muchas razones el método empleado para simular en este documento, es muy atractivo debido a la eficiencia computacional que presenta, la flexibilidad del mismo y sobre todo a las condiciones de frontera que utiliza entre el medio ambiente y las paredes interiores y exteriores, debido a que no es la clásica Ley de enfriamiento de Newton en estado estacionario, la temperatura del sistema se encuentra en estado transitorio para describir adecuadamente el fenómeno, la condición de frontera que se analiza en este documento toma en cuenta la temperatura de retardo, es decir, la inercia térmica del sistema.

El modelo de volumen de control es muy preciso, debido a que cuenta con doscientos nodos y se ejecuta mil veces por segundo. Este método es muy novedoso y tal como se puede observar en el documento proporciona datos muy cercanos a la literatura.

Por otro lado los resultados obtenidos muestran que las temperaturas de las paredes se reducen cuando se utiliza un material de cambio de fase, con ello se logra disminuir la temperatura dentro de un edificio.

DELTA X = 20.0 / N

* TIEMPOS

TIME = 0.0

DELTAT = 0.001

TSIM = 60. * 60. * 7. !TIEMPO DE SIMULACIÓN

* WRITE(*,*) ALFA

BETA = DELTAT * ALFA / (DELTA X * DELTA X)

TC = 34.0

K = 0.2 !K=0.5

H = 0.06399

IMP = 0

HDELTA X K = 1

FACTOR1 = 0.00016 !=0.00017

FACTOR2 = 0.000082

* CONDICIONES INICIALES

DO J=1,25

 T(J) = 24.0

```
END DO
DO J=26,75
    T(J) = 23.0  !=24.2
END DO
DO J=76,125
    T(J) = 19.0    !=18.0
END DO
DO J=126,175
    T(J) = 16.0
END DO
DO J = 176,N
    T(J) = 10.0
END DO

WRITE(10,200) TIME,T(1),T(35),T(100),T(165),T(200)
```

```
DO TIME=0.0,TSIM,DELTAT
    tprom = 0.0
    do j=1,n
        tprom=tprom + t(j) !CALCULA LA TEMPERATURA PROMEDIO
    end do
    tprom = tprom/n
```

```

DO J=1,N
    IF (J==1)THEN    !PARA ENTRAR A LA CONDICIÓN DE FRONTERA
        TEMP(J) = T(J) + (FACTOR1 * (TC - T(J)) -
&                FACTOR2 * (T(J) - Tprom)) * DELTAT

        ELSE IF (J==N)THEN !LA OTRA CONDICIÓN DE FRONTERA
            TEMP(J) = TINF
        ELSE
            TEMP(J) = T(J) + BETA * (T(J+1) -           !ECUACIÓN
&                2 * T(J) + T(J-1))
        END IF
    END DO

DO J=1,N
    T(J) = TEMP(J)
END DO

ERROR=ABS(T(1) - 25.68)

IMP    = IMP + 1           !PARA
IMPRIMIR EN PANTALLA
IF(IMP == 600000) THEN

```

```
WRITE(10,200) TIME,T(1),T(35),T(100),T(165),T(200)
```

```
IMP = 0
```

```
END IF
```

```
END DO
```

```
END PROGRAM
```

Referencias

- [1] M. Domínguez, J. M^a Arías (2003) Incorporación de acumuladores de cambio de fase en la construcción. Instituto del Frío
- [2] Lee, K.S (1983). Passive thermal storage Wall structures for heating and cooling buildings, Google patents
- [3] Abhat, A (1983). Low temperatura latent heat Thermal energy storage-Heat storage materials. Solar energy 30(4)
- [4] Lane,G.A (1976) Macro encapsulation of heat storage phase change materials for use in residential buildings.Michigan, the Down Chemical Company Larkin laboratory
- [5] Sayer, I.O and A.K. Sicar (1990). Phase change Materials for heating and Cooling of Residential Buildings and ither Aplications. Wnergy Conversion Engineering Conference, 1990
- [6] Hawe (1984). Thermal Energy Storage Compositions. U.S. 4,470,917
- [7] Feldman, D; Shaphiro, et al (1989) Fatty acids and their mixtures as phase-change materials for thermal energy storage.Solar energy materials 18 (3-4) 201-216
- [8] Peippo K, Kauranen P, Lunnd PD (1991). A multicomponent PCM Wall optimized for passive solar heating. Energy Buil
- [9] Feldeman D; B.D; Hawesn D;Ghanbari E. (1991). Obtaining an energy storing building material by direct incorporation of an organic phase change material in gypsum wallboard. Solar energy Materials 22 231-242
- [10] Barrio, M; Font J; López, D. (1992) Floor radiant system with heat storage by a solid-solid phase transition material,Solar Energy Materials ans Solar Cells 27 . pp. 127-133
- [11] Kassinen H (1992) The ababsorcion of phase change substances into commonly used building materials, solar energy materials and solar cells
- [12] Abhat (1978). Latent Heat Thermal energy storage in the Temperature range 20-80°C.
- [13] Hasan A, and A. Saying (1994). Some fatty acids as phase-change. Thermal energy storage materials. Renewable energy
- [14] Morillon Galvez, D. (2004) Modelo Para Diseño Y Evaluación Del Control Solar en Edificios. UNAM
- [15] Morillon Galvez, D (2009), Atlas de ventilación natural para la República Mexicana. Potencial para ahorrar energía en la climatización de edificios

- [16] Incropera, Frank. Fundamentos de transferencia de calor .Prentice Hall. P.p .4-10, 74-80,284-289
- [17] H.Boyer, J. Chambriant, B. Grodin-Pérez, thermal building simulation and computer generation of nodal models, buiding and enviromental 31 (3) (1996) 207-214
- [18] H. Boyer, F. Garde, J. Gatina, J. Braun, A multimodel approach to building thermal simulation for desing and reseach purposes, energy and building 28 (1), (1998) 71-78
- [19] Abhat, A. Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Heat Storage Materials. Solar Energy. 1985. Vol. 30 No. 4 132-332
- [20] G.A. Lane, Solar Heat Storage: Latent Heat Material, vol. I, Background and Scientific Principles, CRC Press,Florida, 1983.
- [21] I. Dincer, M.A. Rosen, Thermal energy storage, Systems and Applications, John Wiley & Sons, Chichester (England), 2002
- [22] Lane, G.A. Solar Heat Storage Heat materials. Technology, CRC Press, Inc. Boca Raton, FL 1986. Vol. II
- [23] A. Abhat, Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials, Solar Energy 30 (1983) 313-332
- [24] G.A. Lane, Solar Heat Storage: Latent Heat Material, vol. I, Background and Scientific Principles, CRC Press, Florida, 1983
- [25] Schroeder, J. and K. Gawron. Latent heat Storage, International Journal of Energy reseach 5:103-104 (1981)
- [26] M.M. Farid, Solar energy storage with phase change, J. Solar Energy Res. 4 (1986) 11.
- [27] I.O. Salyer, A.K. Sircar, R.P. Chartoff, Analysis of crystalline paraffinic hydrocarbons for thermal energy storage by differential scanning calorimetry; Part 1, Pure hydrocarbons, 15th North American Thermal Analysis Society Conference, Cincinnati, OH, 1986.
- [28] M. Hadjieva, S. Kanev, J. Argirov, Thermophysical properties of some paraffins applicable to thermal energy storage, Solar Energy Mater. Solar Cells 27 (1992) 181–187.
- [29] M. Samai, Y. Jarny, D. Delaunay, An optimization method using an adjoint equation to identify solidification front location, Numer. Heat Transfer, Part B 23 (1993) 67–89.
- [30] M.A. Cuevas-Diarte, T. Calvet-Pallas, J.L. Tamarit, H.A.J. Oonk, D. Mondieig, Y. Haget, Nuevos materiales termoajustables, Mundo Científico, June 2000.

- [31] M.A. Cuevas-Diarte, Y. Haget, D. Mondieig, Nuevos materiales para el almacenamiento de energía térmica las aleaciones moleculares, *El Instalador* April (1996) 87.
- [32] P. Espeau, D. Mondieig, Y. Haget, M.A. Cuevas-Diarte, *Active* package for thermal protection of food products, *Packag. Technol. Sci.* 10 (1997) 253–260.
- [33] P. Espeau, L. Robl_és, D. Mondieig, Y. Haget, M.A. Cuevas-Diarte, H.A.J. Oonk, Mise au point sur le comportement *energ_étique* et cristallographique des n-alcane. I. Serie de C₈H₁₈ a C₂₁H₄₄, *J. Chim. Phys* 93 (1996) 1217– 1238
- [34] P. Espeau, Syncrystallisation dans la famille des alcanes de C₈H₁₈ a C₁₇H₃₆. Conception, elaboration et caracterisation de nouveaux materiaux a changement de phases a base d_alliages moleculaires (MCPAM). Application a la protection thermique dans le domaine agro-alimentaire, Thesis at the University of Burdeos I, 1995
- [35] E.S. Fath Hassan, Heat exchanger performance for latent heat thermal energy storage system, *Energy Convers. Mgmt.* 31 (2) (1991) 149 – 155
- [36] J.P. Bardon, E. Vrignaud, D. Delaunay, Etude exp_érimentale de la fusion et de la solidification periodique d_une plaque de paraffine, *Rev. G_en. Therm.*, 212–213 (1979).
- [37] H.T. EI-Dessouky, W.S. Bouhamra, H.M. Ettouney, M. Akbar, Heat transfer in vertically aligned phase change energy storage systems, *J. Solar Energy Eng., Trans. ASME* 121 (2) (1999) 98–109.
- [60] Saleh Nasser, et al. Modeling phase change materials embedded in building enclosure: A review. *Civil Envioremental, and architectural*, University of Colorado at Boulder, CO. (2013) 660-673
- [61] Eyres NR, Hartree DR, Ingham J. Jackson R, Sarjant RJ, Wagstaff JB. The Calculation of variable heat flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series, A mathematical and Physical Sciences* (1946); 240: 1-57
- [62] Alexiades V. Salomon AD. *Mathematical modeling of melting and freezing processes*; Hemisphere Pub, Corp; 1993
- [63] Shamsundar N, Sparrow EM. Analysis of multidimensional conduction phase change via the entalphy model. *Journal of Heat Transfer* (1975); 97: 333-340
- [64] Hashemi HT, Sliepcevich CM. A numerical method for solving two dimensional problems of heat conduction with change of phase. *Chemical Engineering ProgSympsseries* (1967); 63: 34-41

- [65] Voller VR. An overview of numerical methods for solving phase change problems. In: Minkowycz WJ, Sparrow EM. Editors, Advances in numerical heat transfer. Taylor & Francis; (1997) p. 341-80
- [66] Faghri A, Zhang Y. Transport phenomena in multiphase systems. Elsevier Academic Press:2006
- [67] Hsiao JS, Chung BTF. An efficient algorithm for finite element solution to two – dimensional heat transfer with melting and freezing. Journal of Heat Transfer (1986); 108: 462-4
- [68] Comini G, Del Giudice S, Lewis RW, Zienkiewicz OC. Finite element solution of non – linear heat conduction problems with special reference to phase change. International Journal of Numerical Methods in Engineering (1974); 8: 613 – 24
- [69] Morgan K, Lewis RW, Zienkiewicz OC. An improved algorithm for heat conduction problems with phase change. International Journal for Numerical Methods in Engineering (1978); 12:1191-5
- [70] Lemmon E. Multidimensional integral phase change approximations for finite element conduction codes. In: Lewis RW, Morgan K, Zienkiewicz OC, editors. Numerical methods in heat transfer. New York: Wiley; 1981. P. 201-13
- [71] Pham QT. Comparison of general – purpose finite – element methods for the Stefan problem. Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals (1995); 27: 417 – 35
- [72] Cao Y, Faghri AA. Numerical analysis of phase – change problems including natural convection. Journal of Heat Transfer (1990); 112: 812-6
- [73] Zeng X, Faghri A. Temperature – transforming model binary solid-liquid phase- change problems. Part I. Mathematical modeling and numerical methodology. Numerical Heat Transfer Part B: Fundamentals (1994); 25: 467-80
- [74] Zeng X, Faghri A. Temperature-transforming model for binary solid-liquid phase change problems. Part II: Numerical simulation. Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals (1994); 481-500
- [75] Zhannua M, Yuwen Z. Solid velocity correction schemes for a temperature transforming model for convection phase change. International Journal of Numerical Methods for Heat & fluid Flow (2006); 16: 204-25
- [76] Wang S, Faghri A, Bergman TL. A comprehensive numerical model for melting with natural convection. International Journal of Heat and Mass Transfer (2010); 53: 1986-2000

- [77] Idelsohn S, Storti M, Crivelli I. Numerical methods in phase –change problems. Archives of computational Methods in Engineering (1994); 1: 49-74
- [78] Voller VR. Implicit finite – difference solutions of the enthalpy formulation of Stefan problems. IMA Journal of Numerical Analysis (1985); 5:201-4
- [79] Crank J. Free and moving boundary problems. Clarendon Press; 1984
- [80] Swaminathan CR, Voller VR. Towards a general numerical scheme for solidification systems. International Journal of Heat and Mass Transfer (1997); 40: 2859-68
- [81] Costa M, Buddhi D, Oliva A. Numerical simulation of latent heat thermal energy storage system with enhanced heat conduction. Energy Conversion and Management (1998); 39: 319-30
- [82] Patankar V. Suhas. (1980) Numerical heat transfer and fluid flow. McGraw-Hill Compay. United States of America.
- [83] Kuznik F, Virgone J, Roux JJ. Energetic efficiency of room Wall containing PCM wallboard. A full – scale experimental investigation. Energy an Buildings (2007); 148-52