



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES

ESTUDIOS DE UN SISTEMA CONSTRUCTIVO CON
CAMBIO DE FASE.

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JORGE BELAUNZARÁN ZAMUDIO

TUTOR DE TESIS:
DR. JORGE A. ROJAS MENÉNDEZ, INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES

TEMIXCO, MORELOS. ENERO 2015



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.

Resumen

En este trabajo de tesis se realizó la evaluación, análisis y comparación de mediciones térmicas obtenidas experimentalmente de un módulo de prueba a escala real sin aire acondicionado y expuesto a la intemperie. El techo se dividió en tres secciones con el fin de comparar el desempeño térmico del MCF contra un material aislante. El material externo para las tres secciones es una lámina de acero galvanizado. Por la parte interior formando una doble capa se colocó en una de las secciones el BioPCM (MCF macroencapsulado) con un espesor equivalente de 1.00 cm. En la sección de en medio solo quedó la capa externa constituida por lámina galvanizada, y en la tercera sección se colocó a manera de bicapa un material aislante (poliestireno expandido) al interior de 2.54 cm de espesor. Se realizaron mediciones durante 4.5 meses de las temperaturas superficiales interiores y exteriores en Temixco, Morelos. A través del algoritmo de conducción por diferencias finitas incluido en el programa EnergyPlus fue simulado el módulo. Debido a que la hoja de acero galvanizado es muy delgada y altamente conductiva, el algoritmo no fue capaz de realizar dicha simulación, por lo que la capa del BioPCM y el poliestireno fueron simulados sin la capa de la lámina galvanizada. Para la capa de en medio donde solo se encuentra la lámina galvanizada se reemplazó con una capa equivalente que permitiera la simulación. A pesar de que la simulación no se realizó tal y como fue construido el módulo experimental los resultados presentaron buena concordancia. El factor de decremento superficial del poliestireno y el BioPCM presentan concordancia en magnitud pero el tiempo de retraso del BioPCM es más grande, lo cual implica que el BioPCM puede ser utilizado en edificaciones para oficinas sin aire acondicionado y para edificaciones con envolventes ligeras donde el retraso de la transferencia de calor al interior es importante para el ahorro de energía.

Abstract

The following thesis is focused on the evaluation, analysis and comparison of experimental thermal measurements obtained in a non air-conditioned outdoor full-scale test cell. The ceiling was divided in three sections in order to compare the PCM thermal performance against other materials. The external base material for the ceiling is galvanized steel, of which one (double layer) division was created, containing encapsulated BioPCM (1.00 cm effective thickness) placed internally atop the base material. The second division of the ceiling was left bare (only the galvanized steel) and the last section contains a commercial isolation material (expanded polystyrene, 2.54 cm thick), also placed internally. Inside and outside surface temperatures were taken during 4.5 months in Temixco Morelos, Mexico. By means of a conduction finite difference algorithm using the software EnergyPlus, the surface temperatures throughout the ceiling divisions were obtained. Because the galvanized steel sheet is highly conductive and thin, the algorithm did not allow its simulation and therefore the simulations for the polystyrene and BioPCM were run without considering the galvanized steel. For the second division, the galvanized steel was replaced with an equivalent layer which allowed a proper simulation. Even though the building envelope was not able to be simulated exactly as in the experiment, the experimental and simulation results were in good agreement. The surface decrement factor of the expanded polystyrene and BioPCM are similar but the surface lag time of the latter is larger, implying that the BioPCM can be used in office buildings with non air-conditioned and light materials in the envelope where the delay in the heat transfer is important for saving energy.

“Si yo fuese un árbol entre los árboles, un gato entre los animales, esta vida tendría un sentido o, más bien, este problema no lo tendría, pues yo formaría parte de este mundo; yo sería este mundo al que me opongo ahora con toda mi conciencia y con toda mi exigencia de familiaridad.”

Albert Camus

Agradecimientos

Al Dr. Jorge A. Rojas Menéndez por su apoyo, enseñanzas y por brindarme sus conocimientos a lo largo de la maestría. A mis sinodales, la Dra. Guadalupe Huelsz Lesbros, al Dr. Guillermo Barrios del Valle, al Dr. Robert Best y Brown y al Dr. Pablo D. Elías López por su intervención en la realización de esta investigación. A mis amigos del IER por su amistad y los buenos momentos. A mis padres que siempre me han brindando su apoyo incondicional. A la UNAM y al CONACyT.

Índice general

Resumen	II
Abstract	III
1. Antecedentes y revisión bibliográfica	1
1.1. Introducción	1
1.1.1. Hipótesis	3
1.1.2. Objetivos	3
1.1.2.1. Objetivos particulares	3
1.1.3. Justificación	3
1.1.4. Organización de la tesis	6
1.2. Almacenamiento de energía térmica	6
1.2.1. Calor sensible	6
1.2.2. Calor latente	7
1.3. Clasificación de los MCF	8
1.3.1. MCF orgánicos	10
1.3.1.1. Parafinas	12
1.3.1.2. No parafinas	13
1.3.2. MCF inorgánicos	13
1.3.3. MCF eutécticos	14
1.4. Características de los MCF según su clasificación	15
1.5. Criterio de selección	16
1.6. MCF comerciales	17
1.7. Métodos de medición	18
1.7.1. Calorímetro de escaneo diferencial	18
1.7.2. Análisis térmico diferencial	19
1.7.3. Método de historia T	19
1.7.4. Otros métodos	20
1.8. Métodos de incorporación del MCF en la envolvente de la edificación	20

1.8.1.	Incorporación directa o impregnación	21
1.8.2.	Inmersión	21
1.8.3.	Encapsulación	21
1.8.3.1.	Micro encapsulado	22
1.8.3.2.	Macro encapsulado	22
1.8.4.	Laminado	23
1.8.5.	Forma estabilizada	23
1.8.6.	Otros contenedores	24
1.9.	Aplicaciones en la edificación	24
1.9.1.	Paneles con MCF	24
1.9.2.	Concretos y morteros con MCF	25
1.9.3.	Bloques con MCF	26
1.9.4.	Muro trombe con MCF	26
1.9.5.	Persianas con MCF	27
1.9.6.	Forma estabilizada MCF	27
2.	Modelado de materiales con cambio de fase	28
2.1.	Modelado analítico de MCF	29
2.2.	Modelado numérico de MCF	30
2.2.1.	Método de capacidad calorífica	32
2.2.1.1.	Relación analítico-empírica	34
2.2.1.2.	Aproximación numérica	35
2.2.2.	Modelos de simulación usados para el análisis en edificaciones	35
3.	Metodología experimental	38
3.1.	Localización	38
3.2.	Objetivo y descripción de los experimentos	39
3.2.1.	Elaboración de la envolvente	39
3.2.2.	Material de cambio de fase BioPCM	41
3.2.2.1.	Dimensiones del BioPCM	42
3.3.	Instrumentación	43
3.4.	Toma de datos experimentales	43
3.5.	Medición de emitancia y absortancia	45
4.	Método numérico de EnergyPlus y configuración para la modelación de MCF	47
4.1.	Método numérico de EnergyPlus	47
4.1.1.	Archivo de clima	49

4.1.2. Geometría y archivo IDF	50
4.2. Configuración de EnergyPlus para modelado con MCF	50
4.2.1. Algoritmo de convección para las superficies interiores y exteriores	51
4.2.2. Algoritmo de transferencia de calor por conducción	52
4.2.2.1. Configuración del modelo diferencias finitas	52
4.2.2.2. Constante espacial de discretización	52
4.2.3. Paso de tiempo	54
4.2.4. Localización	54
4.2.5. Entrada de materiales	54
4.2.5.1. Espesor equivalente del BioPCM	55
4.2.6. La curva de entalpía	55
4.2.7. Sistema constructivo	56
4.2.8. Detalle de componentes de la envolvente	56
4.2.9. Detalle de sombramiento de la edificación	57
4.2.10. Infiltración	57
4.2.11. Ventilación	58
4.2.12. Datos de salida	58
5. Resultados y discusión	59
5.1. Simulación	59
5.2. Resultados	59
5.2.1. Resultados de temperatura etapa 1, periodos 1 y 2	60
5.2.2. Resultados de temperatura etapa 2, periodos 3 y 4	64
5.3. Comparación entre BioPCM y poliestireno	65
6. Conclusiones	68
Referencias	71

Capítulo 1

Antecedentes y revisión bibliográfica

1.1. Introducción

Existen varios factores que pueden influenciar la temperatura del aire al interior de una edificación (Figura 1.1). Primeramente, se tienen las condiciones climáticas, como la temperatura exterior, la radiación solar, la velocidad del viento (convección), la humedad, etc. Por otro lado, se deben considerar las propiedades termofísicas de los materiales de la envolvente como son la conductividad térmica, el calor específico y la densidad. Además, se debe tomar en cuenta el espesor, la absorptancia y también es muy importante el área o porcentaje de las superficies translúcidas puesto que tienen altos índices de ganancia solar. Otro posible factor son las fuentes de calor dentro de la edificación como son los focos, aparatos eléctricos y los habitantes. Y finalmente, pueden influir equipos auxiliares de climatización activa y los cambios de aire por hora, ya sea por medios activos o pasivos.

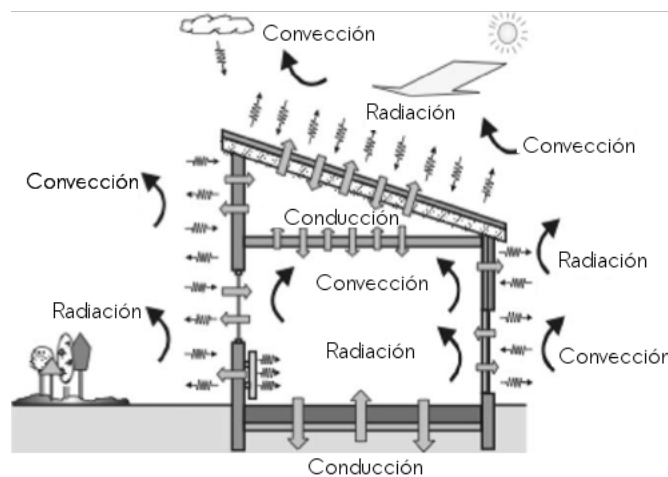


Figura 1.1. Factores que influyen la temperatura al interior [1].

Desde la antigüedad a la fecha, el concepto de climatización de las edificaciones a través del enfriamiento, calentamiento y la ventilación han sido de gran interés para el hombre. La influencia del desarrollo tecnológico sobre estos conceptos de climatización ha tomado fuerza con el fin de generar espacios confortables para las actividades humanas, tanto en edificaciones nuevas como en antiguas. Se han desarrollado diferentes sistemas de calentamiento, ventilación, aire acondicionado y sistemas de refrigeración (HVAC&R, por sus siglas en inglés), y día a día han ido logrando que trabajen de manera más eficiente. Estos sistemas tienen la intención de satisfacer por completo todos los objetivos de proveer un ambiente térmico adecuado, con una buena calidad del aire al interior. Sin embargo, a pesar de todos los esfuerzos enfocados en la eficiencia energética de los HVAC&R, siguen siendo sistemas de alto consumo energético, que en muchos casos hay posibilidad de erradicarlos por completo. En otros casos, también es posible minimizar la carga térmica y contribuir a la reducción del consumo energético a través de sistemas sencillos, como son los sistemas de climatización pasiva (SCP).

Un SCP es un sistema arquitectónico que permite modificar la temperatura y/o humedad de un espacio, promoviendo o evitando la transferencia de calor y/o de humedad hacia dicho espacio sin el uso de equipos electromecánicos. Existen sistemas de calentamiento y enfriamiento, sistemas de humidificación y deshumidificación, sistemas de control de la ganancia de calor. Por último, existen sistemas de reducción de transferencia de calor en el cual centraremos nuestra atención, debido a que los materiales dispuestos en la envolvente de la edificación influyen en gran medida la transferencia de calor del exterior hacia el interior (y viceversa). Existen diversas formas para propiciar la reducción de ganancias por transferencia de calor, entre ellas, dobles muros, techos y muros verdes, ventanas dobles, películas de baja emitancia en vidrios, materiales aislantes y a través de la masa térmica, la cual actúa como un sistema de almacenamiento de energía térmica (SAET). De modo que la masa al interior y en la envolvente contribuye al almacenamiento de energía durante el día y a la liberación durante la noche cuando las temperaturas son menores. En un edificio con materiales de masa térmica considerable, se pueden reducir las temperaturas extremas que experimentan los usuarios dentro de la edificación. De esta manera, se logra que la temperatura interior sea moderada a lo largo del año, y por consiguiente, en términos de habitabilidad, puede propiciar un mejor nivel de confort.

El almacenamiento térmico se puede dar tanto por almacenamiento de calor sensible como calor latente. El almacenamiento de calor sensible requiere un mayor volumen de material para almacenar la misma energía comparativamente con el almacenamiento de calor latente. Materiales como la piedra o la mampostería han sido utilizados durante siglos como un sistema de almacenamiento de calor sensible. Sin embargo, el uso de

la mampostería para el tipo de edificaciones que hoy en día se realizan sería causa de diversos problemas como alto costo, excesiva masividad, y alto peso [2]. Los materiales de cambio de fase (MCF) pueden almacenar más calor en la envolvente de la edificación comparativamente con los materiales tradicionales de calor sensible. Debido a esto, la aplicación de sistemas de almacenamiento de energía de calor latente podrían reducir el uso de sistemas mecánicos de calentamiento y enfriamiento.

El término almacenamiento de calor latente es generalmente entendido como el almacenamiento de energía de calor latente de fusión en sustancias que llevan a cabo un ciclo de fusión-solidificación a una temperatura deseada, de manera que, también es conocido como calor de fusión o almacenamiento de calor de fusión. El uso de almacenamiento de energía térmica para el calentamiento y enfriamiento en edificaciones ha ido incrementado significativamente debido a la alza en los precios de los combustibles fósiles y a la problemática medioambiental.

1.1.1. Hipótesis

El uso de materiales de cambio de fase en la envolvente de las edificaciones como un sistema de almacenamiento de energía térmica puede ser una alternativa viable para mejorar el desempeño térmico en edificaciones ligeras sin el uso de HVAC&R.

1.1.2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es analizar el desempeño térmico de un MCF incorporado en la envolvente de un sistema constructivo ligero para edificaciones localizadas en climas cálidos, sin la utilización de sistemas de aire acondicionado.

1.1.2.1. Objetivos particulares

- Determinar los parámetros adecuados para la simulación numérica en el programa EnergyPlus para representar el cambio de fase de los MCF.
- Construir un módulo para el estudio experimental del MCF.
- Implementar la simulación numérica de los MCF a través del modelo matemático del EnergyPlus.
- Comparar los resultados de la simulación numérica y los experimentales.

1.1.3. Justificación

La principal razón de existencia de las edificaciones es el salvaguardar las actividades del ser humano ante la posible severidad del clima. La historia revela el esfuerzo de

la humanidad en diseñar sus construcciones para generar espacios en los cuales se encuentre más confortable. Es por eso que la antigua arquitectura fue realizada tomando en cuenta las condiciones climáticas con el fin de amortiguar las condiciones extremas del exterior. Sin embargo, la modernización del hombre ha conllevado a olvidar los conceptos de edificar adecuadamente en cuanto al entorno y al clima, lo cual se ve reflejado en la necesidad de climatizar los espacios por medios electromecánicos de alto consumo de energía .

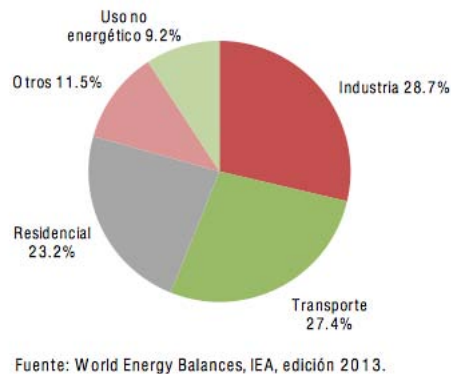


Figura 1.2. Consumo total mundial de energía por sector [3].

Actualmente el sector residencial representa mundialmente el 23.2 % (Figura 1.2) de la energía total consumida con 86,726 PJ. En México, el consumo de energía en el sector residencial ha ido en incremento, ya que en el año 2012 aumentó en un 0.4 % respecto al año 2011, totalizando 929 PJ.[4] (Figura 1.3). De acuerdo a estadísticas de la Administración de Información de Energía de EE. UU. (IEA, por sus siglas en inglés) [5] el sector de la construcción en países desarrollados representa el 40 % del consumo de energía primaria, el 70 % del uso de electricidad y un 40 % de las emisiones de gases de efecto invernadero. Es interesante destacar que las edificaciones representan entre una tercera y una cuarta parte del consumo de energía global generada. A pesar de la crisis energética iniciada en los setentas y principios de los ochenta, y el decaimiento de los recursos fósiles, la demanda de energía ha ido incrementando hasta la fecha. Además, con base al historial de consumo y a las proyecciones a futuro del consumo de energía en edificaciones, se estima que seguirá incrementando considerablemente a nivel global [6] (Tabla 1.1). Debido a esto, la crisis energética ha obligado a prestar interés en el ahorro de energía.

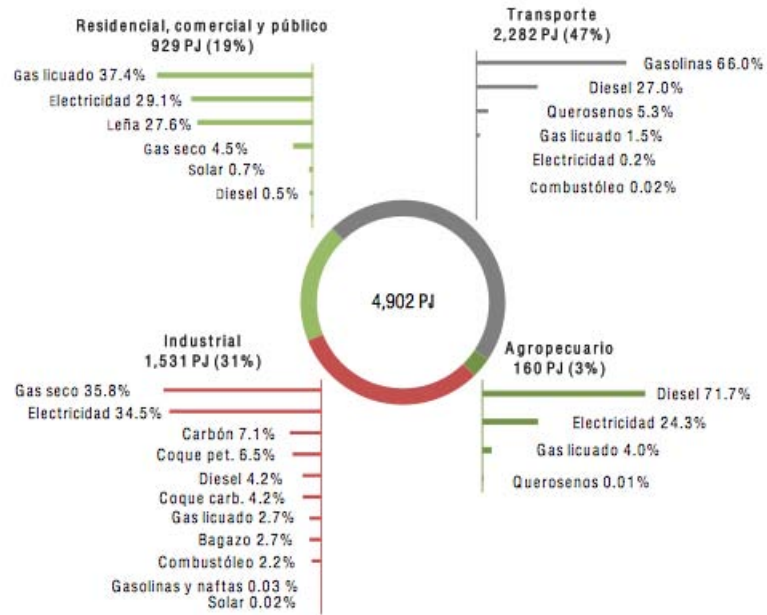


Figura 1.3. Consumo final energético por sector en México, 2014 [4].

La modernización, la economía industrializada y el crecimiento poblacional, han impactado en el incremento de la demanda del sector de la construcción, conllevando al desarrollo de edificaciones de gran calibre y de alto lujo en todo el mundo; resolviendo dicha demanda, pero a su vez, significando una alta demanda de consumo de energía. Es importante notar que la tendencia arquitectónica es la de desarrollar sistemas constructivos ligeros con baja masa térmica que permitan el desarrollo de edificaciones colosales intencionadas en satisfacer la demanda del crecimiento económico.

Año	Consumo eléctrico (ExaJoules/año)
2004	76.171
2010	86.721
2015	95.688
2020	102.651
2025	108.981
2030	115.733

Tabla 1.1. Consumo de energía anual mundialmente estimado en edificaciones [6].

El almacenamiento de energía latente es particularmente atractivo dado que se tiene la posibilidad de almacenar energía en forma de calor en un espesor reducido.

Cuando una sustancia cambia de fase, una gran cantidad de energía es almacenada o liberada sin un cambio significativo en la temperatura.

El MCF mejor conocido y más abundante es el agua, sin embargo, debido a tener una temperatura de cambio de fase cercana a los 0°C , no es apta para aplicaciones como la edificación donde la temperatura de cambio de fase útil es cercana a la temperatura interior de confort.

Para reducir el enorme consumo de energía derivado del control de la temperatura al interior de las edificaciones, es necesario el desarrollo e investigación de nuevas tecnologías en la construcción de edificaciones. El uso desmesurado y la mala proyección de sistemas de aire acondicionado en casas, comercios y oficinas, evidencia esta tendencia de lograr confort térmico deliberadamente. Para lograr un ambiente arquitectónico de mayor confort, es necesario integrar estrategias de diseño bioclimático, que además de sencillas, ayudan a reducir costos adicionales de consumo y también a reducir emisiones de gases de efecto invernadero.

La utilización de un SAET en la envolvente de las edificaciones y en general en el sistema constructivo puede contribuir en el ahorro de energía, o mejorar las condiciones de confort térmico. Por lo tanto, esta tesis está dirigida hacia el estudio del potencial del uso de los materiales con MCF en la envolvente de edificaciones ligeras, donde se lleva a cabo un proceso de cambio de fase, el cual involucra el almacenamiento y la liberación de energía en forma de calor latente, o calor latente de fusión. El MCF puede ser incorporado en la envolvente como un sistema de almacenamiento de energía térmica SAET con el fin de almacenar la energía solar durante el día, y liberarla por las noches cuando la temperatura es más baja. De esta manera es posible reducir la amplitud de la oscilación de la temperatura al interior, y reducir el espesor de la envolvente evitando elementos estructurales pesados en la construcción, y finalmente proporcionar una temperatura más adecuada para las necesidades del ser humano. Existen diversos estudios de MCF y su desempeño junto con HVAC&R. Sin embargo, es escasa la literatura publicada sobre avances en el uso de MCF para climas tropicales sin el uso de HVAC&R. En consecuencia, el estudio del comportamiento y desempeño térmico de la aplicación de los MCF puede ayudar a la reducción del consumo de energía de una edificación, con el fin de generar espacios sin el uso de HVAC&R. Para este trabajo se seleccionó el MCF macroencapsulado BioPCM por ser un material fácil de instalar tanto para edificaciones nuevas como existentes, y con gran versatilidad en la selección de los rangos de fusión y capacidad de almacenamiento de energía térmica.

1.1.4. Organización de la tesis

En el capítulo 1 se realiza una revisión bibliográfica de los MCF, donde se incluyen entre los principales temas la clasificación de los MCF, sus características y los métodos de incorporación en la envolvente de la edificación. En el capítulo 2 se presentan los diferentes modelos numéricos para abordar los problemas con MCF, o de frontera móvil, el cual es llamado problema de Stefan. En el capítulo 3 se presenta el módulo experimental y la instrumentación, seguido del capítulo 4 donde se realiza una descripción del uso de EnergyPlus para la simulación del comportamiento térmico del módulo con MCF. En el capítulo 6 se presentan los resultados y sus implicaciones y la tesis finaliza con las conclusiones.

1.2. Almacenamiento de energía térmica

Los SAET actúan como amortiguamiento térmico hacia los espacios interiores donde hay fluctuaciones de temperatura diarias. Esta tecnología opera tanto en almacenamiento de calor sensible (ACS) como almacenamiento de calor latente (ACL) [7]. El ACS utiliza materiales masivos como el concreto y tabiques para almacenar energía térmica mientras la temperatura del material aumenta. Y el ACL utiliza el calor latente almacenado o liberado durante el cambio de fase para incrementar la capacidad térmica. Debido a la intermitencia de los recursos naturales de energía, (que en este caso el uso de la energía térmica provista por la radiación solar) los sistemas de almacenamiento de energía juegan un papel muy importante en la conservación de la energía disponible y el manejo de ésta. La energía solar está disponible solo durante el día, por lo que su conservación y su manejo requiere de un sistema de almacenamiento de energía térmica de manera que el exceso de calor recolectado durante el horario diurno pueda ser almacenado para su uso nocturno.

1.2.1. Calor sensible

El calor sensible es la cantidad de calor liberado o almacenado por una substancia durante un cambio de temperatura. Hasta ahora la forma más común de almacenamiento de energía térmica es como calor sensible (Figura 1.4), el calor transferido a través del medio de almacenamiento lleva a un incremento de la temperatura del medio de almacenamiento.

La energía térmica almacenada ΔQ (Ecuación(1.1)) debido al incremento de temperatura en un medio de almacenamiento está dado por la siguiente ecuación [23].

$$\Delta Q = mc\Delta T \tag{1.1}$$

Donde, c es el calor específico, m la masa del material de almacenamiento, ΔT es la diferencia de temperaturas.

A menudo el calor específico está dado respecto a la cantidad de material, ya sea el volumen (capacidad calorífica) o la masa (calor específico). De tal manera la ecuación (1.1) denota la transferencia de calor de energía térmica del material de almacenamiento. El almacenamiento de energía en forma de calor sensible es a menudo usado en la construcción a través de un material masivo (sólido), como es el ladrillo, el tabique, la piedra y en algunas ocasiones en forma de líquido como el agua. Los gases tienen muy baja capacidad calorífica volumétrica, por lo que no se usan como almacenamiento de calor sensible.

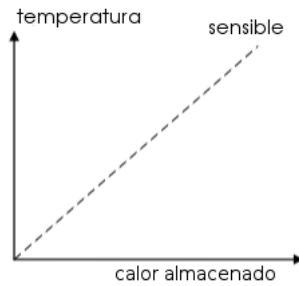


Figura 1.4. Calor sensible.

1.2.2. Calor latente

El almacenamiento de energía de calor latente ha sido aplicado en edificaciones donde ha revelado beneficios en términos de almacenamiento y liberación de energía en forma de calor [8, 9, 10, 11]. Al introducir materiales de almacenamiento de calor latente en edificaciones las fluctuaciones de temperatura al interior pueden ser reducidas. [12]. Existen diferentes opciones para el almacenamiento de calor en forma latente, mediante cambios de fase gas-líquido, sólido-gas, sólido-sólido y sólido-líquido, cada una con sus ventajas y desventajas. El cambio de fase de sólido a líquido a través de un ciclo fusión-solidificación puede almacenar y liberar gran cantidad de calor si se ha seleccionado un material adecuado. Mientras el calor está siendo transferido a través del material de almacenamiento y sufriendo una fundición, la temperatura se mantiene constante a la temperatura de fusión, que también es llamada temperatura de cambio de fase (Figura 1.5). Ya que la fusión ha sido completada, la transferencia de calor se da nuevamente de manera sensible. Se le llama calor latente a la energía térmica almacenada por la fusión (Ecuación(1.2)) y debido al bajo cambio de volumen, la energía térmica almacenada es

igual a la diferencia de entalpía.

$$\Delta Q = \Delta H = m\Delta h \quad (1.2)$$

Donde, ΔH es entalpía de calor latente y Δh es entalpía de calor latente específica [23].

El calor latente, o energía térmica almacenada durante el proceso de cambio de fase es calculado por la diferencia de entalpía entre el estado sólido y el líquido. En el caso del cambio de fase sólido-líquido es llamado calor de fusión, o entalpía de calor latente. Los materiales de cambio de fase de líquido a sólido son adecuados para almacenamiento de energía térmica, y son usualmente referidos como materiales de almacenamiento de calor latente o simplemente MCF.

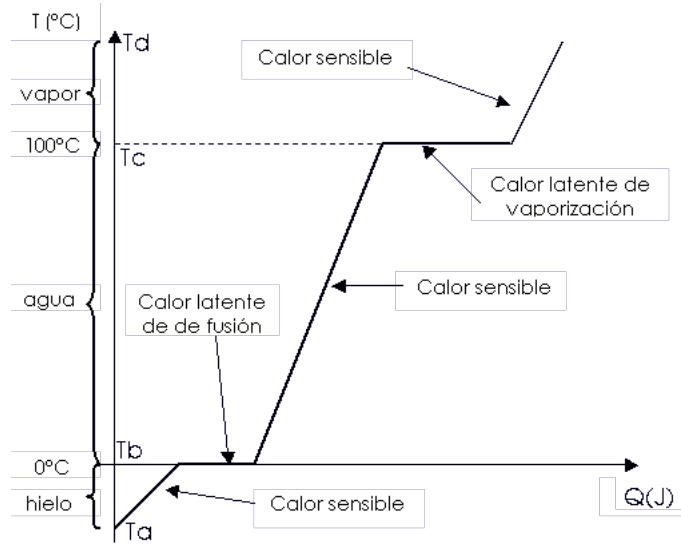


Figura 1.5. Calor latente [21].

La siguiente ecuación (1.3) combina las ecuaciones de calor sensible y calor latente para determinar el intercambio total de energía en un medio [7].

$$\Delta Q = m \left[\int_{T_0}^{T_A} C_{ps}(T)dT + \Delta H_f + \int_{T_B}^{T_C} C_{pl}(T)dT + \Delta H_v + \int_{T_D}^{T_E} C_{pv}(T)dT \right] \quad (1.3)$$

Donde, $C_{ps}(T)dT$ es el calor sensible en la fase sólida, ΔH_f es la entalpía de fusión, $C_{pl}(T)dT$ es el calor sensible en la fase líquida, ΔH_v es la entalpía de evaporización y $C_{pv}(T)dT$ es el calor sensible en la fase gaseosa, T es temperatura, T_b es la temperatura de fusión, T_c es la temperatura de evaporación, T_a es la temperatura en estado sólido, T_d es la temperatura en estado gaseoso.

1.3. Clasificación de los MCF

Diversos autores [7, 16, 17] han realizado artículos que contienen revisiones muy completas de los tipos de material que han sido utilizados, su clasificación, características, ventajas y desventajas y las técnicas experimentales usadas para determinar el comportamiento de solidificación y fusión de dichos materiales. Una de las primeras clasificaciones encontradas para las sustancias que pueden ser usadas para almacenamiento de energía por cambio de fase fue dada por [13] en el año de 1983. La mayoría de los autores se han basado en esta clasificación y según su composición química se clasifican en tres grupos: MCF sólido-líquido, MCF líquido-gas y MCF sólido-sólido (Ver figura 1.6). Los MCF sólido-líquido se clasifican a su vez en orgánicos, inorgánicos y eutécticos. Cada uno de estos tres tipos de MCF pueden ser subclasificados; el grupo de los MCF inorgánicos se compone de sales hidratadas y metales, mientras que el grupo de MCF orgánicos son compuestos de parafinas y no parafinas. Los MCF eutécticos son mezclas de compuestos orgánicos e inorgánicos.

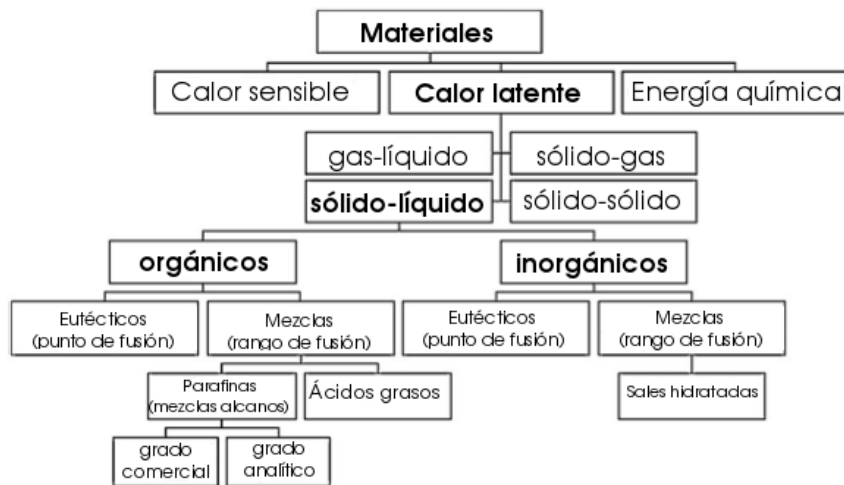


Figura 1.6. Clasificación de los MCF por su composición química [140].

Cada uno de los grupos tienen sus rangos típicos de temperaturas de fusión y energía de calor latente y pueden ser vistos en la figura 1.7.

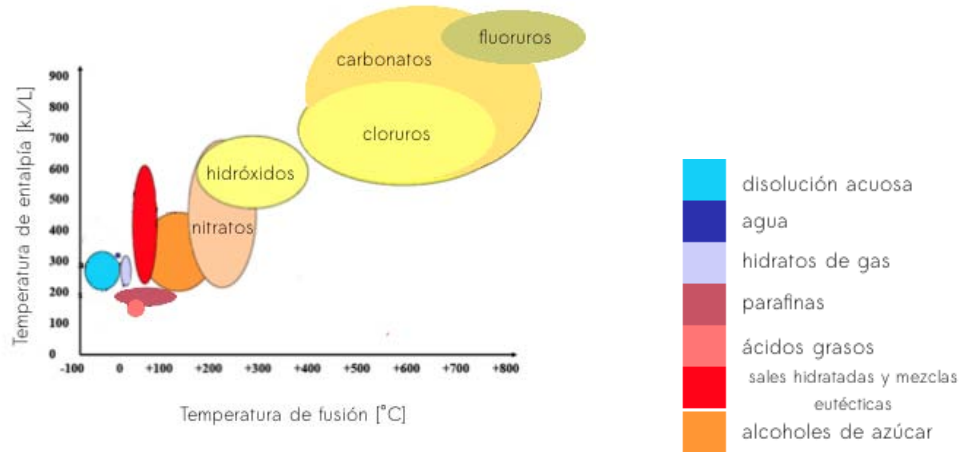


Figura 1.7. Entalpía de cambio de fase y temperatura de fusión de los MCF [15].

El material puede ser una sustancia pura, una mezcla eutéctica o una mezcla no eutéctica. La diferencia entre las mezclas eutécticas y no eutécticas es la temperatura de cambio de fase: para una mezcla eutéctica el cambio de fase se da a temperatura constante, o tiene un punto o temperatura de fusión, mientras que en las mezclas no eutécticas el cambio de fase se da en un intervalo de temperatura, o rango de temperatura de fusión. A continuación se muestra la tabla 1.2 proporcionada por [21] donde se encuentran sustancias de los principales MCF según su clasificación, divididos en orgánicos tanto parafinas como no parafinas, inorgánicos y eutécticos.

Tabla 1.2. Clasificación de los MCF por el tipo de sustancia [21].

Compuesto Orgánico	Parafinas	Compuestos Inorgánicos	Eutécticos (Inorgánicos)
Poliglicol E 400	Parafina C_{14}	H_2O	58.7% $Mg(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ + 41.2% $MgCl_2 \cdot 6H_2O$
Poliglicol E 600	Parafina $C_{15}-C_{16}$	$LiClO_3 \cdot 3H_2O$	
Poliglicol E 6000	Parafina $C_{16}-C_{18}$	$Mn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	66.6% $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ + 33.3% $MgCl_2 \cdot 6H_2O$
Dodecanol	Parafina $C_{13}-C_{24}$	$LiNO_3 \cdot 3H_2O$	
Tetradodocanol	Parafina $C_{16}-C_{28}$	$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	48% $CaCl_2$ + 4.3% $NaCl$ + 0.4% KCl + 47.3 H_2O
Bifenil	Parafina C_{18}	$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$	
HDPE	Parafina $C_{20}-C_{33}$	$CaBr_2 \cdot 6H_2O$	47% $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ + 53% $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$
Trans-1,4-polibutadieno	Parafina $C_{22}-C_{45}$	$Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$	
Propianido	Parafina $C_{23}-C_{50}$	$Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$	60% $Na(CH_2COO) \cdot 3H_2O$ + 40% $CO(NH_2)_2$
Naftaleno	Cera Parafina	$Na(CH_3COO) \cdot 3H_2O$	
Erititol	Octodecano	$Na_2P_2O_7 \cdot 10H_2O$	66.6% $Urea$ + 33.4% NH_4Br
Dimetil-sulfóxido		$Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$	
Ácido Cáprico		$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	
Ácido Capricínico		$(NH_4)Al(SO_4) \cdot 6H_2O$	
Ácido Laruinínico		$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	
Ácido mirísticos		$NaNO_3$	
Laquisol		KNO_3	
Ácido Palmítico		KOH	
Ácido Estéárico		$MgCl_2$	
Acetamida		$NaCl$	
Propionamida		Na_2CO_3	
		KF	
		K_2CO_3	

Desde un punto de vista práctico para aplicaciones en edificación solamente son utilizados los MCF sólido-líquido, ya que tienen un cambio de fase cercano a la temperatura de confort. Por lo que de la gran variedad de sales hidratadas y MCF orgánicos previamente investigados, los posibles candidatos para aplicaciones exclusivamente en edificaciones son mostrados en la tabla 1.3 [13, 18, 19].

1.3.1. MCF orgánicos

Los materiales de almacenamiento térmico orgánicos son usualmente clasificados en dos grupos: parafinas, las cuales son mezclas de alcanos, y las no parafinas que incluyen ácidos grasos, algunos alcoholes y ésteres. Estos materiales son por lo general químicamente estables, no sufren subenfriamiento, no son corrosivos, ni tóxicos y tienen alto calor latente de fusión (pueden llegar a 250 kJ/kg). A continuación se muestra la tabla 1.4 de los MCF orgánicos proporcionada por [5] con temperaturas de fusión cercanas a la temperatura de confort y sus propiedades térmicas más importantes; k_l y

Tabla 1.3. MCF para aplicaciones en edificaciones [20].

Material	Tipo	Temperatura de fusión [°C]	Entalpía de fusión [kJ/kg]	Conductividad Térmica [W/m K]	Densidad [kg/m ³]
n-Heptadecano	Orgánico	19	240	0.21	760 (líq.)
61.5% mol ácido caprico + 38.5% mol ácido láurico	Mezcla ácidos grasos	20.8-21.7	171-172		
Butil Esterato	Orgánico	19.1	132		
		19	140		760 (líq.)
Parafina C ₁₆ - C ₁₈	Orgánico	18-23	123-200	0.21	
FeBr ₃ · 6H ₂ O	Inorgánico (sales hidratadas)	20-22	152		
		21	105		
		27			
Ácido cáprico + ácido láurico	Mezcla ácidos grasos	21	143		
Dimetil sabacato	Orgánico	21	120-135		
Octadecil 3-mencaptopropilato	Orgánico	21	143		
26.5 mol% ácido mirístico + 73.5 mol% ácido cáprico	Mezcla ácidos grasos	21.4	152		
Parafina C ₁₇	Orgánico	21.7	213		
Poliglicol E600	Orgánico	22	127.2	0.1897 (líq., 38.6°C)	1126(líq., 25°C)
		17-22	127	0.19(líq.)	1232(sólido, 4°C)
		20-25	146		
65-90% metil palmitato + 35-10% metil esterato	Mezcla orgánica	22-25.5	120		
Parafina C ₁₃ -C ₂₄	Orgánico	22-24	189	0.21 (líq.)	0.760(líq.) 0.900(sólido)
75.2% ácido cáprico + 24.8% ácido palmítico	Mezcla ácidos grasos	22.1	153		
Etil Palmitato	Mezcla Orgánica	23	122		
34% C ₁₄ H ₂₈ O ₂ + 66% C ₁₀ H ₂₀ O ₂	Eutéctico orgánico	24	147.7		
55 - 65% LiNO ₃ · 3H ₂ O + 35 - 45% Ni(NO ₃) ₂	Mezcla inorgánica	24.2	230		
45% Ca(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O + 55% Zn(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	Mezcla inorgánica	25	130		1930
66.6% CaCl ₂ · 6H ₂ O + 33.3% MgCl ₂ · 6H ₂ O	Mezcla inorgánica	25	127		1590
50% CaCl ₂ + 50% MgCl ₂ + 6H ₂ O	Mezcla inorgánica	25	95		
Octodécano + docosano	Eutéctico orgánico	25.5-27.0	203.8		
Mn(NO ₃) · 6H ₂ O	Inorgánico (sales hidratadas)	25.5	125.9		1738 (líq., 20°C)
		25.8	125.9		1728 (líq., 40°C)
			148		1795 (líq., 5°C)
Octadécano + heneicosano	Eutéctico orgánico	25.8-26.0	173.93		
Ácido láctico	Ácido graso	26	184		
Octadecilo thiogliato	Orgánico	26	90		
34% ácido mirístico + 66% ácido caprico	Orgánico	26	147.7		
		24	147.7		
1-Duodecanol	Orgánico	26	200		
		17.5-23.3	188.8		
48% CaCl ₂ + 4.3% NaCl + 0.4% KCl + 47.3% H ₂ O	Mezcla inorgánica	26.8	188		1640
86.6% ácido cáprico + 13.4% ácido estérico	Mezcla ácido graso	26.8	160		
50% CH ₃ CONH ₂ + 50% NH ₂ CONH ₂	Eutéctico orgánico	27	163		
4.3% NaCl + 0.4% KCl + 48% CaCl ₂ + 47.3% H ₂ O	Mezcla inorgánica	27	188		1530 (líq.)
Vinil esterato	Orgánico	27-29	122		1640(sólido)
		27			
Parafina C ₁₈	Orgánico	28	244	0.148 (líq.)	0.774(líq.)
		27.5-22.5	243.5	0.15 (sólido)	0.814(sólido)
n-Octadecano	Orgánico	28	200	0.148 (líq.)	774(líq.)
				0.358(sólido)	814(sólido)
		28-28.1	245		
			250-247.7		

k_s son la conductividad térmica en fase líquida y en fase sólida respectivamente, y C_{fs} y C_{fl} son la capacidad calorífica en fase sólida y en fase líquida respectivamente.

Tabla 1.4. MCF orgánicos [5].

Materiales	T_f [°C]	H_f [kJ/kg]	C_{fs} [kJ/kg/K]	C_{fl} [kJ/kg/K]	k_s [W/m ² /K]	k_l [W/m ² /K]
GR25	23.2-24.1	45.3	1.2	1.2		
PEG600	22	127.2		2.49		0.189
n-Octadecano	27	243.5	1.934	2.196	0.358	0.148
n-Eicosano	37	241	2.01	2.04	0.15	0.15
P116	47	225	2.4	1.9	0.24	0.24
Butil esterato	19	140				
ERMEST2325	17-20	138				
RT27	26-28	179	1.8	2.4	0.2	0.2
MICRONAL26	26	110				
RT20	22	172				
MP65 %-MS35 %	21.8-24.5	175				
MP77 %-MS23 %	22.4-23.8	177				
MP93 %-MS7 %	22.2-22.8	182				
GR41	43	63			0.15	0.15
GR27	28	72			0.15	0.15
Cáprico-mirístico eutéctico	21.7	155				
MICRONAL 5001	26	110				
MICRONAL 5008	22	110				
Heptadecano	22	214				
MPCM28-D	28	180-195				
UNICERE55	45-60	185				
n-Nonadecano	31.8	160				
Cáprico-estérico eutéctico	24.7	179				
Cáprico-láurico no-eutéctico	19.2-20.3	144-150				
U3	28	244			0.28	0.22
U4	13.6-23.5	104.5-107.5	4	4.1	0.18	0.22
RT25	25	147	2.9	2.1	1.02	0.56

1.3.1.1. Parafinas

Las parafinas son sustancias que coloquialmente se conocen como un material de consistencia tipo cera a temperatura ambiente. Químicamente hablando, las ceras parafinas consisten de una cadena recta primaria de hidrocarburos con una pequeña cantidad de ramificaciones, como grupos de 2-metil, a los extremos de la cadena (Figura 1.8).

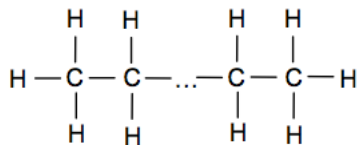


Figura 1.8. Composición química de las parafinas [23].

Las parafinas contienen mayormente alcanos caracterizados por C_nH_{2n+2} ; el enésimo alcano contiene usualmente el 75% o puede alcanzar el 100% [24]. Dependiendo

del largo de la cadena del alcano en la parafina, pueden ser cadenas pares (n-parafinas) o nones (isoparafinas). La parafinas puras contienen solamente alcanos, por ejemplo la parafina octadecano, $C_{18}H_{38}$. El punto de fusión de los alcanos se incrementa al incrementar el número de átomos de carbono. Los alcanos que contienen entre 14 y 40 átomos de carbono poseen puntos de fusión entre 6 y 80°C y son normalmente llamadas parafinas. Las ceras comerciales pueden tener rangos entre 8 y 15 átomos de carbono [24].

En estado sólido las parafinas son encontradas generalmente en dos diferentes modificaciones alotrópicas difiriendo sus propiedades físicas y sus estructuras cristalinas.

1.3.1.2. No parafinas

Los MCF orgánicos que no son parafinas incluyen una amplia gama como son los ácidos grasos, ésteres, alcoholes y glicoles. Generalmente tienen excelentes propiedades de fusión y solidificación, pero son tres veces más caros que las parafinas [11]. Los de más interés en este grupo son los ácidos grasos o ácidos palmitoleicos, y están divididos en seis grupos, caprílicos, cápricos, láuricos, mirísticos, palmíticos y esteáricos con 8, y hasta 18 átomos de carbono por molécula. Tomando en cuenta que otros compuestos orgánicos no parafinas tienen propiedades similares a los ácidos grasos, presentaremos las principales características de los ácidos grasos por ser los de mayor interés.

Los ácidos grasos son compuestos orgánicos caracterizados por $CH_3(CH_2)_{2n}COOH$ (Figura 1.9) con valores de calor de fusión comparables a los de las parafinas. Es conocido que los ácidos grasos poseen un comportamiento de fusión-solidificación parejo con muy bajo nivel de subenfriamiento o nulo [13, 22].

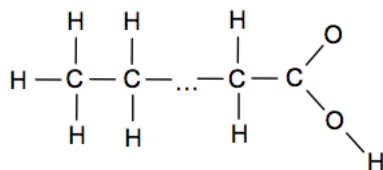


Figura 1.9. Composición química de las no parafinas [23].

1.3.2. MCF inorgánicos

Los MCF inorgánicos están constituidos por sales hidratadas y metales (los metales tiene temperaturas de fusión muy altas para aplicaciones en edificación) [25]. Las sales hidratadas han sido una de las más investigadas para propósitos de almacenamiento térmico en viviendas. Las sales hidratadas pueden ser consideradas como aleaciones de sales inorgánicas y agua, resultando un sólido cristalino. De hecho, su transición de

cambio de fase puede ser relacionada con la hidratación de la sal, aunque este proceso es similar al fundir o solidificar al compuesto. Las sales hidratadas usualmente funden tanto a la sal hidratada con pocos moles de agua, como en su forma anhídrida (sin contener agua). Durante la transición de cambio de fase, el agua es liberada de la sal hidratada disolviendo las moléculas de sal no hidratadas. Estos materiales generalmente tienen buena conductividad térmica, son baratos, no son inflamables, pero tiene la desventaja de que casi todos ellos son corrosivos a la mayoría de los metales y, sufren sub-enfriamiento y descomposición de fase. El cambio de volumen en las sales hidratadas puede llegar a ser hasta del 10 %. y la gran mayoría muestran buena estabilidad química.

Las sales hidratadas se caracterizan por M_nH_2O , donde M es un compuesto orgánico, y son de gran interés como sustancias de almacenamiento de calor debido a su alta densidad de almacenamiento de calor volumétrica. De hecho, su uso como MCF ha sido utilizado desde 1947 [26]. Es comúnmente un número integral de moléculas de agua por par de iones de la sal, formando una estructura cristalina estable. Los enlaces son usualmente iones dipolos o enlaces con hidrógeno. Las moléculas de agua están localizadas y orientadas en la estructura en una manera ordenada y definida. A continuación se muestra la tabla 1.5 de los MCF inorgánicos proporcionada por [5].

Tabla 1.5. MCF inorgánicos [5].

Materiales	T_f [°C]	H_f [kJ/kg/K]	C_{fs} [kJ/kg/K]	C_{fl} [kJ/kg/K]	k_s [W/m ² /K]	k_t [W/m ² /K]
Sal eutéctica	32	216				
SP25A8	25-26	180	2.5		0.6	0.6
Cloruro de calio hexahidratado	26-19	175	2.3	1.4	1	1
Sodio tiosulfato pentahidratado	40-48	210	1.46	2.4		
D1*	30-32.5	131				
D2*	26-28	188	1.44	1.44	1.09	0.54
$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	29.8	191				
S27	27	190	1.5	2.22	0.79	0.48
L30	30	270	1.23	1.79	1.02	

*D=desconocido

1.3.3. MCF eutécticos

Los materiales eutécticos son aleaciones de inorgánicos (principalmente sales hidratadas) y/o orgánicos. Tienen una sola temperatura de fusión, la cual es usualmente menor que cualquiera de los compuestos constitutivos. Los MCF eutécticos forman un cristal cuando solidifican. Una de las principales características de los eutécticos es su capacidad de fundirse y solidificarse sin sufrir segregación de fase. A continuación se muestra la tabla 1.6 de los MCF eutécticos.

Tabla 1.6. MCF Eutécticos [27].

Compuesto	Temperatura de fusión [°C]	Calor de fusión [kJ/kg]
66.6 % $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ + 33.3 % $MgCl_2 \cdot 6H_2O$	25	127
48 % $CaCl_2$ + 4.3 % $NaCl$ - 0.4 % KCl + 47.3 % H_2O	26.8	188
47 % $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ + 53 % $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	30	136
60 % $Na(CH_2COO) \cdot 3H_2O$ + 40 % $CO(NH_2)_2$	30	

1.4. Características de los MCF según su clasificación

A continuación se muestra la tabla 1.7, la cual muestra las principales ventajas y desventajas de los diferentes MCF por su clasificación en orgánicos, inorgánicos y eutécticos.

Tabla 1.7. Ventajas y desventajas de los MCF [29].

Clasificación	Ventajas	Desventajas
Orgánicos: Parafinas y no-parafinas	<ul style="list-style-type: none"> -Disponibilidad en un gran rango de temperatura -Alto calor latente de fusión (ácidos grasos tienen altos valores de calor de fusión en comparación con los de parafinas) -Congelamiento con poco o nulo subenfriamiento -Fase de cambio parejo -Propiedades de fácil nucleación -Sin segregación y buen tasa de nucleación -Estable térmicamente y químicamente, predecible -Baja presión de vapor in forma de fusión -No es peligroso, no-reactivo y no-corrosivo (los ácidos grasos podrían ser ligeramente corrosivos) -Compatibilidad con materiales convencionales de construcción -Reciclable 	<ul style="list-style-type: none"> -Baja conductividad térmica -Menor capacidad de almacenamiento de calor latente volumétrico, ej., menor entalpía de cambio de fase -Menor densidad -Flamable (posibilidad de emplear aditivos retardantes de fuego) -No compatible con contenedores plásticos -Más costoso (parafinas comerciales son más baratas y de mayor disponibilidad que parafinas puras. ácidos grasos son 2-2.5 veces más costosos que las parafinas de grado técnico) -Cambio de volumen relativamente amplio (sin embargo algunos ácidos grasos podrían sufrir cambios en volumen)
Inorgánico: Sales hidratadas	<ul style="list-style-type: none"> -Mayor capacidad de almacenamiento de calor latente volumétrico, por ejemplo, mayor entalpía de fusión -Mayor calor latente de fusión -Bajo costo y disponibilidad -Cambio de fase definido -Mayor conductividad térmica -No flamable -Menor cambio de volumen -Es mejor usar hidratos de sal que parafinas para reducir el impacto ambiental de la manufactura/desecho 	<ul style="list-style-type: none"> -Malas propiedades de nucleación y problemas de subenfriamiento -Fusión impareja y deshidratación en el proceso de ciclos térmicos -Segregación de fase durante transición y problemas de estabilidad térmica -Su aplicación puede hacer que se requiera el uso de aditivos de nucleación y engrosamiento -Descomposición y separación de fase -No es compatible con algunos materiales de construcción -Corrosivo ante la mayoría de metales y ligeramente tóxico
Eutéctico	<ul style="list-style-type: none"> -Temperatura de fusión definida -Densidad de almacenamiento térmico ligeramente por encima de los compuestos orgánicos -No-segregación y cambio de fase parejo 	<ul style="list-style-type: none"> -Información referente a sus propiedades termofísicas limitada -Algunos eutécticos grasos tienen un fuerte olor y por ende no son recomendables para usar como MCF en un panel

1.5. Criterio de selección

Los MCF deben poseer las propiedades física, químicas y económicas de acuerdo a su aplicación y deben de estar fácilmente disponibles.. Los criterios de selección del

MCF son resumidas por [29] en la tabla 1.8.

Tabla 1.8. Criterio de selección de los MCF [28].

Propiedades térmicas y físicas	Temperatura de cambio de fase adecuado para el rango de temperatura operativa deseada Alta conductividad térmica y buena transferencia de calor Alto calor latente de transición por unidad de masa Alto calor específico y alta densidad Estabilidad térmica de largo plazo y fusión pareja Equilibrio de cambio de fase favorable y no segregación Bajo cambio de volumen en el cambio de fase Baja presión de vapor bajo temperatura de operación
Propiedades cinéticas	Alta tasa de nucleación y poco o nulo subenfriamiento en la fase líquida Alta tasa de cristalización
Propiedades químicas	Ciclos de fusión/congelamiento completos y reversibles Estabilidad química de largo plazo y no-degradación después de varios ciclos de fusión/congelamiento No corrosivo y compatibilidad con materiales de construcción No tóxico, no flamable y no explosivo
Propiedades económicas	Abundante y gran disponibilidad Costo-efectivo
Propiedades ambientales	Baja energía incorporada Facilidad de separación de otros materiales y potencial de reciclaje Bajo impacto ambiental, no contaminante

Es visible que ninguno de los materiales puede satisfacer completamente los requerimientos y propiedades de un medio ideal para almacenamiento térmico, por lo que es necesario diseñar un sistema adecuado con los materiales disponibles para compensar las deficientes propiedades físicas y químicas de los diferentes MCF.

1.6. MCF comerciales

Es conocido que un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas fusionan con una alta energía de calor latente en cualquier rango de temperatura requerida, pero solo algunas pocas se han comercializado. (ver tabla 1.9)

Tabla 1.9. MCF comercialmente disponibles en el mercado internacional [27].

Nombre MCF	Tipo de producto	Punto de fusión [°C]	Calor de fusión [kJ/kg]	Proveedor
RT20	Parafina	22	172	Rubitherm GmBH
Climsel C23	Sal hidratada	23	148	Climator
Climsel C24	Sal hidratada	24	216	Climator
RT26	Parafina	25	131	Rubitherm GmBH
RT25	Parafina	26	232	Rubitherm GmBH
STL27	Sal hidratada	27	213	Mitsubishi chemical
S27	Sal hidratada	27	207	Cristopia
RT30	Parafina	28	206	Rubitherm GmBH
RT27	Parafina	28	179	Rubitherm GmBH
TH29	Sal hidratada	29	188	TEAP
Climsel C32	Sal hidratada	32	212	Climator
RT32	Parafina	31	130	Rubitherm GmBH
BioPCM	No parafina	21, 23, 25, 27	212	Phase Change Energy Solutions

1.7. Métodos de medición

El desempeño de los MCF como un sistema de almacenamiento de energía térmica en forma de calor latente (SAETCL) está relacionado directamente con sus propiedades térmicas. Al implementar u optimizar un sistema, es necesario saber de antemano las propiedades térmicas. A pesar de que los proveedores y productores de MCF reportan ciertas propiedades térmicas, éstas pueden ser erróneas, se han reportado casos en que están sobreestimadas [27]. La inconsistencia en la información ha sido puntualizada por algunos autores [32, 33]. Por lo tanto es pertinente hacer mediciones y análisis de los MCF para verificar las propiedades térmicas. Las técnicas más comunes utilizadas actualmente son el calorímetro de escaneo diferencial (DSC) y el análisis térmico diferencial (DTA). Sin embargo existen otros métodos alternativos como el método de la Historia T, o el del plato caliente.

1.7.1. Calorímetro de escaneo diferencial

El Calorímetro de escaneo diferencial es un instrumento que mide la capacidad calorífica de pequeñas muestras de un material, y es conocido como DSC por sus siglas en inglés Differential Scanning Calorimeter. El principio de la prueba es mantener un equilibrio en la temperatura entre la muestra a analizar y el ejemplar de referencia, que habitualmente es metal de Indio. La temperatura varia linealmente respecto al tiempo. El exceso de calor emitido, o absorbido por el ejemplar en análisis es registrado como función del tiempo. De manera que el calor total de la transición del ejemplar en análisis es obtenido al integrar este exceso de calor registrado [32, 34, 35, 36]. El DSC reporta una curva del flujo de calor contra temperatura o tiempo [37], llamada curva de fusión-

solidificación. A través de esta curva es posible determinar la temperatura de fusión, el calor latente de fusión y la solidificación. Las principales limitaciones del DSC son: (i) algunos fenómenos de transferencia de calor son omitidos como es la convección en el ejemplar a analizar, tampoco toma en cuenta la desuniformidad de la temperatura y el tiempo necesario para calentar o enfriar el ejemplar, es decir la inercia [5]; (ii), las cantidades a analizar son pequeñas a pesar de que la capacidad calorífica aparente calculada de las curvas del DSC son claramente influenciadas por la masa del ejemplar y la tasa de calentamiento [23, 38]. Las muestras son usualmente de 6.3 mm de diámetro por 6.3 mm de altura, por lo que se han reportado la acentuación de los efectos de subenfriamiento y por lo tanto nucleación pobre [39]; y (iii) el equipo es complejo y caro, además que el cambio de fase no puede ser presenciado visualmente [19].

1.7.2. Análisis térmico diferencial

La técnica de análisis térmico diferencial (DTA, por sus siglas en inglés) es una técnica alternativa al DSC. En la prueba DTA, el calor aplicado a la muestra a analizar y al ejemplar de referencia permanece constante, a diferencia del DSC que mantiene la temperatura constante [40]. El cambio de fase y otras propiedades térmicas pueden ser medidas a través de la diferencia de temperaturas entre la muestra a analizar y el ejemplar de referencia.

1.7.3. Método de historia T

El método conocido como T-history (TH) es utilizado para determinar la temperatura de fusión, el grado de subenfriamiento, el calor de fusión, el calor específico, y la conductividad térmica de diferentes MCF simultáneamente. El método es descrito por [41]: Los MCF son puestos en diferentes tubos verticalmente; junto con un material de referencia que es igualmente puesto en un tubo vertical. La temperatura de la muestra es medida con un termopar localizado al centro del tubo. Al comenzar la prueba, todos los materiales se encuentran en estado líquido. Los tubos se someten súbitamente a una atmósfera controlada, usualmente un baño de agua fría en el cual la temperatura es regulada a un punto por debajo de la temperatura de fusión de los MCF. La temperatura al interior del tubo y del ambiente controlado es monitoreada. Y es obtenida una curva de temperatura como función del tiempo. El coeficiente convectivo es deducido de la curva de temperatura del material de referencia. En la curva de temperatura del MCF se muestran tres etapas, el enfriamiento de la fase líquida, la solidificación del MCF, y el enfriamiento de la fase sólida. El calor latente del material y la capacidad calorífica de las diferentes fases son obtenidas al calcular las áreas entre la curva de temperatura de material de referencia y la curva de temperatura del ambiente controlado en las

tres etapas. La conductividad térmica del ejemplar es obtenida utilizando un método inverso en el tiempo total de solidificación. Jinping y Yi [41] propusieron este método, e hicieron mediciones de algunos MCF encontrando concordancia entre los resultados de las pruebas e información experimental encontrada en la literatura. Hong et al. [43] modificaron el método TH mejorando algunas suposiciones en el método de [41]. Peck et al. [44] también mejoraron el método de medición al montar los tubos de prueba horizontalmente, pudiendo así disminuir la diferencia de temperaturas, y disparidades en el flujo de calor en la dirección longitudinal del tubo de prueba y las superficies, y así poder obtener datos más certeros. Marin et al. [45] también mejoraron el método obteniendo la capacidad calorífica como función de la temperatura. Comparativamente con otros métodos convencionales como el DSC y DTA, el método TH está diseñado para muestras más grandes [40]; la unidad experimental es simple, es posible medir más propiedades de diversos materiales simultáneamente, y es posible observar el proceso de cambio de fase de cada ejemplar de MCF.

1.7.4. Otros métodos

Otros autores [46, 47, 48] han usado un plato caliente [49] para medir la conductividad térmica de los MCF. Jaworski y Abeid [50] también midieron la conductividad térmica de una muestra de sección transversal cuadrada, a base de yeso y MCF micro encapsulado; utilizando un plato miniatura midiendo la diferencia de temperaturas superficiales de un flujo de calor en estado estacionario. Darkwa y Kim [51] usaron el plato caliente para comparar el desempeño del almacenamiento entre dos paneles con distinto MCF. El experimento se compuso a manera sándwich con una fuente fría, una fuente caliente, un medidor de flujo de calor y el panel muestra. El sándwich fue aislado de cada lado. Las propiedades del panel muestra fueron obtenidas por el medidor de flujo durante el cambio de fase. Schossig et al. [52] también diseñaron un sistema de medición mediante un plato caliente. El sándwich se compuso del panel muestra con un plato de cobre por ambos lados.

1.8. Métodos de incorporación del MCF en la envolvente de la edificación

Varios métodos de incorporación han sido estudiados en la literatura, sin embargo se han considerando tres métodos como los más efectivos en la incorporación del PCM: Incorporación directa, inmersión, encapsulado [6]. Además, existen otros métodos de incorporación como puede ser MCF laminado a manera de sándwich, formando un panel que se combina con otros componentes de la envolvente [51, 53], y finalmente de

forma estabilizada.

1.8.1. Incorporación directa o impregnación

En este método el MCF en forma de líquido o en polvo, es mezclado directamente con materiales de construcción, como puede ser yeso, concreto, etc. durante su fabricación. Este método puede ser el más económico, puesto que no requiere de algún equipo especial durante el proceso de fabricación. El derrame y la incompatibilidad con los materiales de construcción pueden ser el mayor problema de este sistema de inclusión de los MCF. Khudhair y Farid [54] describen los diferentes maneras de impregnación.

Los materiales utilizados para la impregnación de MCF encontrados en la literatura son: morteros [11, 36, 42, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61], concretos [6, 62, 63], vermiculita [64], madera [65], cemento [66], y otros compuestos [67, 68, 69]. Un ejemplo de este método es un panel de yeso para almacenamiento de energía a escala de laboratorio elaborado por incorporación directa de 21-22 % de Butil estearato (BS) grado comercial [61].

1.8.2. Inmersión

En este método el material de construcción es sumergido en el MCF fundido, el cual es absorbido capilarmente en la porosidad de los materiales de construcción. Posteriormente el material de construcción es retirado del MCF fundido y enfriado logrando que el MCF se mantenga en los poros del material constructivo [70]. Este método tienen la ventaja de poder implementar materiales convencionales de construcción en cualquier momento [71]. Hawes y Feldman [72] evaluaron los mecanismos de absorción y establecieron un modelo de desarrollo usando constantes de absorción para los MCF en concreto, con el fin de lograr la difusión de la cantidad de MCF deseada. Sin embargo, Schossig et al. [73] reportaron que pueden haber problemas de derrame después de un periodo de algunos años.

1.8.3. Encapsulación

Los MCF pueden ser encapsulados antes de ser incorporados en elementos de construcción. Los contenedores que albergan a los MCF deben de cumplir con requisitos de resistencia, flexibilidad, estabilidad térmica, y resistencia a la corrosión; además deben de actuar como una barrera de protección al MCF de la interacción con el medio ambiente; proporcionar suficiente superficie de contacto para una buena transferencia de calor; y finalmente proporcionar estabilidad estructural y fácil manejo [74]. Existen dos tipos de encapsulación: Micro encapsulación, y macro encapsulación.

1.8.3.1. Micro encapsulado

En este procedimiento de incorporación el MCF es confinado mediante una película delgada de un material polimérico, formando partículas más pequeñas de 1mm de diámetro el cual debe ser compatible tanto con el MCF, como con el material de construcción para evitar posibles reacciones químicas entre si y la prevención de derrame durante el ciclo de cambio de fase. El MCF micro encapsulado tiene la ventaja de ser fácilmente añadido. También tiene buena transferencia de calor debido a que tienen una mayor superficie de contacto de intercambio de calor por unidad de volumen, y no necesita protección contra la destrucción [73]. Además mejora la estabilidad cíclica puesto que la separación de fase es restringida a distancias microscópicas. Hawlader et al. [75] realizaron un análisis térmico y una prueba de ciclos térmicos de una parafina micro encapsulada; encontraron que la parafina mantenía su perfil geométrico y la capacidad calorífica después de 1000 ciclos. Sin embargo, puede afectar la resistencia mecánica de la estructura donde es aplicada [54]. La calidad del proceso de micro encapsulación es evaluada por el porcentaje entre la masa de las cápsulas que contienen el MCF y el total de masa del polvo. Hawlader et al. [76] investigaron la influencia de este porcentaje sobre diversos parámetros, como es la duración del proceso, la cantidad de MCF, el agente de reticulación introducido en la solución para la aglomeración de la micro encapsulación. Tres características son relevantes en las cápsulas para poder apreciar la calidad del polvo; el diámetro promedio, el grosor de la coraza y el porcentaje de MCF comparado con la masa total de la cápsula.

1.8.3.2. Macro encapsulado

El macro encapsulado consiste en la inclusión del MCF en algún empaque, como pueden ser tubos, esferas, bolsas, paneles o algún otro tipo de recipiente. Estos contenedores pueden servir directamente como intercambiadores de calor, o pueden ser incorporados en la edificación a través de prefabricados. La macro encapsulación utiliza contenedores mayores a un centímetro. En casi todos los casos el MCF tiene que ser encapsulado para poder ser utilizado, puesto que en su fase líquida puede derramarse del recipiente que lo contiene. Con los macro encapsulado el problema de derrame puede ser solucionado y la función estructural de los elementos estructurales puede ser menos afectada. Por otro lado tiene las desventajas de tener una conductividad térmica deficiente, una tendencia a la solidificación en las orillas solamente y sistemas constructivos más complejos para poder integrar los MCF. Además de sostener especialmente el MCF en su fase líquida, y prevenir cambios en la composición al entrar en contacto con el ambiente, la macro encapsulación puede; mejorar la compatibilidad entre materiales estructurales y el MCF., facilitar el manejo del MCF durante su producción e inclusión

en el sistema productivo y reducir los problemas por cambios de volumen del MCF, lo que es un efecto positivo para aplicaciones.

1.8.4. Laminado

El MCF también puede ser laminado formando un elemento simple a manera de placa el cual se incorpora en la parte interior de la envolvente. Se han llevado a cabo experimentos y estudios numéricos [51, 53] para evaluar el desempeño de ejemplares laminados, y se ha encontrado que el sistema laminado puede reducir en un 17 % el tiempo de recuperación, un mejoramiento máximo entre el 20-50 % en el flujo de calor y un mejoramiento en la tasa de transferencia de calor entre 7-18 %. En general, los resultados mostraron que el desempeño térmico del MCF laminado es mejor comparativamente con otros sistemas.

1.8.5. Forma estabilizada

En años recientes, un nuevo tipo de compuesto de MCF ha atraído el interés de muchos investigadores [38, 41, 44, 45, 51, 77, 78, 79]. Los MCF conocidos de forma estabilizada (shape stabilized) FE son construidos con un MCF, el cual puede ser una parafina líquida dispersada en otro material también en fase líquida que sirva como material de soporte. La mezcla es posteriormente enfriada por debajo de la temperatura de solidificación del material de soporte hasta volverse sólido. El material de soporte más común encontrado en la literatura es el polietileno de alta densidad (HDPE) y el estireno butadieno estireno (SBS). Puesto que el porcentaje de masa del MCF puede ser hasta cerca de un 80 %, la energía total es comparable con un MCF tradicional [77].

Los FEMCF (MCF de forma estabilizada) han llamado la atención debido al aparente alto calor específico, conductividad térmica apropiada, la habilidad de mantener la forma del MCF de manera estable durante la transición de fase y, además el buen desempeño logrando múltiples ciclos térmicos a largo plazo [80, 81, 82]. Sari [82] realizó pruebas con HDPE como material de soporte y no encontró ningún tipo de derrame del MCF. Zhang et al. [69] consideran los FEMCF como un sistema práctico y simple, puesto que no requiere dispositivos o contenedores especiales para encapsular el MCF. Debido a los beneficios mencionados de estabilidad, recomiendan ampliamente los FEMCF como un material con alto potencial de aplicación en las edificaciones como elementos interiores en muros, techos y pisos. Algunas aplicaciones en edificación como muros, techos y pisos han sido estudiados por diversos autores [68, 69, 83, 84, 85, 86, 87, 88]. Actualmente se han desarrollado comercialmente algunos materiales compuestos. Rubitherm Technologies GmbH. lanzó al mercado tres productos, The compound PK, el cual consiste en un MCF (parafina) disperso en un polímero, otro llamado Rubitherm

PX que el MCF es dispersado en un polvo de sílice alojando un 60 % de MCF, y el Granulate GR que la matriz esta hecha a base de barro mineral, alojando un 35 % de MCF.

1.8.6. Otros contenedores

Otras formas de contención pueden usarse para la integración de MCF en la edificación. Ahmad et al. [89, 90] utilizaron paneles de PVC llenos con MCF. Carbonari et al. [91] utilizaron un panel tipo sándwich con contenedores plásticos rígidos de MCF. Castell et al. [33] utilizaron paneles CSM. Konuklu y Paksoy [92] probaron hojas de aluminio para incorporar MCF en un panel multicapas. Diversos autores [93, 94, 95, 96] rellenaron tubos con MCF integrados en muros. Pasupathy et al. [97] llenaron un contenedor de acero con MCF para ser incluido en la placa del techo.

1.9. Aplicaciones en la edificación

Con los métodos de incorporación previamente mencionados se han realizado durante la última década extensos avances en el desempeño térmico de MCF en aplicaciones en edificaciones como en muros, techos, pisos con calentamiento eléctrico, ventilación nocturna, etc. Igualmente numerosos proyectos han sido realizados en otros materiales ligeros de construcción como pueden ser paneles, triplay, tejas, etc.

1.9.1. Paneles con MCF

Los paneles son muy apropiados para incorporar MCF, puesto que son muy utilizados en las edificaciones especialmente en construcciones ligeras. Por tanto, se han realizado diversas investigaciones tanto simulaciones [46, 98, 99, 100, 101, 102, 103], como experimentales [42, 60, 104, 105, 106], o ambos [47, 48, 55, 73, 89, 90, 107, 108, 109], con el fin de evaluar el desempeño de paneles mejorados con MCF.

Los paneles habilitados con MCF son considerados efectivos y menos costosos en el reemplazo de paneles convencionales para el almacenamiento de energía solar en las edificaciones. El MCF es incrustado en placas o paneles de yeso, en el aplanado y otro tipo de estructuras. Las características térmicas del panel mejorado con MCF son similares a las del MCF en sí, y cuando el panel es cortado, la mayor concentración se encuentra en la parte externa del grosor del panel debido al proceso de difusión, muy cerca de la cara que será dispuesta al exterior [55]. A continuación se muestran algunos resultados de las investigaciones que se han realizado: Kuznik et al. [46] realizaron una metodología de optimización usando la evolución de la temperatura interior y exterior en un ciclo de 24 horas para optimizar el grosor de un panel de un muro interior con

MCF, encontrando que para estas condiciones el grosor óptimo es de 1cm, y que éste permite doblar la inercia térmica en una edificación. Kuznik et al. [47] llevaron a cabo investigación experimental bajo condiciones térmicas y efectos radiativos controlados en un módulo de prueba a escala real, para evaluar el desempeño de muros (panel de 12.6 mm) con MCF y sin MCF. Los autores comprobaron que el panel de con MCF redujo las fluctuaciones de la temperatura del aire del módulo y por lo tanto, el calentamiento. Concluyeron además que la energía de almacenamiento disponible es dos veces mayor si se le añade al panel de 12.6 mm una capa de MCF de 5 mm de espesor, el cual equivaldría a una capa de concreto de 8 cm. Athienitis et al. [55] realizaron estudios experimentales en un cuarto de prueba a la intemperie en Montreal, y concluyeron que un panel de yeso con 25 wt. % (wt es el porcentaje de peso) de BS incluido en una pared vertical redujo la carga térmica total en un 15 % aproximadamente.

Oliver [110] realizó estudios con un panel de yeso conteniendo el 45 wt. % de MCF. Se encontró que un espesor de 1.5 cm puede almacenar 5 veces más energía térmica que un panel laminado de yeso, y la misma energía que un muro ladrillo de 12 cm dentro de un rango de temperatura de 20-30°C.

1.9.2. Concretos y morteros con MCF

Otro método de aplicación de MCF en las estructuras de la edificación es incorporándolo dentro del concreto. Este compuesto es llamado termocreto. A pesar de que algunos estudios han reportado que la resistencia del concreto puede reducirse significativamente por la aplicación de los MCF, Cabeza et al. [111] investigaron el desempeño del concreto con MCF y, encontraron que el concreto había alcanzado una resistencia a la compresión de 25 MPa, y una resistencia a la tensión de 6 MPa, datos que después de seis meses de operación se mantenían de la misma manera sin sufrir deterioro en las propiedades mecánicas. Cabeza et al. [112] y Chandra et al. [113] realizaron estudios de muros de concreto con MCF y concluyeron que un muro de menor espesor con MCF es más deseable para lograr un SAET más eficiente comparativamente con un muro de concreto convencional. Por otro lado, Alawadhi y Alqallaf [114] realizaron una losa de concreto con conos truncados invertidos como hoyos dentro del espesor del concreto. Los resultados muestran que el flujo de calor hacia el interior del espacio puede ser reducido hasta en un 39 % cuando los MCF son introducidos en el techo.

En cuanto a morteros, Sá et al. [115] realizaron un mortero con 25 % de fracción de masa de MCF encapsulado. Los resultados mostraron que el incorporar MCF en morteros no compromete las propiedades requeridas para aplicaciones en aplanados o acabados en edificaciones, por lo que es factible utilizar los MCF en morteros para aplanados exteriores en la envolvente de la edificación.

1.9.3. Bloques con MCF

Los bloques de concreto y de barro recocido son usados ya sea por el método de impregnación, o relleno en caso de los bloques huecos; son usados igualmente para la envolvente de la construcción dando como resultado una estructura con mayor inercia térmica sin una mayor masa asociada a este incremento. Estudios realizados por Collier y Grimmer [116] muestran que con un macro encapsulado con MCF dentro de los bloques es posible incrementar significativamente el desempeño térmico comparativamente con el mismo volumen de concreto.

Hawes et al. [2, 72] estudiaron el desempeño térmico de los MCF en diferentes tipos de bloques de concreto. Estos estudios fueron enfocados al tiempo de inmersión, la alcalinidad del concreto, la temperatura, la disolución de los MCF en la absorción de los MCF durante el proceso de impregnación y reportaron que los efectos de la modificación de los bloques de concreto con la incorporación de MCF y la técnica de incorporación del MCF afecta en gran medida la capacidad de almacenamiento térmico (cerca de un incremento en 300 %). Por lo que establecieron metodologías en el proceso de absorción para lograr la difusión de las cantidades necesarias de MCF para lograr la capacidad de almacenamiento requerida.

Castell et al. [33] evaluaron experimentalmente el uso de MCF en un bloque convencional mostrando que el consumo de energía en los cubículos donde fueron instalados los bloques se redujo en un 15 % comparativamente con los cubículos tradicionales sin bloques con MCF. También han sido evaluadas parafinas macro encapsuladas en tabiques de barro o arcilla por Silva et al. [117]. Los resultados mostraron que la incorporación de los MCF puede reducir las fluctuaciones de temperatura entre 5 °C y 10 °C. además de incrementarse el retraso en casi 3 horas. Por otro lado, Lai y Chiang [167] estudiaron tabiques aislantes con MCF en los huecos, y notaron que la máxima temperatura alcanzada fue de 31.7°C, la cual fue 4.9°C por debajo de los tabiques que no fueron mejorados con MCF.

1.9.4. Muro trombe con MCF

Numerosos autores han propuesto la implementación de muros trombe (muros de ganancia solar) con MCF, con el fin de reducir grandes volúmenes de concreto. Tanto estudios experimentales como teóricos se han llevado a cabo para evaluar el desempeño en este tipo de sistemas [100, 101, 108, 119]. El utilizar MCF en muros trombe puede contribuir en el desarrollo de sistemas más ligeros, sistemas móviles o rotatorios que se puedan adaptar a edificaciones ligeras. En este enfoque la enorme masa térmica de un muro trombe tradicional puede ser substituida por cargas de calor latente del proceso de cambio de fase de los MCF, y por lo tanto mucho menos cantidad de material es

requerido. Bourdeau [120] hizo pruebas con dos muros trombe y concluyó que un muro de 8.1 cm con MCF tiene un poco mejor comportamiento térmico que un muro de 40 cm de un método tradicional de mampostería.

1.9.5. Persianas con MCF

Para cubrir la alta incidencia de radiación a través de las ventanas se ha investigado el desempeño de persianas rellenas de MCF, las cuales son colocadas tanto interna como externamente. Durante el día las persianas son abiertas con la cara donde es colocado el MCF expuesto a la radiación solar, absorbiendo calor durante el cambio de fase, de sólido a líquido. Por la noche las persianas se cierran y el calor es radiado hacia el interior del recinto o habitación. Weinlaeder et al. [121] realizaron experimentación con un sistema de sombreado al interior compuesto de persianas rellenas de MCF. El sistema mostró un potencial de enfriamiento durante el verano, e incluso algunas ventajas durante invierno comparativamente con persianas convencionales. Mientras que las persianas convencionales a menudo pueden llegar hasta 40°C durante el verano, los resultados mostraron que la temperatura de la superficie interior de las lamas con MCF al interior apenas llegó a la temperatura de fusión del material de 28°C. Los autores recomendaron la utilización de sistemas de ventilación para mejorar la descarga (liberación de energía al solidificar) del material durante la noche.

1.9.6. Forma estabilizada MCF

Como fue citado en la sección 1.8.5, la incorporación de los FEMCF en elementos de la construcción para mejorar la eficiencia energética en edificaciones ha sido estudiada por numerosos autores [42, 55, 68, 69, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 88, 90, 105, 106, 109]. Zhou et al. [87] evaluaron los efectos de incorporar placas de FEMCF en muros y techos, junto con ventilación nocturna durante el verano en Beijing. Los resultados numéricos mostraron que la utilización de las placas de FEMCF podrían reducir la temperatura diurna máxima hasta en 2°C. Para las condiciones climáticas durante el invierno, Zhou et al. [86] mencionaron que las placas con FEMCF pueden crear una respuesta semejante al tener alta masa térmica en construcciones ligeras, pudiendo lograr un incremento de la temperatura al interior hasta de 3°C. También fue evaluado numéricamente el desempeño térmico de dos compuestos de MCF en un sistema solar pasivo en Beijing por Zhou et al. [85]. Los resultados mostraron que ambos tipos de mezclas yeso-MCF y las placas de FEMCF pueden reducir las fluctuaciones de la temperatura al interior en un 46 % y 56 %, respectivamente, y que las placas de FEMCF responden más rápidamente que la mezcla del yeso-MCF, probando que son más efectivos en términos de almacenamiento de calor latente.

Capítulo 2

Modelado de materiales con cambio de fase

Los materiales de cambio o transición de fase se describen matemáticamente mediante una ecuación diferencial parcial con valores de frontera, donde la frontera de cambio de fase puede moverse a través del tiempo. Este cuestionamiento fue primero estudiado por Clapeyron y Lamé en 1831 al analizar el congelamiento de la corteza terrestre. En ese caso, el problema se simplificó de una geometría esférica, a una superficie plana semi-infinita en una sola dimensión [122]. Independientemente, Franz Neuman realizó la solución introduciéndola en sus notas entre los años de 1835 y 1840 [123]. A pesar de estos avances, este tipo de problemas fue llamado finalmente problema de Stefan, quien en 1889 introdujo de manera general este tipo de problemas relacionados al fenómeno de formación de hielo [124]. Posteriormente la existencia de la solución fue probada por Evans en 1951 [125], mientras que la condición de unicidad fue probada por Douglas en 1957 [126]. La modelación matemática de un MCF como un sistema de almacenamiento de energía térmica de calor latente (SAETCL) puede ser utilizada para la selección adecuada de un material en una aplicación determinada y para ayudar en el diseño y la optimización del sistema térmico, en este caso la edificación [168]. Sin embargo, debido a la inherente naturaleza no lineal de la interfase líquida-sólida en movimiento, para la cual la tasa de desplazamiento es gobernada por la pérdida o absorción del calor latente en la frontera [127] (de manera que la posición de la frontera no es conocida a priori y pasa a formar parte de la solución), los mecanismos de transferencia de calor durante el proceso de transformación de fase de un MCF son muy complejos, por lo tanto la transición de cambio de fase es difícil de analizar debido a las siguientes razones: la interfase líquida-sólida está en movimiento; la localización de la interfase no es lineal; el mecanismo de transferencia de calor consiste en conducción y convección natural. Adicionalmente, las dos fases tienen diferentes propiedades termo

físicas [128]. Gracias a estos factores, las soluciones analíticas precisas son únicamente posibles para escenarios muy reducidos [129].

La principal característica del problema de cambio de fase (i.e., problema de Stefan) es la frontera móvil, donde la condición de Stefan debe ser satisfecha. Para la transferencia de calor por conducción, la ecuación gobernante puede ser escrita para la fase sólida y líquida respectivamente, las cuales deben satisfacer la condición de Stefan como se muestra a continuación [136].

Transferencia de calor en la fase sólida:

$$\rho c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) \quad (2.1)$$

Transferencia de calor en la fase líquida:

$$\rho c_l \frac{\partial T_l}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_l \frac{\partial T_l}{\partial x} \right) \quad (2.2)$$

Es importante mencionar que en la fase líquida no es tomada en cuenta la convección en el fluido.

La condición de Stefan que hace cumplir el balance de calor en la interfase sólida-líquida es:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) n - \frac{\partial}{\partial x} \left(k_l \frac{\partial T_l}{\partial x} \right) n = \rho L v n \quad (2.3)$$

Donde, v es la velocidad de la interfase, c es la capacidad calorífica específica, L es el calor latente de fusión, n es la unidad normal en la interfase, k es la conductividad térmica, ρ es la densidad, t es el tiempo, x es la distancia, el subíndice l es en fase líquida y el subíndice s es en fase sólida.

2.1. Modelado analítico de MCF

Como se mencionó, existen muy pocos casos de soluciones analíticas; son principalmente para casos unidimensionales de una región infinita o semi infinita con condiciones de frontera simples y propiedades térmicas constantes [22, 127]. Bajo estas condiciones, estas soluciones exactas usualmente toman forma de funciones de una variable sencilla y son conocidas como soluciones de semejanza [130, 131]. Un compendio de soluciones de semejanza y diversas referencias pueden encontrarse en [132, 133]. También es posible encontrar algunos casos particulares de estas soluciones en Melhing et al. [23] para geometrías cilíndricas y esféricas. Las soluciones analíticas relativamente sencillas que

se obtienen a partir de los modelos existentes de transferencia de calor, dan un panorama general de las relaciones básicas entre los diferentes parámetros en la variación del flujo de calor en función del tiempo (dQ/dt) y el frente de fase (s). Probablemente el más importante es la relación entre la localización del frente de fase s y el tiempo t . La localización del frente de fase s respecto al tiempo relaciona el flujo de calor con las dimensiones de la geometría, debido a que la dimensión geométrica más grande que el frente de fase s recorre determina el promedio y el flujo de calor total hasta que el cambio de fase se haya finalmente completado. Si se requiere utilizar un MCF para cierta aplicación, las soluciones analíticas pueden dar una guía de como se desarrolla el flujo de calor respecto al tiempo, por ejemplo, si se utiliza una encapsulación en platos, tubos, esferas, o alguna geometría en específico. A pesar de poder obtener esta importante información a través de las soluciones analíticas, es fundamental tener en mente que existen grandes limitaciones respecto a la geometría, como suponer que la transferencia de calor se da unidimensionalmente en una capa semiinfinita de MCF y sin efectos de frontera, además que no existe cambio de volumen debido al cambio de fase sólido-líquido. Y lo que es más importante, respecto a los efectos térmicos. Los modelos analíticos solo toman en cuenta la transferencia de calor por conducción, y no por convección por lo tanto el perfil de temperatura es lineal y el flujo de calor es proporcional al gradiente de temperatura. Además asumen, que el MCF está a la temperatura de cambio de fase desde el inicio y que las temperaturas en las fronteras son constantes. Otra limitación bastante restrictiva es asumir una temperatura de fusión bien definida o puntual, cuando una gran cantidad de MCF tienen un rango de temperatura de cambio de fase amplio. Si la temperatura en la frontera llega a ser cercana a la del rango de fusión, el asumir lo dicho lleva a errores muy significativos. Si la temperatura en la frontera es muy diferente al rango de fusión, esta restricción es despreciable. Independientemente, en ese momento el calor sensible se torna significativo y ya no puede ser despreciado, finalmente supone propiedades térmicas constantes. Por lo tanto, dichas restricciones a menudo conllevan a resultados pobres cuando se quiere obtener información cuantitativa.

2.2. Modelado numérico de MCF

Debido a la no linealidad inherente debido a la posición móvil de la interfase, existen pocas soluciones analíticas de interés, dando pie al desarrollo de numerosos algoritmos numéricos basados en diferencias finitas, elemento finito, y más recientemente elementos de frontera [134]. Todos estos métodos se pueden clasificar en dos principales grupos: métodos de trazado frontal o malla adaptativa y métodos de dominio fijo o malla fija.

La principal desventaja relacionada al primer método es que se requiere un grado de regularidad en el movimiento y la evolución de la frontera. En contraste, los métodos de malla fija, los cuales están basados en una formulación más débil, la ecuación de energía puede manejar evoluciones de la interfase en diversas formas geométricas, aunque en contraposición, no es posible lograr una resolución del perfil de temperatura muy bien definida, puesto que se representan los gradientes de temperatura como una función suave a pesar que es una función discontinua en la interfase. De cualquier manera, la asociación de las técnicas de malla fija con elemento finito es bastante adecuada debido a la búsqueda común del modelado de geometrías complicadas. Finalmente, entre los métodos de malla fija podemos mencionar estrategias diferentes como la de capacidad calorífica aparente, método de entalpía, cambio de variable independiente, método de flujo de calor ficticio, o el método de integración discontinuo.

Dutil et al. [127] realizaron un estudio detallado de los modelos matemáticos y simulación de SAETCL (Sistemas de almacenamiento de energía de calor latentes) con MCF. Los autores proporcionaron descripciones matemáticas básicas que sirven como una base para el modelado numérico de MCF utilizando los enfoques tanto de la primera como de la segunda ley de la termodinámica [119] y mallas fijas o adaptativas. Desde el punto de vista del autor, los modelos de la segunda ley de la termodinámica complementan los modelos de la primera ley. Los modelos de la primera ley tienen algunas restricciones porque no consideran el efecto del tiempo en el cual el calor es absorbido o liberado, la temperatura a la cual el calor es suministrado, y la temperatura de los alrededores. El enfoque de la segunda ley trata con dichas restricciones logrando diseños y operaciones mejoradas [127]. En general, una malla de trazado frontal ofrece buena precisión pero está limitada a problemas y geometrías simples, mientras el enfoque de la malla fija, en el cual el calor latente de fusión es usualmente contemplado en la entalpía o calor específico del material, es mucho más simple en aplicaciones prácticas y problemas multidimensionales [128]. Dutil et al. [127] también recolectaron los trabajos publicados en el campo de modelado numérico de MCF utilizados en aplicaciones de almacenamiento térmico, organizándolos con base a la problemática de la geometría como es cartesiana, rectangular, cilíndrica y esférica, y configuraciones específicas o aplicaciones como materiales porosos y fibrosos, placas, aletas, etc. Además, Dutil et al. [127] señalaron la importancia de la estabilidad y convergencia del método numérico utilizado. Y mostraron la importancia de validar los resultados numéricos a través de datos experimentales. Otros factores que no se han tomado en cuenta en la investigación son los efectos relacionados a la evaluación del efecto de la histéresis en los resultado numéricos. Puesto que gran parte de los MCF disponibles para aplicaciones en edificaciones muestran histéresis en el ciclo de carga y descarga, es necesario realizar

más investigación con el fin de evaluar la verdadera influencia de este fenómeno en el diseño de SAETCL con MCF. Por otro lado, cabe mencionar que los métodos numéricos que se recopilan en este trabajo no toman en cuenta los efectos de la convección en las superficies con MCF. La transferencia de calor por convección entre la superficie interior del muro y la temperatura del aire al interior es importante para evaluar el proceso de almacenamiento y liberación de calor del MCF. Este es un problema muy importante debido a que hay muy poca información relacionada con transferencia de calor por convección en muros con MCF, principalmente porque las simulaciones numéricas necesitan el coeficiente convectivo. Liu y Awbi [106] realizaron mediciones en un módulo con MCF en muros y encontraron que la correlación usada para evaluar la transferencia de calor por convección resultó un factor de 2.3 veces mayor respecto al mismo módulo sin MCF. Damien David et al. [186] desarrollaron un modelo numérico para evaluar la transferencia de calor por convección en el MCF, reportando que la convección influencia en gran medida (hasta en un 200 %) el proceso de liberación de energía en el caso de muros con MCF.

La tabla 2.1 proporcionada por [151] resume los diferentes métodos, mostrando las ventajas y desventajas de cada uno de ellos. Por muchas razones incluyendo la eficiencia computacional, la precisión del modelado y la flexibilidad para seleccionar esquemas de solución, el método de la entalpía amerita ser el modelo matemático más atractivo sobre otros para la simulación de problemas de cambio de fase. En particular, es bastante atractivo cuando se implementan esquemas iterativos correctivos o esquemas no iterativos. Sin embargo, en este trabajo se abordará únicamente el método de capacidad calorífica puesto que es el método utilizado por el programa EnergyPlus para la solución numérica.

2.2.1. Método de capacidad calorífica

A partir de la ecuación gobernante del método de entalpía (??), el término de entalpía (tanto del calor latente como sensible) es reemplazado por el término de capacidad calorífica y considera el calor latente de fusión como un calor sensible aumentado para todo el intervalo de transición de fase [108, 135]. Se utilizan generalmente dos enfoques para tomar en cuenta la liberación de calor latente: la capacidad calorífica aparente [128, 145, 146] y la capacidad calorífica efectiva [99, 147]. A pesar de que los dos enfoques difieren en la aproximación de la capacidad calorífica, en recientes investigaciones se han utilizado las terminologías indistintamente. Para su solución, ambos enfoques están basados en el método de diferencias finitas.

El problema de transferencia de calor con cambio de fase puede ser transformado en un problema de conducción no lineal con una sola fase en toda la región calculada, y la

Tabla 2.1. Propiedades, ventajas, desventajas de los métodos matemáticos para problemas con cambio de fase.[151]

Modelo matemático para el desarrollo del calor latente.	Característica principal.	Ventajas.	Desventajas.	Esquemas de soluciones posibles.
Método de entalpía.	La entalpía funciona tanto para calor sensible como calor latente.	Es veloz si se selecciona un esquema apropiado. Funciona tanto con puntos de fusión como rangos de fusión.	Dificultad para tratar el fenómeno de subenfriamiento Es posible que con el tiempo la temperatura oscile en un punto determinado de la red.	Esquema iterativo con solucionadores no lineales (e.g. Métodos de Newton) Entalpía linealizada: esquema iterativo correctivo Cuasi-Entalpía: Esquema de corrección de temperatura no iterativo.
Método de capacidad calorífica.	La capacidad calorífica funciona tanto para el calor latente como el sensible.	Trata con una sola variable dependiente; la temperatura. Fácil de programar. Apto para rangos de cambio de fase.	Carece de eficiencia computacional. Es necesario pasos de tiempo pequeños y redes finas para una buena precisión. Dificultad para tratar casos cuando la temperatura de cambio de fase es en un rango pequeño. Dificultad para lograr convergencia, y siempre hay una posibilidad que el calor latente sea subestimado. No funciona para casos donde la temperatura de cambio de fase es puntual.	Esquema iterativo (ej. esquema iterativo de Gauss-Seidel) si es seleccionado una aproximación adecuada de capacidad calorífica)
Método de transformación de temperatura	La capacidad calorífica y el término fuente funcionan tanto para el calor latente como el sensible.	Funciona tanto con puntos de fusión como rangos de fusión. Maneja largos pasos de tiempos y redes más gruesas	No es un método muy conocido por lo que no se ha evaluado los pros y los contras.	Esquema iterativo (ej. esquema iterativo de Gauss-Seidel) después de linealizar el término fuente.
Método de fuente de calor	El calor latente es tratado como un término fuente.	Capaz de separar el calor latente del calor sensible. Funciona tanto con puntos de fusión como rangos de fusión.	Requiere de sub-relajación, y por lo tanto requiere de un mayor esfuerzo para determinar el factor de relajación. Falta de eficiencia computacional. Problemas con errores de redondeo si la fusión ocurre en un rango de temperatura.	Esquema iterativo (ej. esquema iterativo de Gauss-Seidel) después de linealizar el término fuente.

localización de la interfase de cambio de fase puede ser determinada cuando es obtenida la distribución de temperatura [108]. El método de capacidad calorífica aparente fue introducido por Hashemi y Sliepcevich [148] para resolver la transferencia de calor unidimensional en la zona blanda de la transición de cambio de fase. La ecuación de transferencia de calor unidimensional de conducción utilizando la capacidad calorífica aparente puede ser escrita de la siguiente manera:

$$\rho C^A(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2.4)$$

Donde, C^A es la capacidad calorífica aparente.

Este método es atractivo debido a que la temperatura es la única variable que requiere ser encontrada en la forma discretizada. La clave en este enfoque recae en la aproximación de la capacidad calorífica. Se utilizan dos métodos comúnmente para la aproximación del término de la capacidad calorífica aparente en la ecuación (2.4): la relación analítico-empírica, y la aproximación numérica.

2.2.1.1. Relación analítico-empírica

A partir de los datos obtenidos del DSC de un MCF es posible realizar una aproximación de la capacidad calorífica utilizando una relación directa al introducir un rango de temperatura de fusión arbitrario (2ϵ) [136, 155].

$$C^A = \begin{cases} C_s, & T \leq T_m - \epsilon \quad (\text{región sólida}) \\ \left(\frac{C_s + C_l}{2}\right) + \frac{L}{2\epsilon}, & T_m - \epsilon < T < T_m + \epsilon \quad (\text{región blanda}) \\ C_l, & T \geq T_m + \epsilon \quad (\text{región líquida}) \end{cases} \quad (2.5)$$

Si se ha seleccionado una mitad de rango (ϵ) muy pequeño, o el paso de tiempo es muy largo, pueden surgir problemas de convergencia al resolver la ecuación (2.4). De este modo, se corre el riesgo de omitir la contribución del calor latente en un paso de tiempo largo. La prueba del DSC puede ser utilizada para formar una expresión empírica para aproximar la capacidad calorífica. Fang et al. [188] propusieron una expresión matemática para la capacidad calorífica de una parafina, la cual se obtuvo de un DSC. Por otro lado diversos autores han sugerido y usado formas alternativas para aproximar la capacidad calorífica [189, 190, 191, 192].

2.2.1.2. Aproximación numérica

La aproximación numérica es una alternativa apropiada cuando se tiene información detallada del comportamiento térmico de los MCF. En la literatura se ha propuesto diversas aproximaciones numéricas: por ejemplo Comini [193] utilizó una técnica numérica en el método de elemento finito donde la capacidad calorífica fue determinada al derivar la entalpía respecto a la temperatura. Posteriormente, Morgan [185] mejoró la relación para evitar problemas de convergencia. Cuando se utiliza un esquema iterativo, la capacidad calorífica puede ser aproximada usando las soluciones de temperatura sucesiva y de entalpía. El uso de un promedio temporal propuesto por Morgan está representado por la siguiente ecuación [193].

$$C^A = \frac{\Delta h}{\Delta T} = \frac{h^n - h^{n-1}}{T^n - T^{n-1}} \quad (2.6)$$

$$(2.7)$$

Voller [136] encontró que la aproximación de la capacidad calorífica aparente basada en las relaciones directas son más precisas que la aproximación de Morgan.

2.2.2. Modelos de simulación usados para el análisis en edificaciones

Los estudios numéricos con MCF integrados a la edificación pueden ser categorizados a groso modo de la siguiente manera:

- Ecuación de calor unidimensional en un muro simple [51, 58, 84, 97, 100, 126, 131, 158, 159, 160, 161, 162, 165, 177, 178].
- Ecuación de calor en dos dimensiones en un muro [91, 157, 179].
- Ecuación de calor unidimensional en un muro, balance de energía en una habitación [48, 66, 99, 103, 108, 113, 163, 164, 165, 166].
- Ecuación de calor en dos y tres dimensiones, balance de energía en una habitación [90, 180].

La mayoría de los estudios de ecuación de calor unidimensional en un muro que contienen MCF en la edificación trata con el problema de optimización del MCF: temperatura de cambio de fase, la posición del MCF en el sistema constructivo y espesor. Una de las características más importantes es el espesor del MCF. Entre más grande sea el grosor del MCF, será mayor el tiempo para que el calor penetre; el MCF puede llegar a ser tan grueso que no permita que se lleve a cabo el ciclo de fusión-solidificación diariamente [46]. El grosor óptimo depende entre otras cosas de la difusividad térmica del medio

por lo que debe ser manejado para cada tipo de MCF. En la simulación de edificaciones se realiza la suposición de que la transferencia de calor por conducción se de manera unidimensional en los muros, sin embargo, asumir esto puede llegar a ser poco realista, por lo que es importante poner atención a estas consideraciones sobre todo si se desea tomar en cuenta los puentes térmicos. Por otro lado, la mayoría de las investigaciones tratan con módulos de prueba no habitados. Por supuesto, la evaluación de la temperatura interior de las edificaciones es claramente afectada por las cargas internas. Una manera para evaluar la temperatura óptima para que se realice el cambio de fase del material es calcular la transferencia de calor de la edificación sin MCF y calcular la temperatura media superficial de los muros durante el periodo de almacenamiento. Esta optimización solo puede ser realizada si las cargas térmicas por ocupación son tomadas en cuenta en un escenario real.

Hoy en día, existen diversas herramientas para evaluar la simulación de energía en edificaciones: BLAST, BSim, DeST, DOE, ECOTECH, Ener-Win, Energy Express, Energy-10, EnergyPlus, eQUEST, ESP-r, IDA-ICE, IES, HAP, HEED, PowerDomus, SUNREL, Tas, TRACE, TRNSYS, etc. [165]. Los simuladores EnergyPlus, ESP-r and TRNSYS son conocidos por su versatilidad y credibilidad [164]. Sin embargo, muy pocos programas de simulación pueden manejar el desempeño térmico de la envolvente de edificaciones con MCF. A continuación se muestra la tabla 2.1 proporcionada por [151] en la cual se describen: el método numérico, el esquema de paso de tiempo y la formulación numérica de los principales programas de simulación numérica capaces de simular MCF.

Tabla 2.2. Métodos numéricos para el análisis de la evolución del calor latente en programas de simulación para edificaciones [151].

Simulador.	Identificación.	Formulación numérica.	Método numérico.	Esquemas de spaso de tiempo.	Ventajas y desventajas.	Validación.
EnergyPlus.	CondFD.	FDM: 1D	Capacidad calorífica.	Implícito. Semi implícito.	Pasos de tiempo menores a 3 min. Mallas pequeñas. La histeresis no es modelada. MCF a temperatura isotérmica no es modelada.	Análítico, Comparativo y Experimental.
TRNSYS.	Modified TYPE36	FDM: 1D	Método de entalpía.	Explícito.	Pasos de tiempo pequeños.	Experimental. (Solo para concreto)
	TYPE58	FDM: 2D	Método de entalpía.	Explícito.	No existe acceso al código. No existe acceso al código. Ineficiente computacionalmente.	Experimental.
	TYPE204	FDM: 3D	Capacidad calorífica.	Explícito, Implícito y Semi implícito.	No existe acceso al código. Ineficiente computacionalmente	N/A.
	TYPE101	FDM: 1D	Capacidad calorífica.	Semi implícito (Crank-Nicholson).	Se requiere un factor de corrección para los puentes térmicos para lograr precisión.	Experimental.
	Active Wall	Coefficientes de transferencia de calor equivalentes	Fuente de calor variable (Imitación del comportamiento del MCF.)		La transferencia de calor real del MCF no es modelada.	Experimental.
	TYPE241	FDM: 1D	Fuente de calor.	Implícito.	Propiedades térmicas basadas en el paso de tiempo anterior (explícito).	N/A.
	TYPE260	FDM: 1D	Capacidad calorífica.	Implícito.	Diseñado para muros interiores. Modelo muy simplificado. Capa interna dentro de la envolvente. Poca precisión (lumped heat balance). Para cambio de fase a una temperatura fija.	Experimental. N/A.
ESP-r	SPMCMP53- SPMCMP56.	FDM: 1D	Capacidad calorífica y Fuente de calor.		Pasos de tiempo pequeños.	N/A.
BSim		FVM: 1D	Capacidad calorífica.	Implícito.	Pasos de tiempo pequeños para evitar inestabilidades.	Experimental
RADCOOL		FDM: 1D	Capacidad calorífica.	Implícito.		
ESim		FDM: 1D	Capacidad calorífica.	Explícito.	Pasos de tiempo pequeños para evitar inestabilidades.	Experimental

FVM: Método de volumen finito, FDM: Método de diferencias finitas.

Capítulo 3

Metodología experimental

3.1. Localización

Los experimentos fueron realizados en el Instituto de Energías Renovables (IER) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), ubicado en Privada Xochicalco s/n., Temixco, Morelos ($18^{\circ} 51'$ latitud norte). El IER fue ubicado en esta localidad (Figura 3.1) debido a la radiación solar recibida. Entre los meses de invierno pueden alcanzar los 700 W/m^2 y en verano llega a alcanzar los 1000 W/m^2 .

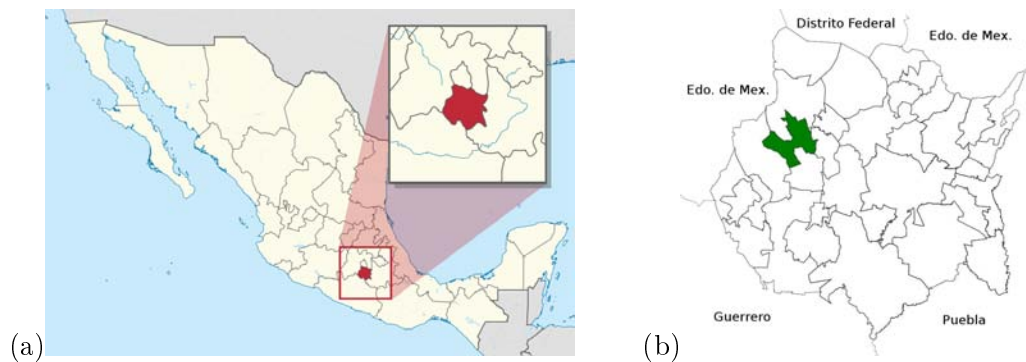


Figura 3.1. (a) Mapa de la república Mexicana, en rojo estado de Morelos. (b) Estado de Morelos, en verde Temixco.

3.2. Objetivo y descripción de los experimentos

Se diseñó y construyó un módulo de prueba a escala real (Figura 3.2) para evaluar el desempeño del MCF BioPCM en un recinto sin aire acondicionado (A/C) a través de un análisis experimental y simulaciones realizadas con el programa EnergyPlus. El objetivo de las pruebas se enfoca en evaluar la transferencia de calor en la envolvente para recintos que no utilicen métodos mecánicos de enfriamiento en un clima cálido-

templado como el de Temixco. Se evaluó la transferencia de calor hacia el interior al analizar las temperaturas superficiales y posteriormente se comparó el desempeño del BioPCM con un material aislante (Poliestireno) mediante los parámetros del tiempo de retraso y el factor de decremento superficial.



Figura 3.2. Módulo de prueba.

3.2.1. Elaboración de la envolvente

En la figura 3.3 podemos ver la planta arquitectónica del módulo, en el cual el corte B-B' está orientado hacia el norte, el corte C-C' hacia el sur.

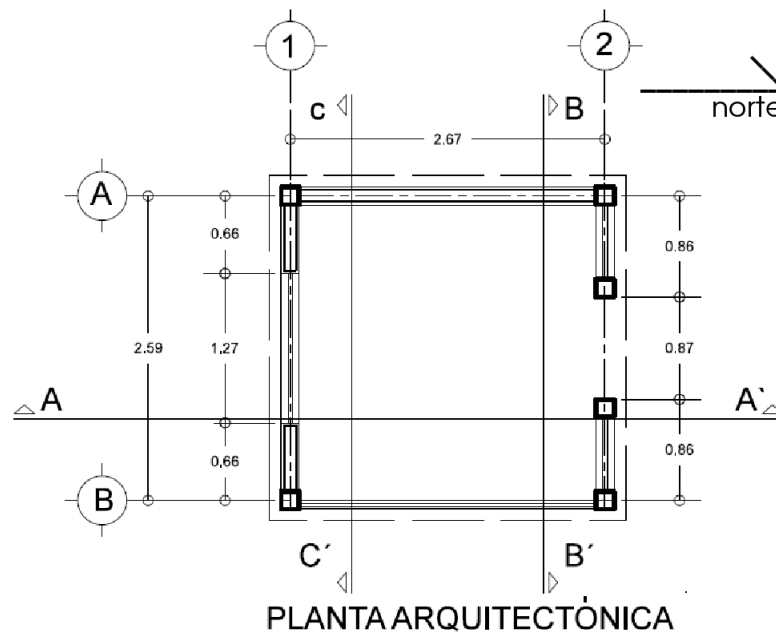


Figura 3.3. Planta arquitectónica del módulo de prueba.

El MCF fue colocado en el interior de una sección del muro este y de una sección

del techo. Se seleccionaron estas dos superficies debido a que el techo es la superficie con mayor incidencia solar, y porque en el muro este la transferencia de calor se lleva a cabo de manera más rápida respecto al muro oeste (ambas superficies con mayor incidencia solar después del techo). A pesar de que la orientación es favorable, y podríamos afirmar que la incidencia solar en el muro este y oeste son iguales, el flujo de calor en la superficie del muro este se da de manera más drástica al venir de temperaturas mínimas durante la madrugada y al recibir los rayos del sol de la mañana. En contraposición, el flujo de calor en la superficie del muro oeste está sujeto a la inercia térmica del día, y la temperatura va bajando poco a poco hasta llegar al punto más bajo por la madrugada antes de amanecer.

Los muros sur, norte y oeste se realizaron con un sistema constructivo convencional y ampliamente utilizado en México (Figura 3.4), el cual consta de muros de bloque a base de cemento-arena con dimensiones de 12 cm x 14 cm x 28 cm, y repellados tanto al interior como al exterior con mezcla de cemento-arena de un espesor aproximado de 1.5 cm. Los interiores y exteriores de dichos muros están pintados de blanco.



Figura 3.4. Sistema constructivo en muros sur, norte y oeste.

Las ventanas fueron diseñadas y construidas en el muro sur y en el muro norte (Figura 3.5), tomando en cuenta que los vientos dominantes fluyen en esta dirección. En el muro norte está ubicada la puerta y dos ventanas en la parte baja, y en el muro sur fue construida una ventana en la parte superior para propiciar ventilación cruzada. El área del vano de las ventanas del sur es igual al área de las ventanas ubicadas al norte con el fin de tener la misma área de carga y descarga de aire.



Figura 3.5. Muros sur con ventana en la parte superior, muro norte con puerta y un par de ventanas inferiores.

Las dos superficies a evaluar (techo y muro este) fueron divididas en tres secciones, (Figura 3.6) para comparar tres sistemas constructivos. La primera está compuesta por una lámina lisa galvanizada de 0.06 mm de espesor al exterior y una placa de poliestireno de 2.5 cm de espesor al interior. La segunda localizada al centro está compuesta únicamente por la lámina galvanizada. Y finalmente, la tercera sección está compuesta por la lámina galvanizada al exterior y el BioPCM al interior.



Figura 3.6. (a) Subdivisión del techo en tres partes al interior, (b) Subdivisión del techo en tres partes al exterior, (c) Capa interior de poliestireno y BioPCM.

A continuación se muestran (Tabla 3.1) las propiedades térmicas de los materiales tanto de los utilizados para los muros con un sistema constructivo convencional, como los utilizados para las superficies que se evaluaron.

3.2.2. Material de cambio de fase BioPCM

El BioPCM M91-Q25 es un MCF encapsulado (Figura 3.7) en una película de polímero de grado farmacéutico diseñado con un espacio de aire para los cambios de volumen durante el cambio de fase. El BioPCM es instalado típicamente al interior y es utilizado como un sistema de almacenamiento de energía para la reducción de flujo de calor al interior. El BioPCM es especialmente benéfico para edificaciones ligeras,

Tabla 3.1. Propiedades térmicas de los materiales.

	Aplanado	Bloque	Poliestireno	Lámina	BioMCF
Espesor [cm]	1.50	12.00	2.50	0.6	1.40
Conductividad térmica [W/m-K]	0.72	0.51	0.04	6.00	0.20
Densidad [kg/m^3]	1760	1400	15	7827	870
Calor específico [J/kg-K]	840	1000	1400	502	1620
Emisividad	0.90	0.90	0.90	0.20	0.90
Absortancia solar	0.30	0.60	0.57	0.70	0.57
Absortancia visible	0.30	0.60	0.69	0.69	0.69

puesto que actúa como si fuera un material de alta inercia térmica, siendo un material delgado y de bajo peso. Este material está caracterizado principalmente por dos valores, el valor M y el factor Q . El valor M se refiere a la capacidad calorífica o entalpia de cambio de fase por unidad de pie cuadrado, y el factor Q referente a la temperatura de fusión-solidificación, el cual fue determinado por la curva del Calorímetro de Escaneo Diferencial DSC proporcionada por el proveedor. Se seleccionó el BioPCM M91-Q25 entre el Q21, Q23, Q25 y Q27.



Figura 3.7. Techo con BioPCM M91-Q25.

La temperatura de fusión de 25 °C del BioPCM Q25 (Figura 3.8) fue seleccionada debido a que está cercana a la temperatura media anual en la locación. La capacidad calorífica se seleccionó M91 puesto que es posible obtener más energía de cambio de fase por metro cuadrado (entre el M51 y el M91), y por tanto un amortiguamiento mayor en la transferencia de calor hacia el interior. A continuación se muestra la curva de entalpía del BioPCM M91-Q25.

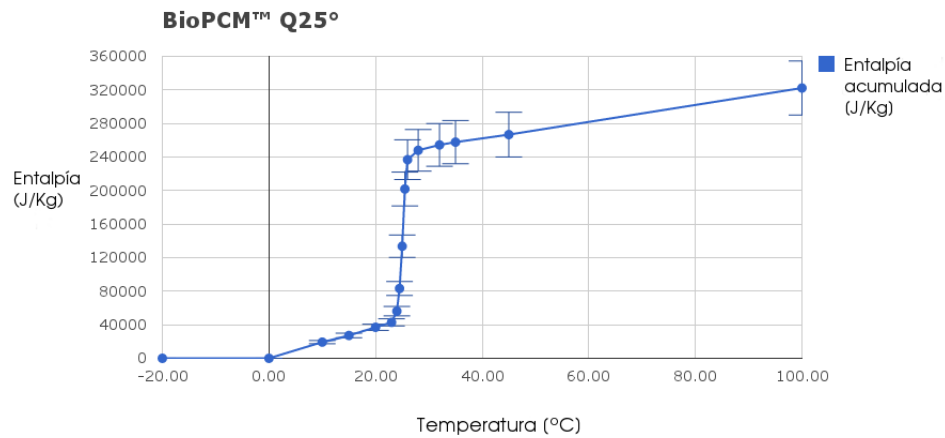


Figura 3.8. Gráfica de entalpía respecto a la temperatura del BioPCM.

La capacidad calorífica se muestra en la figura 3.9. De la curva de entalpía se puede notar que la temperatura de transición ocurre a los 25 °C. Y de la curva de capacidad calorífica se puede notar que la entalpía en la fase líquida es mayor que en la fase sólida. Cabe mencionar que la temperatura pico de solidificación es de 20.27 °C y la solidificación se completa alrededor de los 15 °C. En cuanto a la temperatura de fusión se puede notar que la temperatura pico de fusión es de 24.81 °C, y la fusión se completa alrededor de los 29 °C.

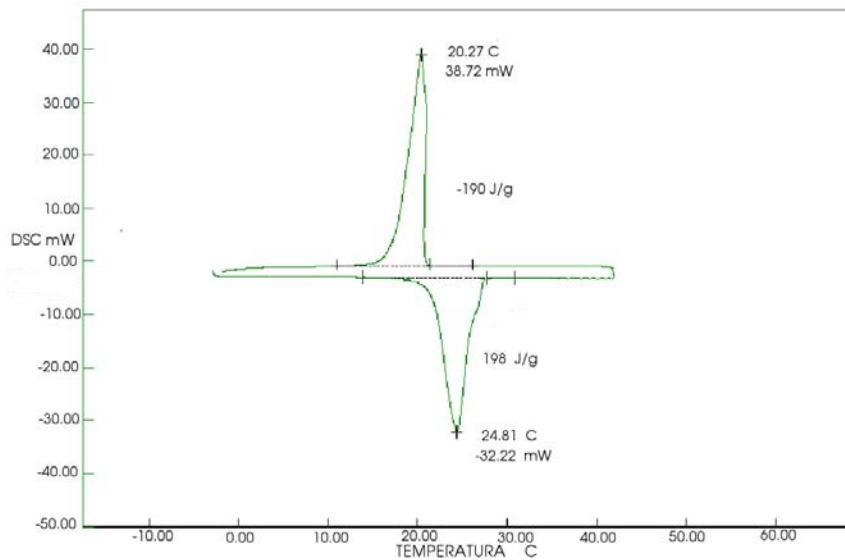


Figura 3.9. Capacidad calorífica del BioPCM.

El BioPCM se encuentra como un gel sólido cuando está por debajo de la temperatura de transición, y como un gel líquido cuando se encuentra por arriba de las

temperaturas de transición o cambio de fase. Está compuesto por derivados de ácidos grasos, alcoholes grasos, esterres, emulsionantes, algunos aditivos para hacerlo espeso y mantener sus moléculas juntas. A continuación se muestran sus principales propiedades y características (Tabla 3.2).

Tabla 3.2. Propiedades del BioPCM.

Temperatura de Fusión	25 °C
Estado físico a 25°C o más	Gel suave
Estado físico por debajo de los 25°C	Gel sólido
Densidad	870 kg/m ³
Apariencia	Blanco opaco y semi-transparente
Olor	Neutral
Punto de evaporación	249° C
Solubilidad	Miscible
Viscosidad	100-130 Pa.s entre 25-30° C
Presión de vapor	1 mm Hg @ 25°C
Flamabilidad	No presenta flamabilidad, OSHA Clase III-B.
Volatilidad de los compuestos orgánicos	Voc's: 0.00 %
Presión de vapor de los compuestos orgánicos	0.3 mm Hg @25-40°C
Insoluble en agua	
No representa propiedades de oxidación	

3.2.2.1. Dimensiones del BioPCM

El BioPCM no está encapsulado de manera continua como una placa, sino que se encuentra dentro en una hoja (Figura 3.10) que mide 120 cm x 43 cm y que contiene dos filas de 20 bolsas cada una. Con base a la figura 3.11, que ilustra un corte del perfil del BioPCM, se observa que cada base rectangular mide 4.0 cm x16 cm con 1 cm de espesor, y tiene a su vez tres pequeñas bolsas cuadradas de 4.0 cm x 4.5 cm con un espesor de 2 cm. Estos bolsas cuadradas están separadas entre sí pero conectadas por la base rectangular.

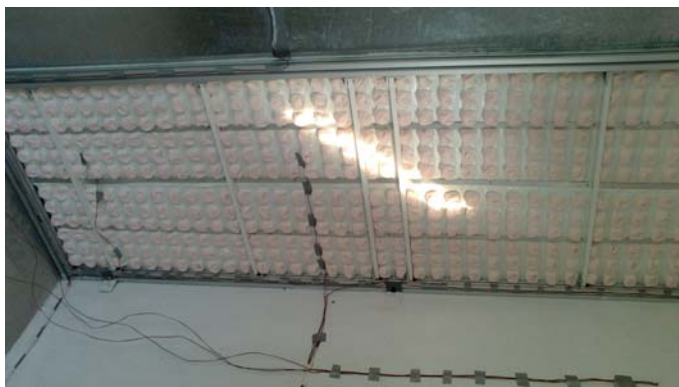


Figura 3.10. Composición formal del BioPCM.

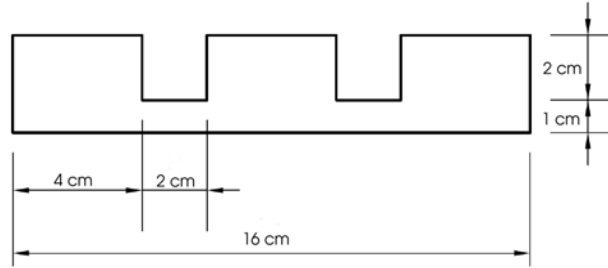


Figura 3.11. Corte transversal de cada macroencapsulado rectangular de BioPCM.

3.3. Instrumentación

El sistema de adquisición de datos consta de un adquirente de datos CR800 (Figura 3.12 (b)) y un multiplexor AM16/32B (Figura 3.12 (a)) para la medición de las temperaturas superficiales de los materiales convencionales, y también se utilizó un adquirente de datos Agilent 34970A para la medición de las temperaturas superficiales de los materiales evaluados (muro este y techo). Para la programación y configuración del sistema y, para la descarga y almacenamiento de los datos medidos se utilizó el programa LoggerNet y el software Agilent Vee para los adquirentes correspondientes.

Para las temperaturas superficiales de los materiales convencionales se conectaron todos los termopares al multiplexor AM16/32B con el fin de incrementar la cantidad de terminales de termopares (Solo fue necesario un multiplexor para satisfacer la demanda de número de termopares). A su vez, el multiplexor AM16/32B se conectó al adquirente de datos CR800, de manera que el multiplexor fue alimentado desde los puertos 12V y G (tierra) controlado por los puertos de control C3 y C4 del adquirente CR800. Para la configuración de la toma de datos de los termopares conectados en el multiplexor a través del CR800 fue necesario conectar los puertos COM ODD H, al puerto 1H, el puerto COM ODD L, al puerto 1L, el puerto COM EVEN H al 2H, y el puerto COM EVEN L al 2L del CR800. Finalmente el adquirente cr800 fue conectado a la computadora, y configurado a través del software LoggerNet para obtener mediciones de temperatura a cada minuto. Por otro lado, se conectaron todos los termopares de las temperaturas superficiales de los materiales evaluados directamente al adquirente de datos Agilent 34970A, y se configuró por medio del software Agilent Vee.

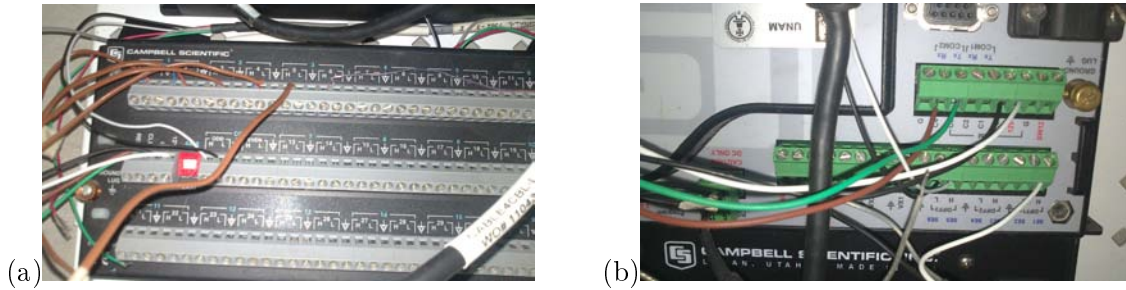


Figura 3.12. (a) Multiplexor AM16/32B. (b) Adquisidor CR800.

3.4. Toma de datos experimentales

Se registraron medidas de las temperaturas de todas las superficies interiores y exteriores durante el periodo del 20 de Diciembre, 2014 hasta el 1º de Mayo, 2015. Las mediciones fueron tomadas tanto de los muros convencionales, como de las superficies a evaluar, y se registraron cada minuto. Por motivos técnicos y debido a la composición no rígida del macroencapsulado del BioPCM, el registro de datos se dividió en dos etapas. Del 20 de Diciembre, 2014 al 21 de Marzo, 2015, existió una capa de aire de 0.5 cm entre la lámina galvanizada y el BioPCM, puesto que el macroencapsulado de plástico flexible se pandeaba por el propio peso del BioPCM al colocarlo horizontalmente. Posteriormente, se hicieron modificaciones en el sistema constructivo, con la intención de fijar el BioPCM lo más cercano posible a la lámina galvanizada, dando lugar a las mediciones del 21 de Marzo, 2015 a las del 1º de Mayo, 2015.

Para la medición de las temperaturas tanto de las superficies como de la temperatura del aire al interior, se utilizaron termopares tipo T de dos calibres, 12 y 30, dependiendo de la distancia al adquisidor de datos. Los termopares en el muro interior de análisis (Muro este) se ubicaron en tres posiciones, uno a un metro de distancia del piso, otro a 20cm del suelo y el tercero a 20 cm del techo. Se realizó esta misma configuración para las tres secciones del muro este, que son: la del BioPCM, la del poliestireno y la de la lámina. Para los demás muros tanto al exterior como al interior se colocó únicamente un termopar por muro a un metro de distancia del suelo. En el caso del techo, se colocaron en el centro geométrico de las tres secciones que se evaluaron. Las puntas de los termopares se colocaron con cemento Omega de alta conductividad térmica. Sin embargo, cabe destacar que para los termopares que monitorearon las temperaturas en la lámina, fue necesario colocar una capa de aislante eléctrico directamente en la lámina puesto que es un material conductor de electricidad. Se instaló también un termopar en el centro geométrico del suelo para medir su temperatura. Finalmente, la temperatura del aire exterior se monitoreo con la estación climatológica del IER.

A continuación se muestra la tabla 3.3 de nomenclatura utilizada para el registro

de temperaturas.

Tabla 3.3. Nomenclatura de los termopares tipo T.

Temperatura muro sur interior	MSI
Temperatura muro sur exterior	MSE
Temperatura muro oeste interior	MOI
Temperatura muro oeste exterior	MOE
Temperatura muro norte-este interior	MNEI
Temperatura muro norte-este exterior	MNEE
Temperatura muro norte-oeste interior	MNOI
Temperatura muro norte-oeste exterior	MNOE
Temperatura muro este poliestireno interior	MEPI
Temperatura muro este poliestireno intermedio	MEPM
Temperatura muro este poliestireno exterior	MEPE
Temperatura muro este poliestireno interior superior	MEPIS
Temperatura muro este poliestireno interior inferior	MEPIB
Temperatura muro este lámina interior	MELI
Temperatura muro este lámina exterior	MELE
Temperatura muro este MCF interior	MEMCFI
Temperatura muro este MCF intermedio	MEMCFM
Temperatura muro este MCF exterior	MEMCFE
Temperatura muro este MCF interior superior	MEMCFIS
Temperatura muro este MCF interior inferior	MEMCFIB
Temperatura techo poliestireno interior	TPI
Temperatura techo poliestireno-lámina interior	TPM
Temperatura techo poliestireno exterior	TPE
Temperatura techo MCF interior	TMCFI
Temperatura techo MCF-lámina interior	TMCFM
Temperatura techo MCF exterior	TMCFE
Temperatura techo lámina interior	TLI
Temperatura techo lámina exterior	TLE
Temperatura del aire al interior	TI
Temperatura del suelo	TS

3.5. Medición de emitancia y absortancia

Con el fin de delimitar las variables en los datos de entrada de la simulación se realizaron pruebas de emitancia y absortancia solar de los materiales del techo y muro de análisis. Las pruebas de absortancia solar se realizaron con un espectrofotómetro (Figura 3.13a), y las de emitancia con un medidor llamando scaling digital voltmeter (Figura 3.13b), en el cual se obtuvo un valor promedio de emitancia de $\epsilon = 0.18$. Para el valor de la absortancia solar α se obtuvo un valor de $\alpha = 0.70$, calculado de acuerdo a la norma ASTM E903.

La reflectancia solar fue calculada de acuerdo a la norma ASTM E903 según la

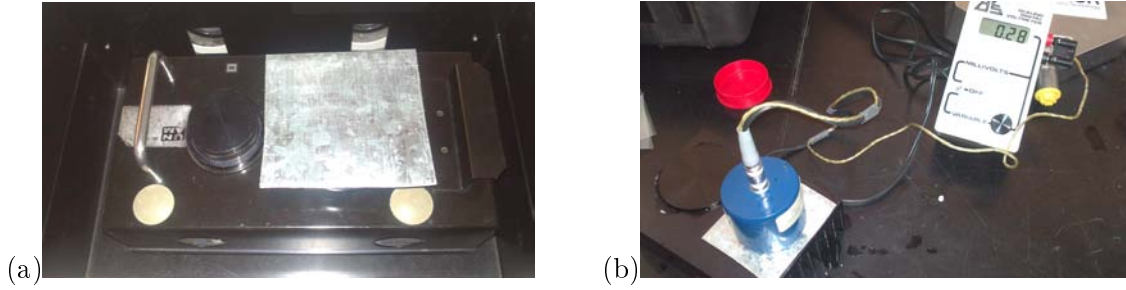


Figura 3.13. (a) Espectrofotómetro. (b) Medidor de emitancia scaling digital voltmeter.

relación (3.1).

$$\rho_s = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \rho(\lambda_i) (E_{\lambda_i}) \Delta\lambda_i \right)}{\left(\sum_{i=1}^n E_{\lambda_i} \Delta\lambda_i \right)} \quad (3.1)$$

Donde, ρ_s es la reflectancia, λ es la longitud de onda en nanómetros, $\rho(\lambda_i)$ la reflectancia espectral, E_{λ_i} la irradiancia solar espectral, i y n son los datos asociados a la sumatoria, siendo i el valor inicial llamado límite inferior y n es el valor final llamado límite superior, en este caso de la reflectancia espectral, y la irradiancia solar espectral a cada longitud de onda desde 250 nm hasta 2500 nm.

El valor $\rho(\lambda_i)$ se obtiene directamente del espectrofotómetro, con incrementos de longitud de onda de 2 nm y el valor E_{λ_i} se obtiene de acuerdo a la norma ASTM G173. La norma tiene incrementos en la longitud de onda diferentes para distintos rangos y van desde 0.5 nm hasta 5.0 nm, por lo que fue necesario obtener incrementos iguales en la longitud de onda tanto en el espectrofotómetro y en la tabla de irradiancia solar terrestre. Una vez obtenido el valor de la reflectancia, se obtuvo a través del complemento la absorptancia.

$$\alpha = 1 - \rho_s \quad (3.2)$$

Capítulo 4

Método numérico de EnergyPlus y configuración para la modelación de MCF

En este capítulo se describe primeramente las bases del programa EnergyPlus y el modelo numérico que utiliza para la transferencia de calor por conducción para MCF, y posteriormente la configuración necesaria para su modelado. En la descripción de la configuración, se abordan los diferentes parámetros proporcionados por EnergyPlus necesarios para cualquier tipo de simulación como los específicos para el uso de MCF.

4.1. Método numérico de EnergyPlus

EnergyPlus es un programa de simulación de análisis de energía y cargas térmicas, el cual modela calentamiento, enfriamiento, iluminación, ventilación y otros aspectos de energía en edificaciones. El programa incluye algunas capacidades importantes de simulación como la opción de variar los pasos de tiempo, sistemas de configuración modular (que son integrados con un balance de masa) y calor basado en zonas de simulación, flujos de aire entre zonas, confort térmico, y ventilación natural [181]. Para los trabajos realizados en esta tesis se utilizó la versión de EnergyPlus V8-8-0. EnergyPlus está desarrollado en el lenguaje FORTRAN, y tienen sus orígenes en dos programas existentes previamente: BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) y DOE-2. Ambas herramientas de simulación de energía y cargas térmicas desarrolladas a finales de los setentas y principios de los ochentas. EnergyPlus utiliza por omisión el método de funciones de transferencia (CTF) para resolver la transferencia de calor por conducción en la envolvente de la edificación.

La ventaja del CTF es que se puede calcular la transferencia de calor por con-

ducción a través de un elemento constructivo mediante una única ecuación simple y lineal con coeficientes constantes. Sin embargo, el método de CTF no es útil cuando se trata de emplear propiedades térmicas dependientes de la temperatura (conductividad térmica, entalpía, MCF). Además, no es posible encontrar el perfil de temperatura a lo ancho del muro. La capacidad de modelar MCF se ha facilitado a partir de la versión 2.0 de EnergyPlus al incorporar el algoritmo de solución de conducción por diferencias finitas (CondFD) [183]. El algoritmo utiliza un esquema semi implícito basado en el método de capacidad calorífica con una función auxiliar de temperatura-entalpía para tomar en cuenta la evolución del calor latente [184]. Al utilizar el conjunto de datos de temperatura-entalpía, se aproxima la capacidad calorífica empleando un enfoque temporal promediado similar al propuesto por Morgan [185]. Mientras que las versiones previas de EnergyPlus tenían un esquema semi implícito para el modelado de MCF, en la versión 7 se añadió un esquema implícito, con mayor flexibilidad numérica [186]. Para ambos esquemas, se recomienda utilizar un paso de tiempo pequeño para obtener resultados precisos. EnergyPlus tiene tres controladores (Figura 4.1): Un administrador de simulación, un módulo para balance de calor y masa y un módulo de simulación para sistemas de edificaciones. Los cálculos de balance de calor están basados en el programa IBLAST, que es una versión de BLAST con sistemas integrados de HVAC y simuladores de cargas térmicas en edificaciones.

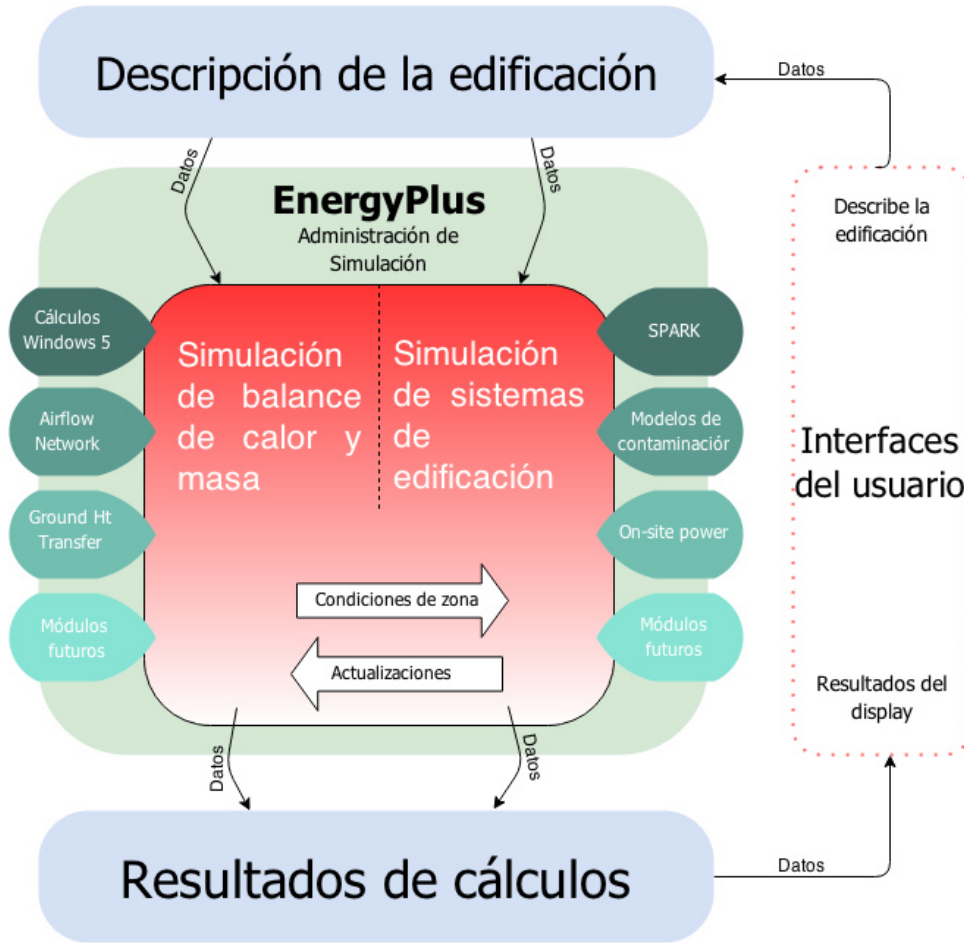


Figura 4.1. Diagrama del funcionamiento del cálculo de los balances de calor en edificaciones por EnergyPlus [127].

El modelo de MCF de EnergyPlus basado en el método de capacidad calorífica utiliza un esquema de diferencias finitas implícito clasificado por [134] como un algoritmo de malla fija.

$$\frac{\rho C_p \Delta x (T_i^{j+1} - T_i^j)}{\Delta t} = \frac{1}{2} \left[\frac{k_w (T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1} + T_{i+1}^j - T_i^j)}{\Delta x} + \frac{k_e (T_{i-1}^{j+1} - T_i^{j+1} + T_{i-1}^j - T_i^j)}{\Delta x} \right] \quad (4.1)$$

Donde, el subíndice i indica el nodo que está siendo modelado, $i+1$ indica el nodo adyacente al interior de la construcción, $i-1$ indica el nodo adyacente al exterior de la construcción, k_w es la conductividad térmica para la interfase entre el nodo i y el nodo $i+1$, k_e es la conductividad térmica para la interfase entre el nodo i y el nodo $i-1$, $j+1$ es el paso de tiempo anterior y j es el paso de tiempo siguiente. La ecuación anterior muestra la formulación implícita de un nodo interno. Los subíndices se refieren al nodo y al paso

de tiempo. Se complementa la ecuación con una función de entalpia-temperatura:

$$h_i = f_{ht}(T_i) \quad (4.2)$$

Donde, la función f_{ht} está dada por el usuario. Para todos los nodos se utilizan las dos ecuaciones previas (nodos superficiales externos, internos y nodos de interfase). El nodo de interfase facilita el modelado del MCF. Puesto que es una solución implícita, se utiliza un esquema de iteración Gauss-Seidell [186] para actualizar el nuevo valor de nodo de la temperatura en la envolvente. Usando una ecuación adicional, para cada iteración, el valor de la entalpía se actualiza y es usado para obtener la variable C_p .

$$C_p = \frac{h_{i,nuevo} - h_{i,anterior}}{T_{i,nuevo} - T_{i,anterior}} \quad (4.3)$$

El esquema iterativo asegura el uso correcto de la entalpía y por ende el respectivo valor de C_p en cada paso de tiempo. Si el material es regular, se utiliza la constante C_p provista por el usuario para la simulación.

Los dos archivos de entrada necesarios para correr una simulación son:

- El archivo de clima: Este archivo debe contener los datos históricos de variables climáticas para el periodo que se requiere simular.
- El archivo IDF (EnergyPlus Input Data File): que contiene toda la información acerca de la localización, geometría, materiales, estructura, y equipos de climatización.

4.1.1. Archivo de clima

Desde el ícono de EP-Lunch se suministra el archivo de clima (Figura 4.2), el cual debe tener el formato EPW. El archivo EPW se puede construir a través del programa Weather Statistics and Conversions de EnergyPlus. Para generar el archivo EPW son necesarios dos archivos, el archivo que contenga los datos climatológicos con formato CSV, y un archivo con extensión DEF con el mismo nombre del archivo de clima (CSV) que se desea convertir. Este archivo DEF debe de ubicarse en la misma carpeta donde está ubicado el archivo de clima con terminación CSV, y sirve para identificar las variables climáticas que serán suministradas en el archivo de clima CSV. Si en el archivo CSV tenemos radiación global horizontal, radiación, temperatura de bulbo seco, humedad relativa, velocidad de viento el archivo DEF tendrá el siguiente formato (Figura 4.3):

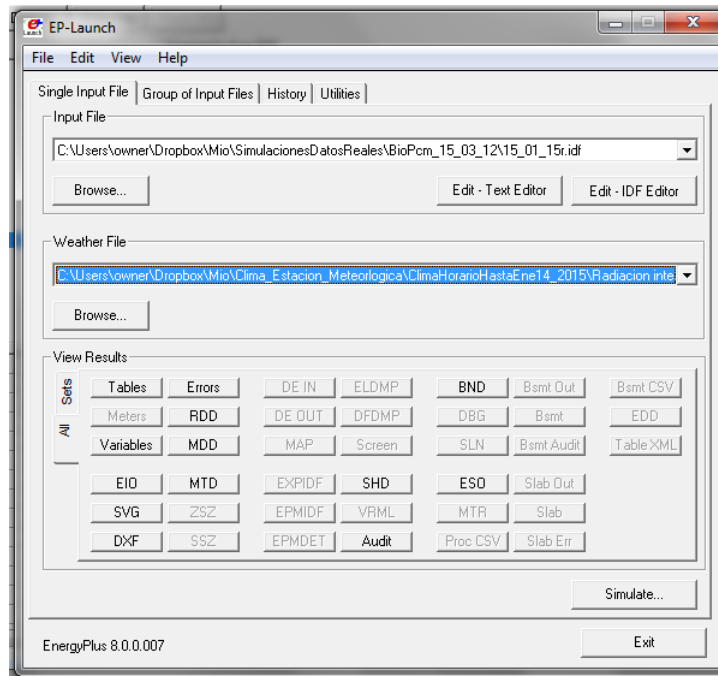


Figura 4.2. EP Launch de EnergyPlus, pestaña de localización del archivo de clima.

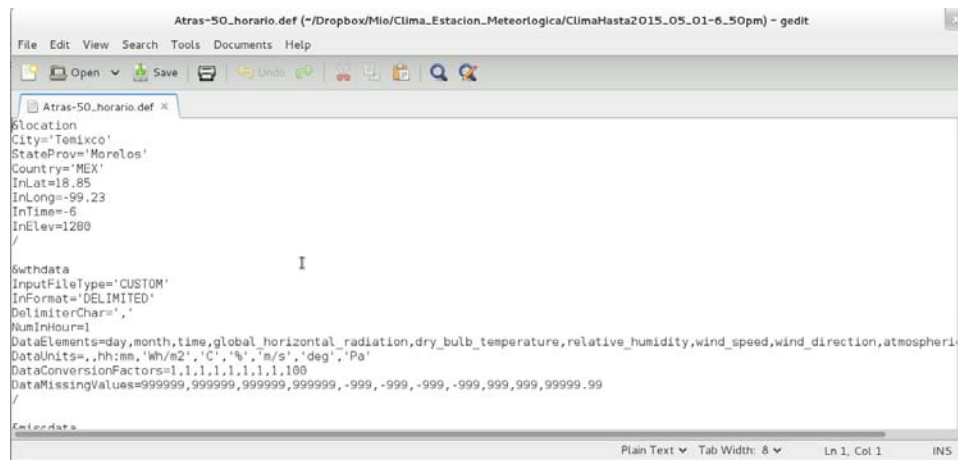


Figura 4.3. formato DEF del archivo de clima.

4.1.2. Geometría y archivo IDF

Existen diversas interfaces gráficas para generar la geometría para EnergyPlus, entre ellas están DesignBuilder, EFEN, AECOsim Energy Simulator, Hevacomp Simulator V8i, COMFEN, Solar Shoe Box, N++, gEnergy, Simergy, Beopt, Sefaira, Archsim, OpenStudio y EBEST. Para versiones antiguas del EnergyPlus están CYPE, MC4

SUITE, SMART ENERGY y EPlusInterface. Estas interfaces facilitan la elaboración del modelado dándole la información acerca de la localización, geometría, propiedades físicas de los materiales, estructura y equipos de climatización. De esta manera, al exportar los datos generados por la interfase estos datos forman parte del archivo IDF para EnergyPlus. Para este trabajo se utilizó el DesignBuilder versión D.B3.0 para otorgar las propiedades de los materiales y generar las sombras del edificio 3.1. Alternativamente se utilizó el SketchUp 8 (Figura 4.4) para generar la geometría.

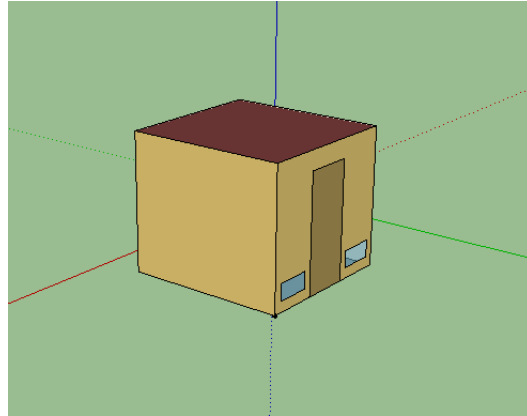


Figura 4.4. Geometría generada desde el programa SketchUp 8.

4.2. Configuración de EnergyPlus para modelado con MCF

Para configurar una simulación en EnergyPlus se cuenta con alrededor de 52 grupos de parámetros para definir una simulación específica. Estos pueden ser seleccionados desde la lista de clasificación (*Class List*). El principal grupo es llamado Parámetros de Simulación (Simulation Parameters) en el cual se incluyen datos de entrada como es el paso de tiempo, los límites de convergencia, los algoritmos de conducción y convección, especificaciones de la edificación, etc. Otros principales grupos de parámetros son Localización y Clima, Superficies de los Elementos Constructivos, Zonas Térmicas y Superficies, Ganancias Internas, Flujo de Aire por Zonas, Ventilación Natural y múltiples grupos para los equipos de climatización, por ejemplo Formatos de HVAC&R. A continuación se describen los comandos relevantes para las simulaciones de este trabajo, comenzando por los parámetros correspondientes al grupo de parámetros de (*Simulation Parameters*).

4.2.1. Algoritmo de convección para las superficies interiores y exteriores

Este parámetro de entrada es utilizado para seleccionar el modelo de transferencia de calor por convección de las superficies exteriores e interiores. Para el algoritmo de las superficies interiores las opciones son: *Simple*, *TARP*, *Ceiling Diffuser* y *Adaptive Convection Algorithm*, donde el modelo *Simple* utiliza coeficientes de transferencia de calor constantes según la orientación de la superficie, el modelo *TARP* correlaciona los coeficientes de transferencia de calor con la diferencia de temperaturas para las distintas orientaciones, el *Ceiling Diffuser* correlaciona los coeficientes de transferencia de calor con la tasa de cambios de aire para el techo, muros y pisos, y finalmente el *Adaptive Convection Algorithm* es un algoritmo dinámico que organiza y selecciona automáticamente dentro de diferentes modelos de convección, aplicando el modelo de convección más conveniente. El algoritmo predeterminado es el *TARP*.

Para el algoritmo de las superficies exteriores las opciones son: *Simple Combined*, *TARP*, *MoWiTT*, *DOE-2*, y *Adaptive Convection Algorithm*, donde el modelo *Simple Combined* utiliza coeficientes de transferencia de calor dependiendo de la rugosidad de la superficie y de la velocidad del viento en la superficie, es un coeficiente de transferencia de calor que incluye la radiación hacia el al cielo, la tierra y el aire. El modelo *TARP* combina las correlaciones de convección natural y forzada obtenidas en laboratorio a través de mediciones en platos planos, los modelos *DOE-2* y *MoWiTT* utilizan correlaciones obtenidas en campo para superficies rugosas y superficies lisas respectivamente. Finalmente se tiene el *Adaptive Convection Algorithm*, el cual es un algoritmo dinámico que organiza y selecciona automáticamente dentro de diferentes modelos de convección, aplicando el modelo de convección más conveniente. Se eligió el algoritmo *TARP*, por ser un modelo dinámico, sin embargo, se realizaron simulaciones con diversos modelos y no se obtuvieron resultados significativamente diferentes.

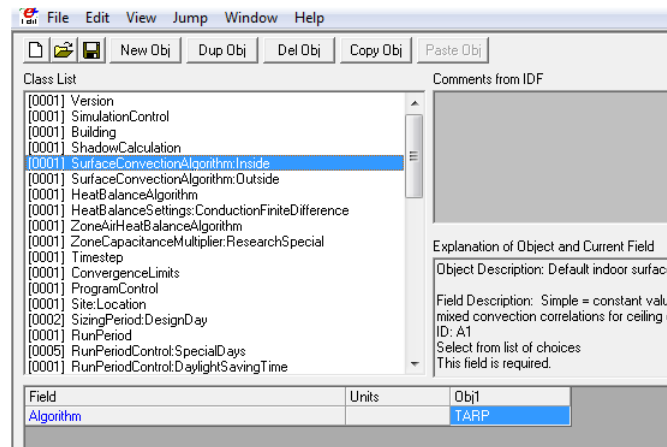


Figura 4.5. Editor IDF de EnergyPlus, pestaña del algoritmo de convección.

4.2.2. Algoritmo de transferencia de calor por conducción

Uno de los principales parámetros de entrada para la simulación de MCF en EnergyPlus es el algoritmo de transferencia de calor por conducción, el cual utiliza el método de diferencias finitas, puesto que es el que da la opción de introducir los datos de entalpía de cambio de fase, es decir, la curva de entalpía. Esta solución utiliza un modelo unidimensional en todos los elementos constructivos y no toma en cuenta el almacenamiento de humedad, difusión en los elementos constructivos y tampoco la convección en el MCF cuando está en estado líquido.

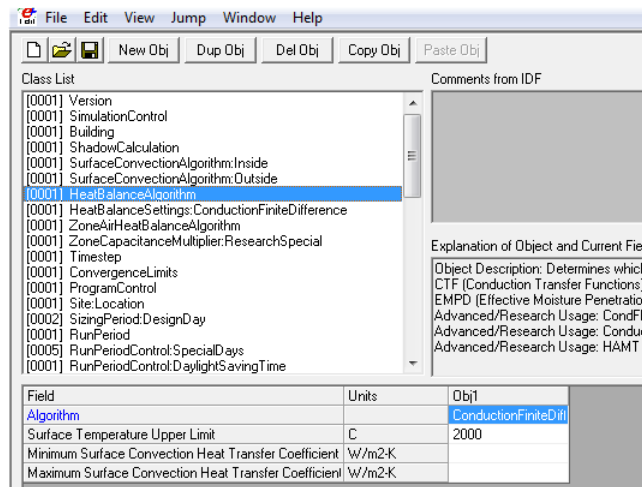


Figura 4.6. Editor IDF de EnergyPlus, pestaña del algoritmo de conducción.

4.2.2.1. Configuración del modelo diferencias finitas

Este parámetro determina la utilización del algoritmo de conducción por diferencias finitas (ver Figura 4.6) para la transferencia de calor a través de los elementos sólidos de la envolvente. También es posible determinar el esquema de solución, tiene la opción de seleccionar entre el esquema implícito de primer orden (para la variable de tiempo), y el esquema de *Crank-Nicholson* de segundo orden (para la variable de tiempo), el cual puede ser más rápido, pero menos estable para condiciones de frontera que cambian abruptamente. El esquema implícito es más estable con el paso de tiempo y está seleccionado por defecto al utilizar diferencias finitas. Hemos notado que para las simulaciones realizadas no significaban ningún cambio en los resultados al utilizar uno o el otro. Las simulaciones realizadas para este trabajo fueron hechas con el esquema implícito.

4.2.2.2. Constante espacial de discretización

EnergyPlus utiliza el parámetro C llamado constante espacial de discretización para determinar la distancia nominal entre nodos y el número de nodos para cada capa de material del sistema constructivo (Figura 4.7). Como Δx depende de la difusividad térmica de los materiales, se obtiene una distancia nominal entre nodos diferente para cada material dispuesto en la envolvente de la edificación.

$$\Delta x = \sqrt{C\alpha\Delta t} \quad (4.4)$$

Donde, α = difusividad térmica, Δt = el paso temporal, C = es la constante de discretización y Δx es la distancia nominal entre nodos.

Una vez obteniendo Δx , es posible determinar el número de nodos ($\#N$) a través de la ecuación (4.5), con base al espesor del material L y la distancia nominal entre nodos Δx .

$$\#N = \frac{L}{\Delta x} \quad (4.5)$$

Los valores típicos de C van de 1 a 3, y entre menor sea la constante conlleva a un valor mayor del número de nodos por capa de material. El valor predeterminado de la constante de discretización es $C=3$, y es el inverso del número de Fourier ($F_o = \alpha\Delta t/\Delta x^2$), el cual está basado en el criterio de estabilidad para el modelo explícito [181], el cual requiere valores mayores a $C=2$, o números de Fourier menores a 0.5. Cabe mencionar que para el algoritmo de transferencia de calor de diferencias finitas utiliza un esquema implícito que no tienen los mismos requerimientos de estabilidad que el modelo explícito, por lo tanto el valor $C=3$ está arbitrariamente predeterminado. Sin embargo, debido a que la lámina galvanizada es altamente conductiva y muy delgada se utilizó un valor de $C=0.2$, que permitía obtener al menos 2 nodos para la lámina galvanizada.

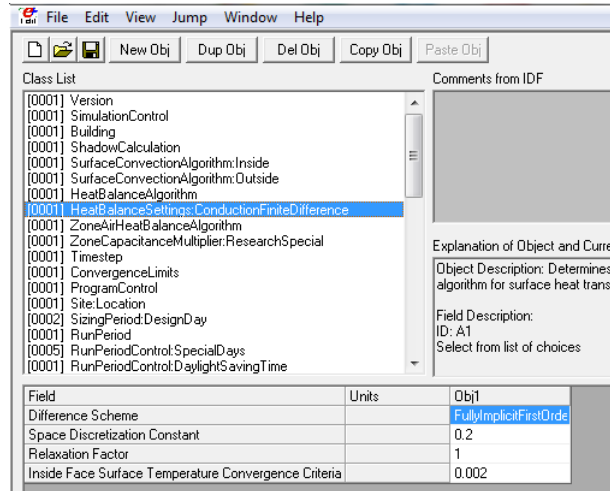


Figura 4.7. Editor IDF de EnergyPlus, pestaña del esquema de conducción y la constante espacial de discretización.

Los nodos en la malla de discretización para cada capa de material son distribuidos con media distancia en cada orilla y de igual distancia en el resto del interior del material. Para capas de materiales muy delgados al menos se requieren un mínimo de dos nodos, esto significa dos medios nodos que representan la temperatura superficial interior y exterior de la capa. Puesto que el algoritmo de conducción de diferencias finitas determina el número de nodos en cada capa de material basado en el criterio de estabilidad de Fourier, y la constante de discretización C (Esta constante tiene un valor único para todas las capas del sistema constructivo), tenemos de acuerdo con las ecuaciones (4.4) y (4.5), que no es posible simular materiales muy delgados y altamente conductivos, porque al recurrir al criterio de Fourier arroja distancias entre nodos mayores a los espesores de los materiales delgados. Por tal motivo para la lámina galvanizada fue necesario generar un material con base al criterio de Fourier con un espesor mayor tal que ofreciera una difusividad térmica la cual fuera capaz de ser simulada.

4.2.3. Paso de tiempo

Para el paso de tiempo, el algoritmo de diferencias finitas puede manejar pasos de tiempo entre 20 y 60 pasos de tiempo por hora. En este caso se seleccionó 60 pasos por hora (Figura 4.8) puesto que para la simulación de la lámina galvanizada permitía espesores más delgados. La selección del paso de tiempo tiene importantes implicaciones para la precisión de la simulación, y el tiempo que toma realizar la simulación. El seleccionar un paso de tiempo de 60 pasos por hora significó mayores tiempos de simulación.

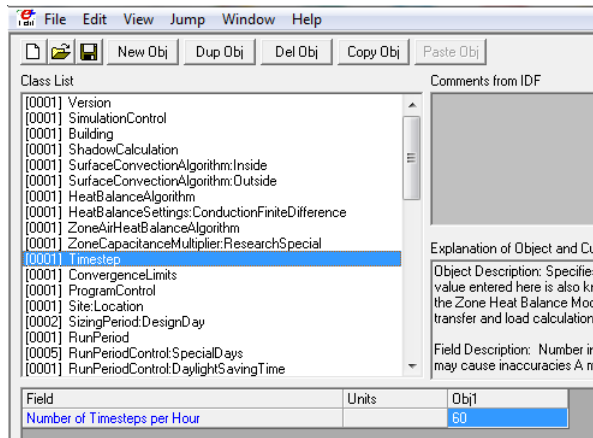


Figura 4.8. Editor IDF de EnergyPlus, pestaña del paso de tiempo.

A continuación se describen los parámetros correspondientes al grupo de parámetros de *Location-Climate-Weather File Access*.

4.2.4. Localización

A través del IDF Editor de EnergyPlus es posible definir múltiples parámetros. En esta sección se define la latitud, la longitud, la zona horaria y la elevación (Figura 4.9). Estos datos son determinados por el archivo de clima EPW.

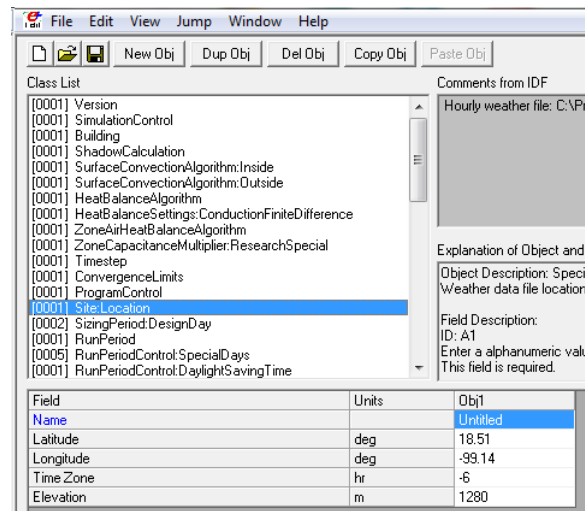


Figura 4.9. Editor IDF de EnergyPlus, pestaña de localización.

Los siguientes parámetros corresponden al grupo de parámetros de *Surface Construction Elements*.

4.2.5. Entrada de materiales

Este parámetro (*Materials*) sirve para suministrar las propiedades físicas de los materiales de la envolvente. Es posible proporcionar la rugosidad del material, el grosor [m], la conductividad térmica [W/mK], la densidad [kg/m^3], el calor específico [J/kgK], la absorptancia térmica, la absorptancia solar, y la absorptancia visible. La rugosidad afectará solamente a los coeficientes convectivos del algoritmo de convección, específicamente al coeficiente convectivo exterior. La absorptancia térmica equivale a la emisividad de onda larga del material. La absorptancia solar abarca todo el espectro solar, tanto el espectro visible como el ultravioleta y el infrarrojo, y finalmente la absorptancia visible abarca solamente el espectro visible (Figura 4.10). En este trabajo se utilizaron los materiales proporcionados en la tabla 3.1.

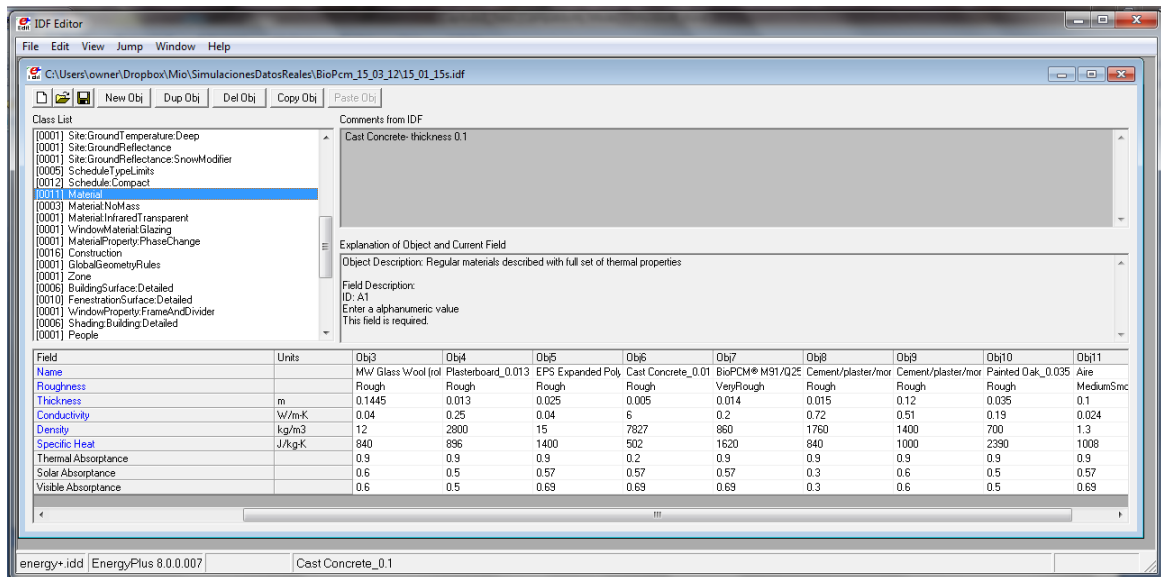


Figura 4.10. Editor IDF de EnergyPlus, pestaña de suministro de propiedades de los materiales.

4.2.5.1. Espesor equivalente del BioPCM

El módulo de simulación de MCF en EnergyPlus toma en cuenta las capas como si fueran una capa continua, u homogénea, por lo que es necesario representar esta capa de BioPCM como una capa con un espesor equivalente. Con la finalidad de asegurar que se ha utilizado el mismo volumen de BioPCM, esta capa fue calculada de dos maneras; calculando el volumen midiendo físicamente las variables dimensionales y midiendo el volumen al sumergir una muestra del MCF macroencapsulado con y sin el relleno de MCF en una probeta con agua. Los resultados de la medición física nos dio un resultado de 1.4 cm de espesor equivalente (Figura 3.11). A través de la medición

sumergida en agua se obtuvo un espesor equivalente de 1.0 cm. el cual representa una medición más confiable respecto a medir sus dimensiones. Finalmente, por recomendaciones del fabricante se tomó para las simulaciones un espesor de 0.6 cm, puesto que el macroencapsulado tiene un volumen de aire contemplado para cambios de volumen por cambio de fase. El espesor del aire dentro del macroencapsulado es de 0.4 cm de espesor equivalente. La suma de espesores equivalentes recomendados por el fabricante (0.6 cm de MCF y 0.4 cm de aire en el macroencapsulado) concuerdan con 1.0 cm que se obtuvo de la medición al sumergir el MCF.

4.2.6. La curva de entalpía

De manera tabular, a través del parámetro *MaterialProperty:PhaseChange* es posible suministrar los datos de la entalpía de cambio de fase a través de 16 pares de datos que describan enteramente el rango de temperatura del MCF, la entalpía de cambio de fase asociada a una temperatura específica. A pesar de que la gran mayoría de los MCF presentan histéresis, solamente es posible suministrar la curva de entalpía para la fusión y no para la solidificación, por lo tanto en los 16 pares de datos de entalpía-temperatura, la temperatura debe de ir forzosamente en incremento (ver Figura 4.11).

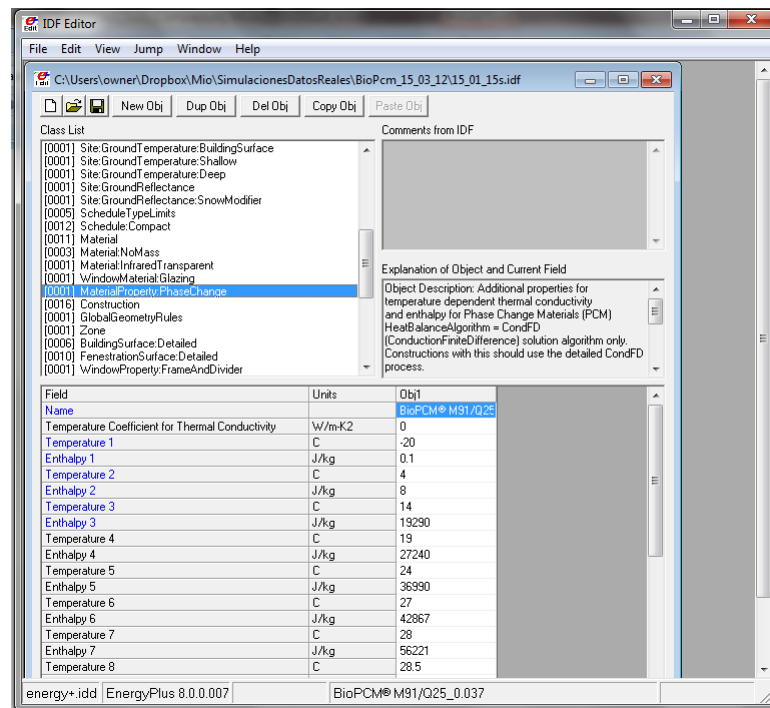


Figura 4.11. Editor IDF de EnergyPlus, pestaña de función de temperatura-entalpía.

4.2.7. Sistema constructivo

Para el sistema constructivo es posible definir a través del parámetro *Construction* (ver figura 4.12), las diferentes capas de las superficies, tomando en cuenta que la superior será la capa externa, o la superficie que está menos expuesta a la zona que se está analizando. El sistema constructivo se definirá con base a los materiales dados de alta en Materiales. Proporcionando un nombre que será utilizado para definir el tipo de sistema constructivo, ya sea de los muros, techos, pisos, ventanas, puertas. Es posible generar hasta ocho capas para muros y techos y 8 capas para ventanas.

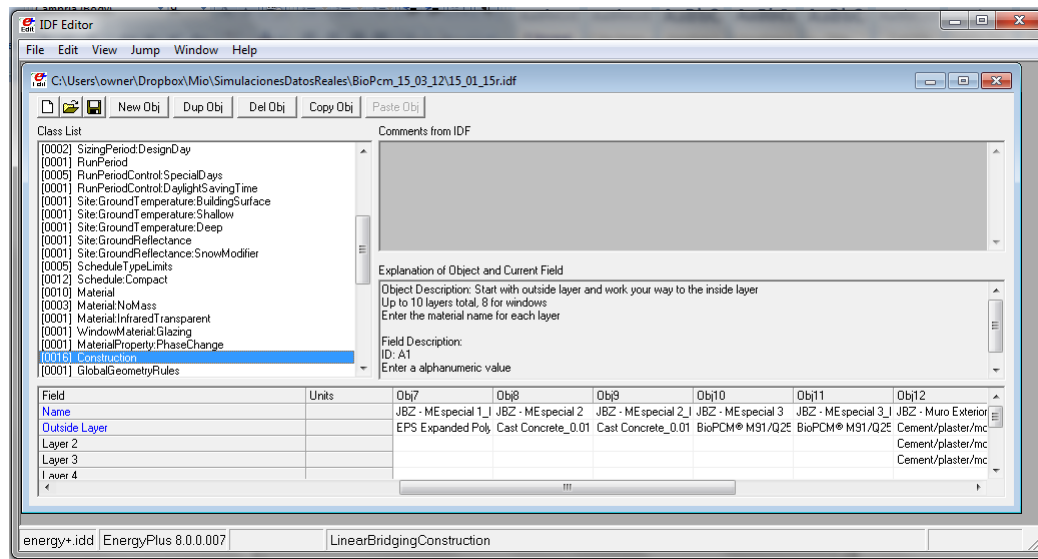


Figura 4.12. Editor IDF de EnergyPlus, pestaña de sistema constructivo.

El grupo de parámetros a continuación pertenecen al grupo de parámetros llamado *Thermal Zone Description/Geometry*.

4.2.8. Detalle de componentes de la envolvente

En este parámetro (ver figura 4.13) se describen las dimensiones de los diferentes elementos de la envolvente, ya sean muros (*BuildingSurface:Detailed*), como puertas, ventanas, (*FenestrationSurface:Detailed*). Aquí se describe la ubicación respecto a un eje coordenado, y también es posible definir si algún elemento de la envolvente está en contacto con el suelo, a la intemperie o alguna otra zona. Para poder representar el techo y el muro este correspondiente al módulo experimental se utilizó el parámetro (*FenestrationSurface:Detailed*) de tal manera que pudieran ser simuladas tres diferentes secciones con propiedades distintas en una misma superficie.

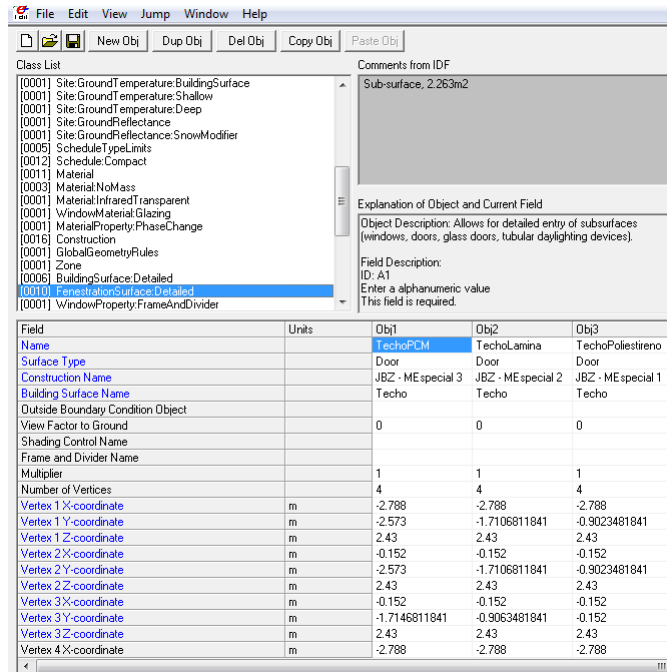


Figura 4.13. Editor IDF de EnergyPlus, pestaña de detalle de las superficies.

4.2.9. Detalle de sombramiento de la edificación

Este parámetro (ver Figura 4.14) sirve para simular como otras superficies afectan al objeto en estudio, como puede ser radiación reflejada del suelo y otras superficies adyacentes, o sombras generadas por árboles o edificios contiguos. Para poder lograr mejores resultados en la simulación fue necesario tomar en cuenta las sombras que las edificaciones aledañas generan en el módulo de prueba, por lo tanto se tomó en cuenta para la simulación el edificio 3.1 localizado al noreste del módulo de prueba.

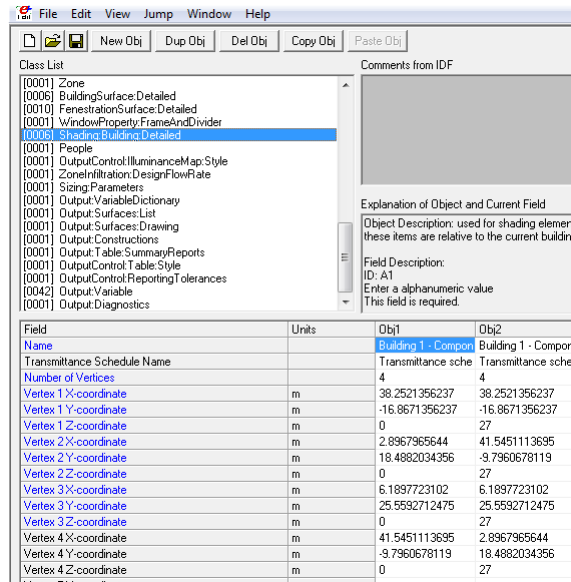


Figura 4.14. Editor IDF de EnergyPlus, pestaña de sombreado.

Los parámetros correspondientes al grupo de parámetros *Airflow* describen el flujo de aire entre zonas y flujos debido a ventilación cruzada o ventilación mecánica, y los utilizados para la simulación fueron los siguientes:

4.2.10. Infiltración

Los flujos de aire del exterior que logran entrar a una zona térmica al interior de la edificación son posible tomarlos en cuenta a través de este parámetro (*ZoneInfiltration:DesignFlowRate*, ver Figura 4.15). La infiltración es generalmente causada por abrir y cerrar las ventanas, o ya sea por los pequeños huecos que queden en los elementos de las edificaciones como son puertas y ventanas. Para la elaboración de la caseta se pretendió minimizar en lo más posible las fuentes de infiltración, quedando únicamente pocas áreas descubiertas como es el umbral, o luz en la parte baja de la puerta de entrada y pequeños espacios en el muro de evaluación (muro este). Se realizaron diferentes simulaciones con diversos cambios de aire por infiltración y no significaron grandes cambios en los datos de salida, y finalmente se consideraron 0.15 cambios de aire por hora.

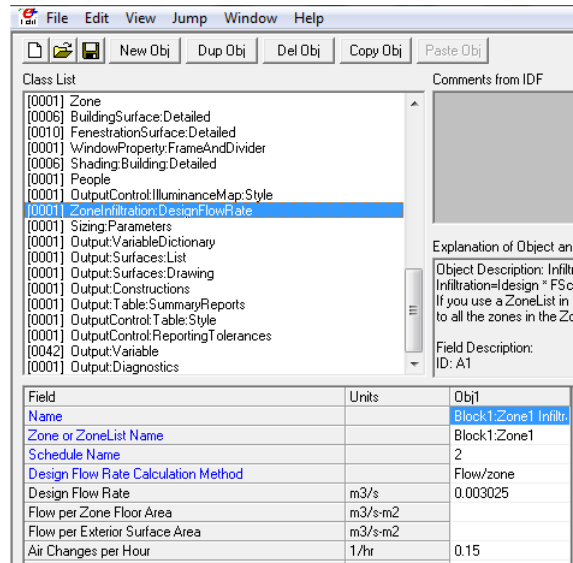


Figura 4.15. Editor IDF de EnergyPlus, pestaña de infiltración.

4.2.11. Ventilación

El parámetro de ventilación (*ZoneVentilation:DesignFlowRate*) se refiere al flujo de aire del exterior que entra hacia una zona térmica de manera intencional. Este objeto de entrada tiene la intención de simular flujos sencillos de ventilación y no modelos que involucren sistemas de aire mecánicos. Debido a que los experimentos se realizaron con las ventilas cerradas, no se tomo en cuenta ningún parámetro de entrada de ventilación. Del grupo de parámetros de datos de salida (*ZoneVentilation:DesignFlowRate*) se seleccionó únicamente el siguiente parámetro:

4.2.12. Datos de salida

Desde este parámetro (*Output:Variable*, ver Figura 4.16) es posible elegir las variables de salida, pudiendo seleccionar gran cantidad de variables como pueden ser temperaturas superficiales, temperaturas al interior, flujo de calor por unidad de área, humedad relativa, y variables incluso con factores económicos, o de emisiones de dióxido de carbono. Para el caso de simulación con MCF es posible seleccionar las temperaturas para cada nodo usado en el análisis de conducción de calor.

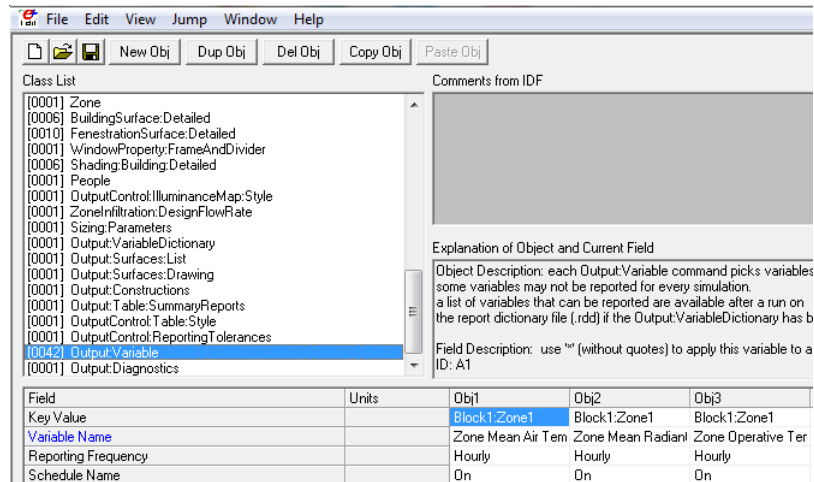


Figura 4.16. Editor IDF de EnergyPlus, pestaña de variables de salida.

Una vez definido todos los parámetros se procedió a la simulación térmica del módulo. Los resultados se presentan en el siguiente capítulo los cuales se comparan con los obtenidos en los experimentos.

Capítulo 5

Resultados y discusión

En este capítulo se muestran los resultados por medio de gráficas de los datos experimentales y numéricos de las temperaturas superficiales exteriores e interiores de las tres secciones del techo. Para poder analizar de mejor manera estos resultados se realizó un análisis del cambio de pendiente de la temperatura superficial interior. También se elaboró un análisis de resultados para evaluar el desempeño de los MCF a través de medidas de desempeño térmico como es el factor de decremento y el tiempo de retraso. Finalmente se hizo una comparación con el material aislante convencional (poliestireno).

5.1. Simulación

De igual manera que los datos experimentales, las simulaciones fueron divididas en dos etapas: la Etapa 1, a partir del día 20 de diciembre del 2014 en donde se tiene una capa de aire de 0.5 cm entre la lámina y el BioPCM, y la Etapa 2 a partir del día 21 de marzo del 2015, hasta el 01 de mayo del 2015, donde fueron realizadas las adecuaciones en el sistema constructivo para eliminar dicha capa de aire.

5.2. Resultados

Dado que la superficie del techo recibe la mayor incidencia solar, se reportaron los resultados únicamente de este elemento constructivo. Con el fin de analizar los datos por día, a continuación se muestran los resultados de cuatro periodos. Cada periodo representa siete días, los cuales fueron obtenidos durante los 4.5 meses de mediciones. Los dos primeros periodos se realizaron con la capa de aire (Etapa 1), el primer periodo del día 10 de enero 2015 al 17 de enero 2015, y el segundo periodo del día 6 de febrero del 2015 al 13 de febrero del 2015. El tercer y cuarto periodos se realizaron sin la capa

de aire (Etapa 2), del día 24 de marzo 2015 al 31 de marzo 2015, y del día 15 de abril 2015 al 21 de abril 2015, respectivamente. Cabe mencionar que debido a la existencia de unas montañas lejanas (ubicadas al oeste del módulo experimental) las cuales no fueron contempladas en la simulación, es posible atribuir que las temperaturas exteriores mínimas de la simulación para cada sección son ligeramente mayores (De 0.5 °C a 1.0 °C) a las experimentales, porque para la simulación existe incidencia solar hasta el ocaso a diferencia de las experimentales que antes del ocaso no existía incidencial solar.

5.2.1. Resultados de temperatura etapa 1, periodos 1 y 2

A continuación se presentan los valores experimentales y de la simulación de la temperatura superficial interior y exterior correspondientes a la sección del techo con MCF (Figura 5.1) del primer periodo. Con azul oscuro se representan los valores experimentales de la temperatura superficial interior (línea continua, E-TMCFI), y la temperatura superficial exterior (línea discontinua, E-TMCFE). En azul claro se representan los resultados de la simulación de la temperatura superficial interior (línea punteada, S-TMCFI), y de la temperatura superficial exterior (línea discontinua, S-TMCFE). Se puede notar que la temperatura superficial exterior máxima no presenta diferencias entre datos experimentales y simulados. En la temperatura superficial exterior mínima existe una diferencia máxima de temperatura de 0.5 °C. Para los datos de la temperatura superficial interior podemos notar que los datos simulados para la fusión se apega bien a los datos experimentales, sin embargo no es el caso para la solidificación.

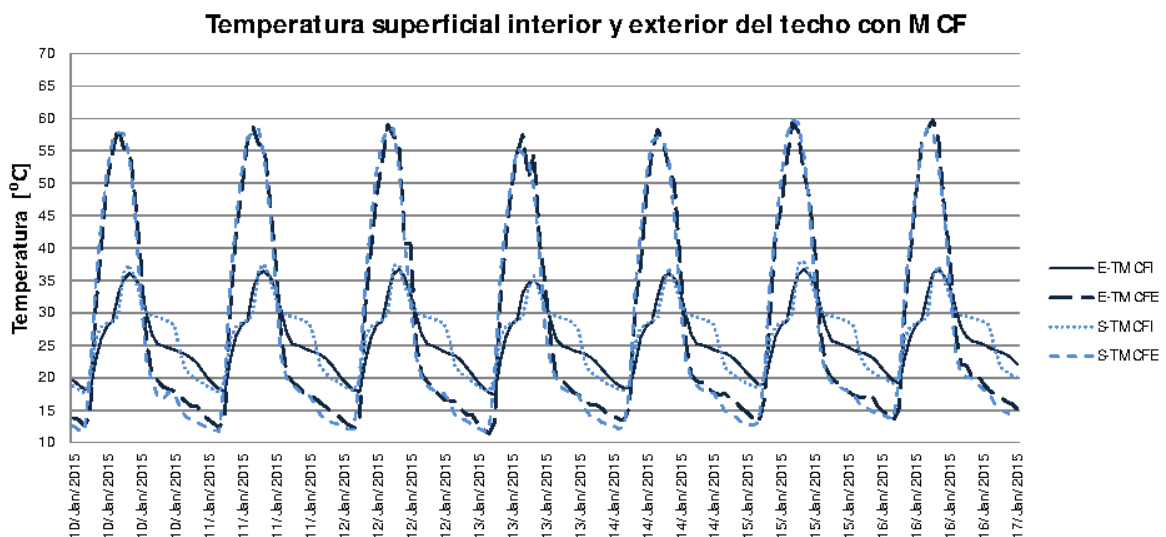


Figura 5.1. Datos experimentales (E) y simulados (S) del periodo 1.

En el análisis del cambio de pendiente de la temperatura superficial interior de la

simulación, se encontró que durante el cambio de fase (fusión), existen dos principales cambios de pendientes, por lo que se hizo un ajuste para abarcar el rango completo y obtener una sola pendiente de cambio de fase. Como es posible ver en la figura 5.2, la curva de la temperatura superficial al interior sufre un cambio en la pendiente alrededor de los 26 °C.

Temperatura superficial interior del techo con MCF (Fusión)

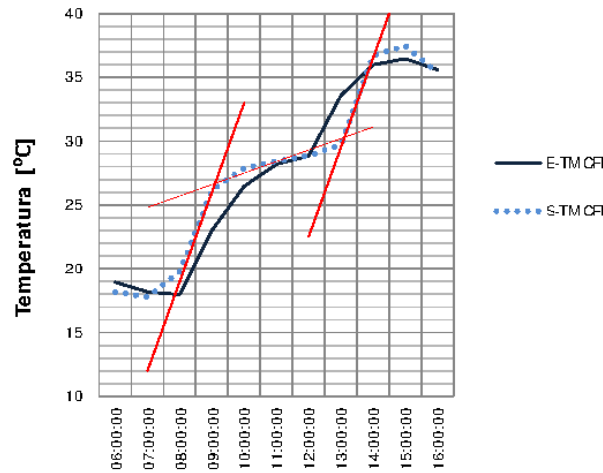


Figura 5.2. Análisis de pendiente de los datos simulados del 11 de Enero del 2015, proceso de fusión.

Entre 7 y 9 h. (Figura 5.2) la pendiente de la temperatura superficial al interior es de 4.3 °C/h, esto es debido al incremento en la temperatura por la incidencia solar (de 18 °C a 26 °C, aproximadamente), hasta que alcanza el inicio del rango de fusión del BioPCM a las 9 h y dura hasta las 12 h. Se obtuvo una pendiente para todo el rango de cambio de fase de 0.97 °C/h desde los 26 °C hasta los 29 °C, lo cual indica que la transferencia de calor en ese rango se presenta de manera latente, a temperatura casi constante. Se observa que para el caso del BioPCM, existe un rango de cambio de fase y no un punto de fusión. Asimismo, el rango de fusión que se encontró y comprobó con los datos del fabricante (alrededor de 3 °C), no es tan amplio como en el caso de otros tipos de MCF, lo cual permite que las diferencias de temperatura ambiente entre la noche y el día del sitio donde se colocará el MCF no se requieran que sean tan amplias. Al finalizar el cambio de fase se obtuvo una pendiente promedio de 4.4 °C/h, que es muy cercana a la pendiente en estado sólido, indicando que este cambio es de manera sensible en estado líquido.

Temperatura superficial interior del techo con MCF (Fusión)

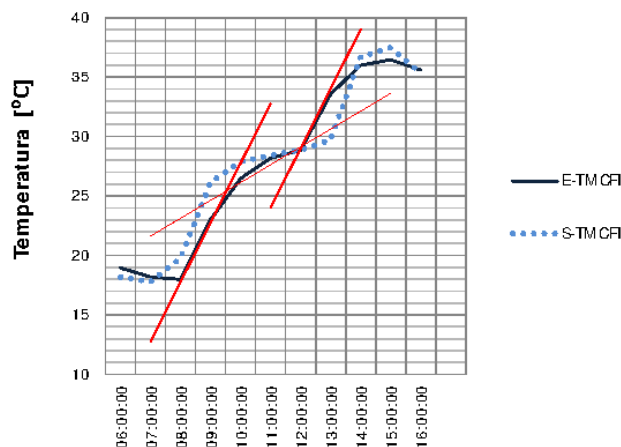


Figura 5.3. Análisis de pendiente de los datos experimentales del 11 de Enero del 2015, proceso de fusión.

Para los datos de pendientes obtenidos (Figura 5.3) en la temperatura superficial interior experimental, se observa que realiza el mismo patrón de cambio de pendiente, teniendo primeramente una pendiente de $2.7\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ en el estado sólido entre 8 h y 10 h, posteriormente una pendiente de $1.2\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ en la transición de cambio de fase entre 10 h y 12 h y finalmente entre 12 h y 15 h, la pendiente en el estado líquido es de $3.5\text{ }^{\circ}\text{C/h}$, la cual es similar a la del estado sólido por ser ambas de manera sensible.

A pesar de que los datos experimentales y simulados se acercan en gran medida en todo el proceso de fusión, una vez comenzada la solidificación, la temperatura superficial interior presenta una discrepancia entre los datos de simulación y los datos experimentales (Ver figura 5.4).

Temperatura superficial interior del techo con MCF (solidificación)

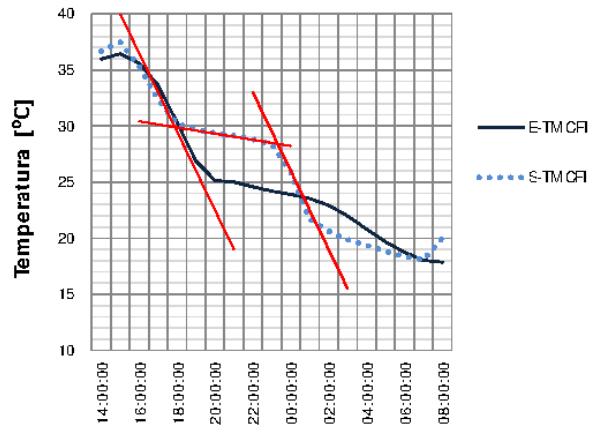


Figura 5.4. Análisis de pendiente de los datos simulados del 11 de Enero del 2015, proceso de solidificación.

En los resultados de la simulación (Figura 5.4), la solidificación se da en el mismo rango que el de fusión, comenzando desde los 29 °C y terminando alrededor de los 25 °C entre 18 h y 22 h, con una pendiente promedio de 0.75 °C/h. Para los datos experimentales se da entre 20 h y 02 h. pero el rango de solidificación es de los 25 °C a los 23 °C y una pendiente de 0.53 °C/h. Por otro lado, se observa que las pendientes para la fase líquida entre la simulación y los datos experimentales son bastante similares con -3.8 °C/h y -3.4 °C/h respectivamente. Para la parte sólida las pendientes difieren de -2.5 °C/h en la simulación contra -1.0 °C/h en el experimental. El rango donde termina la solidificación de los datos experimentales es abajo de los 23 °C y hasta los 18°C, y a esas temperaturas la pendiente de la simulación es de -0.6 °C/h, la cual es más cercana al -1.0 °C/h de los datos experimentales. Cabe destacar que a pesar de estas discrepancias la amplitud de la curva de ambas temperaturas interiores es de la misma magnitud. Se sabe que el algoritmo de EnergyPlus no toma en cuenta los efectos de histéresis, por lo que se podría suponer que esta diferencia en la solidificación es debido a que el BioPCM presenta histéresis y solo se da la curva de fusión. En la figura 3.9 se observa que en el resultado de las mediciones del DSC reportadas por el fabricante, el rango de fusión no es el mismo que el rango de solidificación. Por otro lado, una vez obtenidos los cálculos de las pendientes podemos notar que los datos proporcionados por el proveedor en la figura 3.9 no corresponden al rango de fusión y de solidificación obtenidos en los datos experimentales. En el rango de fusión existe más similitud que en el rango de solidificación, se puede observar que los datos proporcionados por el proveedor para la fusión van de 18 °C pasando por el pico de fusión a 24.81 °C y terminando la fusión a 29

°C. Y en los datos experimentales 5.3 podemos notar que la pendiente más pronunciada comienza alrededor de los 25 °C. existe cierta similitud pensando en que la fusión de los 18 °C a los 25 °C no es muy notoria. Sin embargo, en el rango de solidificación es posible notar que el rango proporcionado por el proveedor va de los 22 °C pasando por el pico de solidificación a 20.27 °C y terminando la solidificación a 15 °C aproximadamente. En contra posición en los datos experimentales 5.3 es posible notar que el rango de solidificación del BioPCM (figura 5.5) se da a partir de los 25 °C y termina alrededor de los 23 °C.

Temperatura superficial interior del techo con MCF (solidificación)

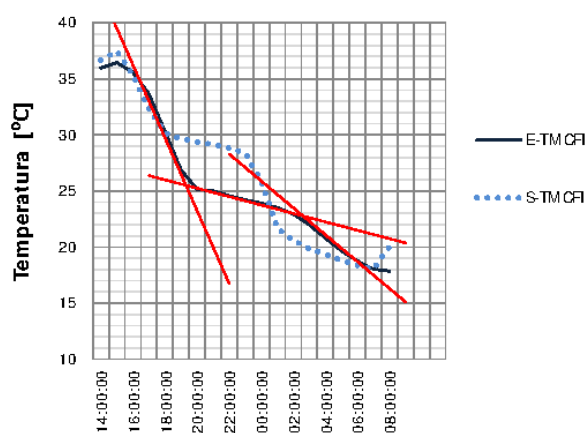


Figura 5.5. Análisis de pendiente de los datos experimentales del 11 de Enero del 2015, proceso de solidificación.

En los datos obtenidos para el poliestireno, se presenta una buena concordancia entre los datos experimentales y los simulados. Existe una diferencia en la temperatura superficial máxima al interior de 2 °C y un promedio de 1 °C aproximadamente. En las temperaturas superficiales al interior mínimas existe una diferencia máxima de 1 °C y un promedio de 0.75 °C. La temperatura superficial interior (Figura 5.6), presenta un incremento casi constante en el periodo de 6 h a 14 h, lo cual implica que la transferencia de calor se da de manera sensible, y la temperatura incrementa constantemente mientras que aumenta la energía térmica debido a la incidencia de la radiación solar. Para la temperatura superficial exterior mínima existe una discrepancia de 1 °C y un promedio de 0.5 °C. En la temperatura superficial exterior máxima prácticamente no existen diferencias. Cabe mencionar que a este material le fueron otorgadas las propiedades térmicas superficiales exteriores de la lámina galvanizada, y que la lámina es tan delgada y altamente conductiva que fue posible descartarla para las simulaciones.

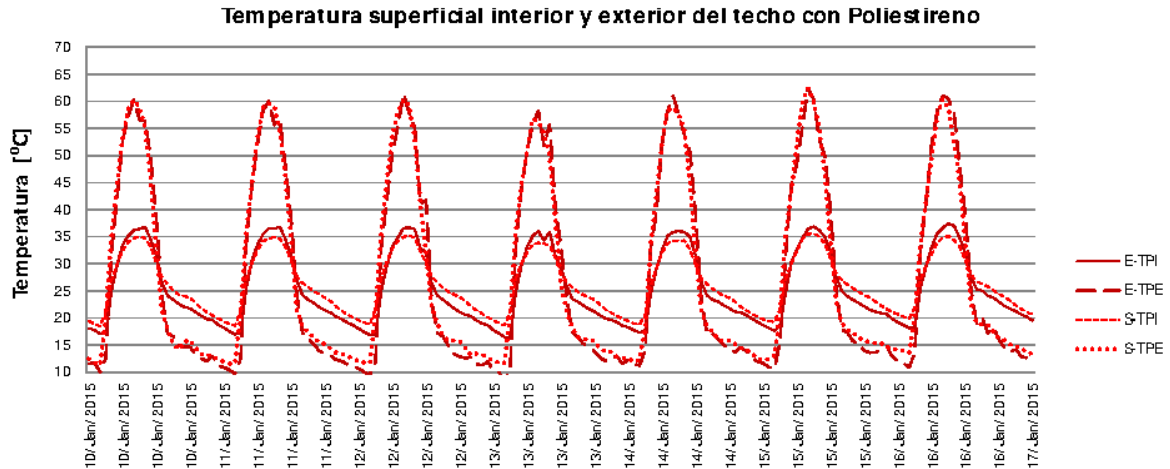


Figura 5.6. Datos experimentales (E) y simulados (S) del poliestireno del periodo 1.

Ya que el poliestireno mantuvo durante todo el tiempo este acuerdo entre datos experimentales y simulados ya no se presentan resultados de este material para los siguientes periodos.

A continuación se muestran los resultados experimentales y de la simulación de la lámina galvanizada (Ver figura 5.7). Existe un defasamiento (7.5°C) en la temperatura superficial exterior máxima entre los datos experimentales y simulados atribuido a la imposibilidad de simular las propiedades térmicas y físicas de la lámina galvanizada y a la presencia de las montañas que no fueron simuladas, sin embargo, a pesar de que el sistema constructivo no se simuló de la misma manera que en el experimento, se obtuvo buena semejanza en los resultados. Por otro lado, esta discrepancia también se le atribuye a la existencia de montañas lejanas que no fueron contempladas en la simulación, por lo que la temperatura de la simulación al atardecer no desciende de la misma manera que los resultados experimentales, en los cuales el sol es obstruido por la montaña desde antes del ocaso. En cuanto a las temperaturas exteriores, podemos notar que existe una diferencia en promedio de 7.5°C en la temperatura máxima y una diferencia de 5°C en la temperatura mínima.

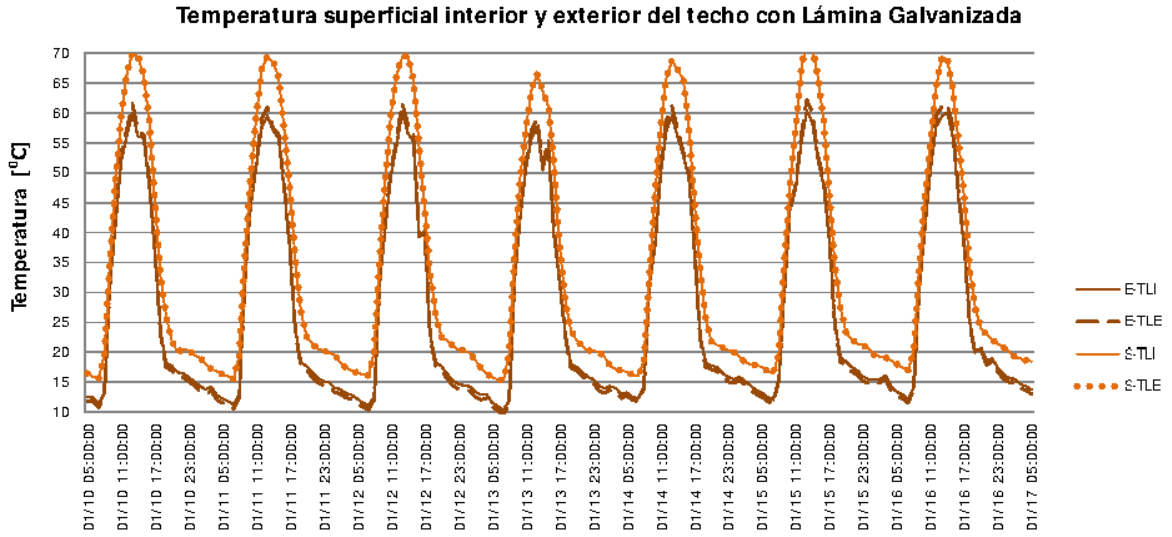


Figura 5.7. Datos experimentales (E) y simulados (S) de la lámina del periodo 1.

Para el segundo periodo podemos notar (Ver figura 5.8) que se mantiene consistente el mismo comportamiento de cambio de fase, llevandose acabo el ciclo fusión-solidificación completamente a lo largo de los meses entre diciembre y febrero. La pendiente de cambio de fase es claramente visible aún, y también vemos que en la temperatura de solidificación llega a la temperatura pico de solidificación de 20.27 referente a la figura 3.9. Sin embargo, no llega a la temperatura de terminación de solidificación de 15 °C.



Figura 5.8. Datos experimentales (E) y simulados (S) del BioMCF del periodo 2.

5.2.2. Resultados de temperatura etapa 2, periodos 3 y 4

Para los datos experimentales obtenidos durante el tercer periodo, que abarca del día 24 de marzo 2015 al 31 de marzo 2015 (Figura 5.9), la curva de cambio de fase está suavizada en comparación con el caso del periodo 1 y 2 previamente analizado. Esto puede ser debido a que el MCF no llega a una temperatura de solidificación completamente y la consistencia del MCF es blanda, por ejemplo, el día 25 de marzo, al descender la temperatura, llega a los 23 °C, temperatura a la cual los datos experimentales previamente analizados (periodo 1) demuestran que finaliza el cambio de fase. Podemos notar que para finales del mes de marzo la temperatura exterior ha subido de tal manera que la temperatura superficial interior apenas llega al límite inferior donde se completa el ciclo de fusión-solidificación. Para el caso de las temperaturas superficiales exteriores se tiene una discrepancia de 5 °C en promedio entre los datos experimentales y los simulados.

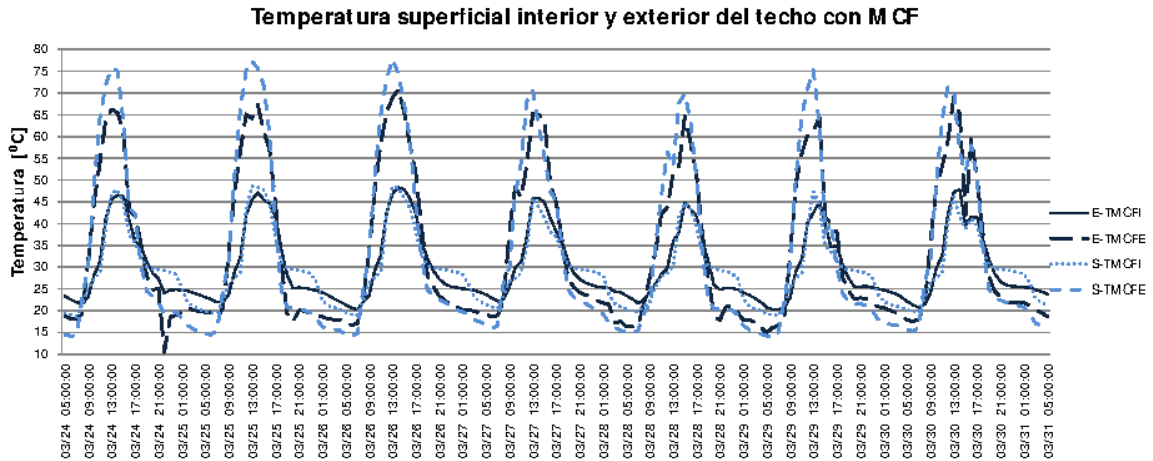


Figura 5.9. Datos experimentales (E) y simulados (S) del periodo 3.

El último periodo abarca del día 15 de abril 2015 al 21 de abril 2015 (Figura 5.10). Para el caso del periodo 4, es evidente que en los datos experimentales ya no se lleva a cabo el ciclo fusión-solidificación. Cabe destacar que el mes más caluroso en Temixco, Morelos es abril, por lo que en estos días durante la noche la temperatura no baja lo suficiente y el material no realiza su ciclo diario de fusión-solidificación, manteniéndose líquido durante toda la noche, por lo tanto, el material se mantiene líquido por varios días, actuando como un material de almacenamiento de calor sensible. Para la simulación, es posible destacar que los ciclos diarios de cambio de fase aún se siguen llevando a cabo, y se puede asumir que es debido a que el cambio de fase se da de 25 °C a 29 °C, semejante al rango de fusión; motivo por el cual en la simulación es posible llegar a una temperatura de solidificación completamente.

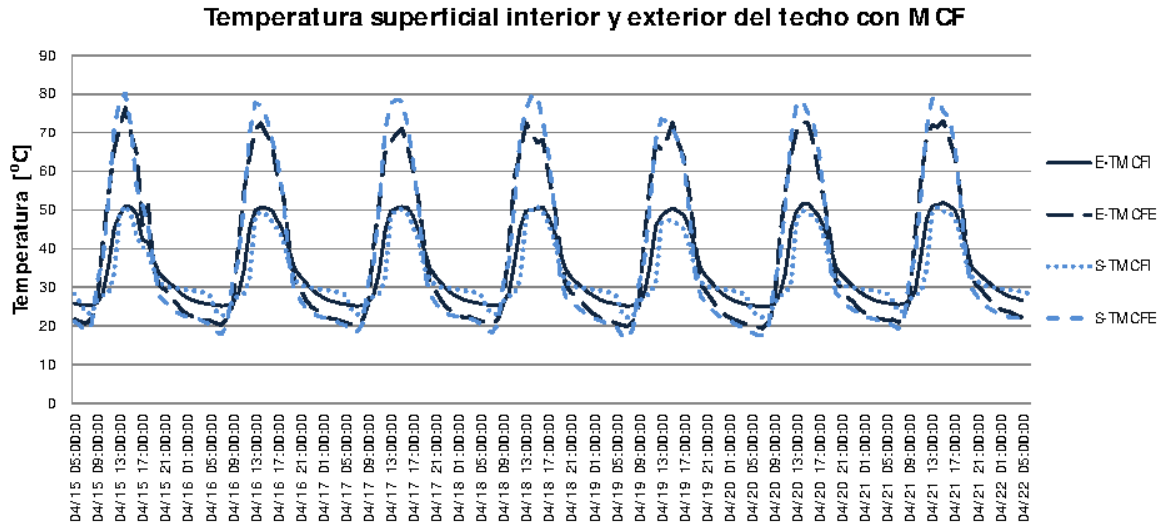


Figura 5.10. Datos experimentales (E) y simulados (S) del periodo 4.

5.3. Comparación entre BioPCM y poliestireno

Con el fin de evaluar el desempeño de ambos materiales, se muestra la figura 5.11 en donde se superponen las gráficas 5.1 y 5.6 correspondientes al periodo 1.

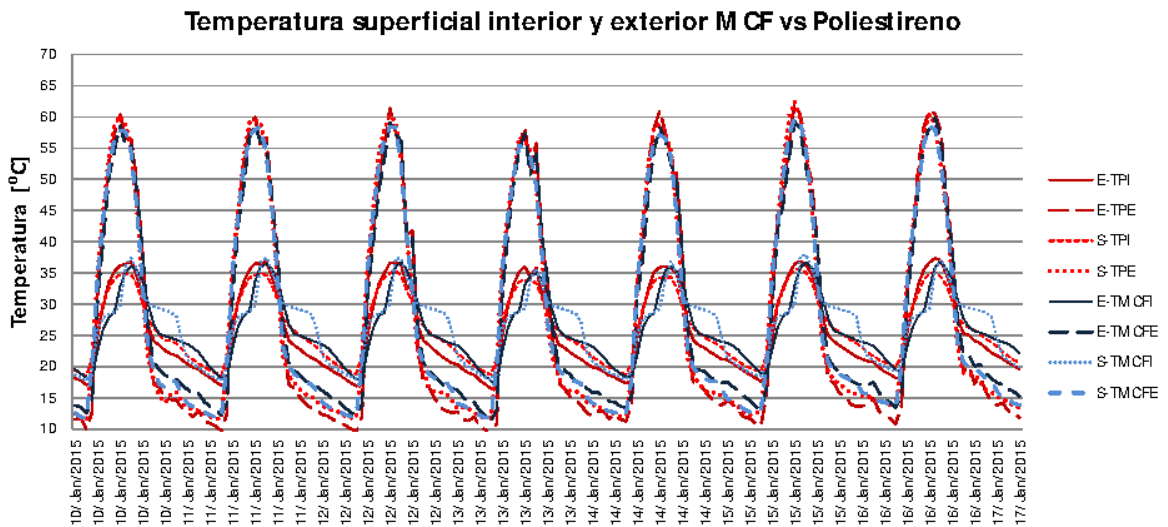


Figura 5.11. Datos experimentales (E) y simulados (S) del periodo 1.

Se puede notar que la temperatura superficial interior en el caso del BioPCM tiene un tiempo de retraso mayor al observado con el poliestireno. Este efecto es muy importante porque por ejemplo, si vemos una ampliación de la figura del día 11 de Enero (Figura 5.10), de 10 h a 14 h las temperaturas superficiales interiores del BioPCM llegan

a ser hasta 6°C menores que las correspondientes en poliestireno. Cabe mencionar que el valor de las temperaturas máximas para el poliestireno y el BioPCM son de la misma magnitud.

Temperatura superficial interior y exterior MCF vs Poliestireno (Fusión)

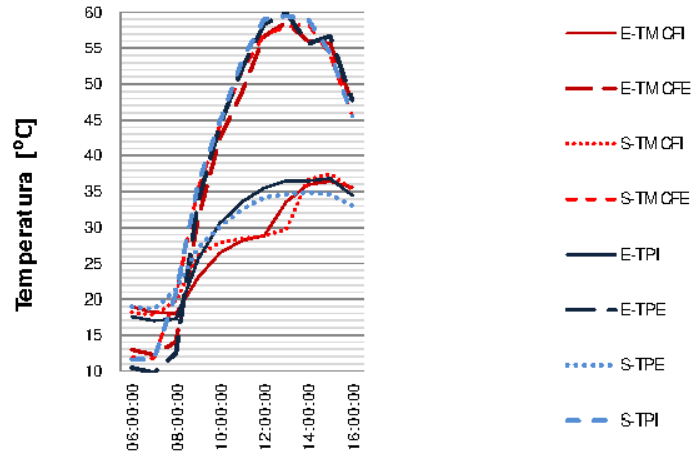


Figura 5.12. Tiempo de retraso promedio de la Etapa 1.

Como fue previamente mencionado, para la evaluación del desempeño térmico de un material de la envolvente en un edificación, normalmente se utilizan los parámetros del factor de decremento y del tiempo de retraso. El factor de decremento se define como la relación A_i/A_e , donde A_i es la amplitud de la oscilación de la temperatura superficial interior $T_{i_{max}} - T_{i_{min}}$, y A_e es la amplitud de la oscilación de la temperatura superficial exterior $T_{e_{max}} - T_{e_{min}}$. Por lo tanto, el factor de decremento indica en qué medida disminuye la amplitud de la oscilación de la temperatura interior con relación a la amplitud de la oscilación de la temperatura exterior. El tiempo de retraso se refiere al tiempo que transcurre desde el momento en que la temperatura superficial exterior ha alcanzado su valor máximo, hasta el momento en que la temperatura superficial interior haya alcanzado de igual manera su valor máximo.

A continuación se muestra la figura 5.13(a) que indica el factor de decremento, y la figura 5.13(b) que presenta los tiempos de retraso de cada día de la etapa 1. Para el poliestireno (TP) y para el material de cambio de fase (TMCF).

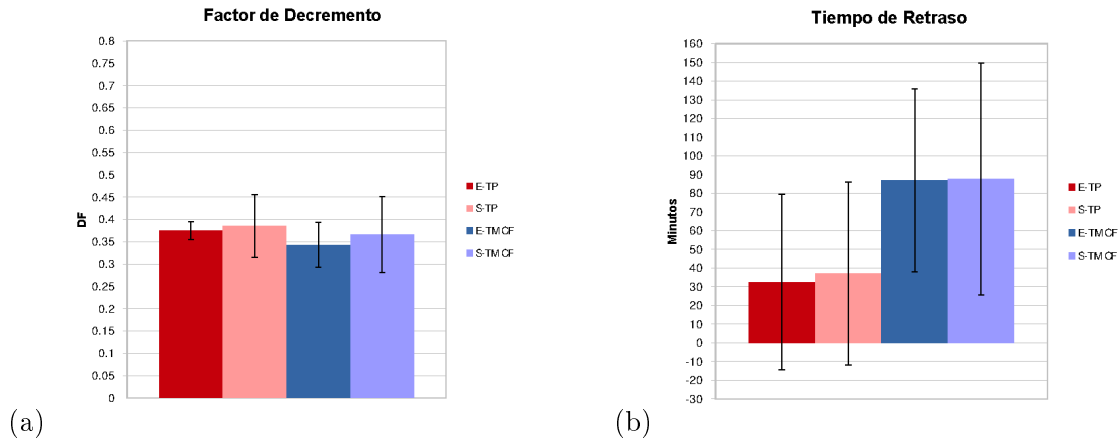


Figura 5.13. (a) Factor de decremento de la Etapa 1, (b) Tiempo de retraso de la Etapa 1.

En la figura 5.13(a) se tienen factores de decremento muy similares para los dos materiales, lo cual está de acuerdo con lo observado en la figura 5.11. De acuerdo con este factor, bajo las condiciones establecidas, los dos arreglos constructivos tienen un desempeño similar. Sin embargo el tiempo de retraso del BioPCM es en promedio 1 h mayor que el del poliestireno (Figura 5.13(b)).

En la segunda etapa, se observa que el factor de decremento (Figura 5.14(a)) para el poliestireno mantiene el mismo valor que en la etapa 1 mientras que el MCF tiene un incremento que va de 0.35 a 0.50 en el experimento y de 0.35 a 0.55 en el la simulación. El tiempo de retraso para el E-TP se mantiene igual y se nota una ligera disminución en S-TP. En el caso de MCF se presenta una disminución muy importante comparado con el obtenido en la etapa 1. Cabe mencionar que para esta etapa el MCF no realiza el ciclo de fusión-solidificación en algunos días. Por lo tanto, el funcionamiento del MCF se afecta y como se muestra en la figura 5.14, repercute en los indicadores de desempeño térmico.

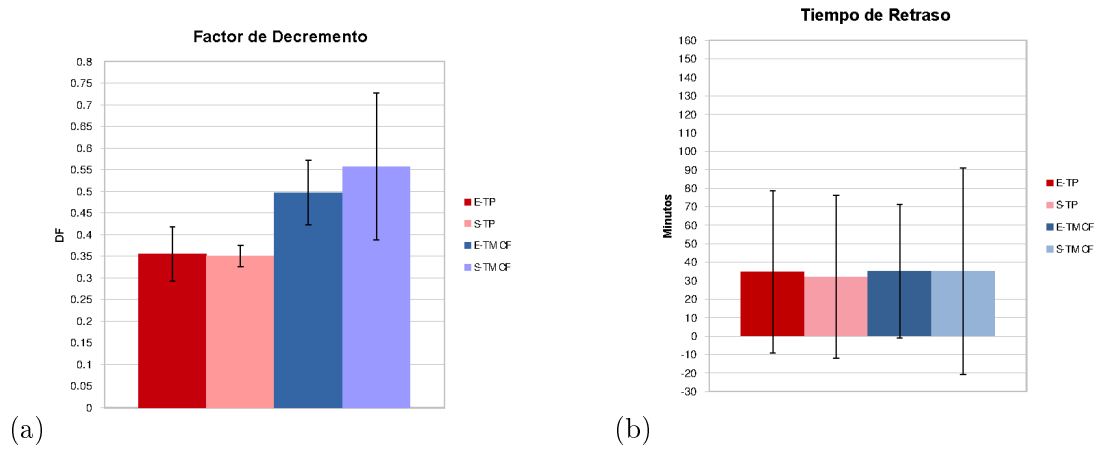


Figura 5.14. (a) Factor de decremento de la Etapa 2, (b) Tiempo de retraso de la Etapa 2.

Capítulo 6

Conclusiones

Con base a los resultados obtenidos en las simulaciones y en los datos experimentales en el módulo de prueba sin aire acondicionado, podemos concluir que para la utilización de MCF en la envolvente de las edificaciones con fines térmicos, es importante tomar en cuenta diferentes factores para que la aplicación tenga un desempeño correcto y efectivo. Primeramente es importante notar que la utilización de MCF en la envolvente para recintos sin A/C, requiere que sean instalados en climas donde las diferencias de temperaturas entre el día y la noche sean lo suficientemente grandes para lograr el ciclo de fusión-solidificación diario, por lo tanto es importante saber de antemano si la fusión del MCF se presenta en un punto o en un rango, así como la amplitud de dicho rango.

También es necesaria la utilización de un programa de simulación puesto que en la selección del MCF, además de la diferencia de temperaturas exteriores entre el día y la noche, se debe tener en cuenta el sistema constructivo en el cual éste sea incluido. El poner el MCF al interior o al exterior puede alterar el desempeño considerablemente.

En el caso de sistemas constructivos ligeros o de baja masa térmica sin A/C, pudimos notar que esta aplicación es factible para recintos como oficinas en donde exista un horario laboral, puesto que la gran ventaja de la utilización de este material es el tiempo de retraso, que fue de 60 min en promedio respecto al caso del poliestireno; presentando entre 11:00 h y 13:00 h temperaturas superficiales en el MCF menores hasta de 6 °C, que las correspondientes al poliestireno. Es preciso destacar que en la etapa 1, cuando se tuvo una capa de aire de 5cm entre la lámina y el MCF, el factor de decremento del MCF fue ligeramente menor al del material aislante, lo cual implica que un sistema constructivo de MCF con una capa de aire puede ser una buena opción y además con el MCF se logran tiempos de retraso de más del doble que con el material aislante, lo que lo hace más atractivo ya que durante varias horas de la mañana se tienen temperaturas menores que con el aislante y además las temperaturas

superficiales máximas al interior son de la misma magnitud, es decir el MCF actúa como un aislante, y proporciona tiempos de retraso en la transferencia de calor. Cabe mencionar que esto dependerá de que se encuentre bajo las condiciones adecuadas (de acuerdo al clima y selección de punto de fusión) para que se genere el ciclo de fusión-solidificación, como fue el caso de la etapa 1. Por este motivo es de suma importancia definir el punto de fusión del MCF en la fase de diseño. Los resultados de los tiempos de retraso indicaron que para la etapa 1 se obtuvieron 60 min promedio, a comparación con los de la etapa 2 que no solo no hubo mayores tiempos de retraso respecto al poliestireno, sino que además el factor de decremento se incrementó en 20 %.

Para climas donde exista un comportamiento estacional es importante definir para cuándo se quiere establecer la utilización del MCF. Es posible definir el punto de fusión para las épocas más calurosas o también es posible definir el punto de fusión para la temperatura media anual con el fin de abarcar más días de aprovechamiento del material. El definir el punto de fusión bajo la segunda opción traería como consecuencia que en los días más calurosos el material se comportaría como una masa donde la transferencia de calor se daría de manera sensible con una conductividad térmica más elevada que un material aislante, por lo que la temperatura de la superficie interior sería mayor que al utilizar un aislante, como es el caso del periodo 4 con resultados de hasta 5°C mayores a los de un aislante convencional. También traería como consecuencia mayores días al año con temperaturas más bajas en las superficies interiores. Para el caso de definir el punto de fusión para las épocas más calurosas lograría reducir las temperaturas superficiales interiores de un menor número de días pero favoreciendo la época más calurosa. Por lo tanto, es preciso definir si en esos días más calurosos será necesario el uso de sistemas de aire acondicionado para llegar a temperaturas interiores de confort, o con el uso de MCF es suficiente para llegar a temperaturas de confort, y de tal manera no sería necesario diseñar para abarcar más días al año, sino simplemente la época calurosa. Dicho lo anterior, es necesaria la utilización de un programa de simulación que permita determinar de manera más precisa el punto de fusión con base al sistema constructivo en el cual se quiera instalar, y tomando en cuenta para que época del año se requiera que trabaje el MCF.

Otro punto importante a tomar en cuenta es la absorptancia solar de las superficies exteriores. Como bien es sabido, el color de las superficies exteriores juega un papel muy importante en la transferencia de calor al interior, por lo que el color debe ser definido con anticipación para seleccionar el material y el punto de fusión a utilizar. Los valores de absorptancia solar tienen un rango desde 0 a 1 idealmente. Por lo tanto, una superficie idealmente negra, como cuerpo negro debería absorber el 100 %, y una superficie reflejante no debería absorber nada y reflejar el 100 %. Sin embargo el valor

de absorción en una superficie reflejante real se encuentra alrededor del 0.1, lo cual significa que refleja el 90 % y entonces se vería disminuida en un gran porcentaje la transferencia de calor comparativamente con una pintura negra, o por ejemplo una pintura roja que tiene un valor aproximado del 0.7, y refleja el 30 %. De tal manera, la diferencia de calor que es transmitida es considerablemente diferente si se toman colores distintos, por lo que el color de las superficies exteriores debe ser contemplado con anticipación .

Finalmente, tomando en cuenta que los experimentos y las simulaciones se realizaron con cero cambios de aire por ventilación y considerándose solamente un valor de 0.17 cambios de aire por hora de infiltración, podemos destacar al analizar los datos de las dos etapas, que en el caso del periodo 3 y 4 podría complementarse el uso de MCF junto con ventilación nocturna para lograr una eficiencia mayor en el ciclo de fusión-solidificación. De esta manera, en la noche la convección por ventilación cruzada, o en un dado caso ventilación forzada ayudaría a la descarga del MCF enfriando las superficies interiores, y contribuyendo así a la solidificación del MCF por las noches. Esto podría contribuir a obtener mayor número de días en donde se llevara a cabo el ciclo de fusión-solidificación y por lo tanto más horas al año con temperaturas superficiales al interior menores hasta en 6 °C entre 11:00 h y 13:00 diariamente. Futuros estudios son requeridos para ver de qué manera la ventilación cruzada o forzada pueda contribuir a la solidificación del MCF en los casos donde se mantuvo líquido el BioPCM durante toda la noche. Son precisos estos estudios para determinar un punto de fusión que pueda abarcar mayor rango de días anuales en los cuales se aproveche el MCF en la envolvente de edificaciones sin sistemas de aire acondicionado.

Cabe destacar que para que la simulación de MCF en el software EnergyPlus sea más exacta, es necesario habilitar una curva de entalpía para la solidificación puesto que muchos MCF presentan diferentes rangos o puntos de solidificación a los de fusión.

Referencias

- [1] F. Kuznik, D.David, K.Johannes, J.-J.Roux, *A review on phase change materials integrated in building walls*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 -1 -2011 379-391.
- [2] D.W. Hawes, D. Banu and D. Feldman, *Latent heat storage in concrete II*, Sol. Energy Mater, 21 -1990 61-80.
- [3] International Energy Agency. *World Energy Balances, 2013*. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) iLibrary. Junio, 2013 <http://tinyurl.com/o7mzdgq>
- [4] Secretaría de Energía. *Balance Nacional de Energía, 2013*. México, 2014 PDF <http://tinyurl.com/balanceNE>
- [5] U.S. Energy Information Administration. *Annual Energy Outlook, 2013* Energy Information Administration, 2007 PDF [http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383\(2013\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383(2013).pdf)
- [6] Praditsmanont A, Chungpaibulpatana S. *Performance analysis of the building envelope: a case study of the Main Hall*, Shinawatra University. Energy and Buildings 2008;40:1737-46
- [7] Dincer I, Rosen MA. *Thermal Energy Storage Systems and Applications*, 2nd edn. Wiley Sons, 2011
- [8] Barkmann HG, Wessling FC. *Use of buildings structural components for thermal storage* In: Proceedings of the workshop on solar energy storage subsystems for the heating and cooling of buildings 1975
- [9] Abhat A. Short term thermal energy storage. Energy and Buildings 1981;3:49-76.
- [10] Morikama Y, Suzuki H, Okagawa F, Kanki K. *A development of building elements using PCM*. In: Proceedings of the international symposium on thermal application of solar energy. 1985

- [11] Hawes DW, Feldman D, Banu D. *Latent heat storage in building materials* Energy and Buildings 1993;20:77-86.
- [12] Haussmann T, Henning HM, Schossig P. *Phase change materials in wall integrated systems* In: Proceedings of the 2nd workshop of IEA ECES IA annex 17 2002
- [13] Abhat A. *Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials* Sol Energy 1983;30:313-32.
- [14] J. Dieckmann, *Latent heat storage in concrete* Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, Germany. www.eurosolar.org/ 2008 (retrieved 09.12.08).
- [15] Dipl.-Ing. Jens H. Dieckmann. *Latent heat storage in concrete*. University of Kaiserslautern, Germany; 2006 www.eurosolar.de/
- [16] G.A. Lane, *Solar Heat Storage: Latent Heat Material, vol. I, Background and Scientific Principles*. CRC Press, Florida, 1983
- [17] G.A. Lane, *Solar Heat Storage: Latent Heat Material, vol. II, Technology*, CRC Press, Florida, 1986
- [18] Hadorn JC. *Thermal energy storage for solar and low energy buildings*. Universitat de Lleida; 2005
- [19] Zalba B, Marín JM, Cabeza LF, Mehling H. *Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications*. Applied Thermal Engineering 2003;23:251-83.
- [20] L.F. Cabeza, A. Castella, C. Barrenechea, A. de Gracia, A.I. Fernández. *Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 -2011 1675-1695
- [21] M.F. Demirbas, *Thermal energy storage and phase changing materials: an overview*. Energy Resources, Part B: Economics, Planning and Policy 1 -1 -2006 85-95.
- [22] G. A. Lane and D. N. Glew, *Heat-of-fusion systems for solar energy storage*. Proc. Workshop on Solar Energy Storage Subsystems for the Heating and Cooling of Buildings, pp. 43-55. Charlottesville, Virginia (1975).
- [23] Harald Mehling · Luisa F. Cabeza, *Heat and cold storage with PCM, An up to date introduction into basics and applications*
- [24] *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. Vol. 14, pp. 768-769. Wiley, New York (1971).

- [25] A. Pasupathy, R. Velraja, R.V. Seeniraj. *Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments* Renewable and Sustainable Energy Reviews 12 -2008 39-64
- [26] M. Telkes, *Solar house heating—A problem of heat storage. Heating and Ventilating*,44, 68-75 (1947).
- [27] V.V.Tyagi, D. Buddhi, *PCM termal storage in buildings: a state of art*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 11 -6 -2007 1146-1166.
- [28] A. Pasupathy, R. Velraja, R.V. Seeniraj. *Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments* Renewable and Sustainable Energy Reviews 12 -2008 39-64
- [29] N. Soares, J.J. Costa, A.R. Gaspar, P. Santos. *Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings. energy efficiency*. Energy and Buildings 59 -2013 82-103
- [30] Buddhi D, Sharma SD. *Measurements of transmittance of solar radiation through stearic acid: latent heat storage material*. Energy Convers Manage 1999;40:1979-84.
- [31] Knowler T. *Proportioning composites for efficient-TSWs*. Sol Energy 1983;31(3):319-26.
- [32] A. Joulin, Z. Younsi, L. Zalewski, S. Lassue, D.R. Rouse, J.-P.Cavrot, *Experimental and numerical investigation of a phase change material: termal energy storage and release*. Applied Energy 88 -7 -2011 2454-2462.
- [33] A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, G. Pérez, L.F. Cabeza, *Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling*, Energy and Buildings 42 -4 -2010 534-540.
- [34] D. Feldman, M.M. Shapiro, D. Banu, C.J. Fuks, *Fatty acids and their mixtures as phase-change materials for thermal energy storage*. Solar Energy Materials 18 -1989 201-216.
- [35] A.F. Rudd, *Phase-change material wallboard for distributed thermal storage in buildings*. ASHRAE Transactions: Research 99 2 -1993 339-346.
- [36] Feldman D, Banu D. *DSC analysis for the evaluation of an energy storing wallboard*. Thermochemica Acta/Advances in International Thermal Sciences Environment Polymers Energy and Techniques 1996;272:243-51.
- [37] Dean JA. *The Analytical Chemistry Handbook*. McGraw Hill, Inc., 1995

- [38] A. Hauer, H. Mehling, P. Schossig, M. Yamaha, L. Cabeza, V. Martin, F. Setterwall, *Advanced thermal energy storage through phase change materials and chemical reactions-feasibility studies and demonstration projects*. International energy agency implementing
- [39] Buddhi D, Sawhney RL, Sehgal PN, et al. *A simplification of the differential thermal analysis method to determine the latent heat of fusion of phase change materials*. J Phys D Appl Phys 1987;20:1601
- [40] D. Zhou, C.Y. Zhao, Y. Tian, *Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications*. Applied Energy 92 -2012 593-605.
- [41] Y. Zhang, Y. Jiang, *A simple method, the T-history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials*. Measurement Science and Technology 10 -3 -1999 201-205.
- [42] Scalat S, Banu D, Hawes D, Paris J, Haghghata F, Feldman D. *Full scale thermal testing of latent heat storage in wallboard*. Solar Energy Mater Solar Cells 1996;44:49-61.
- [43] Hong Hiki, Kim Sun Kuk, Kim Yong-Shik. *Accuracy improvement of T-history method for measuring heat of fusion of various materials*. Int J Refrig 2004;27:360-6.
- [44] Peck Jong Hyeon, Kim Jae-Jun, Kang Chaedong, Hong Hiki. *A study of accurate latent heat measurement for a PCM with a low melting temperature using T-history method*. Int J Refrig 2006;29:1225-32.
- [45] Marin J, Zalba B, Cabeza L, Mehling H. *Determination of enthalpy temperature curves of phase change materials with the temperature history method: improvement to temperature dependent properties*. Measurement Science and Technology 2003;14:184-9.
- [46] F. Kuznik, J. Virgone, J. Noel, *Optimization of a phase change material wallboard for building use*. Applied Thermal Engineering 28 (11-12) -2008 1291-1298.
- [47] F. Kuznik, J. Virgone, J.-J. Roux, *Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: a full-scale experimental investigation*. Energy and Buildings 40 -2 -2008 148-156.
- [48] F. Kuznik, J. Virgone, *Experimental investigation of wallboard containing phase change material: data for validation of numerical modeling*. Energy and Buildings 41 -5 -2009 561-570.

- [49] A.S.T.M. Standard C177, *Standard Test Method for Steady-state Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-hot-plate Apparatus*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004
- [50] M. Jaworski, S. Abeid, *Thermal conductivity of gypsum with incorporated phase change material (PCM) for building applications*. Journal of Power Technologies 91 -2 -2011 49-53.
- [51] Darkwa K, Kim J-S. *Dynamics of energy storage in phase change drywall systems*. International Journal of Energy Research 2005;29(4):335-43.
- [52] Zhang Y, Zhou G, Lin K, Zhang Q, Di H. *Application of latent heat thermal energy storage in buildings: state-of-the-art and outlook*. Building and Environment 2007;42(6):2197-209.
- [53] Darkwa K, Kim JS. *Heat transfer in neuron composite laminated phase-change drywall*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A. Journal of Power and Energy 2004;218(A2): 83-8.
- [54] Khudhair AM, Farid MM. *A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials*. Energy Conversion and Management 2004;45(2): 263-75.
- [55] Athienitis AK, Liu C, Hawes D, Banu D, Feldman D. *Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage*. Building and Environment 1997;32(5):405-10.
- [56] Banu D, Feldman D, Hawes D. *Evaluation of thermal storage as latent heat in phase change material wallboard by differential scanning calorimetry and large scale thermal testing*. Thermochemica Acta 1998;317(1):39-45.
- [57] Feldman D, Banu D, Hawes DW. *Development and application of organic phase change mixtures in thermal storage gypsum wallboard*. Solar Energy Materials and Solar Cells 1995;36(2):147-57.
- [58] Koschenz M, Lehmann B. *Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings*. Energy and Buildings 2004;36(6):567-78.
- [59] Sari A, Karaipekli A, Kaygusuz K. *Capric acid and stearic acid mixture impregnated with gypsum wallboard for low-temperature latent heat thermal energy storage*. International Journal of Energy Research 2008;32(2):154-60.

- [60] Shilei L, Guohui F, Neng Z, Li D. *Experimental study and evaluation of latent heat storage in phase change materials wallboards*. Energy and Buildings 2007;39(10):1088-91.
- [61] Feldman D, Banu D, Hawes D, Ghanbari E. *Obtaining an energy storing building material by direct incorporation of an organic phase change material in gypsum wallboard*. Solar Energy Materials 1991;22(2-3):231-42.
- [62] Lee T, Hawes DW, Banu D, Feldman D. *Control aspects of latent heat storage and recovery in concrete*. Solar Energy Materials and Solar Cells 2000;62(3): 217-237.
- [63] Hadjieva M, Stoykov R, Filipova T. *Composite salt-hydrate concrete system for building energy storage*. Renewable Energy 2000;19(1-2):111-5.
- [64] Karaipekli A, Sari A. *Capric-myristic acid/expanded perlite composite as form-stable phase change material for latent heat thermal energy storage*. Renewable Energy 2008;33(12):2599-605.
- [65] Li J, Xue P, He H, Ding W, Han J. *Preparation and application effects of a novel form-stable phase change material as the thermal storage layer of an electric floor heating system*. Energy
- [66] Li H, Liu X, Fang G. *Preparation and characteristics of nonadecane/cement composites as thermal energy storage materials in buildings*. Energy and Buildings; In Press.
- [67] Lin K, Zhang Y, Xu X, Di H, Yang R, Qin P. *Experimental study of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates*. Energy and Buildings 2005;37(3):215-20.
- [68] Xu X, Zhang Y, Lin K, Di H, Yang R. *Modeling and simulation on the thermal performance of shape-stabilized phase change material floor used in passive solar buildings*. Energy and Buildings 2005;37(10):1084-91.
- [69] Zhang Y, Lin K, Yang R, Di H, Jiang Y. *Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings*. Energy and Buildings 2006;38(10):1262-9.
- [70] Kaasinen H. *Absorption of phase change substances into commonly used building materials*. Solar Energy Materials and Solar Cells 1992;27(2):173-9.
- [71] Banu D, Feldman D, Haghghat F, Paris J, Hawes D. *Energy storing wallboard: flammability tests*. Journal of Materials in Civil Engineering 1998;10(2):98-105.

- [72] Hawes DW, Feldman D. *Absorption of phase change materials in concrete*. Solar Energy Materials and Solar Cells 1992;27(2):91-101.
- [73] Schossig P, Henning HM, Gschwander S, Haussmann T. *Micro-encapsulated phase change materials integrated into construction materials*. Solar Energy Materials and Solar Cells 2005;89(23):297-306.
- [74] A.F. Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini, *Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: a review*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12 -2008 2438-2458.
- [75] Hawlader MN, Uddin MS, Zhu HJ. *Encapsulated phase change materials for thermal energy storage: experiments and simulation*. Int J Energy Res 2002;26:159-71.
- [76] Hawlder M, Uddin M, Khin MM. *Microencapsulated PCM thermal energy storage system*. Applied Energy 2003;74:195-202.
- [77] Arkar C, Medved S. *Influence of accuracy of thermal property data of phase change material on the result of a numerical model of packed bed latent heat storage with spheres*. Thermochemica Acta 2005;438:192-201.
- [78] Cho K, Choi S. *Thermal characteristics of paraffin in a spherical capsule during freezing and melting process*. International Journal of Heat and Mass Transfer 2000;43:3183-96.
- [79] Fang X, Zhang Z, Chen Z. *Study on preparation of montmorillonite based composite phase change materials and their applications in thermal storage building materials*. Energy Conversion and Management 2008;49(4):718-23.
- [80] Inaba H, Tu P. *Evaluation of thermophysical characteristics on shape stabilized paraffin as a solid-liquid phase change material*. Heat Mass Transfer 1997;32(4):307-12.
- [81] Xiao M, Feng B, Gong K. *Preparation and performance of shape stabilizes phase change thermal storage materials with high thermal conductivity*. Energy Convers Manage 2002;43:103-8.
- [82] Sari A. *Form stable paraffin/high density polyethylene composites as a solid-liquid phase change material for thermal energy storage: preparation and thermal properties*. Energy Convers Manage 2004;45:2033-42.
- [83] G. Zhou, Y. Yang, H. Xu, *Performance of shape-stabilized phase change material wallboard with periodical outside heat flux waves*. Applied Energy 88 -2011 2113-2121.

- [84] G. Zhou, Y. Yang, X. Wang, J. Cheng, *Thermal characteristics of shape stabilized phase change material wallboard with periodical outside temperature waves*. Applied Energy 87 -2010 2666-2672.
- [85] G. Zhou, Y. Zhang, X. Wang, K. Lin, W. Xiao, *An assessment of mixed type PCM gypsum and shape stabilized PCM plates in a building for passive solar heating*. Solar Energy 81 -2007
- [86] G. Zhou, Y. Zhang, K. Lin, W. Xiao, *Thermal analysis of a direct gain room with shape-stabilized PCM plates*. Renewable Energy 33 -6 -2008 1228-1236.
- [87] G. Zhou, Y. Yang, X. Wang, S. Zhou, *Numerical analysis of effect of shape-stabilized phase change material plates in a building combined with night ventilation*. Applied Energy 86 -2009 52-59.
- [88] W. Xiao, X. Wang, Y. Zhang, *Analytical optimization of interior PCM for energy storage in a lightweight passive solar room*. Applied Energy 86 -10 -2009 2013-2018.
- [89] Ahmad M, Bontemps A, Salle H, Quenard D. *Experimental investigation and computer simulation of thermal behaviour of wallboards containing a phase change material*. Energy and Buildings 2006;38(4):357-66.
- [90] Ahmad M, Bontemps A, Salle H, Quenard D. *Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material*. Energy and Buildings 2006;38(6):673-81.
- [91] Carbonari A, Grassi MD, Perna CD, Principi P. *Numerical and experimental analyses of PCM containing sandwich panels for prefabricated walls*. Energy and Buildings 2006;38(5):472-83.
- [92] Konuklu Y, Paksoy HO. *Phase change material sandwich panels for managing solar gain in buildings*. Journal of Solar Energy Engineering 2009;131(4): 41012
- [93] Medina MA, King JB, Zhang M. *On the heat transfer rate reduction of structural insulated panels (SIPs) outfitted with phase change materials (PCMs)*. Energy 2008;33(4):667-78.
- [94] Voelker C, Kornadt O, Ostry M. *Temperature reduction due to the application of phase change materials*. Energy and Buildings 2008;40(5):937-44.
- [95] Zhang M, Medina MA, King JB. *Development of a thermally enhanced frame wall with phase change materials for on-peak air conditioning demand reduction and energy savings in residential buildings*. International Journal of Energy

- [96] Guceri S, Faunce S. *Modeling of a thermal wall panel using phase change materials*. Energy 1979;4(4):695-9.
- [97] Pasupathy A, Athanasius L, Velraj R, Seeniraj R. *Experimental investigation and numerical simulation analysis on the thermal performance of a building roof incorporating phase change material (PCM) for thermal management*. Applied Thermal Engineering
- [98] D. Heim, J.A. Clarke, *Numerical modelling and thermal simulation of PCM gypsum composites with ESP-r*. Energy and Buildings 36 -8 -2004 795-805.
- [99] D. Heim, *Isothermal storage of solar energy in building construction*. Renewable Energy 35 -4 -2012 788-796.
- [100] Y. Zhang, K. Lin, Y. Jiang, G. Zhou, *Thermal storage and nonlinear heat transfer characteristics of PCM wallboard*. Energy and Buildings 40 -9 -2008 1771-1779.
- [101] T.K. Stovall, J.J. Tomlinson, *What are the potential benefits of including latent storage in common wallboard*. Journal of Solar Energy Engineering Transactions of the ASME 117 -4 -1995 318-325.
- [102] B.M. Diaconu, M. Cruceru, *Novel concept of composite phase change material wall system for year-round thermal energy savings*. Energy and Buildings 42 -10 -2010 1759-1772.
- [103] D.A. Neeper, *Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage*. Solar Energy 68 -5 -2000 393-403.
- [104] F. Kuznik, J. Virgone, K. Johannes, *In-situ study of thermal comfort enhancement in a renovated building equipped with phase change material wallboard*. Renewable Energy 36 -5 -2011 1458-1462.
- [105] L. Shilei, Z. Neng, F. Guohui, *Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter*. Energy and Buildings 38 -1 -2006 18-24.
- [106] H. Liu, H.B. Awbi, *Performance of phase change material boards under natural convection*. Building and Environment 44 -9 -2009 1788-1793.
- [107] J. Koo, H. So, S.W. Hong, H. Hong, *Effects of wallboard design parameters on the thermal storage in buildings*. Energy and Buildings 43 -8 -2011 1947-1951.
- [108] C. Chen, H. Guo, Y. Liu, H. Yue, C. Wang, *A new kind of phase change material (PCM) for energy-storing wallboard*. Energy and Buildings 40 -5 -2008 882-890.

- [109] A.M. Borreguero, M.L. Sánchez, J.L. Valverde, M. Carmona, J.F. Rodríguez, *Thermal testing and numerical simulation of gypsum wallboards incorporated with different PCMs content*. Applied Energy 88 -3 -2011 930-937.
- [110] A. Oliver, *Thermal characterization of gypsum boards with PCM included: thermal energy storage in buildings through latent heat*. Energy and Buildings 48 -2012 1-7.
- [111] L.F. Cabeza, C. Castellón, M. Nogués, M. Medrano, R. Leppers, O. Zubillaga, *Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings*. Energy and Buildings 39 -2 -2007 113-119.
- [112] L.F. Cabeza, M. Medrano, C. Castellón, A. Castell, C. Solé, J. Roca, M. Nogués, *Thermal energy storage with phase change materials in building envelopes*. Contributions to Science 3 -4 -2007 501-510.
- [113] S. Chandra, R. Kumar, S. Kaushik, S. Kaul, *Thermal performance of a non air conditioned building with PCCM thermal storage wall*. Energy Conversion and Management 25 -1 -1985 15-20.
- [114] E.M. Alawadhi, H.J. Alqallaf, *Building roof with conical holes containing PCM to reduce the cooling load: numerical study*. Energy Conversion and Management 52 (8-9) -2011 2958-2964.
- [115] A.V. Sá, M. Azenha, H. de Sousa, A. Samagaio, *Thermal enhancement of plastering mortars with phase change materials: experimental and numerical approach*. Energy and Buildings 49 -2012 16-27.
- [116] Collier RK, Grimmer DP. *The experimental evaluation of phase change material building walls using small passive test boxes*. In: Proceedings of the third national passive solar conference, San Joseph, CA, January, 1979
- [117] T.Silva, R.Vicente, N.Soares, V. Ferreira, *Experimental testing and numerical modelling of masonry wall solution with PCm incorporation: a passive construction solution*. Energy and Buildings 2012.
- [118] V.R. Voller, M. Cross, N.C. Markatos, *An enthalpy method for convection/diffusion phase change*. International Journal for Numerical Methods in Engineering 24 -1 -1987 271-284.
- [119] R.C. Chen, A. Sharma, *Numerical investigation of melt fraction of PCMs in a latent heat storage system*. Journal of Engineering and Applied Sciences 1 -4 -2006 437-444.

- [120] Bourdeau LE. *Study of two passive solar systems containing phase change materials for thermal storage*. In: Hayes J, Snyder R, editors. Proceedings of the fifth national passive solar conference, 19-26 October, Amherst. Newark,
- [121] H. Weinlaeder, W. Koerner, M. Heidenfelder, *Monitoring results of an interior sun protection system with integrated latent heat storage*. Energy and Buildings 43 -9 -2011 2468-2475.
- [122] Clapeyron BPE, Lamé -MM. *Memoire sur la solidification par refroidissement d'un globe liquide*. Ann Chim Phys 1831;47:250-6.
- [123] Brillouin M. *Sur quelques problemes non resolus de la Physique Mathematique classique. Propagation de la fusion*. Ann l-inst Henri Poincare -1930;1(3):285-308.
- [124] Stefan J. *Uebereinige probleme der theorie der warmeleitung*. Sber Akad Wiss Wien 1889;98:473-84.
- [125] Evans GW. *A note on the existence of a solution to a problem of Stefan*. Q Appl Math 1951;9:185-93.
- [126] Douglas J. *A uniqueness theorem for the solution of a Stefan problem*. Proc Am Math Soc 1957;8:402-8.
- [127] Y. Dutil, D.R. Rousse, N.B. Salah, S. Lassue, L. Zalewski *A review on phase-change materials: mathematical modeling and simulations*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 -1 -2011 112-130.
- [128] A.Sharma, V.V.Tyagi, C.R.Chen, D.Buddhi.*Review on termal energy storage with phase change materials and applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 -2 -2009 318-345.
- [129] Radhakrishnan KB, Balakrishnan AR. *Heat transfer analysis of thermal energy storage using phase change materials*. Heat Recovery Syst CHP 1992;12(5):427-35.
- [130] Crank J.*Free and moving boundary problems*. Oxford: Clarendon Press; 1984
- [131] Hill JM *One-dimensional Stefan problems: an introduction*. Harlow: Longman Scientific Technical; 1987
- [132] Carslaw HS, Jaeger JC. *Conduction of heat in solids*. Oxford: Clarendon Press; 1959
- [133] Lunardini VJ. *Heat transfer in cold climates*. New York: Van Nostrand Rein- hold; 1981

- [134] Sergio R, Idelsohn Mario A, Storti Luis A. Crivelli. *Numerical methods in phase-change problems*. Archives of Computational Methods in Engineering State of the art reviews. Vol. 1, 49-74, -1994
- [135] V.R. Voller, C.R. Swaminathan, B.G. Thomas *Fixed grid techniques for phase change problems: a review*. International Journal for Numerical Methods in Engineering 30 -4 -1990 875-898.
- [136] V.R. Voller. *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.
- [137] N. Soares, A. Samagaio, R. Vicente, J. Costa. *Numerical simulation of a PCM shutter for buildings space heating during the winter*. Proceedings of WREC - World Renewable Energy Congress 2011, Linköping, Sweden, 8-13
- [138] 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
- [139] M. Costa, D. Buddhi, A. Oliva. *Numerical simulation of a latent heat thermal energy storage system with enhanced heat conduction*. Energy Conversion and Management 39 -3 -1998 319-330.
- [140] B.Zalba, J.M.Marín, L.F.Cabeza, H.Mehling. *Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications*. Applied Thermal Engineering 23 -3 -2003 51-83.
- [141] Furzeland RMA. *Comparative study of numerical methods for moving boundary problems*. IMA Journal of Applied Mathematics 1980;26:411-29.
- [142] Shamsundar N, Sparrow EM. *Analysis of multidimensional conduction phase change via the enthalpy model*. Journal of Heat Transfer 1975;97: 333-40.
- [143] McAdie RL, Cross JT, Lewis RW, Gethin DT. *A finite element enthalpy technique for solving coupled nonlinear heat conduction/mass diffusion problems with phase change*. International Journal of Numerical Methods for Heat Fluid Flow
- [144] Kelley CT. *Solving nonlinear equations with Newton-s method*. Society for Industrial and Applied Mathematics 2003
- [145] Idelsohn S, Storti M, Crivelli L. *Numerical methods in phase-change problems*. Archives of Computational Methods in Engineering 1994;1: 49-74.

- [146] Hu H, Argyropoulos SA. *Mathematical modelling of solidification and melting: a review*. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering 1996;4:371-96.
- [147] Poirier D, Salcudean M. *On numerical methods used in mathematical modeling of phase change in liquid metals*. Journal of Heat Transfer 1988;110: 562-70.
- [148] Hashemi HT, Sliepcevich CM. *A numerical method for solving two- dimensional problems of heat conduction with change of phase*. Chemical Engineering ProgSymposiumseries 1967;63:34-41.
- [149] Cao Y, Faghri AA. *Numerical analysis of phase-change problems including natural convection*. Journal of Heat Transfer 1990;112:812-6.
- [150] Zeng X, Faghri A. *Temperature-transforming model for binary solid-liquid phase-change problems. Part I: Mathematical modeling and numerical methodology*. Numerical Heat Transfer Part B: Fundamentals 1994;25: 467-80.
- [151] Nasser Saleh AL-Saadi, Zhiqiang Zhai. *Modeling phase change materials embedded in building enclosure: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 21(2013)659-673.
- [152] 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;25:481-500.
- [153] 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.
- [154] Zhanhua 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.
- [155] Faghri A, Zhang Y. *Transport phenomena in multiphase systems*. Elsevier Academic Press; 2006
- [156] Swaminathan CR, Voller VR. *Towards a general numerical scheme for solidification systems*. International Journal of Heat and Mass Transfer 1997;40:2859-68.
- [157] Alawadhi EM. *Thermal analysis of a building brick containing phase changematerial*. Energy and Buildings 2008;40(3):351-7.

- [158] Weinlder H, Beck A, Fricke J. *PCM-facade-panel for daylighting and room heating*. Solar Energy 2005;78(2):177-86 [iSES Solar World Congress 2003].
- [159] Darkwa K. *Quasi-isotropic laminated phase-change material system*. Applied Energy 2007;84(6):599-607.
- [160] Kim J-S, Darkwa K. *Simulation of an integrated PCM-wallboard system*. International Journal of Energy Research 2003;27(3):215-23.
- [161] Mathieu-Potvin F, Gosselin L. *Thermal shielding of multilayer walls with phase change materials under different transient boundary conditions*. International Journal of Thermal Sciences 2009
- [162] Kaushik S, Sodha M, Bhardwaj S, Kaushik N. *Periodic heat transfer and load leveling of heat flux through a PCCM thermal storage wall/roof in an air-conditioned building*. Building and Environment 1981;16(2):99-107.
- [163] Darkwa K, O-Callaghan P. *Simulation of phase change drywalls in a passive solar building*. Applied Thermal Engineering 2006;26(8-9):853-8.
- [164] Ibanez M, Lazaro A, Zalba B, Cabeza LF. *An approach to the simulation of PCMs in building applications using TRNSYS*. Applied Thermal Engineering 2005;25(11-12):1796-807.
- [165] Kuznik F, Virgone J, Johannes K. *Development and validation of a new TRNSYS type for the simulation of external building walls containing PCM*. Energy and Buildings 2010;42(7):1004-9.
- [166] Zhou G, Zhang Y, Wang X, Lin K, Xiao W. *An assessment of mixed type PCM-gypsum and shape-stabilized PCM plates in a building for passive solar heating*. Solar Energy 2007;81(11):1351-60.
- [167] C.-ming Lai, C.-ming Chiang, *How phase change materials affect thermal performance: hollow bricks*. Building Research and Information 34 (2) (2006)
- [168] P.Verma, S.K. Varun, Singal, *Review of mathematical modeling on latent heat thermal energy storage systems using phase change material*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2008.
- [169] A. Sharma, S.D. Sharma, D. Buddhi, L.D. Won, *Effect of thermo physical properties of heat exchanger on the performance of latent heat storage system using enthalpy method*. International Journal of Energy Research 2006

- [170] C.R. Chen, A. Sharma, S.K. Tyagi, D. Buddhi. *Numerical heat transfer studies of PCMs used in a box-type solar cooker*. Renewable Energy 33 (5) (2008) 1121-1129.
- [171] P. Brousseau, M. Lacroix. *Numerical simulation of a multi-layer latent heat thermal energy storage system*. International Journal of Energy Research 22 (1) (1998) 1-15.
- [172] C.R. Swaminathan, V.R. Voller. *On the enthalpy method*. International Journal of Numerical Methods for Heat Fluid Flow 3 (3) (1993) 233-244.
- [173] Alexiades V, Solomon AD. *Mathematical modeling of melting and freezing processes*. Hemisphere Pub. Corp.; 1993.
- [174] Kelley CT. *Iterative methods for linear and nonlinear equations*. Society for Industrial and Applied Mathematics; 1995.
- [175] Williams MA, Wilson DG. *Iterative solution of a nonlinear system arising in phase-change problems*. SIAM Journal on Scientific Computing 1990;11: 1087-101.
- [176] Knoll DA, Keyes DE *Jacobian-free Newton-Krylov methods: a survey of approaches and applications*. Journal of Computational Physics 2004;193: 357-97.
- [177] Darkwa K, Kim JS. *Thermal analysis of composite phase change drywall systems*. Journal of Solar Energy Engineering 2005;127(3):352-6.
- [178] Halford C, Boehm R. *Modeling of phase change material peak load shifting*. Energy and Buildings 2007;39(3):298-305.
- [179] Darkwa K. *Evaluation of regenerative phase change drywalls: low energy buildings application*. International Journal of Energy Research 1999;23(14):1205-12.
- [180] Mozhevelov S, Ziskind G, Letan R. *Temperature moderation in a real-size room by PCM-based units*. Journal of Solar Energy Engineering 2006;128(2): 178-88.
- [181] D.B. Crawley, L.K. Lawrie, *EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program*. Energy and Buildings 33 (4) (2001) 319-331.
- [182] Barbour JP, Hittle DC. *Modeling phase change materials with conduction transfer functions for passive solar applications*. Journal of Solar Energy Engineering 2006;128:58-68.
- [183] U.S.A Department of Energy New Features in Version 2.0.0 http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_archives.cfm#v2.

- [184] Pedersen CO. *Advance zone simulation in ENERGYPLUS: incorporation of variable properties and phase change material (PCM) capability building simulation*. 2007,. China; 2007.
- [185] 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.
- [186] U.S.A Department of Energy-EnergyPlus engineering reference <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/engineeringreference.pdf>.
- [187] Damien David, Kuznik Frederic *Numerical study of the influence of the convective heat transfer on the dynamical behaviour of a phase change material wall*. Applied Thermal Engineering 31 (2011) 3117-3124.
- [188] Fang Y, Medina MA. *Proposed modifications for models of heat transfer problems involving partially melted phase change processes*. Journal of ASTM International 2009:6.
- [189] Virgone J, Noel J. *Numerical study of the influence of the thickness and melting point on the effectiveness of phase change materials: application ti the renovation of a low inertia school Building Simulation 2009*. In: 11th international IBPSA conference. Glasgow, Scotland, 2009.
- [190] Egolf PW, Manz H. *Theory and modeling of phase change materials with and without mushy regions*. International Journal of Heat and Mass Transfer 1994;37:2917-24.
- [191] Feustel HE. *Simplified numerical description of latent storage characteristics for phase change wallboard*. Lawrence Berkeley Laboratory Report, University of California Berkley; 1995.
- [192] Fachinotti VD, Cardona A. *A fast convergent and accurate temperature model for phase change heat conduction*. International Journal for Numerical Methods in Engineering 1999;44:1863-84.
- [193] Comini G, Del Giudice S. *Finite element solution of nonlinear heat conduction problems with special reference to phase change*. International Journal for Numerical Methods in Engineering 1974;8:613-24.
- [194] Fachinotti VD, Cardona A. *A fast convergent and accurate temperature model for phase change heat conduction*. International Journal for Numerical Methods in Engineering 1999;44:1863-84.