



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

Simulación Dinámica de Materiales de Cambio de Fase para Control
de la Temperatura de Paneles Fotovoltaicos

presentada por
Ing. Ana Lilia Sánchez Brito

como requisito para la obtención del grado de
Maestra en Ciencias en Ingeniería Mecánica

Director de tesis
Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor

Cuernavaca, Morelos, México. Enero 2021.



“2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria”

Cuernavaca, Mor., **30/noviembre/2020**

OFICIO No. DIM/185/2020

Asunto: Aceptación de documento de tesis
CENIDET-AC-004-M14-OFCIO

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de la Ing. Ana Lilia Sánchez Brito con número de control M19CE008, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado **“Simulación dinámica de materiales de cambio de fase para control de la temperatura de paneles fotovoltaicos”** y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor
Director de tesis

Dra. Yvonne Chávez Chena
Revisor 1

Dr. Jesús Arce Landa
Revisor 2

Dr. Efraín Simá Moo
Revisor 3

C.c.p. Depto. Servicios Escolares.
Expediente / Estudiante

Iniciales ABO/mrsr





"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Cuernavaca, Morelos **02/diciembre/2020**

OFICIO No. SAC/ 278/2020

Asunto: Autorización de impresión de tesis

ANA LILIA SÁNCHEZ BRITO
CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA
PRESENTE

Por este conducto tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "*Simulación dinámica de materiales de cambio de fase para control de la temperatura de paneles fotovoltaicos*", ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

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

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"Conocimiento y tecnología al servicio de México"

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



**CENTRO NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO
SUBDIRECCIÓN
ACADÉMICA**

C.c.p. M.E. Guadalupe Garrido Rivera. Jefa del Departamento de Servicios Escolares
Expediente
CMAZ/CHG

*A mis padres,
por su apoyo incondicional.*

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico y seguro médico otorgado durante mis estudios de posgrado.

Al Tecnológico Nacional de México - Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por permitirme realizar mis estudios de maestría.

Al departamento de Ingeniería Mecánica, personal docente, administrativo y de servicios, por el apoyo brindado durante este tiempo.

A mis padres, Lilia Brito Maldonado y Miguel Sánchez Monroy, por brindarme su apoyo para realizar cualquier meta que me proponga.

A mis hermanos, Miguel y Mayra por estar siempre presentes.

A mi asesor y guía el Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor, por el apoyo y paciencia en la realización y revisión de este trabajo, agradezco la oportunidad y confianza brindada.

A mis revisores: Dra. Yvonne Chávez, Dr. Efraín Simmá y el Dr. Jesús Arce, por su tiempo y buenos comentarios, sus aportaciones lo hicieron posible.

A los profesores con los que tuve la oportunidad de convivir y aprender durante mi estadía en CENIDET por brindarme las herramientas necesarias para desarrollarme como persona y profesionista.

A mis amigos, compañeros y guías Javier Uriarte y Carlos Torres por su infinita paciencia para ayudarme a resolver dudas presentes durante la realización de este proyecto.

A mis compañeros de laboratorio: Yessi, Samanta, Daniel, Javier, Carlos, Edgar, Rogelio, Miguel y Pedro, por tantos buenos momentos de amistad y convivencia.

A mis amigos y compañeros de aventura, Ariel, Jessica, Samantha y mis compañeros del área diseño mecánico, por tantos momentos inolvidables y de amistad sincera.

A la Dra. Minerva Vargas por su amistad, por compartir su conocimiento conmigo y por ponerme en el camino correcto.

Resumen

El aprovechamiento del recurso solar en México como una alternativa de energía limpia ha ido en aumento. Un claro ejemplo de ello es el uso de sistemas fotovoltaicos debido a su popularidad y fácil adquisición, sin embargo, en estudios reportados se ha demostrado que el aumento de la temperatura del panel fotovoltaico, al estar expuesto a la radiación solar directa por periodos prolongados de tiempo, tiene un efecto negativo en su eficiencia. Es por ello que se presenta el estudio del efecto térmico al adicionar un Material de Cambio de Fase o PCM (*"Phase Change Material"*). Estos son materiales con un alto calor latente, que al alcanzar la temperatura de cambio de fase son capaces de almacenar o liberar grandes cantidades de energía.

Para la modelación del sistema PV-PCM (Panel fotovoltaico acoplado a un material de cambio de fase) se consideró un modelo unidimensional, el cual fue planteado empleando el método de Balances Globales de Energía. El modelo matemático resultante emplea el Método de Capacidad de Calor Efectivo. El espesor total del material se seccionó en siete partes para obtener un resultado con menor margen de error.

Se realizó la comparación del perfil de temperaturas obtenido de un sistema PV-PCM con un sistema sin PCM. El estudio se realizó bajo condiciones climáticas de la ciudad de Villahermosa, Tabasco, durante las 24 horas de los días con mayor y menor temperatura de cada mes para un año. Se evaluaron tres diferentes PCM (RT25HC, RT28HC y RT35HC) para seleccionar el más óptimo para la ciudad evaluada.

Los resultados muestran que el PCM que permitió un comportamiento térmico deseado fue el RT28HC, es decir, al emplear el material de cambio de fase en el sistema fotovoltaico se logra disminuir la temperatura, obteniendo

una disminución de temperatura máxima y mínima de 11.46 y 1.03°C respectivamente, teniendo un efecto positivo en su eficiencia.

Con base en los resultados obtenidos se demostró que el uso de PCM en los sistemas fotovoltaicos bajo las condiciones evaluadas es una alternativa para aumentar su eficiencia. Sin embargo, es necesario realizar más estudios para determinar en mayor medida los beneficios de implementar este tipo de materiales en la generación de energía y en el análisis energético en edificaciones.

Abstract

The use of solar resources in Mexico as a clean energy alternative has been increasing. The use of photovoltaic systems is a clear example of this. However, in reported studies, it has been shown a negative effect on their efficiency are produced for being exposed to direct solar radiation during prolonged periods.

A Phase Change Material has been used to improve the behavior of the temperature in photovoltaic systems. The main characteristic of the PCM is their high latent heat, which upon reaching the phase change temperature are capable of storing or releasing large amounts of energy.

A one-dimensional model was considered for the modeling of the PV-PCM system (photovoltaic panel coupled to a phase change material). The model was solved using the Global Energy Balances method. For the part that involves PCM uses the Effective Heat Capacity Method. The layer of PCM was sectioned in seven parts.

The temperature profile obtained from a PV-PCM system was compared with a system without PCM. The study was carried out under the climatic conditions of Villahermosa, Tabasco, during the 24 hours of the days with the highest and lowest temperatures of each month during a year.

Three different PCM were evaluated (RT25HC, RT28HC and RT35HC) to select the most optimal for the evaluated city.

The results show that RT28HC PCM allowed desired thermal behavior in the photovoltaic system. The value of the maxim and minim decrease in temperature was 11.46 and 1.03°C, respectively. For that reason, efficiency

presented a positive effect.

The results showed that an alternative to increasing the efficiency of photovoltaic systems is using a layer of PCM. However, more studies are needed to determine the benefits of implementing this type of material in power generation and energy analysis in buildings.

Contenido

Nomenclatura	1
1. Introducción	3
1.1. Demanda energética	3
1.2. Energías renovables	5
1.3. Paneles fotovoltaicos	6
1.4. Situación en México	7
1.5. Estado del arte	8
1.5.1. Estudios numéricos resueltos empleando el método de balances de energía	9
1.5.2. Estudios numéricos resueltos empleando CFD	14
1.5.3. Estudios experimentales de sistemas PV-PCM	23
1.5.4. Estudios experimentales de sistemas PV/PCM/T	29
1.5.5. Estudios teóricos	32
1.6. Conclusión de la revisión bibliográfica	35
1.7. Objetivos	35
1.7.1. Objetivo general	35
1.7.2. Objetivos específicos	36
1.8. Alcances	36
1.9. Productos esperados	36
2. Conceptos de materiales de cambio de fase	37
2.1. Principio de cambio de fase	37
2.2. Zona de interface	39
2.3. Materiales de cambio de fase sólido-líquido	40
2.4. Tipos de materiales	41
2.5. Principales problemas en PCM	43
2.6. PCM comerciales	45

2.7. Métodos matemáticos	46
3. Modelo Físico y Matemático	51
3.1. Modelo físico	53
3.2. Consideraciones del modelo matemático	54
3.3. Desarrollo del modelo matemático	55
3.3.1. Discretización del término transitorio	55
3.3.2. Balance de energía de los elementos que integran el sistema	56
3.4. Sistema de ecuaciones resultante	69
3.4.1. Sistema PV-PCM	69
3.4.2. Sistema PV	72
3.5. Diagrama de flujo computacional	74
3.6. Radiación total absorbida	75
3.7. Producción de energía eléctrica	76
4. Metodología de solución numérica	77
4.1. Método de Balances Globales de Energía	77
4.1.1. Diagrama eléctrico del sistema PV-PCM analizado	79
4.2. Verificación de problemas de transferencia de calor por conducción con solución analítica	80
4.2.1. Caso 1. Barra con un material homogéneo y condiciones de frontera de primera clase en estado permanente	80
4.2.2. Caso 2. Barra con un material homogéneo y condiciones de frontera de tercera clase en estado permanente	81
4.2.3. Caso 3. Barra con dos materiales homogéneos y condiciones de frontera de primera clase en estado permanente	83
4.2.4. Caso 4. Barra con dos materiales homogéneos y condiciones de frontera de tercera clase en estado permanente	85
4.3. Verificación de un problema bidimensional de conducción de calor en estado transitorio con multi material	87
4.4. Verificación de la solución al problema de cambio de fase de Stefan	89
4.5. Análisis de independencia temporal del Estudio 1: Panel fotovoltaico	93

4.6. Análisis de independencia temporal del Estudio 2: Panel fotovoltaico compuesto con PCM	94
4.7. Selección del PCM óptimo	95
5. Resultados de la modelación del sistema PV-PCM	99
5.1. Componentes del sistema	100
5.1.1. Vidrio	100
5.1.2. Etileno Acetato de Vinilo	101
5.1.3. Celda fotovoltaica	101
5.1.4. Placa absorbedora	102
5.1.5. Aislamiento	102
5.1.6. Material de cambio de fase	103
5.2. Resultados de temperatura	103
5.3. Resultados de producción eléctrica	108
5.4. Análisis económico	112
5.4.1. Inversión inicial	112
5.4.2. Costo de operación y mantenimiento	113
5.4.3. Costo de energía	115
5.4.4. Costo de valor residual	117
6. Conclusiones y recomendaciones	119
6.1. Conclusiones	119
6.2. Recomendaciones para futuros trabajos	121
A. Paneles fotovoltaicos	133
A.1. Fenomenología del proceso de conversión de energía	134
A.2. Aplicaciones de la generación solar fotovoltaica	136
B. Antecedentes y conceptos fundamentales de PCM	139
B.1. Antecedentes de materiales de cambio de fase	139
B.2. Proceso termodinámico presente en el proceso de almacenamiento de energía térmica	140
B.3. Proceso de cambio entre fases	143
B.4. Calor de reacción química	144

B.5. Aplicaciones de almacenamiento de calor latente (cambio de fase sólido-líquido)	144
--	-----

Índice de tablas

4.1. Comparación de los resultados analíticos y numéricos: Caso 1 . . .	81
4.2. Comparación de los resultados analíticos y numéricos: Caso 2 . . .	82
4.3. Comparación de los resultados analíticos y numéricos: Caso 3 . . .	84
4.4. Comparación de los resultados analíticos y numéricos: Caso 4 . . .	86
4.5. Propiedades del material en el problema de Stefan	90
4.6. Comparación de los resultados obtenidos del problema de Stefan	91
4.7. Propiedades de PCM evaluados	96
4.8. Resultados de selección del PCM	97
5.1. Propiedades del vidrio (Elemento 1) [Ma et al., 2018, Smith et al., 2014]	100
5.2. Propiedades de EVA (Elemento 2 y 4) [Ma et al., 2018, de Oliveira et al., 2018]	101
5.3. Propiedades de la celda fotovoltaica (Elemento 3) [Ma et al., 2018]	101
5.4. Propiedades de la placa absorbadora (Elemento 6 y 14) [Smith et al., 2014]	102
5.5. Propiedades de la capa de aislamiento (Elemento 15) [Preet et al., 2017]	102
5.6. Propiedades del PCM empleado (Elemento 7 a 13) [Rubitherm-Technologies, 2020]	103
5.7. Componentes del sistema PV-PCM	113
5.8. Inversión inicial	113
5.9. Costo de operación y mantenimiento	114
5.10. Costo por remplazo	115
B.1. Comparación de las densidades típicas de diferentes métodos de almacenamiento de energía	146

Índice de figuras

1.1. Metas para el desarrollo sustentable [United-Nations, 2015]. . . .	3
1.2. Toneladas de producción de CO_2 per cápita para el año 2000 a 2016 para México [ESMAP, 2019].	7
2.1. Representación ilustrativa a nivel molecular de los distintos estados de la materia.	38
2.2. Formas de interfaces comunes.	39
2.3. Clasificación de los PCM principales.	41
3.1. Distribución de climas en la República Mexicana.	52
3.2. Representación territorial de Villahermosa, Tabasco.	52
3.3. Modelo físico del sistema PV-PCM analizado.	53
3.4. Diagrama de flujo de los ciclos computacionales empleados para resolver el problema de un sistema PV-PCM.	74
4.1. Representación del circuito eléctrico correspondiente a un sistema térmico y eléctrico.	78
4.2. Diagrama eléctrico del sistema PV-PCM.	79
4.3. Modelo físico del Caso 1.	80
4.4. Modelo físico del Caso 2.	81
4.5. Modelo físico del Caso 3.	83
4.6. Modelo físico del Caso 4.	85
4.7. Modelo físico del Caso multi material.	87
4.8. Resultados del caso multi material.	88
4.9. Modelo físico del problema de cambio de fase.	89
4.10. Selección del PCM para el Estudio 2.	95
5.1. Resultados del comportamiento de las temperaturas para días cálidos.	105

5.2. Resultados del comportamiento de las temperaturas para días fríos.	106
5.3. Resultados del comportamiento de la eficiencia y potencia eléctrica para días cálidos	110
5.4. Resultados del comportamiento de la eficiencia y potencia eléctrica para días fríos	111
A.1. Arreglo de paneles fotovoltaicos.	133
A.2. Unión Silicio-Fósforo y Silicio-Boro.	135
A.3. Representación de material tipo N y tipo P.	136
A.4. Instalación conectada a la red eléctrica.	137
A.5. Instalación aislada.	138
B.1. Representación ilustrativa de calor sensible al agregar energía. . .	141
B.2. Representación ilustrativa de calor sensible al remover energía. .	141
B.3. Representación ilustrativa de calor latente a nivel molecular. . . .	142
B.4. Campo potencial de aplicación del PCM para control de temperatura.	145
B.5. Campo potencial de aplicación del PCM para almacenamiento de calor.	145

Nomenclatura

EPP_{cell}	Producción de energía eléctrica en la celda
G_{solar}	Radiación solar absorbida por la superficie
h_{conv}	Coefficiente de transferencia de calor convectivo
h_{rad}	Coefficiente de transferencia de calor radiativo
h^*_{rad}	Coefficiente de transferencia de calor radiativo equivalente
Hx	Espesor del elemento
Q	Flujo térmico
q_{entra}	Calor que entra al sistema
q_{sale}	Calor que sale del sistema
R_{cond}	Resistencia térmica conductiva
R_{conv}	Resistencia térmica convectiva
R_{rad}	Resistencia térmica radiativa
R^*_{rad}	Resistencia térmica radiativa equivalente
T_A	Temperatura del material 1
T_B	Temperatura del material 2
T_{env}	Temperatura del medio
T_{cell}	Temperatura de la celda fotovoltaica
T_{cov}	Temperatura de la cubierta
T_{EVA1}	Temperatura del asilante 1
T_{EVA2}	Temperatura del asilante 2
T_{glass}	Temperatura del vidrio
T_{insu}	Temperatura de la capa de aislante
T_{Pabs1}	Temperatura de la placa absorbadora 1
T_{Pabs2}	Temperatura de la placa absorbadora 2
T_{PCM1}	Temperatura de la primera capa de PCM
T_{PCM2}	Temperatura de la segunda capa de PCM
T_{PCM3}	Temperatura de la tercera capa de PCM
T_{PCM4}	Temperatura de la cuarta capa de PCM

T_{PCM5}	Temperatura de la quinta capa de PCM
T_{PCM6}	Temperatura de la sexta capa de PCM
T_{PCM7}	Temperatura de la septima capa de PCM
T_{sky}	Temperatura de la cúpula celeste
T_{cell}^{old}	Temperatura de la celda fotovoltaica en el tiempo anterior
T_{cov}^{old}	Temperatura de la cubierta en el tiempo anterior
T_{EVA1}^{old}	Temperatura del asilante 1 en el tiempo anterior
T_{EVA2}^{old}	Temperatura del asilante 2 en el tiempo anterior
T_{glass}^{old}	Temperatura del vidrio en el tiempo anterior
T_{insu}^{old}	Temperatura de la capa de aislante en el tiempo anterior
T_{Pabs1}^{old}	Temperatura de la placa absorbadora 1 en el tiempo anterior
T_{Pabs2}^{old}	Temperatura de la placa absorbadora 2 en el tiempo anterior
T_{PCM1}^{old}	Temperatura de la primera capa de PCM en el tiempo anterior
T_{PCM2}^{old}	Temperatura de la segunda capa de PCM en el tiempo anterior
T_{PCM3}^{old}	Temperatura de la tercera capa de PCM en el tiempo anterior
T_{PCM4}^{old}	Temperatura de la cuarta capa de PCM en el tiempo anterior
T_{PCM5}^{old}	Temperatura de la quinta capa de PCM en el tiempo anterior
T_{PCM6}^{old}	Temperatura de la sexta capa de PCM en el tiempo anterior
T_{PCM7}^{old}	Temperatura de la septima capa de PCM en el tiempo anterior
t	Tiempo
α_1^*	Absortividad en el elemento 1
α_2^*	Absortividad en el elemento 2
τ_1	Transmisividad en el elemento 1
ε	Emisividad
λ	Conductividad térmica
σ	Constante de Stefan-Boltzmann

1

CAPÍTULO

Introducción

1.1 Demanda energética

Debido al aumento en la población mundial, la demanda energética ha crecido de forma exponencial, ocasionando problemas graves de contaminación por la emisión de CO_2 a la atmósfera. Dichos gases contribuyen al efecto invernadero, el cambio climático, la lluvia ácida y la contaminación del aire. Además de la contaminación ambiental, la demanda energética ocasiona conflictos de interés político y social.



Figura 1.1. Metas para el desarrollo sustentable [United-Nations, 2015].

Con el fin de contribuir a un desarrollo sustentable, se incluyó en la agenda 2030 de las Naciones Unidas el punto número siete, específicamente dedicado a energía asequible y limpia (mostrado en la Figura 1.1). Mismo punto que

resulta de vital importancia al estar directamente relacionado para lograr algunos otros puntos del tratado [United-Nations, 2015].

Para lograr cumplir el acuerdo número siete “Garantizar el acceso a energía asequible, confiable, sostenible y moderna para todos” se plantearon cinco objetivos principales.

1. Para 2030, garantizar el acceso universal a servicios de energía asequibles, confiables y modernos.
2. Para 2030, aumentar sustancialmente la participación de las energías renovables en la combinación energética mundial.
3. Para 2030, duplicar la tasa global de mejora en eficiencia energética.
4. Para 2030, mejorar la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y la tecnología de energía limpia, incluidas las energías renovables, la eficiencia energética y la tecnología avanzada y más limpia de combustibles fósiles, y promover la inversión en infraestructura energética y tecnología de energía limpia.
5. Para 2030, ampliar la infraestructura y actualizar la tecnología para suministrar servicios de energía modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo, en particular los países menos adelantados, los pequeños estados insulares en desarrollo y los países en desarrollo sin litoral, de conformidad con sus respectivos programas de apoyo.

Al centrar la atención al objetivo número cuatro, se genera un gran interés por la obtención de nuevas fuentes de energía, que tengan la característica de reponerse a un ritmo igual que al que se consumen. Estas energías se conocen como energías renovables [Velasco, 2009].

1.2 Energías renovables

Las energías renovables se diferencian de los combustibles fósiles por su abundancia y por tener potencial de aprovechamiento en cualquier lugar del planeta, además de ser amigables con el ambiente puesto que no generan emisión de gases a la atmósfera. Las energías renovables se han vuelto cada vez más importantes, puesto que representan un desarrollo del futuro sustentable. Entre ellas encontramos a la energía eólica, energía hidráulica, energía geotérmica, energía solar, entre otras [Velasco, 2009].

En particular de la energía solar, se tiene la luz solar, la cual nos proporciona más energía de la que podemos aprovechar, la clave está en captarla y hacer un uso eficiente de la misma, además de ser una energía gratuita y que no produce contaminación. Entre algunas aplicaciones de la energía solar se encuentra el calentamiento solar de agua, procesos de calor solar industrial, estanques solares, sistemas de energía solar térmica, enfriamiento solar, y calefacción en edificios. [Grossman, 2002, Karakilcik et al., 2006, Mercado et al., 2007, Murcia, 2008]

En particular en las edificaciones se reporta que aproximadamente el 50% de la energía que se consume, es en los procesos de calefacción y refrigeración, esto debido a la mala calidad de las envolventes. Una reducción a este consumo energético es mediante el uso de techos ventilados, chimeneas solares, ventanas de vidrio doble o tripe, colectores solares, entre otros, ésto con la finalidad de tener el confort térmico del recinto [González Julián et al., 2018, Hernández Pérez et al., 2018, Jiménez Xamán et al., 2019, Quiñonez and Hernández, 2013, Tzuc et al., 2019, Uriarte Flores et al., 2019, Xamán et al., 2015].

Otra aplicación de la energía solar es mediante sistemas fotovoltaicos o PV, los cuales captan la energía proveniente del Sol y la transforman para producir energía eléctrica [Gasquet, 1997]. Pero no toda la energía solar es aprovechada, solo el 16% de la energía total incidente es convertida en energía eléctrica y el resto se pierde o se transforma en calor, lo que genera un sobrecalentamiento

de los módulos, teniendo un impacto directo en la disminución de su eficiencia [Huang et al., 2000].

1.3 Paneles fotovoltaicos

En la actualidad en México y en el mundo se ha vuelto cada vez más común el uso de paneles fotovoltaicos como una alternativa de energía limpia.

El funcionamiento básico de un panel fotovoltaico es capturar la energía a través de la superficie y transformarla en energía eléctrica. Pero para asegurar la eficiencia del sistema, este debe mantenerse a una temperatura óptima de operación que ronda entre los 24 y los 26°C, [Huang et al, 2011]. Si la temperatura es excedida, la eficiencia puede no ser la esperada. Lo cual implica que la inversión económica que se realizó para su compra y colocación ya no sea tan atractiva.

Dado que el aumento de la temperatura del panel fotovoltaico tiene un efecto negativo en la eficiencia, los investigadores han propuesto varias alternativas de enfriamiento hasta el momento, como el uso de refrigeración y el uso de materiales de cambio de fase. El panel fotovoltaico con material de cambio de fase (PCM) resulta la mejor alternativa al regular la temperatura de funcionamiento del panel [Preet, 2018].

Dichos materiales de cambio de fase tienen la capacidad de almacenar cantidades significativas de energía en volúmenes muy pequeños. El interés de este tipo de materiales radica en que, durante el cambio de fase, la temperatura se mantiene constante mientras que el material va absorbiendo o liberando energía.

El sistema PV-PCM se basa en la colocación del PCM en la parte posterior del panel fotovoltaico, el cual, al absorber el exceso de calor del módulo, regula su temperatura, mejorando así la potencia de salida y por lo tanto la eficiencia del sistema [Arıcı et al., 2018].

1.4 Situación en México

México cuenta con una superficie de 195.6 millones de hectáreas y se estima que cerca del 70% de su territorio recibe una radiación horizontal global con valores de $4.5kWh \cdot m^2$ [ESMAP, 2019] posicionando a México como una región favorable para el aprovechamiento de la energía solar, presentando un auge específicamente en la utilización de energía generada por medio de paneles fotovoltaicos.

Uno de los beneficios de ésta energía se observa en el decremento de las toneladas de CO_2 per cápita después del año 2012, año en que se logró al introducir la contribución renovable en la red eléctrica nacional [ESMAP, 2019]. La Figura 1.2 muestra las toneladas de emisiones de CO_2 en México per cápita para el año 2000 a 2016.

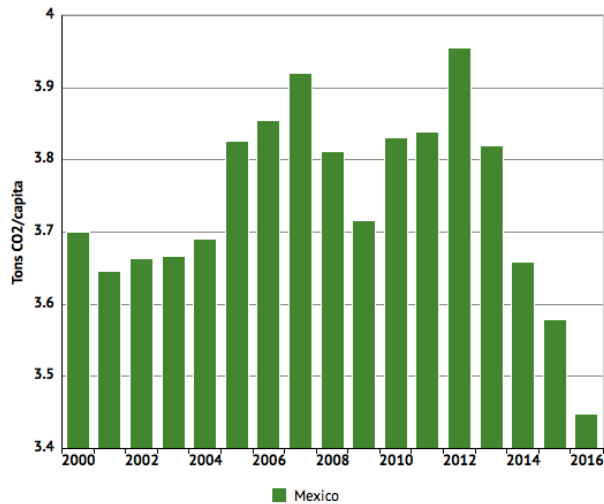


Figura 1.2. Toneladas de producción de CO_2 per cápita para el año 2000 a 2016 para México [ESMAP, 2019].

1.5 Estado del arte

Como se ha mencionado anteriormente, los paneles fotovoltaicos presentan una disminución en su eficiencia energética y térmica cuando sus temperaturas de operación son rebasadas. Por lo anterior diversos autores han propuesto diversas alternativas de enfriamiento hasta el momento, como el uso de refrigerantes y el uso de materiales de cambio de fase o PCM por sus siglas en inglés “Phase Change Material”.

A continuación se presenta el estado del arte referente a los paneles fotovoltaicos con material de cambio de fase o sistemas PV-PCM. Los artículos revisados fueron clasificados en estudios numéricos, experimentales y recopilaciones teóricas de información acerca del estudio de este tema. La primera clasificación de estudios numéricos presenta dos formas principales de abordar el problema; mediante el método de Balances Globales de Energía y mediante el uso de alguna técnica numérica de CFD (Computational Fluid Dynamics) las cuales emplean diversos métodos de solución como la técnica de Volumen Finito, Diferencias Finitas y Elemento Finito.

En la segunda clasificación se presentan los estudios experimentales, que a su vez se subdividen en estudios que involucran los sistemas PV-PCM y los estudios que adicionan algún sistema térmico de enfriamiento, como sistemas de tuberías con fluido circundante o placas de algún material para mejorar la transferencia de calor hacia el aire.

En la tercera clasificación se muestran los estudios que involucran un análisis teórico de estudios previos, numéricos y experimentales, para concluir sobre la mejora en la eficiencia de los paneles fotovoltaicos al emplear materiales de cambio de fase.

1.5.1. Estudios numéricos resueltos empleando el método de balances de energía



Malvi et al., en 2011 presentaron un modelo de balance de energía para un sistema solar térmico (ST) calentador de agua, combinado con un panel fotovoltaico (PV) que incorpora un material de cambio de fase (PCM). El PV convierte las partes visibles y ultravioletas del espectro solar, el ST utiliza partes infrarrojas del espectro y el calor residual del PV, y el PCM regula la temperatura del PV, lo que aumenta la eficiencia fotovoltaica. Las ecuaciones de balance de energía se resolvieron en una dimensión utilizando el método de diferencias finitas con un paso de tiempo pequeño (de 1s) para garantizar la estabilidad y mantener la simulación receptiva a los cambios en la temperatura del aire y la intensidad de la luz solar. La simulación se ejecutó durante 10 días, cada día con un período de 24 h. El PCM se dividió en 40 capas.

Los resultados muestran que el volumen de agua calentada y la ganancia de temperatura del sistema combinado son apropiados para aplicaciones de calentamiento de agua. En todos los casos, un aumento en el rendimiento del PV se asocia con una disminución en el rendimiento de ST. Esto ocurre porque las propiedades mejoradas de PCM regulan la temperatura del panel, pero se limita el calentamiento máximo del agua durante la parte más calurosa del día, cuando están funcionando las partes PV y ST.

A medida que el grosor de PCM aumenta de 0m a 0.03m, la salida de PV aumenta en 6.5%, lo que demuestra el beneficio significativo de usar PCM. No hay beneficio en aumentar el grosor más allá de 0.03 m [Malvi et al., 2011].



Smith et al., en 2014 realizaron la simulación de un sistema PV/PCM que utiliza un modelo de balances de energía. El modelo es unidimensional y considera temperatura ambiental, irradiancia y velocidad del viento. La información climática fue extraída de los datos climáticos de regiones ubicadas en la cuadrícula de coordenada 1.5° de longitud y 1.5° de latitud (México, África oriental, América Central y del Sur,

África, Arabia, Sur de Asia, Indonesia y Europa). El modelo se resolvió utilizando el método de diferencias finitas para la parte temporal.

Se investigó el efecto de variar la temperatura de fusión del PCM de 0 a 50°C, para identificar la temperatura óptima en cada ubicación de la cuadrícula.

Los resultados muestran que el enfriamiento propiciado por el uso del PCM es más beneficioso en lugares con alta insolación y poca variabilidad en el clima. Al utilizar la temperatura de fusión óptima del PCM, la producción de energía fotovoltaica anual aumenta entre 5 y 6% en la mayor parte de las regiones analizadas. Los autores concluyeron que es posible lograr mejoras significativas en el rendimiento incluso cuando se utiliza una temperatura de fusión de PCM por debajo de la óptima [Smith et al., 2014].



Bambrook y Sproul, en 2016 realizaron un método simple para analizar un colector de aire PVT de cualquier dimensión y caudal másico de aire para condiciones de estado permanente, empleando el método de balances de energía. La analogía de circuito eléctrico también es útil para visualizar los flujos de calor y comprender los factores que afectan el rendimiento térmico del colector de aire PVT.

Los autores realizaron la comparación de los resultados obtenidos al resolver por el método de balances de energía en analogía a un arreglo de circuito, y los resultados que se obtenían empleando el modelo de Florschuetz para un intervalo de caudales másicos de aire, obteniendo exactamente los mismos resultados.

Los autores concluyeron que la ventaja de utilizar un modelo de circuito eléctrico es que los modelos de colectores de aire PVT de mayor complejidad pueden analizarse rápida y fácilmente agregando componentes adicionales al circuito. Y los resultados obtenidos de resolver utilizando el método de balances son confiables [Bambrook and Sproul, 2016].



Ma et al., en 2018 identificaron que entre las problemáticas principales de las simulaciones en CFD para sistemas de PV (Paneles Fotovoltaicos) que involucran PCM (Materiales de Cambio de Fase), previamente reportadas se encuentra el impedimento para resolver las ecuaciones durante la fundición del PCM, para ello los autores desarrollaron un modelo mejorado de resistencia térmica, que consume menos tiempo de cómputo que el método CFD y puede incorporar el efecto de transferencia de calor por convección dentro del PCM durante el cambio de fase mediante la aplicación de una propuesta de cálculo para la conductividad térmica. La ecuación desarrollada para modelar la transferencia de calor por convección se simuló en el software MATLAB y se validó mediante el método CFD.


El modelo mejorado de resistencia térmica se empleó para examinar los impactos de varios parámetros que comúnmente se tienen en el sistema PV-PCM. El resultado muestra que el no considerar las pérdidas o ganancias de la transferencia de calor por convección, y/o de calor radiativo en las fronteras y la simplificación del módulo fotovoltaico como una placa, da lugar a una diferencia de aproximadamente 20, 10 y $\pm 1.5^{\circ}C$ en la temperatura del panel fotovoltaico. Además, los autores realizaron un análisis de sensibilidad de dos variables, que ilustra que el sistema PV-PCM tiene un gran potencial para la implementación en un área de alta radiación solar, y se recomienda alrededor de $5^{\circ}C$ por encima de la temperatura ambiente para que pueda ocurrir el cambio de fase del PCM. Durante la simulación se emplea el uso de aletas en el sistema PV-PCM [Ma et al., 2018].



(a) **Aly et al., en 2018** desarrollaron tres modelos numéricos en estado transitorio para la simulación de módulos fotovoltaicos basados en silicio. Los modelos numéricos fueron implementados en el compilador MATLAB. Los tres modelos se basan en el balance de energía de diferentes volúmenes de control, y en conjunto constituyen el dominio sólido completo del panel. El propósito del modelo es calcular la temperatura de la celda y predecir su distribución. Con la información

obtenida de temperatura de la celda se puede calcular el rendimiento eléctrico, mientras que la distribución de la temperatura se puede usar para el modelado termomecánico estructural de los módulos PV.

Los modelos se validaron con datos experimentales usando información desde días soleados despejados, nublados soleados, y nublados lluviosos. El margen de error encontrado fue entre 0.2 y 0.7°C, por lo tanto los autores concluyeron que el modelo es adecuado debido a la concordancia encontrada [Aly(a) et al., 2018].

 (b) Aly et al., en 2018 presentaron la implementación numérica de un modelo en estado transitorio, basado en el método de balance de energía, el cual simula el comportamiento térmico para cualquier panel fotovoltaico, en condiciones de variables reales. Se definió el modelo para un panel en específico basado en silicio, y la información considerada: irradiación solar total incidente, velocidad del viento y temperatura ambiente. Se eligieron tres tipos de días para la condición de desierto, un día frío de invierno, uno caluroso de verano, y uno más de temperatura moderada con fuertes lluvias.

Los resultados fueron validados de la literatura y de información correspondiente que proporciona la hoja de datos del panel fotovoltaico, para condiciones climáticas diversas. Se concluyó que al utilizar condiciones de entrada realistas, el modelo desarrollado tiene mejor precisión de predicción que otros modelos disponibles de la literatura. Los criterios de precisión de diferentes modelos considerados, se evaluaron en función de diferentes parámetros de error estadístico, el error cuadrático medio, el error de sesgo medio y el factor de correlación.

Los cuales concluyen que con las modificaciones adecuadas de las capas y propiedades del material, el modelo planteado, se adapta a la simulación de cualquier panel fotovoltaico, y para cualquier condición climática. El modelo es capaz de realizar análisis en estado permanente y transitorio [(Aly(b) et al., 2018)].



Zhao et al., en 2019 realizaron un modelo unidimensional resuelto por el método de balances de energía, para analizar el comportamiento de los sistemas PV/PCM sobre diferentes condiciones climáticas a lo largo de un año. Las condiciones climáticas seleccionadas fueron de Shanghai.

Se simularon cinco sistemas, un sistema sin PCM y cuatro más PV/PCM con diferentes puntos de fusión, PCM15, PCM20, PCM25 y PCM30, con lo cual es posible observar que estos sistemas funcionan de manera diversa bajo diferentes condiciones climáticas y estaciones, y es necesario realizar una configuración óptima para las diferentes condiciones que se presenten.

Los resultados mostraron que la mejor eficiencia del panel se obtuvo durante el verano y se obtiene una mejora en la producción de electricidad del 2.46 % anual. El resultado indica que un cambio de conductividad de $\pm 10\%$ daría como resultado aproximadamente un cambio promedio de -0.42% y $+0.37\%$ en la temperatura PV relativamente. Los resultados obtenidos del modelo fueron validados con datos experimentales [Zhao et al., 2019].



Khanna et al., en 2019 realizaron un modelo para la optimización de un equipo que involucra un panel fotovoltaico (PV) con un material de cambio de fase, donde al PCM se le adicionan aletas con el fin de mejorar la potencia obtenida por el panel. Para realizar el estudio consideraron los parámetros de flujo solar colectivo diario en la superficie PV, velocidad del viento, acimut del viento, temperatura del entorno, punto de fusión, distancias de aletas sucesivas, profundidad de las aletas y ancho de las aletas. Para capturar la influencia de las circunstancias de trabajo en el rendimiento del sistema, los autores utilizaron las correlaciones apropiadas para el número de Nusselt y el coeficiente de transferencia de calor.

Los resultados mostraron que el cambio en la velocidad del viento de 0.2 a 6 m/s da como resultado la reducción de la profundidad del contenedor o

recinto de PCM de 5.2 a 3.7 cm, 5.6 a 4.0 cm, 5.8 a 4.2 cm, 5.9 a 4.3 cm y 5.9 a 4.3 cm para distancias de aletas sucesivas de 1, 1/2, 1/3, 1/4 y 1/5 m, respectivamente. De forma similar el cambio en el acimut del viento de 0 a 75° resulta en un incremento en la mejor profundidad del recinto de 3.9 a 4.8 cm, 4.3 a 5.2 cm, 4.5 a 5.4 cm, 4.6 a 5.5 cm y 4.5 a 5.5 cm para distancias de aletas respectivas. La producción de energía aumenta de 125 a 137, 140, 142, 143 y 143 W/m^2 con un ancho de aletas de 0, 0.5, 1, 2 y 4 mm, respectivamente.

Los resultados obtenidos de la modelación fueron validados con datos experimentales, en dicha comparación se observó que no hay diferencias significativas entre ambos resultados [Khanna et al., 2019].

1.5.2. Estudios numéricos resueltos empleando CFD



Huang et al., en 2004 desarrollaron el modelo numérico bidimensional de un sistema que involucra un panel fotovoltaico con un material de cambio de fase (PV-PCM), el modelo fue resuelto con la técnica de volumen finito. En el modelo fue conjugado para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes, así como la ecuación de conservación de energía. En el sistema se predijeron temperaturas, campos de velocidad y formación de vórtices dentro del sistema para diferentes configuraciones. Se utilizaron datos experimentales para validar el modelo.

Las distribuciones de temperatura en la superficie fotovoltaica para diferentes insolaciones y temperaturas ambientales muestran que la regulación de la temperatura puede conducir a mejoras significativas en la eficiencia de las fachadas fotovoltaicas. El modelo proporciona en detalle el rendimiento térmico de un PCM de transición sólido-líquido cuando se utiliza en una aplicación de control de temperatura de paneles fotovoltaicos [Huang et al., 2004].



Huang et al., en 2006 desarrollaron un modelo numérico tridimensional para simular el uso de un material de cambio de fase (PCM) vinculado a un sistema fotovoltaico (PV) con el fin de ayudar a controlar el aumento de temperatura de las celdas en paneles fotovoltaicos. Los campos de velocidad y temperatura dentro del sistema PV/PCM fueron modelados para una amplia variedad de geometrías. Las condiciones de frontera empleadas en las simulaciones del sistema PV/PCM fueron cambiadas para reflejar diferentes niveles de insolación, temperatura ambiente y transferencia de calor por convección y radiación al ambiente circundante. Se presentaron simulaciones detalladas realizadas con el modelo 3D y se compararon con las realizadas con un modelo de transferencia de calor en 2D, este último fue previamente desarrollado y validado experimentalmente. También se presenta la distribución de temperatura dentro del PCM obtenida cuando se agregaron cinco aletas de clavija para mejorar la transferencia de calor al PCM. Los autores realizaron la comparación entre los modelos en 2D y 3D y aplicando las condiciones de frontera requeridas encontraron que el modelo 2D puede reflejar una buena aproximación de la distribución de temperaturas promedio del sistema 3D [Huang et al., 2006].



Huang et al., en 2007 desarrollaron un modelo numérico tridimensional para simular el uso de un material de cambio de fase vinculado a un sistema PV, con el fin de controlar el aumento de temperatura de las celdas PV. El modelo puede ser utilizado para predecir temperaturas, campos de velocidad y formación de vórtices dentro del sistema.


Los campos de velocidad y temperatura dentro de un sistema PV/PCM se pueden predecir para un intervalo de geometrías del sistema. Las condiciones de frontera empleadas en las simulaciones del sistema PV/PCM pueden cambiarse para reflejar aislamiento, temperaturas ambientales y transferencia de calor convectivo y radiativo al entorno circundante.

Las temperaturas predichas se compararon con mediciones experimentales para las cuales la geometría del sistema, las características del material y las

condiciones de frontera se igualaron lo más posible. Las predicciones también se compararon con las de un modelo de transferencia de calor de volumen finito bidimensional que fue previamente desarrollado y validado experimentalmente en un módulo construido a escala.

La variación en las diferencias de temperatura promedio predecidas en la superficie del frente y posterior para las simulaciones 3D y 2D son de ± 1 y $\pm 1.6^{\circ}C$ respectivamente, representando una variación relativa de ± 2.9 y $\pm 4.9\%$.

Los resultados mostraron que el modelo 2D puede reflejar con precisión las predicciones realizadas por el modelo 3D para sistemas simples de eje lineal. Además los autores presentaron la distribución de temperatura dentro del PCM obtenida cuando se agregaron cinco aletas de clavija para mejorar la transferencia de calor al PCM, mostrando una mejora efectiva al aumentar la superficie de pérdida de calor en el sistema [Huang et al., 2007].

 **Sarwar et al., en 2010** desarrollaron un modelo bidimensional mediante el método de elementos finitos para simular la evolución de temperatura en un panel fotovoltaico con un PCM integrado. La discretización espacial se realizó con una función de interpolación cuadrática, la discretización temporal se realizó por diferencia finita y se utilizó el algoritmo SIMPLE para determinar las velocidades y la presión. Adicionalmente, se implementó un sistema experimental, para la configuración experimental se fijó un recipiente de aluminio a la parte posterior del PV y se llenó con PCM. Se unieron cinco termopares al frente y tres más a la superficie posterior del PV para registrar la evolución de la temperatura en el PV con insolaciones simuladas de 500 , 750 y $1000W/m^2$ en condiciones interiores a una temperatura ambiente que varía en el intervalo de $20^{\circ}C$ a $25^{\circ}C$.

Los resultados simulados de la evolución de la temperatura de un sistema PV/PCM integrado se compararon con los resultados experimentales para validar el modelo desarrollado. Los resultados simulados muestran

concordancias con los resultados experimentales y con la variación debida a la temperatura ambiente con un porcentaje de error menor al $\pm 1\%$ [Sarwar et al., 2010].



Ciulla et al., en 2012 crearon un modelo numérico capaz de describir el comportamiento de un sistema PV-PCM. El modelo fue validado experimentalmente. Para estudiar la influencia del PCM, se monitorearon dos paneles fotovoltaicos idénticos, uno de los cuales se aplicó el PCM. Las medidas de campo se realizaron en los meses de verano, ya que se caracterizan por valores de radiación solar más altos.

La carga eléctrica también se ha cambiado con frecuencia para observar la respuesta del sistema a las variaciones de carga. La comparación de los resultados numéricos con los experimentales muestran que el modelo propuesto es válido y puede usarse de manera útil para determinar el comportamiento térmico de una pared multicapa, en la cual hay un material de cambio de fase. La comparación entre las mediciones experimentales y las predicciones numéricas ha demostrado que el algoritmo, aunque simplificado y en geometría unidimensional, puede usarse para determinar la tendencia en la temperatura de una pared multicapa acompañada de un PCM [Ciulla et al., 2012].



Ho et al., en 2012 realizaron simulaciones para determinar la eficiencia térmica y eléctrica en un edificio integrado con un módulo fotovoltaico para evaluar las influencias de los entornos ambientales externos e internos, la irradiación solar diaria y el grosor, así como el punto de fusión de la capa del material de cambio de fase microencapsulado en el módulo fotovoltaico. Para la solución del modelo numérico se usó un esquema de alto orden.

Los resultados muestran que la incorporación de la capa adecuada de material de cambio de fase microencapsulado puede mejorar el rendimiento térmico y

eléctrico del módulo fotovoltaico. La temperatura de fusión y la relación de aspecto afectan significativamente el rendimiento térmico y eléctrico del módulo fotovoltaico. La capa de PCM microencapsulado aumenta la eficiencia mínima en aproximadamente 0.09 y 0.12%, para una relación de aspecto de 0.277 y 1, respectivamente [Ho et al., 2012].




Tanuwijava et al., en 2013 utilizaron la simulación en CFD para investigar las características de la transferencia de calor y el comportamiento térmico de los módulos de PCM microencapsulados para aplicaciones fotovoltaicas en condiciones transitorias. Se analizaron dos casos con diferentes puntos de fusión (26 y 34°C), y las relaciones de aspecto de los sistemas PCM utilizadas fueron de 0.277 y 1.


Los resultados muestran que la relación de aspecto de la capa de PCM microencapsulada tiene efectos significativos en las características de transferencia de calor, aumentan y disminuyen la eficiencia de la celda fotovoltaica promedio en aproximadamente 0.1 y 0.14%. El rendimiento térmico general de los dos casos examinados con diferentes puntos de fusión es aproximadamente el mismo. Los resultados están limitados a la simulación del PCM microencapsulado utilizado y la ubicación específica del clima considerado [Tanuwijava et al., 2013].



Biwole et al., en 2013 utilizaron la dinámica de fluidos computacional para investigar el uso de un PCM con el fin de regular la temperatura de los paneles fotovoltaicos. Los autores consideran la transferencia de calor y masa en un sistema compuesto, situando el PCM en la parte posterior del PV. Se utilizó el método de entalpía para simular el cambio termofísico de las propiedades del material, de igual manera se considera que cuando el PCM está en fase sólida el campo de velocidad es cero. El modelo se resolvió utilizando el método de elemento finito.


Los resultados muestran que al agregar un PCM en la parte posterior de un panel fotovoltaico se mantiene una temperatura de funcionamiento del panel a menos de $40^{\circ}C$ durante 80 minutos bajo una radiación solar constante de $1000W/m^2$. Mientras que el PV sin la implementación del PCM alcanza la misma temperatura transcurridos los primeros 5 minutos. Los resultados de los campos de velocidad y campos de isoterma se validaron con los datos de una configuración experimental [Biwole et al., 2013].

 **Brano et al., en 2014** desarrollaron un algoritmo, y un sistema PV-PCM, para modelar mediante el método de diferencias finitas. Para el desarrollo del algoritmo se consideró un sistema unidimensional transitorio. Los resultados del modelo se comparan con los datos provenientes de una instalación de prueba, los cuales confirmaron las simulaciones numéricas realizadas y mostraron que el modelo propuesto es satisfactorio y se puede usar para determinar el comportamiento térmico de un sistema PV-PCM. Los autores concluyeron que el método presentado se puede utilizar incluso para otras configuraciones de PCM, como las empleadas en estructuras civiles para mejorar el rendimiento térmico de la envolvente de los edificios [Brano et al., 2014].

 **Arıcı et al., en 2018** desarrollaron un modelo numérico unidimensional para analizar el comportamiento térmico de un sistema PV-PCM y mejorar la eficiencia mediante el uso de materiales de cambio de fase. El modelo matemático fue resuelto usando el método de diferencias finitas. Para el estudio se analizaron diferentes PCM orgánicos, y se examinaron sus respectivas temperaturas de fusión y calores latentes, con el fin de identificar el más adecuado para las condiciones climáticas requeridas; en este caso para dos ciudades turcas con condiciones típicas del mediterráneo, en condiciones de invierno y verano. Finalmente, se eligió una cera de parafina.

El modelo fue validado con datos experimentales obtenidos de la literatura, con una desviación máxima que oscila entre el 1 y 3.1%. Con base en los resultados se refleja que la utilización de un PCM es favorable, puesto que reduce la temperatura de operación de panel entre 0.31 hasta 10.26°C, lo que aumenta su eficiencia en promedio anual en casi 1.59% debido a la incorporación de la capa de PCM. Se encontró que el espesor óptimo de la capa de PCM para esta región en específico fue de 38 mm.

Adicionalmente, los autores analizaron el aspecto económico, en cuanto a la utilización de los sistemas de enfriamiento PV-PCM, encontrando que es necesaria una disminución del precio inicial del material para garantizar la factibilidad del costo energético nivelado o LCOE (Levelized Cost of Energy). Esto es posible de lograr con un comportamiento térmico más eficiente del sistema PCM [Arıcı et al., 2018].

 **Barth et al., en 2018** presentaron un modelo numérico para un panel fotovoltaico utilizando el método de elemento finito. El modelo combina principalmente tres características físicas: irradiación solar, transferencia de calor dentro del módulo y rendimiento eléctrico. El comportamiento térmico del PV se simuló a largo plazo y en condiciones de desierto severas.

El modelo fue validado bajo condiciones NOCT (Temperatura de Operación Nominal de la Célula), y se encontró que los resultados reproducían de forma correcta la variabilidad de la temperatura del PV.

Se considera la posibilidad de que con un conjunto completo de datos experimentales, el modelo predecirá de forma precisa la temperatura del PV y su rendimiento eléctrico durante largos periodos de tiempo [Barth et al., 2018].



Nizetic et al., en 2018 compararon dos sistemas PV-PCM, uno utilizando un PCM orgánico y el segundo empleando grasa porcina como un nuevo PCM, para investigar los principales parámetros de rendimiento y su comportamiento térmico de los paneles fotovoltaicos. Para la investigación numérica se implementó un código en diferencias finitas unidimensional, y el análisis se realizó para una ubicación geográfica con condiciones climáticas mediterráneas.

El modelo numérico fue validado con datos experimentales disponibles, en los que demostró ser suficiente para el propósito principal del análisis. Los resultados muestran que no hay una diferencia significativa en el beneficio de rendimiento al realizar la comparación de los sistemas PV-PCM considerados. En el aspecto económico general, el uso de un PCM como la grasa porcina no es económicamente viable para las circunstancias generales dadas.

La aplicación de este nuevo PCM demostró que la grasa de cerdo contiene potencial desde el punto de vista del rendimiento, puesto que se comporta como un material PCM orgánico típico, sin embargo; debe considerarse la degradación a largo plazo de sus propiedades físicas [Nizetić et al., 2018].



Benlekkam et al., en 2018 realizaron un estudio numérico de una nueva configuración propuesta PV/PCM con aletas internas; con el objetivo de comprender el efecto del ángulo de inclinación de las aletas y su orientación en la mejora de la regulación térmica de las celdas fotovoltaicas.

Los cálculos se basan en la técnica de volumen finito que incorpora una formulación de entalpía para la simulación del fenómeno de cambio de fase. En el estudio también se analiza para varios ángulos de inclinación en el intervalo de 0 a 45° cada 5° y la orientación de las aletas internas converge o diverge. Además, el rendimiento de PCM se evalúa bajo diferentes intensidades de insolación. Los mejores resultados se obtuvieron con una configuración divergente que mantuvo la temperatura de aproximadamente 34°C durante 170 minutos, mientras que la convergencia la mantuvo a 38°C. Los resultados

indican que el ángulo de inclinación de las aletas ($\alpha = 25^\circ$) puede mantener la eficiencia de la celda PV en 14% con una temperatura promedio de 34.5°C durante 3 horas, en comparación con el sistema PV/PCM con aletas horizontales ($\alpha = 0^\circ$) cuya eficiencia disminuye al 12.5% desde su valor máximo (15%) con una temperatura media de 38°C [Benlekkam et al., 2018].



Kant, et al., en 2019 desarrollaron un modelo de un panel fotovoltaico para llevar a cabo simulaciones numéricas con condiciones climáticas reales para tres PCM diferentes; RT-25, n-octadecano y ácido cáprico. El estudio se enfocó en investigar el efecto del espesor de PCM, la altura de BIPV (Panel Fotovoltaico Integrado en Edificios), el espesor del espacio de aire óptimo y caudal másico de aire entre el edificio y el panel.

El modelo físico estaba compuesto por el panel fotovoltaico, el PCM encapsulado en aluminio, una separación por la que circulaba aire y un espesor de muro de concreto perteneciente a la edificación.

Los autores concluyeron que para el intervalo seleccionado de parámetros, los valores óptimos de espesor de PCM, altura H, Espesor de aire y flujo másico son: 0.04m, 3m, 0.02m y 0.18kg/s para maximizar la generación de energía del panel y 0m, 3m, 0.08m y 0.091kg/s para maximizar la energía extraída por el aire.

Con base en estos resultados, se desarrollaron correlaciones para la energía generada por el panel, energía extraída por el aire, temperatura máxima del panel fotovoltaico y temperatura máxima de salida del aire. Las correlaciones desarrolladas tienen un nivel de confianza del 99% para la generación de energía del panel, un nivel de confianza del 95% para la temperatura máxima del panel y temperatura de salida máxima del aire y un 90% para energía extraída por el aire. Con base en estas correlaciones desarrolladas, se derivaron diseños óptimos de edificio integrado al panel fotovoltaico [Kant et al., 2019].

1.5.3. Estudios experimentales de sistemas PV-PCM



Huang et al., en 2008 realizaron el estudio experimental en un sistema de prueba compuesto por un panel fotovoltaico con un material de cambio de fase (PV/PCM) al que se adicionó un simulador solar y un sistema de adquisición de datos. Se utilizó un dispositivo de registro de adquisición de datos programable con alimentación independiente para leer y almacenar datos de los termopares y el piranómetro. Los datos del sistema de registro fueron para cada 60 segundos y estaba ubicado adyacente al sistema de prueba fuera de línea de la insolación simulada. El efecto de la resistencia térmica en el control de temperatura PV/PCM se encuentra con los efectos de la cristalización y el proceso de fusión estudiado. Se evaluó la adición de aletas para evitar una mayor resistencia térmica debido a las burbujas formadas durante el proceso de fusión. El rendimiento térmico del PCM en el sistema PV/PCM con aletas se controló durante el proceso de fusión y se realizó una evaluación experimental detallada del proceso dentro del sistema PV / PCM. Se descubrió que la convección natural comenzó durante las primeras etapas del proceso de fusión y este aumenta en magnitud con el proceso de fusión. Se observó que las aletas moderan efectivamente el aumento de temperatura. El efecto de control de temperatura se mejora al reducir el intervalo entre las aletas, pero el tiempo durante el cual se mantiene el control se acorta [Huang et al., 2008].



Hasan et al., en 2010 realizaron la evaluación de cinco PCM, todas con temperaturas de fusión $25 \pm 4^{\circ}C$ y calor de fusión entre 140 y 213kJ/kg. Se realizaron experimentos a tres intensidades de insolación para evaluar el rendimiento de cada PCM en cuatro sistemas PV/PCM diferentes.

Los resultados mostraron que el rendimiento de regulación térmica de un PCM depende de la masa térmica del PCM y de la conductividad térmica del PCM de todos los sistemas PV/PCM analizados. Los autores lograron una reducción máxima de la temperatura de $18^{\circ}C$ durante 30 minutos, mientras que la reducción de la temperatura de $10^{\circ}C$ se mantuvo durante 5 horas a una insolación de $1000W/m^2$. La conductividad térmica del contenedor PCM tuvo

un mayor impacto en el rendimiento de los eutécticos de baja conductividad térmica de ácidos grasos.

Los resultados logrados son satisfactorios, sin embargo, es necesaria una mayor reducción de la temperatura para que el PCM sea económicamente viable. Además los autores concluyeron que con la utilización de aletas metálicas térmicamente conductoras se logró una mayor reducción de la temperatura durante períodos de tiempo más largos [Hasan et al., 2010].



(a) **Huang et al., en 2011** realizaron el estudio del proceso de fusión de PCM para sistemas PV/PCM con y sin aletas internas de forma teórica y experimental. Debido a que la efectividad de los PCM está limitada por sus bajas conductividades térmicas y la segregación de cristalización durante la solidificación, se plantearon diseños que involucran el uso de aletas.

El aparato experimental consistió en el sistema de prueba experimental PV/PCM con separaciones de aletas variables, un sistema de iluminación del simulador solar, cámara ambiental y un dispositivo de adquisición de datos programable alimentado de forma independiente. La temperatura ambiente y las temperaturas dentro y fuera de las superficies externas de los sistemas PV/PCM se midieron usando termopares de cobre-constantano tipo T. Se comprobó que con aletas internas, el aumento de temperatura del PV se puede reducir en comparación con el uso de una sola placa de aluminio plana. La mejor comprensión fundamental de los procesos dentro del sistema PV/PCM proporcionadas por los autores se puede utilizar para optimizar el diseño de los sistemas PV/PCM [Huang(a) et al., 2011].



(b) **Huang en 2011** realizaron el estudio del proceso de fusión de PCM para sistemas PV/PCM con y sin aletas internas de forma teórica y experimental. Debido a que la efectividad de los PCM está limitada por sus bajas conductividades térmicas y la segregación de cristalización durante la solidificación, se plantearon diseños que involucran el uso de aletas.


El aparato experimental consistió en el sistema de prueba experimental PV/PCM con separaciones de aletas variables, un sistema de iluminación del simulador solar, cámara ambiental y un dispositivo de adquisición de datos programable alimentado de forma independiente. La temperatura ambiente y las temperaturas dentro y fuera de las superficies externas de los sistemas PV/PCM se midieron usando termopares de cobre-constantano tipo T. Se comprobó que con aletas internas, el aumento de temperatura del PV se puede reducir en comparación con el uso de una sola placa de aluminio plana. La mejor comprensión fundamental de los procesos dentro del sistema PV/PCM proporcionadas por los autores se puede utilizar para optimizar el diseño de los sistemas PV/PCM [Huang(b), 2011].



Park et al., en 2014 examinaron la aplicación de un material PCM en un módulo fotovoltaico vertical en condiciones climáticas reales. Además los autores realizaron la simulación para analizar la generación anual de energía eléctrica con cambios de dirección en la instalación del módulo PV/PCM, variando las temperaturas de fusión y los espesores del PCM.


Los resultados experimentales mostraron que con la utilización del PCM, la salida de energía eléctrica del módulo fotovoltaico se incrementó en un 3%, cuando la cantidad de radiación solar vertical fue alta y cuando la temperatura del aire exterior fue moderada. Sin embargo; durante el invierno, cuando la temperatura exterior es relativamente baja, el aumento en el rendimiento de la generación de energía fue mínimo.

Con los resultados de la simulación se determinó que la temperatura de fusión óptima fue de 298K en las condiciones climáticas de la región de estudio (Incheon, Corea del Sur), para todas las direcciones de la instalación, y se incrementó la generación de energía eléctrica en un 1 a 1.5% en comparación con el módulo fotovoltaico convencional [Park et al., 2014].

 **Hasan et al., en 2014** realizaron el análisis experimental de la eficiencia de la energía eléctrica y térmica de los sistemas PV-PCM en dos climas diferentes, en regiones de Irlanda y Pakistán.

Los resultados muestran que dichos sistemas son económicamente viables en entornos de mayor temperatura y mayor radiación solar. Lo cual considera un aumento en la vida útil del panel debido a la reducción de la temperatura de operación y mayor potencia para la creación de energía fotovoltaica.

En el análisis actual, la energía térmica almacenada en el PCM se convierte en energía eléctrica con una eficiencia muy baja, lo que limita el beneficio de la energía térmica, la cual puede ser mejorada mediante un mejor diseño del intercambiador de calor [Hasan et al., 2014].

 **Hasan et al., en 2015** realizaron la simulación y el análisis experimental de dos sistemas PV-PCM evaluados en exteriores con dos diferentes materiales de cambio de fase (hidrato de sal y mezcla de ácidos). El estudio se realizó para dos climas diferentes: cálido y frío. Los resultados mostraron que con la implementación de los dos PCM la temperatura del panel fotovoltaico fue entre 3 y 4°C menor que la del panel de referencia que no utilizaba PCM. Siendo el sistema que utilizó el PCM de hidrato de sal, el que alcanzó temperaturas más bajas.

También se observó que las desviaciones entre los resultados experimentales y de simulación están en promedio por debajo del 6.3%. Los autores demostraron que al utilizar materiales de PCM se evitó la pérdida de potencia de PV y aumentaron las eficiencias de conversión de PV. Ambos PCM lograron una mayor caída de temperatura en condiciones climáticas cálidas y temperaturas estables para las condiciones climáticas más frías [Hasan et al., 2015].



Abdulmunem y Jalil, en 2018 realizaron el estudio numérico y experimental de un sistema PV/PCM (panel fotovoltaico con material de cambio de fase) al que se adicionaba el uso de aletas internas con el fin de mejorar la transferencia de calor, reducir la temperatura del panel y mejorar el rendimiento del mismo. Se utilizó una cera de parafina como PCM, y las aletas que se adicionaron eran de aluminio.

Los autores realizaron la comparación entre un sistema PV/PCM con aletas, y un sistema PV/PCM sin aletas, adicional a estos dos se realizó el análisis para un PV que no adicionaba PCM. Los resultados mostraron que el uso de aletas de aluminio con PCM condujo a acelerar la fusión de PCM en 3.5 minutos a una profundidad de 2 cm y aproximadamente 14 minutos a una profundidad de 3 cm en comparación con el uso de PCM solamente. Esto condujo a una mayor caída de la temperatura de la celda PV en comparación con el uso de PCM solamente. El porcentaje de caída de la temperatura de la celda PV fue de aproximadamente 18.3% usando PCM solamente y 27.8% usando PCM/Aletas acopladas en comparación con la celda PV sin materiales aditivos (PCM). La mejora en el rendimiento de la celda fotovoltaica utilizada con la caída de su temperatura fue de aproximadamente 9.84% en la potencia máxima [Abdulmunem and Jalil, 2018].




Sarafraz et al., en 2019 realizaron el estudio experimental para evaluar el rendimiento térmico y eléctrico de un panel solar fotovoltaico que se enfría con nanotubos de carbono de múltiples paredes: nano-suspensión de agua/etilenglicol.

Se diseñó una cubierta de enfriamiento y se unió al panel solar para reducir la pérdida de calor y mejorar la velocidad de transferencia de calor entre el refrigerante y el panel. También se rellenó con material de cambio de fase (PCM) de nanotubos de carbono de pared múltiple y las tuberías de enfriamiento se pasaron a través del PCM. El nanofluido se introdujo en las tuberías, mientras que el nano-PCM estaba en la camisa de enfriamiento llena de parafina.

Los resultados mostraron que con un aumento en la concentración de masa del refrigerante se promovió la producción de electricidad y energía, mientras que con un aumento en la concentración de masa del nanofluido la potencia de bombeo se incrementó, dando como resultado una disminución en la potencia equivalente termoeléctrica.

Los autores identificaron que una nano-suspensión de 0.2% en peso puede representar el rendimiento térmico y eléctrico más alto de $292.1W/m^2$. También se identificó que es posible producir con un panel fotovoltaico al 0.2% en peso, un 45% de la electricidad y el 44% de la energía térmica entre la 1:30 y las 3:30 p.m [Sarafraz et al., 2019].


 **Rajvikram et al., en 2019** realizaron el estudio experimental de un material utilizado para potenciar la conductividad térmica (TCE) para PCM (Materiales de cambio de fase), que son comúnmente empleados para ayudar a la disminución de la temperatura en paneles fotovoltaicos (PV). Los autores utilizaron una lámina de aluminio como TCE y el experimento lo realizaron bajo condiciones de radiación solar directa.


La configuración constó de un PCM orgánico de 0.03 m de espesor al que se colocó inmediatamente una lámina de aluminio de área de $0.036 m^2$ en la parte posterior. El material PCM propició una disminución de temperatura en la superficie del panel fotovoltaico, mientras que la lámina de aluminio se utilizó para acelerar la velocidad de difusión del calor a los alrededores. Los resultados mostraron que el PCM con una lámina de aluminio como placa posterior en el panel fotovoltaico, mejora la eficiencia de conversión en un promedio de 24.4%. Con la disminución de la temperatura promedio de $10.35^{\circ}C$, la eficiencia eléctrica promedio general se ha incrementado en un 2%.

La configuración mostrada del PCM atrincherado con paneles fotovoltaicos basados en láminas de aluminio muestra un mejor rendimiento bajo la radiación solar directa. Por lo tanto, este método puede ser un enfoque eficaz para reducir la temperatura de funcionamiento del panel fotovoltaico con un

costo mínimo, menos peso y un aumento en la eficiencia del panel fotovoltaico [Rajvikram et al., 2019].

1.5.4. Estudios experimentales de sistemas PV/PCM/T

 **Browne et al., en 2016** desarrollaron un sistema PV/T/PCM que cumple la función de generar electricidad, almacenar calor y realizar precalentamiento de agua, para condiciones exteriores en Dublín Irlanda. El diseño combinó un módulo fotovoltaico con un colector térmico, en el que se elimina el calor del intercambiador en el PCM a través del termosifón. Se comparó el rendimiento para el sistema sin PCM, el sistema sin intercambiador de calor y el módulo fotovoltaico solo. El PCM utilizado fue ácido palmítico. Los resultados muestran que la temperatura alcanzada por el agua fue aproximadamente $5.5^{\circ}C$ más alta en el sistema que no utilizaba PCM, demostrando que los PCM son un medio eficaz para almacenar calor y extraer energía térmica del PV hasta siete veces más en comparación con un sistema sin PCM. Se demostró que el almacenamiento de energía por el PCM permite que la energía térmica se utilice en otras aplicaciones, por ejemplo para el calentamiento de agua [Browne et al., 2016].

 **Tomar et al., en 2018** realizaron un trabajo teórico-experimental de pruebas de eficiencia eléctrica y térmica en cinco módulos fotovoltaicos integrados, compuestos de diferentes materiales (monocristalino, policristalino, película delgada de silicio amorfo, película delgada de telurio de cadmio y, selenurio de galio e indio-galio). Los autores realizaron la prueba con y sin flujo de agua superficial para diferentes caudales, con el fin de determinar la influencia de la temperatura en el desempeño de construcción de un sistema fotovoltaico-térmico integrado. Los módulos se integraron en celdas de prueba idénticamente aisladas.

Los resultados del modelo matemático desarrollado se validaron con resultados de previas investigaciones experimentales sobre módulos fotovoltaicos. Los resultados muestran que el promedio diario de eficiencia eléctrica de los módulos para todos los casos es casi el doble cuando está presente un flujo de

agua, que cuando no se utiliza agua. Así mismo todos los módulos fotovoltaicos alcanzan una temperatura menor cuando está presente el flujo de agua. El módulo monocristalino alcanzó una energía total promedio máxima para ambos casos con y sin agua.

Para lograr el confort térmico o la temperatura deseada, el caudal másico del flujo de agua superficial debe optimizarse según la demanda de cargas eléctricas y de calefacción para mejorar el rendimiento general del sistema [Tomar et al., 2018].



Li et al., en 2019 realizaron el estudio experimental y análisis del comportamiento térmico de panel solar fotovoltaico (PV) integrado con un material de cambio de fase. El material de cambio de fase (PCM) se emplea y se conecta en la parte posterior del módulo PV, para absorber el exceso de calor del módulo PV con el fin de mejorar la regulación térmica y la eficiencia eléctrica. Además, el sistema está integrado con un colector solar térmico (ST) para utilizar aún más el calor almacenado en PCM.

Para evaluar el rendimiento operativo del sistema en una aplicación práctica, se diseñó y probó un nuevo módulo PV-PCM y un módulo PV-PCM-T en condiciones exteriores reales. Se recopilaron y analizaron los datos de temperatura PV, temperatura PCM, temperatura del agua, salida de electricidad. La producción de energía total del sistema PV-PCM-T se evaluó mediante la introducción de indicadores: suma energética y suma eléctrica, que se calculan como 3088 y 2312 kJ/día, aumentan en un 74.3 y 30.4% respectivamente. Los resultados muestran que la diferencia de temperatura PV entre el sistema PV-PCM y solo PV podría alcanzar los $23^{\circ}C$, por lo que la producción de electricidad del sistema PV-PCM aumenta en 5.18% [Li et al., 2019].



(a) Al-Waeli et al., en 2019 realizaron una evaluación económica para un sistema PVT (Panel Fotovoltaico con enfriador Térmico). El sistema de enfriamiento fotovoltaico consiste en un tanque conectado a la parte posterior del panel lleno de PCM (cera de parafina) mezclado con nano-SiC para aumentar su conductividad térmica y el depósito se enfría reciclando nanofluido (agua + nano-SiC). El sistema propuesto fue probado, evaluado y comparado con tres diseños para validar la efectividad de este sistema. Los sistemas con que se comparó fueron de PV convencional, PVT con un tanque lleno de agua y agua que fluye dentro de las tuberías y un PVT con un tanque lleno de PCM y agua que fluye dentro.

La eficiencia térmica más alta para el sistema propuesto es del 72.0%. Los resultados eléctricos, térmicos y económicos del sistema propuesto resultaron prometedores en comparación con el sistema PVT en la literatura.

Se utilizó MATLAB para la evaluación económica. Dentro de los factores económicos se encuentra que el LCC, CoE y PBP son 1288.37 USD, 0.112 USD/kWh y 4.4-5.3 años, respectivamente. Finalmente, durante la operación y debido a las altas temperaturas de trabajo, la eficiencia fotovoltaica se registró en 7.1% para PV convencional, mientras que la eficiencia más alta registrada por el sistema propuesto fue de 13.7% con una potencia eléctrica de 120.7W [Al-Waeli(a) et al., 2019].




(b) Al-Waeli et al., en 2019 investigaron los sistemas de enfriamiento fotovoltaico térmico (PV/T) que utilizan agua. Los autores evaluaron de forma numérica y experimental diferentes sistemas PV/T: convencional, a base de agua, PVT de nano fluido de agua y, nano fluido/nano-PCM, y compararon las diferencias en las eficiencias de los sistemas térmicos y eléctricos. El entorno que utilizaron son redes neuronales artificiales o ANN (Artificial Neural Networks), y la experimentación se llevó a cabo en la Universidad de Malasia en Bangi.

Los resultados mostraron que el uso del nano fluido/nano-PCM mejoró la eficiencia eléctrica del 8.07 al 13.32% y su eficiencia térmica alcanzó el 72%.

En el análisis de sensibilidad mostró que la influencia de la irradiación solar y la temperatura ambiental tiene un efecto constante en la eficiencia eléctrica. Sin embargo; la temperatura ambiente tuvo un mayor impacto en la eficiencia térmica.


Los resultados de la ANN fueron consistentes con los resultados experimentales del estudio actual y trabajos anteriormente publicados [Al-Waeli(b) et al., 2019].

1.5.5. Estudios teóricos


 Norton et al., en 2011 realizaron una revisión de las investigaciones referidas a edificaciones integradas con paneles fotovoltaicos (BIPV), haciendo énfasis en los que incluyen inversores, concentradores y sistemas de gestión térmica. También, los autores discutieron los avances en técnicas para aspectos específicos del diseño, instalación y operación de estos sistemas. Entre los sistemas que analizan se encuentran el uso de paneles fotovoltaicos con placas de aluminio en la parte posterior y la inclusión de aletas con el fin de mejorar la transferencia de calor hacia el ambiente, y de este modo mejorar la eficiencia del panel. Se evalúan análisis de las pérdidas eléctricas por distintos factores, orientaciones, ángulos de incidencia de radiación solar, parámetros de tamaño, etc.

Así mismo los autores realizan una evaluación de costos, y concluyeron que el costo de un sistema BIPV disminuir reduciendo los costos de fabricación de módulos y componentes fotovoltaicos, costos de instalación, costos de operación y mantenimiento y mejorando la eficiencia de los paneles fotovoltaicos y otros componentes.

El costo y la eficiencia siguen siendo barreras para el uso generalizado de BIPV, sin embargo, entre los factores estudiados se pueden seleccionar algunos que harán que BIPV sea más viable económicamente en una mayor variedad de ubicaciones [Norton et al., 2011].

 **Preet en 2018** realizó una revisión bibliográfica de estudios que involucran técnicas de enfriamiento relacionadas con el sistema fotovoltaico/térmico (PV/T) basado en agua y el panel fotovoltaico con sistema de material de cambio de fase (PV-PCM). La revisión bibliográfica involucra estudios teóricos y experimentales. El autor realizó una recopilación de los resultados obtenidos en los diferentes estudios seleccionados para su revisión, construyó una tabla en la que analizan todos los sistemas PV/T, explicando la configuración del modelo empleado por cada autor y los valores obtenidos de eficiencia eléctrica y térmica. Así como una tabla para los sistemas que involucran un material de cambio de fase describiendo sus configuraciones, el tipo de PCM que se utilizaba y la eficiencia eléctrica de cada sistema.

El autor concluyó que para los sistemas que involucran PCM existe una ventaja en comparación con otros sistemas de gestión térmica de paneles fotovoltaicos sin almacenamiento de calor. Esto debido a que el calor extraído por el PCM puede usarse durante un período prolongado de tiempo y además el calor del PCM puede usarse para calentar agua [Preet, 2018].

 **Waqas et al., en 2018** presentaron una revisión de la literatura que aborda diferentes aspectos de los sistemas PV/PCM, tales como su desarrollo, la evaluación del rendimiento, la selección de PCM, la mejora de la transferencia de calor, la simulación y la aplicación en la práctica. Los autores realizaron una recopilación de lo más importante concluido por diversos autores que se involucran en el estudio de dichos sistemas.

Se ha observado que el PCM puede reducir efectivamente la temperatura de funcionamiento del panel fotovoltaico en ciertos grados, lo que resulta en una mejora en la eficiencia de conversión eléctrica de los paneles fotovoltaicos. Con base en la literatura revisada, los autores concluyeron que el PCM puede reducir efectivamente la temperatura de funcionamiento del panel fotovoltaico hasta $20^{\circ}C$ mejorando el efecto general de conversión eléctrica. Se ha observado que PCM con un punto de fusión en el intervalo de 25 a $35^{\circ}C$ es

más adecuado para la aplicación de enfriamiento de los sistemas PV/PCM con un punto de fusión superior a 35°C , adecuado para regiones de clima cálido. Sin embargo, la selección del punto de fusión del PCM depende completamente de la ubicación geográfica y las condiciones climáticas del área de estudio.

Los PCM se consideran adecuados y económicamente beneficiosos para los lugares con alta temperatura ambiente y alta radiación solar en comparación con lugares más fríos con baja radiación solar. Los PCM orgánicos incluso con baja conductividad térmica se ven más atractivos para la regulación térmica y eléctrica de paneles fotovoltaicos. La encapsulación de PCM con aletas internas y externas se considera beneficiosa para mejorar la transferencia de calor entre PV y PCM que puede reducir aún más la temperatura del panel debido a la rápida transferencia de calor. Para la transferencia rápida de calor, el PCM mezclado con algunos metales como el grafito también se considera útil, ya que la conductividad térmica general del PCM se mejora mezclada con metales.

Es importante considerar que en promedio, es necesario utilizar 2.6 kg de PCM por metro cuadrado de área fotovoltaica para disminuir un grado de temperatura pico PV, lo cual puede aumentar el peso total del panel fotovoltaico hasta un 40% repercutiendo en el trabajo empleado para el montaje e instalación [Waqas et al., 2018].



Rukman et al., en 2020 realizaron una revisión general de los métodos recientes de enfriamiento de módulos fotovoltaicos. Los autores realizan una clasificación de métodos de enfriamiento de paneles fotovoltaicos (PV), en los cuales se analizan los diseños de sistemas de enfriamiento y el tipo de refrigerantes que pueden ser empleados, en esta segunda clasificación se realiza otra subdivisión entre los sistemas de enfriamiento convencionales PVT que utilizan fluidos como aire o agua y sistemas de enfriamiento avanzados que involucran el uso de PCM, tuberías de calor o nanofluidos.

Los autores analizaron los estudios acerca de sistemas de enfriamiento avanzados, explicando sus principales ventajas. Los autores concluyeron que particularmente en el uso de nanofluidos, PCM y tubería de calor, se observa una mejora en el rendimiento del sistema PVT, aunque los estudios realizados aún son escasos y de costos elevados.

A pesar de que ha ido en aumento la comercialización de esta tecnología al ser empleada por las industrias y las comunidades, todavía está en etapa de prueba [Rukman et al., 2020].

1.6 Conclusión de la revisión bibliográfica

Con la revisión bibliográfica realizada se puede concluir que diversos estudios tanto numéricos como experimentales se han realizado con el fin de determinar una mejora en la eficiencia energética y térmica de los sistemas PV-PCM. De lo anterior se pueden concluir los siguientes puntos; todos los estudios analizados se realizaron en estado completamente transitorio, con el uso adicional de aletas internas, placas de aluminio o sistemas de tuberías con fluido circundante se mejora la transferencia de calor en el uso del PCM, y efectivamente el uso de un material de cambio de fase ayuda a regular la temperatura del panel fotovoltaico. Dado que los artículos científicos referentes a sistemas PV-PCM revisados e incluidos en el estado del arte son para regiones externas a la República Mexicana se han planteado los siguientes objetivos del proyecyo.

1.7 Objetivos

1.7.1. Objetivo general

Modelar dinámicamente un sistema compuesto de un panel fotovoltaico (PV) con un material de cambio de fase (PCM) para un clima cálido de la República Mexicana.

1.7.2. Objetivos específicos

- Aprender una técnica de simulación (Balances Globales de Energía).
- Aprender a modelar el fenómeno de difusión de calor por cambio de fase.
- Desarrollar un código numérico para simular la transferencia de calor en un medio compuesto de PV con un material de cambio de fase (PCM).
- Con base a un clima seleccionado obtener la ecuación de datos continuos en el tiempo.
- Realizar el estudio paramétrico de un panel fotovoltaico con y sin PCM para un clima cálido de México.

1.8 Alcances

Se desarrollará un código computacional para el modelado del sistema (panel fotovoltaico con un material de cambio de fase) en estado transitorio mediante la técnica de Balances Globales de Energía. Se realizará el estudio paramétrico con las condiciones climatológicas seleccionadas de la República Mexicana, dimensión y características del PV, tipo y espesor de PCM. Mediante valores de fluxes de calor y temperatura se llevará a cabo la evaluación térmica para realizar una propuesta de regulación de temperatura en el PV. Para llevar a cabo este trabajo, se considera la plataforma computacional desarrollada en Cenidet, en el modelado numérico de componentes de edificaciones.

1.9 Productos esperados

- Desarrollar un programa computacional que simule la transferencia de calor en paneles fotovoltaicos con un material de cambio de fase.
- Realizar una tesis de maestría.
- Obtener el grado de maestra en ciencias.
- Escribir el borrador de un artículo.

A continuación se darán mas detalles acerca de los PCM en el Capítulo 2 y se adiciona información acerca de paneles fotovoltaicos en el Anexo 1.

2

CAPÍTULO

Conceptos de materiales de cambio de fase

En este Capítulo se presentan fundamentos teóricos de los materiales de cambio de fase o PCM, que son empleados como un método de almacenamiento de energía para ayudar a regular la temperatura en edificaciones y sistemas que lo requieran, en este caso el PCM es empleado para regular la temperatura de paneles fotovoltaicos.

Se mencionan los materiales más utilizados, las ventajas y desventajas de utilizarlos, así como las especificaciones que deben cumplir para ser eficientes. Finalmente se describen algunos métodos matemáticos empleados para resolver el comportamiento de los PCM en simulaciones numéricas.

2.1 Principio de cambio de fase

La estructura molecular y las fuerzas de unión determinan la forma en la cual las moléculas absorben energía y sus propiedades químicas. Cada fuerza intermolecular define la configuración de las propiedades del sistema como presión de vapor, fugacidad, calor latente, vaporización, etc.

La existencia de los diferentes estados de la materia (sólido, líquido y gaseoso) tanto en su composición pura como en mezclas está relacionado con tales fuerzas intermoleculares y con los efectos de la presión, temperatura y su composición. En la Figura 2.1 se muestra una representación ilustrativa de los

distintos estados de la materia a nivel molecular. Por ejemplo, en el estado sólido éstas fuerzas intermoleculares son mucho más grandes que la energía cinética de las moléculas. Son comparables en el estado líquido y débiles en un gas a baja presión.

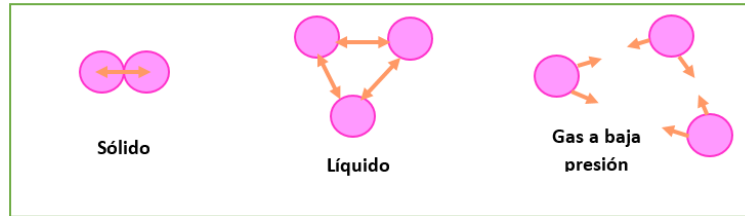


Figura 2.1. Representación ilustrativa a nivel molecular de los distintos estados de la materia.

Por lo tanto, el comportamiento de las fases en una mezcla será determinado por la interacción molecular entre las fases involucradas. Durante la fase sólida las moléculas vibran alrededor de posiciones fijas de equilibrio, mientras que en la fase líquida estas moléculas deben permanecer entre las posiciones de equilibrio. La manifestación macroscópica de estas vibraciones de energía es conocida como energía térmica, medida como temperatura.

Para pasar del estado sólido a líquido se debe absorber cierta cantidad de energía, en orden de separar las fuerzas de cohesión que mantienen la estructura sólida. Esta energía se conoce como calor latente de cambio de fase, y representa la diferencia en la energía térmica (entalpía) entre la fase líquida y sólida.

Con lo anterior se puede concluir que el cambio de fase es la absorción o remoción de calor latente que tendrá lugar a una temperatura a la que la estabilidad de la fase cambie a otra fase basado en la energía disponible. La temperatura de cambio de fase (o temperatura de punto de fusión T_m) depende de la presión. A una presión fija o presión constante T_m puede ser un valor fijo particular o en función de otra variable termodinámica.

2.2 Zona de interface

La región de transición en la que el sólido y líquido coexisten se llama interface. El espesor de la interface puede variar desde un par de Angstroms a un par de centímetros, y su microestructura suele ser muy compleja, dependiendo de varios factores: el mismo material, la cantidad de enfriamiento, el gradiente de temperatura, etc.

Los tipos de interface que suelen presentarse son los que se muestran en la Figura 2.2:

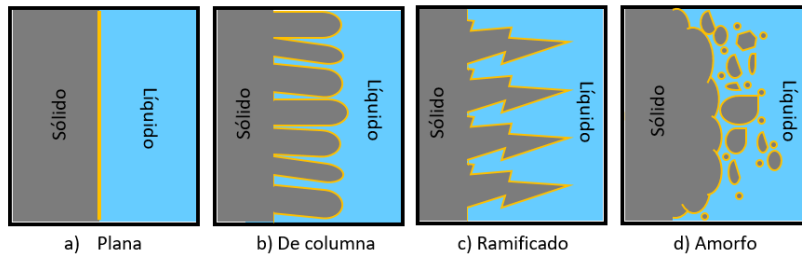


Figura 2.2. Formas de interfaces comunes.

El tipo de interface plana solo aparece en materiales puros bajo condiciones ordinarias de enfriamiento y se considera un espesor de la interface despreciable.

En el caso del proceso de solidificación se involucra una región sólida, una líquida y una interface sólida-líquida que también es conocida como "mushy region", la cual ocurre cuando hay un equilibrio de temperatura en la interface.

Para poder modelar los problemas de cambio de fase deben realizarse ciertas consideraciones para tratar la interface. Durante el proceso de solidificación, el calor latente se libera y se transfiere en dicha región y es transferido por conducción y advección hacia la parte líquida.

Cuando nos referimos a sustancias con alto calor de cambio de fase es posible utilizar las iniciales PCM provenientes de "Phase Change Material".

2.3 Materiales de cambio de fase sólido-líquido

Además de requerir una temperatura de cambio de fase adecuada y una gran entalpía de fusión, los materiales de cambio de fase tienen requerimientos físicos, técnicos y económicos.

Requerimientos físicos

Entre los requerimientos físicos, además de los dos ya mencionados, el PCM debe poseer estabilidad cíclica para que el material pueda absorber o liberar energía tantas veces como lo requiera la aplicación. La baja capacidad de subenfriamiento también es requerida, puesto que si la temperatura de fusión no es la adecuada, el material no podrá volver a adquirir la fase sólida. Así mismo es requerido que el PCM tenga buena conductividad térmica dependiendo de su aplicación.

Requerimientos técnicos

Con respecto a los requerimientos técnicos se pueden enlistar los siguientes: baja presión de vapor y pequeño cambio en el volumen para evitar inconvenientes con el contenedor. Estabilidad química y compatibilidad del PCM con otros materiales para asegurar una larga vida tanto del PCM como del contenedor. Así como restricciones de seguridad para evitar que el material sea tóxico o flamable.

Requerimientos económicos

Entre los requerimientos económicos resulta necesario un bajo precio para ser competitivo con otros métodos de enfriamiento y una buena reciclabilidad por razones medioambientales y económicas.

2.4 Tipos de materiales

Como es bien sabido el mejor material de cambio de fase es el agua, la cual ha sido utilizada para enfriar en forma de hielo. Para temperaturas menores a los 0°C usualmente se utiliza una mezcla de agua con sal.

Cubriendo el intervalo de temperatura de 0 a 130°C suelen utilizarse parafinas, ácidos grasos y alcoholes de azúcar como materiales orgánicos.

Las sales hidratadas y clatratos cubren el intervalo de 0 a 30°C , y para temperaturas arriba de 150°C suelen utilizarse distintas mezclas de sales.

Por otro lado, los materiales inorgánicos cubren un amplio intervalo de temperatura. La principal desventaja de este tipo de materiales es su poca compatibilidad con otros materiales debido a que se puede presentar una corrosión severa entre algunas combinaciones de PCM-metales [Mehling and Cabeza, 2008].

En la Figura 2.3 se muestra una clasificación de los principales tipos de PCM existentes y posterior se da una breve descripción de algunos de ellos.

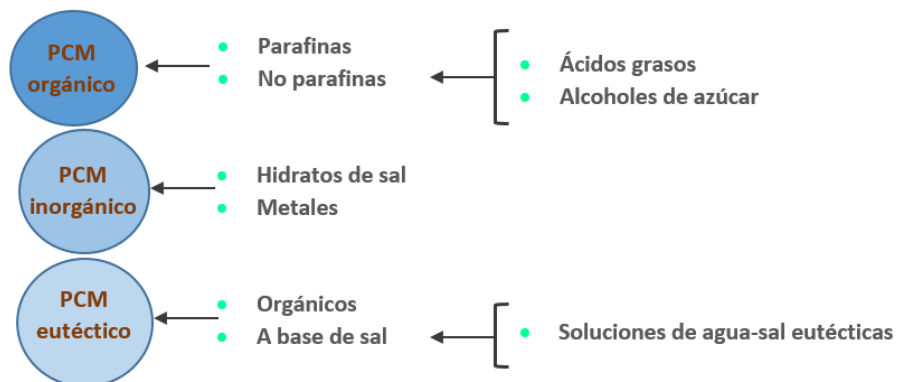


Figura 2.3. Clasificación de los PCM principales.

Parafinas

Los materiales orgánicos usualmente empleados son los PCM de parafinas, su nombre proviene específicamente de los alcanos lineales C_nH_{2n+2} . Las parafinas muestran una buena densidad de almacenamiento con respecto a masa y fusión, y una solidificación congruente con nulo subenfriamiento. La conductividad térmica es baja y la presión de vapor es poco significativa.

Las parafinas son insolubles en agua y no tienen reacción con los agentes químicos más comunes. A temperaturas elevadas las estructuras se pueden romper y resultar en pequeñas cadenas evaporadas, a menudo se utilizan como combustible por su fácil combustión.

La parafina es compatible con los metales y en plásticos puede causar reblandecimiento. Las parafinas comerciales suelen variar el número de hidrocarburos dependiendo de la temperatura que se desee obtener. Por ejemplo para una temperatura de fusión de $28^\circ C$, con una entalpía de 200-245 se emplea un n-octadecano $C_{18}H_{38}$.

Ácidos grasos

Los materiales ácidos grasos $(CH_2CH_2)_{2n}COOH$ presentan únicamente una diferencia en la última molécula con respecto a las parafinas. Ambos materiales poseen temperaturas de fusión similares, la cual puede ir incrementando conforme se varía el espesor de la molécula.

Los ácidos grasos al estar formados por un solo componente no pueden separarse durante el cambio de fase, y al igual que las parafinas no presentan subenfriamiento y tienen una conductividad baja. A diferencia de las parafinas, los ácidos grasos carecen de compatibilidad con los metales.

Alcoholes de azúcar

Los materiales de alcoholes de azúcar $HOCH_2[CH(OH)]_nCH_2OH$ poseen temperaturas de fusión en el intervalo de 90 a $200^\circ C$, la masa específica de entalpía de fusión es alta y por lo tanto su densidad. A diferencia de otros materiales orgánicos presentan subenfriamiento.

Hidratos de sal

Los hidratos de sal están en el rango de temperaturas entre 5 y $130^\circ C$ que consisten en una mezcla de agua y sales que forman estructuras cristalinas.

Soluciones de agua-sal eutécticas

Las soluciones de agua-sal eutécticas tienen temperaturas de fusión por debajo de los $0^\circ C$ debido a que el uso de sal disminuye su temperatura de fusión.

Clatratos

Los clatratos son materiales que no pertenecen al grupo de los orgánicos ni inorgánicos. Los clatratos son estructuras cristalinas con moléculas encerradas en redes cristalinas de otras y no tienen composición estequiométrica.

2.5

Principales problemas en PCM

Como ya ha sido mencionado, los PCM deben cumplir ciertos requerimientos, sin embargo es común que algunos problemas típicos se presenten durante su uso. A continuación se enlistan algunos problemas y sus posibles soluciones [Mehling and Cabeza, 2008]:

- **Separación de fase.** Se presenta en materiales compuestos de más de una sustancia. El problema puede resolverse empleando una mezcla artificial según las concentraciones del PCM. La segunda manera de

resolver el problema es utilizando un proceso de difusión para homogenización, el cual funciona únicamente si la distancia que separa las fases es pequeña, y para que esto suceda se puede utilizar gelificante. Otra forma de reducir esta distancia es utilizando un espesamiento lo cual sucede agregando un material al PCM para incrementar su viscosidad.

- **Subenfriamiento.** Se presenta cuando el material no solidifica inmediatamente por debajo de la temperatura de fusión, pero comienza la cristalización solo después de alcanzar una temperatura muy por debajo de la temperatura de fusión.
- **Encapsulado para prevenir fuga y mejorar la transferencia de calor.** Las dos principales razones por las que el PCM debe ser encapsulado son: para mantener el contenido líquido cuando el PCM se encuentra en esta fase y para evitar el contacto del PCM con el ambiente. La encapsulación puede clasificarse en dos grupos, macroencapsulación y microencapsulación. La primera de ellas se refiere a que el PCM será contenido en un recipiente macroscópico en cantidades de mililitros hasta unos cuantos litros. Estos contenedores generalmente son elaborados de bolsas plásticas o metales. El macroencapsulado es la forma más común de contener al PCM. Algunos ejemplos de macroencapsulado suelen contener PCM de sales hidratadas debido a que los contenedores plásticos no son corroídos por los hidratos de sal. También, los PCM orgánicos pueden emplear este tipo de encapsulado pero debe elegirse con mucho cuidado debido a que los materiales orgánicos pueden suavizar los plásticos. En la microencapsulación se mantiene el PCM sólido o líquido en cantidades de una micra hasta mil micrómetros, actualmente sólo se puede utilizar este tipo de encapsulado en materiales orgánicos.
- **Mejora de propiedades.** El PCM al ser mezclado con otros materiales puede modificar ciertas propiedades, algunas de estas propiedades son:

estabilidad mecánica y conductividad térmica. Un ejemplo de la estabilidad mecánica se observa en las parafinas al mezclarse con polietileno de alta densidad, al mezclarse el nuevo material se llama forma-estabilizada. Otra propiedad que puede ser mejorada es la conductividad térmica, como es sabido todos los materiales no metálicos tienen baja conductividad, y tener una baja conductividad puede resultar en un problema a la hora de querer liberar todo el calor almacenado. Para mejorar esto se puede agregar al PCM algún material con alta conductividad, lo cual ayuda a eliminar el proceso convectivo cuando el PCM se encuentra en la fase líquida. Un ejemplo de ello es en las parafinas con aluminios de diferente porosidad. Un material que suele utilizarse frecuentemente es el grafito, el cual ayuda a mejorar su composición incrementando su conductividad térmica.

2.6 PCM comerciales

En la actualidad existen cerca de 50 PCM disponibles en el mercado los cuales suelen variar su precio dependiendo de su composición química, por ejemplo en el caso de las parafinas usualmente contiene una mezcla de diferentes alcanos puesto que los alcanos puros son muy costosos.

El precio de PCM comercial generalmente está en el rango de 0.5 a $10e/kg$, lo que tiene una gran influencia en la economía de las aplicaciones PCM. Para una estimación aproximada, se puede suponer un precio de energía de $0.05e/kWh$ para el calor. Esto significa que 3600 kJ cuestan $0.05e$. Tomando una densidad de almacenamiento promedio de un PCM de 180 kJ/kg, se necesitan $20kg$ de PCM para almacenar $3600kJ(=1kWh)$, una cantidad de calor que tiene un valor de $0.05e$. Sin embargo, $20kg$ de PCM cuestan al menos $20kg \cdot 0.5e/kg = 10e$. Para almacenar calor con un valor que iguale el costo de la inversión necesaria para el PCM, se necesitan $10e/0.05e = 200$ ciclos de almacenamiento [Mehling and Cabeza, 2008].

Las propiedades físicas y térmicas son la base para el desarrollo y diseño del producto. La propiedad más importante que debe poseer un PCM es la capacidad de absorber calor en un rango pequeño de temperatura. Los métodos para determinar el cambio de calor en cualquier proceso se llaman métodos calorimétricos.

2.7 Métodos matemáticos

Los principales problemas a los que nos enfrentamos en la modelación de PCM es la interface sólida-líquida y la incertidumbre de localización de la frontera de cambio de fase. En la literatura se habla de dos grupos principales para la resolución de este tipo de problemas: el primero de ellos es la malla adaptativa o móvil, el segundo grupo se refiere a la malla fija o dominio fijo.

Malla adaptativa

Tiene restricciones a problemas unidimensionales, además de que no soporta interfaces múltiples. Debido a que el método cambia a cada instante es posible hacer coincidir la interface con los puntos del mallado. Es decir, tiene la ventaja de adaptar la malla al contorno del PCM y ser dinámico en el tiempo, pero posee la desventaja de tener una dificultad en su uso para situaciones complejas (multidimensionales).

Requiere una condición adicional para la interface, dicha condición se conoce como la condición de Stefan, la cual relaciona los flujos de calor a cada lado de la interface con el calor latente liberado o consumido.

La condición de Stefan se muestra en la Ecuación 2.1.

$$\lambda \frac{dT}{dn} \Big|_{\text{liquido}}^{\text{sólido}} = (\pm) \rho L \frac{ds}{dt} \quad (2.1)$$

Donde:

- $n \leftarrow$ Normal a la interface
- $\frac{ds}{dt} \leftarrow$ Velocidad instantánea de la interface s-l en dirección normal (m/s)
- $\lambda \leftarrow$ Conductividad térmica (W/m^2K)
- $L \leftarrow$ Calor latente de fusión (J/kg)

Esta condición describe la velocidad de la interface de la frontera móvil entre el sólido y líquido de la misma sustancia. En el caso del segundo grupo de frontera fija resulta ser matemáticamente y computacionalmente más fácil de implementar. Éste método utiliza la formulación que contempla implícitamente la singularidad causada por una interface móvil del cambio de fase cuya posición se determina posteriormente por el campo de temperaturas. Dentro del grupo de malla fija es común encontrar dos métodos de solución fundamentales; el primero de ellos es el método de entalpía y el método de capacidad de calor efectivo, ambos métodos han sido empleados desde 1970 y ellos permiten utilizar las mismas ecuaciones de conservación para las dos fases y evita resolver la posición frontal de fusión. A continuación se describen con más detalle éstos dos métodos.

Malla fija

Método de entalpía

En el método de la entalpía el problema se simplifica, puesto que como ya se mencionó, las ecuaciones gobernantes son las mismas para la fase sólida y líquida y para las condiciones de la interface se logran automáticamente y se crea una región pastosa entre las dos regiones.

El método de la entalpía consiste en reformular el problema, de forma que la interface sólida-líquida se elimina. Se obtiene una ecuación que se aplica al dominio físico completo y posteriormente se calcula la posición de la interface. Este método nos permite utilizar la malla fija en el dominio completo e

implícitamente involucra la condición de Stefan y permite la posibilidad de tener más de un cambio de fase.

En el modelo de entalpía, la entalpía se utiliza como variable dependiente junto con la temperatura. Las condiciones de la interface se logran y la región “mushy” es creada. Esta región evita discontinuidades que podrían causar inestabilidad numérica.

Método de capacidad de calor efectivo

En éste método el calor latente es aproximado por una gran capacidad calorífica efectiva en el intervalo de temperatura de cambio de fase. La capacidad calorífica efectiva del PCM es directamente proporcional al intervalo de temperatura de fusión o solidificación. Está basado en la idea de incorporar el fenómeno de cambio de fase en el cálculo de capacidad calorífica $C_{P,eff}$, la cual debe incluir el calor latente de cambio de fase. La capacidad calorífica efectiva incrementa y decrece bruscamente con un pico aparente cuando el material se somete al cambio de fase.

El $C_{P,eff}$ del material es directamente proporcional a la energía liberada durante el cambio de fase, y es inversamente proporcional a la amplitud de la temperatura de fusión o solidificación. Definiendo lo anterior se puede expresar como en la Ecuación 2.2.

$$C_{P,eff} = C_{P,PCM} = \begin{cases} \frac{C_{P,s}}{2} & T < (T_m - \Delta T) \\ \frac{C_{P,s} + C_{P,l}}{2} + \frac{L_{ls}}{2\Delta T} & (T_m - \Delta T) \leq T \leq (T_m + \Delta T) \\ C_{P,l} & T > (T_m + \Delta T) \end{cases} \quad (2.2)$$

Donde:

- $C_{P,l}$ ← Calor específico del líquido (J/kgK)
- $C_{P,s}$ ← Calor específico del sólido (J/kgK)
- L_{ls} ← Calor latente asociado al cambio de fase (J/kg)

- $T_m \leftarrow$ Temperatura de cambio de fase (K)
- $\Delta T = T_l - T_s \leftarrow$ Intervalo de cambio de fase (K)
- $T_s \leftarrow$ Temperatura baja (K)
- $T_l \leftarrow$ Temperatura alta (K)

La energía se aporta en forma de calor sensible (entalpía). El calor latente varía dependiendo la fracción líquida, la cual puede ser diferente en el cambio de fase de sólido a líquido y de líquido a sólido. La fracción líquida es la porción de líquido que se tiene en la mezcla y puede expresarse en términos de temperatura. Las propiedades para esta zona se pueden calcular como un promedio entre la propiedad en la fase sólida y en la fase líquida.

$$\phi_{mushy} = \frac{\phi_s + \phi_l}{2} \quad (2.3)$$

Donde ϕ suele tomar los valores para ρ , C_P y λ .

Para el caso en el que el cambio de fase ocurre a cierta temperatura $T_l = T_s$ por lo tanto $\Delta T \approx 0$ se requiere asignar un valor, el cual suele ser pequeño con valores aproximados de 0.2%. El método del C_P efectivo es una mejor opción en comparación con el método de entalpía puesto que no necesita realizarse ninguna modificación en los programas de conducción, únicamente con la opción de propiedad variable resulta suficiente.

Para el desarrollo del presente trabajo será empleado el método de C_P efectivo, elegido por su simplicidad y buenos resultados obtenidos al realizar las actividades de familiarización mostradas en el Capítulo 4 de solución numérica y verificación. Debido a lo anterior el método de C_P efectivo resulta una buena alternativa para resolver el problema de cambio de fase que se presenta en el sistema de estudio; panel fotovoltaico con material de cambio de fase, descrito a detalle a continuación en el Capítulo 3.

3

CAPÍTULO

Modelo Físico y Matemático

En el desarrollo de este Capítulo se presenta el modelo físico y matemático del sistema a analizar. Se realizará la comparación entre dos estudios, para el Estudio 1 el sistema es un panel fotovoltaico con las cinco partes que lo conforman; vidrio, aislante 1, celda fotovoltaica, aislante 2 y cubierta posterior del panel. Para el Estudio 2 se añadirá un material de cambio de fase en la parte posterior del panel, el cual se encuentra contenido entre dos placas absorbedoras y posterior a este una capa de aislante. Ambos estudios se realizan con el fin de obtener un análisis comparativo entre ellos.

En los dos estudios realizados, se analiza la transferencia de calor por conducción. Posteriormente, se realizan las consideraciones para definir el modelo matemático y se establecen las condiciones de frontera del sistema.

Puesto que la mejora en la eficiencia de los sistemas PV-PCM se da en climas cálidos, se seleccionó un clima cálido de la República Mexicana. El clima seleccionado fue el característico de la ciudad de Villahermosa, capital del estado de Tabasco. El 95.5% de la superficie del estado presenta clima cálido húmedo y el 4.5% presenta clima cálido subhúmedo [INEGI, 2020]. De acuerdo a la clasificación de Koppen, el clima de Villahermosa se clasifica como Am (Tropical monzónico) como se observa en la Figura 3.1. Éste se caracteriza por pequeños rangos de temperatura anual, altas temperaturas y abundantes precipitaciones [Britannica, 2020].

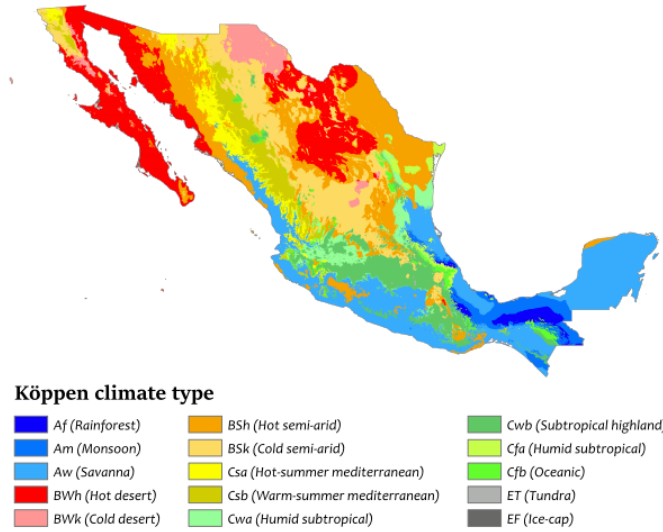


Figura 3.1. Distribución de climas en la República Mexicana.

Su temperatura media anual es de $27^{\circ}C$ [Climate-Data, 2020]. La ciudad de Villahermosa fue seleccionada puesto que es una de las ciudades más representativas del país que además presenta una alta demanda en el sector energético y cuenta con las condiciones necesarias para evaluar el uso de paneles fotovoltaicos implementando material de cambio de fase. Villahermosa cuenta con una radiación horizontal global anual de $1948kWh/m^2$ representado en la Figura 3.2 [Atlas-global, 2020].

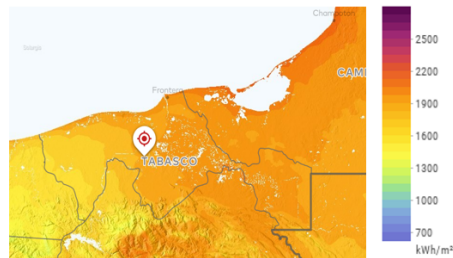


Figura 3.2. Representación territorial de Villahermosa, Tabasco.

3.1 Modelo físico

El panel está seccionado en las cinco partes que lo conforman, cada una de sus partes cumplen el concepto de placa delga, en cambio el PCM debe ser seccionado en el número de partes requeridas para realizar su análisis, es por eso que se colocaron más puntos incógnitas.

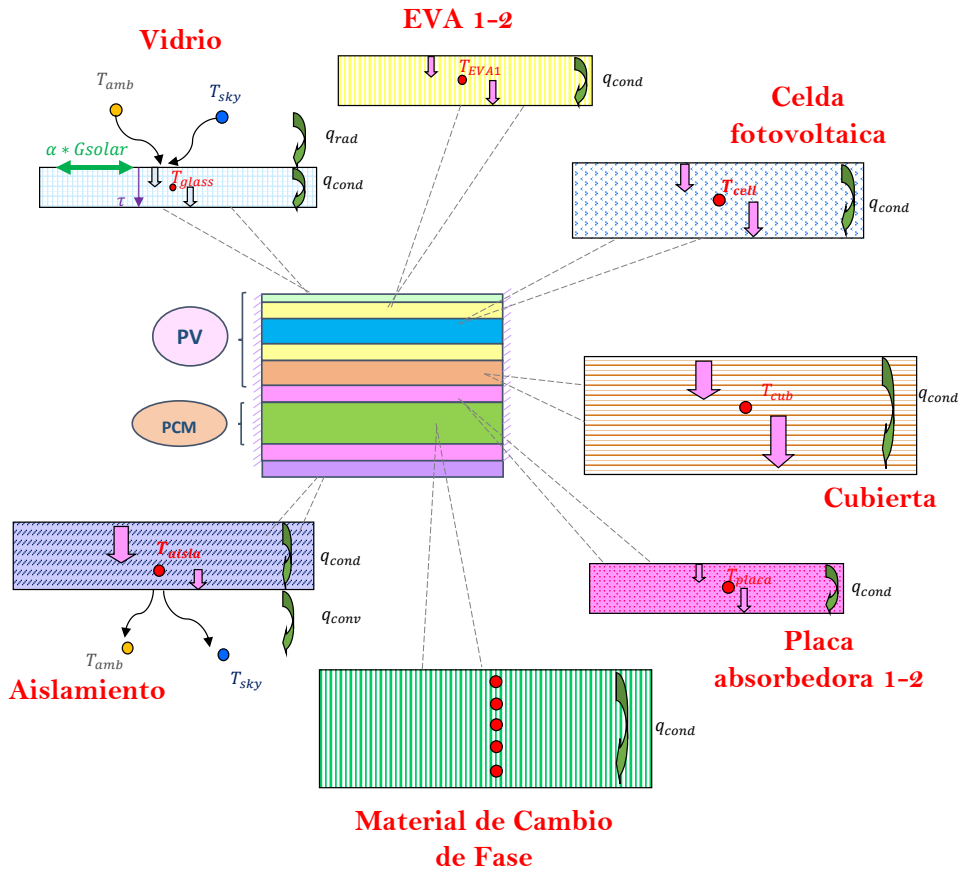


Figura 3.3. Modelo físico del sistema PV-PCM analizado.

La principal ganancia de energía del sistema está dada por una constante solar denotada como $\alpha_1^* G_{solar}$, además fue considerada una ganancia de energía radiativa y convectiva del cielo a la superficie del panel y del ambiente a la superficie, respectivamente. Dado que la primera capa es una superficie transparente se considera la transmisividad de ésta para tomar en cuenta la energía que deja pasar al segundo elemento. En la tercera capa se ubica a la celda fotovoltaica y se adiciona como una pérdida la energía eléctrica producida. En las dos capas siguientes solo se considera conducción.

Posterior a las cinco capas del panel se adiciona el material de cambio de fase, el cual es encapsulado en medio de dos placas absorbedoras. La placa absorbidora 1 se encuentra en contacto directo con la cubierta del panel y se considera conducción entre estas. Después se coloca el material de cambio de fase, el cual será seccionado en siete partes para obtener un mejor análisis cuando ocurra el cambio de fase. Posterior al PCM se coloca la placa absorbidora 2 y finalmente una capa de aislante, el cual se encuentra en contacto con el ambiente y se considera una pérdida radiativa y convectiva del aislante hacia el ambiente.

3.2 Consideraciones del modelo matemático

Para plantear y resolver el modelo matemático del sistema PV-PCM (panel fotovoltaico con material de cambio de fase) se tomaron en cuenta las consideraciones enlistadas a continuación:

1. El modelo fue resuelto empleando el método de Balances Globales de Energía, descrito con mayor detalle en el Capítulo 4.
2. El modelo se planteó como unidimensional y fue resuelto en estado transitorio.
3. Se consideró una distribución uniforme de parámetros en la superficie del panel.

4. Todos los elementos que conforman el sistema cumplen con el concepto de placa delgada.
5. El mecanismo de transferencia de calor analizado en todo el sistema PV-PCM es conducción.
6. El método para resolver las ecuaciones correspondientes al PCM que se emplea es el método de C_P efectivo.

3.3 Desarrollo del modelo matemático

El modelo matemático considera que todos los elementos del sistema cumplen con el concepto de placa delgada, es decir, se considera que todas las partes que lo conforman son de espesores suficientemente pequeños para determinar que la temperatura no cambia en todo el volumen de material.

A continuación, se presenta el tratamiento utilizado para discretizar el término transitorio y posteriormente se plantea el balance de energía empleado para obtener la ecuación correspondiente a cada sección del sistema de análisis.

3.3.1. Discretización del término transitorio

El método de Balances Globales de Energía se basa en el principio de conservación de energía, que establece que el intercambio el flujo térmico o intercambio de calor en un sistema es equivalente a la diferencia entre el calor que entra al sistema y el calor que sale, menos el calor que se almacena en dicho sistema.

$$q_{in} - q_{out} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho C_P T) Hx \quad (3.1)$$

Utilizando una aproximación de diferencia finita atrasada con un grado de error de primer orden

$$\left[\frac{\rho C_P T| - \rho C_P T|_0}{\Delta t} \right] Hx \quad (3.2)$$

Donde $\rho C_P T|_0$ es del tiempo anterior

Considerando a ρC_p constante en el tiempo, al factorizar se obtiene:

$$\frac{\rho C_P}{\Delta t} Hx(T - T^0) = a_P^0 T - a_P^0 T^0 \quad (3.3)$$

Simplificando términos $a_P^0 = \frac{\rho C_P}{\Delta t} Hx$

Donde:

- $\rho \leftarrow$ Densidad del material (kg/m^3)
- $C_P \leftarrow$ Calor específico J/kgK
- $\Delta t \leftarrow$ Incremento en el tiempo (s)
- $Hx \leftarrow$ Espesor del material (m)
- $T \leftarrow$ Temperatura del material en el tiempo actual ($^{\circ}C$)
- $T^0 \leftarrow$ Temperatura del material en el tiempo anterior ($^{\circ}C$)

3.3.2. Balance de energía de los elementos que integran el sistema

Las relaciones empleadas se muestran en el grupo de Ecuaciones 3.4:

$$R_{cond} = \frac{Hx}{2\lambda}$$

$$R_{conv} = \frac{1}{h_{conv}}$$

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad}}$$

$$h_{rad} = \sigma \varepsilon (T_B^2 + T_A^2)(T_B + T_A)$$

$$R^*_{rad} = \frac{1}{h^*_{rad}} \quad (3.4)$$

$$q_{rad} = h^*_{rad}(T_B - T_A)$$

$$h^*rad = hrad \frac{(T_{sky} - T_A)}{T_B - T_A}$$

Balance de energía para los elementos del panel fotovoltaico

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_P T) Hx = [q_{entra} - q_{sale}] \quad (3.5)$$

Elemento 1: Vidrio

$$q_{entra} = \left[\frac{1}{\frac{1}{R_{conv1}} + \frac{1}{R^*rad1} + R_{cond_{glass}}} \right] [T_{env} - T_{glass}] + \alpha^* G_{solar} \quad (3.6)$$

Donde: $G_{solar} = G_D \cos\theta$

Composición del término radiativo:

$$R^*rad1 = \frac{1}{\left[\sigma \varepsilon_1 (T_{glass}^2 + T_{env}^2) (T_{glass} + T_{env}) \right] \left[\frac{T_{sky} - T_{glass}}{T_{env} - T_{glass}} \right]} \quad (3.7)$$

El cálculo del coeficiente convectivo empleado para el cálculo de la resistencia convectiva se obtuvo mediante la ecuación: $h_{conv} = 5.8 + 3.7(V_{wind})$ donde V_{wind} es la velocidad del viento para ese instante del tiempo [McAdams, 1942].

El valor de la temperatura del cielo se calculó mediante la relación por Ma et al., 2018:

$$T_{sky} = 0.037T_{env}^{1.5} + 0.32T_{env} \quad (3.8)$$

$$q_{entra} = \left[\frac{1}{\left[\frac{(R_{conv1})(R^*rad1)}{R_{conv1} + R^*rad1} + R_{cond_{glass}} \right] \leftarrow a_1} \right] [T_{env} - T_{glass}] + \alpha^* G_{solar}$$

$$q_{sale} = \left[\frac{1}{\left[R_{cond_{glass}} + R_{cond_{EVA1}} \right] \leftarrow a_2} \right] [T_{glass} - T_{EVA1}] \quad (3.9)$$

Aplicando balance de energía:

$$\frac{\rho_{glass} C_{P,glass} (T_{glass} - T_{glass}^{old})}{\Delta t} Hx_{glass} = \left[\frac{T_{env} - T_{glass}}{a_1} + \alpha_1^* G_{solar} \right] - \left[\frac{T_{glass} - T_{EVA1}}{a_2} \right] \quad (3.10)$$

Despejando:

$$(a_1 a_2) \left[\frac{\rho_{glass} C_{P,glass} (T_{glass} - T_{glass}^{old})}{\Delta t} \right] Hx_{glass} = a_2 (T_{env} - T_{glass}) + a_1 a_2 \alpha_1^* G_{solar} - a_1 (T_{glass} - T_{EVA1}) \quad (3.11)$$

Factorizando términos y reordenando:

$$(a_1 a_2) (a_P^0) (T_{glass} - T_{glass}^{old}) = (a_1 + a_2) T_{glass} - (a_1) T_{EVA1} - (a_2 T_{env} + a_1 a_2 \alpha_1^* G_{solar}) \quad (3.12)$$

$$(a_1 + a_2 + a_P^0 a_1 a_2) T_{glass} - (a_1) T_{EVA1} = a_2 T_{env} + a_1 a_2 \alpha_1^* G_{solar} + a_P^0 a_1 a_2 T_{glass}^{old} \quad (I)$$

Elemento 2: Etileno Acetato de Vinilo 1 (EVA1)

$$q_{entra} = \left[\frac{1}{[Rcond_{glass} + Rcond_{EVA1}] \leftarrow b_1} \right] [T_{glass} - T_{EVA1}] + \tau_1 \alpha_2^* G_{solar}$$

$$q_{sale} = \left[\frac{1}{[Rcond_{EVA1} + Rcond_{cell}] \leftarrow b_2} \right] [T_{EVA1} - T_{cell}] \quad (3.13)$$

Aplicando balance de energía:

$$\frac{\rho_{EVA1} C_{P,EVA1} (T_{EVA1} - T_{EVA1}^{old})}{\Delta t} Hx_{EVA1} = \left[\frac{T_{glass} - T_{EVA1}}{b_1} + \tau_1 \alpha_2^* G_{solar} \right] - \left[\frac{T_{EVA1} - T_{cell}}{b_2} \right] \quad (3.14)$$

Despejando:

$$(b_1 b_2) \left[\frac{\rho_{EVA1} C_{P,EVA1} (T_{EVA1} - T_{EVA1}^{old})}{\Delta t} \right] Hx_{EVA1} =$$

$$b_2 (T_{glass} - T_{EVA1}) + b_1 b_2 \tau_1 \alpha_2^* G_{solar} - b_1 (T_{EVA1} - T_{cell}) \quad (3.15)$$

Factorizando términos y reordenando:

$$(b_1 b_2) (a_P^0) (T_{EVA1} - T_{EVA1}^{old}) = -(b_2) T_{glass} + (b_1 + b_2) T_{EVA1} - (b_1) T_{cell} - b_1 b_2 \tau_1 \alpha_2^* G_{solar} \quad (3.16)$$

$$-b_2 T_{glass} + (b_1 + b_2 + a_P^0 b_1 b_2) T_{EVA1} - b_1 T_{cell} = b_1 b_2 \tau_1 \alpha_2^* G_{solar}$$

$$+ a_P^0 b_1 b_2 T_{EVA1}^{old} \quad (II)$$

Elemento 3: Celda fotovoltaica

$$q_{entra} = \left[\frac{1}{[Rcond_{EVA1} + Rcond_{cell}] \leftarrow c_1} \right] [T_{EVA1} - T_{cell}]$$

$$q_{sale} = \left[\frac{1}{[Rcond_{cell} + Rcond_{EVA2}] \leftarrow c_2} \right] [T_{cell} - T_{EVA2}] + EPP_{cell} \quad (3.17)$$

Aplicando balance de energía:

$$\frac{\rho_{cell} C_{P,cell} (T_{cell} - T_{cell}^{old})}{\Delta t} Hx_{cell} =$$

$$\left[\frac{T_{EVA1} - T_{cell}}{c_1} \right] - \left[\frac{T_{cell} - T_{EVA2}}{c_2} + EPP_{cell} \right] \quad (3.18)$$

Despejando:

$$(c_1 c_2) \left[\frac{\rho_{cell} C_{P,cell} (T_{cell} - T_{cell}^{old})}{\Delta t} \right] Hx_{cell} =$$

$$c_2 (T_{EVA1} - T_{cell}) - c_1 (T_{cell} - T_{EVA2}) + (c_1 c_2 EPP_{cell}) \quad (3.19)$$

Factorizando términos y reordenando:

$$(c_1 c_2) (a_P^0) (T_{cell} - T_{cell}^{old}) = -(c_2) T_{EVA1} + (c_1 + c_2) T_{cell} - c_1 T_{EVA2} + c_1 c_2 EPP_{cell} \quad (3.20)$$

$$-c_2 T_{EVA1} + (c_1 + c_2 + a_P^0 c_1 c_2) T_{cell} - c_1 T_{EVA2} = -c_1 c_2 EPP_{cell}$$

$$+ a_P^0 c_1 c_2 T_{cell}^{old} \quad (III)$$

Elemento 4: Etileno Acetato de Vinilo 2 (EVA2)

$$q_{entra} = \left[\frac{1}{[Rcond_{cell} + Rcond_{EVA2}] \leftarrow d_1} \right] [T_{cell} - T_{EVA2}]$$

$$q_{sale} = \left[\frac{1}{[Rcond_{EVA2} + Rcond_{cov}] \leftarrow d_2} \right] [T_{EVA2} - T_{cov}] \quad (3.21)$$

Aplicando balance de energía:

$$\frac{\rho_{EVA2} C_{P,EVA2} (T_{EVA2} - T_{EVA2}^{old})}{\Delta t} Hx_{EVA2} =$$

$$\left[\frac{T_{cell} - T_{EVA2}}{d_1} \right] - \left[\frac{T_{EVA2} - T_{cov}}{d_2} \right] \quad (3.22)$$

Despejando:

$$(d_1 d_2) \left[\frac{\rho_{EVA2} C_{P,EVA2} (T_{EVA2} - T_{EVA2}^{old})}{\Delta t} \right] Hx_{EVA2} =$$

$$d_2 (T_{cell} - T_{EVA2}) - d_1 (T_{EVA2} - T_{cov}) \quad (3.23)$$

Factorizando términos y reordenando:

$$(d_1 d_2)(a_P^0)(T_{EVA2} - T_{EVA2}^{old}) = -(d_2)T_{cell} + (d_1 + d_2)T_{EVA2} - d_1 T_{cov} \quad (3.24)$$

$$-d_2 T_{cell} + (d_1 + d_2 + a_P^0 d_1 d_2)T_{EVA2} - d_1 T_{cov} = a_P^0 d_1 d_2 T_{EVA2}^{old} \quad (IV)$$

Elemento 5: Cubierta posterior del panel

$$q_{entra} = \left[\frac{1}{[Rcond_{EVA2} + Rcond_{cov}] \leftarrow e_1} \right] [T_{EVA2} - T_{cov}]$$

$$q_{sale} = \left[\frac{1}{[Rcond_{cov} + Rcond_{Pabs1}] \leftarrow e_2} \right] [T_{cov} - T_{Pabs1}] \quad (3.25)$$

Aplicando balance de energía:

$$\frac{\rho_{cov} C_{P,cov} (T_{cov} - T_{cov}^{old})}{\Delta t} Hx_{cov} =$$

$$\left[\frac{T_{EVA2} - T_{cov}}{e_1} \right] - \left[\frac{T_{cov} - T_{Pabs1}}{e_2} \right] \quad (3.26)$$

Despejando:

$$(e_1 e_2) \left[\frac{\rho_{cov} C_{P,cov} (T_{cov} - T_{cov}^{old})}{\Delta t} \right] Hx_{cov} =$$

$$e_2 (T_{EVA2} - T_{cov}) - e_1 (T_{cov} - T_{Pabs1}) \quad (3.27)$$

Factorizando términos y reordenando:

$$(e_1 e_2)(a_P^0)(T_{cov} - T_{cov}^{old}) = -(e_2)T_{EVA2} + (e_1 + e_2)T_{cov} - e_1 T_{Pabs1} \quad (3.28)$$

$$-e_2 T_{EVA2} + (e_1 + e_2 + a_P^0 e_1 e_2)T_{cov} - e_1 T_{Pabs1} = a_P^0 e_1 e_2 T_{cov}^{old} \quad (V)$$

Balance de energía para la placa absorbedora 1

Elemento 6: Primera placa absorbedora

$$q_{entra} = \left[\frac{1}{[Rcond_{cov} + Rcond_{Pabs1}] \leftarrow f_1} \right] [T_{cov} - T_{Pabs1}]$$

$$q_{sale} = \left[\frac{1}{[Rcond_{Pabs1} + Rcond_{PCM1}] \leftarrow f_2} \right] [T_{Pabs1} - T_{PCM1}] \quad (3.29)$$

Aplicando balance de energía:

$$\frac{\rho_{Pabs1} C_{P,Pabs1} (T_{Pabs1} - T_{Pabs1}^{old})}{\Delta t} Hx_{Pabs1} =$$

$$\left[\frac{T_{cov} - T_{Pabs1}}{f_1} \right] - \left[\frac{T_{Pabs1} - T_{PCM1}}{f_2} \right] \quad (3.30)$$

Despejando:

$$(f_1 f_2) \left[\frac{\rho_{Pabs1} C_{P,Pabs1} (T_{Pabs1} - T_{Pabs1}^{old})}{\Delta t} \right] Hx_{Pabs1} =$$

$$f_2 (T_{cov} - T_{Pabs1}) - f_1 (T_{Pabs1} - T_{PCM1}) \quad (3.31)$$

Factorizando términos y reordenando:

$$(f_1 f_2) (a_P^0) (T_{Pabs1} - T_{Pabs1}^{old}) = -(f_2) T_{cov} + (f_1 + f_2) T_{Pabs1} - f_1 T_{PCM1} \quad (3.32)$$

$$-f_2 T_{cov} + (f_1 + f_2 + a_P^0 f_1 f_2) T_{Pabs1} - f_1 T_{PCM1} = a_P^0 f_1 f_2 T_{Pabs1}^{old} \quad (VI)$$

Balance de energía para el material de cambio de fase (PCM)

Durante el proceso de cambio de fase de sólido-líquido se presenta una región conocida como “zona mushy” o zona pastosa en la que hay una fracción de material sólido y una fracción de material líquido.

En la parte sólida se presenta transferencia de calor por difusión, en la zona líquida se presenta convección y en la zona de mezcla se presentan ambas. Debido a que los espesores de PCM que se utilizan son muy pequeños se considera únicamente el efecto difusivo, puesto que en estudios realizados se han encontrado desviaciones de aproximadamente 5% al involucrar el efecto convectivo [Moraga et al., 2016].

El modelo matemático será el mismo para la parte sólida y líquida, lo único variable serán sus propiedades (λ, C_P, ρ) y se sabrá en qué zona se encuentra debido a su temperatura. Para este caso en particular el PCM se seccionó entre siete partes, es decir se obtuvieron siete ecuaciones para representar su comportamiento (ecuación 7 a 13), el número de elemento entre el cual se requiere dividir su espesor será distinto de acuerdo al espesor total de material que se tenga y al tipo de PCM que se analice, dichas ecuaciones podrán ser aplicadas solo después de realizar la evaluación de la temperatura correspondiente a cada elemento.

Elemento 7: Primera capa de PCM

$$q_{entra} = \left[\frac{1}{[Rcond_{Pabs1} + Rcond_{PCM1}] \leftarrow g_1} \right] [T_{Pabs1} - T_{PCM1}]$$

$$q_{sale} = \left[\frac{1}{[Rcond_{PCM1} + Rcond_{PCM2}] \leftarrow g_2} \right] [T_{PCM1} - T_{PCM2}] \quad (3.33)$$

Aplicando balance de energía:

$$\frac{\rho_{PCM1} C_{P,PCM1} (T_{PCM1} - T_{PCM1}^{old})}{\Delta t} Hx_{PCM1} = \left[\frac{T_{Pabs1} - T_{PCM1}}{g_1} \right] - \left[\frac{T_{PCM1} - T_{PCM2}}{g_2} \right] \quad (3.34)$$

Despejando:

$$(g_1 g_2) \left[\frac{\rho_{PCM1} C_{P,PCM1} (T_{PCM1} - T_{PCM1}^{old})}{\Delta t} \right] Hx_{PCM1} = g_2 (T_{Pabs1} - T_{PCM1}) - g_1 (T_{PCM1} - T_{PCM2}) \quad (3.35)$$

Factorizando términos y reordenando:

$$(g_1 g_2) (a_P^0) (T_{PCM1} - T_{PCM1}^{old}) = -(g_2) T_{Pabs1} + (g_1 + g_2) T_{PCM1} - g_1 T_{PCM2} \quad (3.36)$$

$$-g_2 T_{Pabs1} + (g_1 + g_2 + a_P^0 g_1 g_2) T_{PCM1} - g_1 T_{PCM2} = a_P^0 g_1 g_2 T_{PCM1}^{old} \quad (VII)$$

Elemento 8: Segunda capa de PCM

$$q_{entra} = \left[\frac{1}{[Rcond_{PCM1} + Rcond_{PCM2}] \leftarrow h_1} \right] [T_{PCM1} - T_{PCM2}]$$

$$q_{sale} = \left[\frac{1}{[Rcond_{PCM2} + Rcond_{PCM3}] \leftarrow h_2} \right] [T_{PCM2} - T_{PCM3}] \quad (3.37)$$

Aplicando balance de energía:

$$\frac{\rho_{PCM2}C_{P,PCM2}(T_{PCM2} - T_{PCM2}^{old})}{\Delta t} Hx_{PCM2} = \left[\frac{T_{PCM1} - T_{PCM2}}{h_1} \right] - \left[\frac{T_{PCM2} - T_{PCM3}}{h_2} \right] \quad (3.38)$$

Despejando:

$$(h_1 h_2) \left[\frac{\rho_{PCM2}C_{P,PCM2}(T_{PCM2} - T_{PCM2}^{old})}{\Delta t} \right] Hx_{PCM2} = h_2(T_{PCM1} - T_{PCM2}) - h_1(T_{PCM2} - T_{PCM3}) \quad (3.39)$$

Factorizando términos y reordenando:

$$(h_1 h_2)(a_P^0)(T_{PCM2} - T_{PCM2}^{old}) = -(h_2)T_{PCM1} + (h_1 + h_2)T_{PCM2} - h_1 T_{PCM3} \quad (3.40)$$

$$-h_2 T_{PCM1} + (h_1 + h_2 + a_P^0 h_1 h_2) T_{PCM2} - h_1 T_{PCM3} = a_P^0 h_1 h_2 T_{PCM2}^{old} \quad (VIII)$$

Por efectos de simplificación el desarrollo de las ecuaciones IX a XII será omitido debido a que presenta el mismo procedimiento que el elemento 8.

$$-i_2 T_{PCM2} + (i_1 + i_2 + a_P^0 i_1 i_2) T_{PCM3} - i_1 T_{PCM4} = a_P^0 i_1 i_2 T_{PCM3}^{old} \quad (IX)$$

$$-j_2 T_{PCM3} + (j_1 + j_2 + a_P^0 j_1 j_2) T_{PCM4} - j_1 T_{PCM5} = a_P^0 j_1 j_2 T_{PCM4}^{old} \quad (X)$$

$$-k_2 T_{PCM4} + (k_1 + k_2 + a_P^0 k_1 k_2) T_{PCM5} - k_1 T_{PCM6} = a_P^0 k_1 k_2 T_{PCM5}^{old} \quad (XI)$$

$$-l_2 T_{PCM5} + (l_1 + l_2 + a_P^0 l_1 l_2) T_{PCM6} - l_1 T_{PCM7} = a_P^0 l_1 l_2 T_{PCM6}^{old} \quad (XII)$$

Elemento 13: Séptima capa de PCM

$$q_{entra} = \left[\frac{1}{[Rcond_{PCM6} + Rcond_{PCM7}] \leftarrow m_1} \right] [T_{PCM6} - T_{PCM7}]$$

$$q_{sale} = \left[\frac{1}{[Rcond_{PCM7} + Rcond_{Pabs2}] \leftarrow m_2} \right] [T_{PCM7} - T_{Pabs2}] \quad (3.41)$$

Aplicando balance de energía:

$$\frac{\rho_{PCM7} C_{P,PCM7} (T_{PCM7} - T_{PCM7}^{old})}{\Delta t} Hx_{PCM7} =$$

$$\left[\frac{T_{PCM6} - T_{PCM7}}{m_1} \right] - \left[\frac{T_{PCM7} - T_{Pabs2}}{m_2} \right] \quad (3.42)$$

Despejando:

$$(m_1 m_2) \left[\frac{\rho_{PCM7} C_{P,PCM7} (T_{PCM7} - T_{PCM7}^{old})}{\Delta t} \right] Hx_{PCM7} =$$

$$m_2 (T_{PCM6} - T_{PCM7}) - m_1 (T_{PCM7} - T_{Pabs2}) \quad (3.43)$$

Factorizando términos y reordenando:

$$(m_1 m_2) (a_P^0) (T_{PCM7} - T_{PCM7}^{old}) = -(m_2) T_{PCM6} + (m_1 + m_2) T_{PCM7} - m_1 T_{Pabs2} \quad (3.44)$$

$$-m_2 T_{PCM6} + (m_1 + m_2 + a_P^0 m_1 m_2) T_{PCM7} - m_1 T_{Pabs2} =$$

$$a_P^0 m_1 m_2 T_{PCM7}^{old} \quad (XIII)$$

Balance de energía en la placa absorbedora 2

Elemento 14: Segunda placa absorbedora

$$q_{entra} = \left[\frac{1}{[Rcond_{PCM7} + Rcond_{Pabs2}] \leftarrow n_1} \right] [T_{PCM7} - T_{Pabs2}]$$

$$q_{sale} = \left[\frac{1}{[Rcond_{Pabs2} + Rcond_{insu}] \leftarrow n_2} \right] [T_{Pabs2} - T_{insu}] \quad (3.45)$$

Aplicando balance de energía:

$$\frac{\rho_{Pabs2} C_{P,Pabs2} (T_{Pabs2} - T_{Pabs2}^{old})}{\Delta t} Hx_{Pabs2} =$$

$$\left[\frac{T_{PCM7} - T_{Pabs2}}{n_1} \right] - \left[\frac{T_{Pabs2} - T_{Pinsu}}{n_2} \right] \quad (3.46)$$

Despejando:

$$(n_1 n_2) \left[\frac{\rho_{Pabs2} C_{P,Pabs2} (T_{Pabs2} - T_{Pabs2}^{old})}{\Delta t} \right] Hx_{Pabs2} =$$

$$n_2 (T_{PCM7} - T_{Pabs2}) - n_1 (T_{Pabs2} - T_{Pinsu}) \quad (3.47)$$

Factorizando términos y reordenando:

$$(n_1 n_2) (a_P^0) (T_{Pabs2} - T_{Pabs2}^{old}) = -(n_2) T_{PCM7} + (n_1 + n_2) T_{Pabs2} - n_1 T_{Pinsu} \quad (3.48)$$

$$-n_2 T_{PCM7} + (n_1 + n_2 + a_P^0 n_1 n_2) T_{Pabs2} - n_1 T_{insu} = a_P^0 n_1 n_2 T_{Pabs2}^{old} \quad (XIV)$$

Elemento 15: Capa aislante

$$q_{entra} = \left[\frac{1}{[Rcond_{Pabs2} + Rcond_{Pinsu}] \leftarrow o_1} \right] [T_{Pabs2} - T_{insu}]$$

$$q_{sale} = \left[\frac{1}{R_{cond_{insu}} + \frac{1}{R_{conv2}} + \frac{1}{R^*rad_2}} \right] [T_{insu} - T_{env}]$$

$$q_{sale} = \left[\frac{1}{\left[R_{cond_{insu}} + \frac{(R_{conv2})(R^*rad_2)}{R_{conv2} + R^*rad_2} \right] \leftarrow o_2} \right] [T_{insu} - T_{env}] \quad (3.49)$$

Donde:

$$R^*rad_2 = \frac{1}{[\sigma \varepsilon_2 (T_{insu}^2 + T_{env}^2)(T_{insu} + T_{env})] \left[\frac{T_{insu} - T_{sky}}{T_{insu} - T_{env}} \right]} \quad (3.50)$$

Aplicando balance de energía:

$$\frac{\rho_{insu} C_{P,insu} (T_{Pinsu} - T_{insu}^{old})}{\Delta t} Hx_{insu} =$$

$$\left[\frac{T_{Pabs2} - T_{insu}}{o_1} \right] - \left[\frac{T_{insu} - T_{env}}{o_2} \right] \quad (3.51)$$

Despejando:

$$(o_1 o_2) \left[\frac{\rho_{insu} C_{P,insu} (T_{insu} - T_{insu}^{old})}{\Delta t} \right] Hx_{insu} =$$

$$o_2 (T_{Pabs2} - T_{insu}) - o_1 (T_{insu} - T_{env}) \quad (3.52)$$

Factorizando términos y reordenando:

$$(o_1 o_2) (a_P^0) (T_{insu} - T_{insu}^{old}) = -(o_2) T_{Pabs2} + (o_1 + o_2) T_{insu} - o_1 T_{env} \quad (3.53)$$

$$-o_2 T_{Pabs2} + (o_1 + o_2 + a_P^0 o_1 o_2) T_{insu} = o_1 T_{env} + a_P^0 o_1 o_2 T_{insu}^{old} \quad (XV)$$

3.4 Sistema de ecuaciones resultante

3.4.1. Sistema PV-PCM

A continuación se presentan las Ecuaciones obtenidas correspondientes al Estudio 2, panel fotovoltaico acoplado a un material de cambio de fase.

Ecuación de la capa de Vidrio

$$\underbrace{(a_1 + a_2 + a_P^0 a_1 a_2)}_{A_1} T_{glass} - \underbrace{(a_1)}_{A_2} T_{EVA1} = \underbrace{a_2 T_{env} + a_1 a_2 \alpha_1^* G_{solar} + a_P^0 a_1 a_2 T_{glass}^{old}}_{B_1} \quad (I)$$

Ecuación de la capa 1 de Etileno Acetato de Vinilo

$$\underbrace{-b_2}_{A_3} T_{glass} + \underbrace{(b_1 + b_2 + a_P^0 b_1 b_2)}_{A_4} T_{EVA1} - \underbrace{b_1}_{A_5} T_{cell} = \underbrace{b_1 b_2 \tau_1 \alpha_2^* G_{solar} + a_P^0 b_1 b_2 T_{EVA1}^{old}}_{B_2} \quad (II)$$

Ecuación de la Celda Fotovoltaica

$$\underbrace{-c_2}_{A_6} T_{EVA1} + \underbrace{(c_1 + c_2 + a_P^0 c_1 c_2)}_{A_7} T_{cell} - \underbrace{c_1}_{A_8} T_{EVA1} = \underbrace{-c_1 c_2 EPP_{cell} + a_P^0 c_1 c_2 T_{cell}^{old}}_{B_3} \quad (III)$$

Ecuación de la capa 2 de Etileno Acetato de Vinilo

$$\underbrace{-d_2}_{A_9} T_{cell} + \underbrace{(d_1 + d_2 + a_P^0 d_1 d_2)}_{A_{10}} T_{EVA2} - \underbrace{d_1}_{A_{11}} T_{cov} = \underbrace{a_P^0 d_1 d_2 T_{EVA2}^{old}}_{B_4} \quad (IV)$$

Ecuación de la Cubierta posterior del panel

$$\underbrace{-e_2}_{A_{12}} T_{EVA2} + \underbrace{(e_1 + e_2 + a_P^0 e_1 e_2)}_{A_{13}} T_{cov} - \underbrace{e_1}_{A_{14}} T_{Pabs1} = \underbrace{a_P^0 e_1 e_2 T_{cov}^{old}}_{B_5} \quad (V)$$

Ecuación de la primera Placa absorbadora

$$\underbrace{-f_2}_{A_{15}} T_{cov} + \underbrace{(f_1 + f_2 + a_P^0 f_1 f_2)}_{A_{16}} T_{Pabs1} - \underbrace{f_1}_{A_{17}} T_{PCM1} = \underbrace{a_P^0 f_1 f_2 T_{Pabs1}^{old}}_{B_6} \quad (VI)$$

Ecuación de la primera capa de PCM

$$\underbrace{-g_2}_{A_{18}} T_{Pabs1} + \underbrace{(g_1 + g_2 + a_P^0 g_1 g_2)}_{A_{19}} T_{PCM1} - \underbrace{g_1}_{A_{20}} T_{PCM2} = \underbrace{a_P^0 g_1 g_2 T_{PCM1}^{old}}_{B_7} \quad (VII)$$

Ecuación de la segunda capa de PCM

$$\underbrace{-h_2}_{A_{21}} T_{PCM1} + \underbrace{(h_1 + h_2 + a_P^0 h_1 h_2)}_{A_{22}} T_{PCM2} - \underbrace{h_1}_{A_{23}} T_{PCM3} = \underbrace{a_P^0 h_1 h_2 T_{PCM2}^{old}}_{B_8} \quad (VIII)$$

Ecuación de la tercera capa de PCM

$$\underbrace{-i_2}_{A_{24}} T_{PCM2} + \underbrace{(i_1 + i_2 + a_P^0 i_1 i_2)}_{A_{25}} T_{PCM3} - \underbrace{i_1}_{A_{26}} T_{PCM4} = \underbrace{a_P^0 i_1 i_2 T_{PCM3}^{old}}_{B_9} \quad (IX)$$

Ecuación de la cuarta capa de PCM

$$\underbrace{-j_2}_{A_{27}} T_{PCM3} + \underbrace{(j_1 + j_2 + a_P^0 j_1 j_2)}_{A_{28}} T_{PCM4} - \underbrace{j_1}_{A_{29}} T_{PCM5} = \underbrace{a_P^0 j_1 j_2 T_{PCM4}^{old}}_{B_{10}} \quad (X)$$

Ecuación de la quinta capa de PCM

$$\underbrace{-k_2}_{A_{30}} T_{PCM4} + \underbrace{(k_1 + k_2 + a_P^0 k_1 k_2)}_{A_{31}} T_{PCM5} - \underbrace{k_1}_{A_{32}} T_{PCM6} = \underbrace{a_P^0 k_1 k_2 T_{PCM5}^{old}}_{B_{11}} \quad (XI)$$

Ecuación de la sexta capa de PCM

$$\underbrace{-l_2}_{A_{33}} T_{PCM5} + \underbrace{(l_1 + l_2 + a_P^0 l_1 l_2)}_{A_{34}} T_{PCM6} - \underbrace{l_1}_{A_{35}} T_{PCM7} = \underbrace{a_P^0 l_1 l_2 T_{PCM6}^{old}}_{B_{12}} \quad (XII)$$

Ecuación de la séptima capa de PCM

$$\underbrace{-m_2}_{A_{36}} T_{PCM6} + \underbrace{(m_1 + m_2 + a_P^0 m_1 m_2)}_{A_{37}} T_{PCM7} - \underbrace{m_1}_{A_{38}} T_{Pabs2} = \underbrace{a_P^0 m_1 m_2 T_{PCM7}^{old}}_{B_{13}} \quad (XIII)$$

Ecuación de la segunda Placa absorbadora

$$\underbrace{-n_2}_{A_{39}} T_{PCM7} + \underbrace{(n_1 + n_2 + a_P^0 n_1 n_2)}_{A_{40}} T_{Pabs2} - \underbrace{n_1}_{A_{41}} T_{insu} = \underbrace{a_P^0 n_1 n_2 T_{Pabs2}^{old}}_{B_{14}} \quad (XIV)$$

Ecuación del Aislante

$$\underbrace{-o_2}_{A_{42}} T_{Pabs2} + \underbrace{(o_1 + o_2 + a_P^0 o_1 o_2)}_{A_{43}} T_{insu} = \underbrace{o_1 T_{env} + a_P^0 o_1 o_2 T_{insu}^{old}}_{B_{15}} \quad (XV)$$

Matriz resultante del sistema PV-PCM

El sistema de Ecuaciones de (I) a (XV) se puede escribir en forma de matriz como:

$$\begin{pmatrix} A_1 & A_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ A_3 & A_4 & A_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & A_6 & A_7 & A_8 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & A_9 & A_{10} & A_{11} & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 & 0 & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & 0 & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & A_{33} & A_{34} & A_{35} & 0 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{36} & A_{37} & A_{38} & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{39} & A_{40} & A_{41} \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{42} & A_{43} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_{glass} \\ T_{EV A1} \\ T_{cell} \\ T_{EV A2} \\ T_{cov} \\ T_{Pabs1} \\ T_{PCM1} \\ \vdots \\ T_{Pabs2} \\ T_{insu} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \\ B_7 \\ \vdots \\ B_{14} \\ B_{15} \end{pmatrix}$$

3.4.2. Sistema PV

A continuación se presenta el sistema de Ecuaciones resultante correspondiente al Estudio 1, panel fotovoltaico seccionado en las cinco partes que lo conforman. Para este caso se utilizan las cinco primeras Ecuaciones obtenidas del estudio anterior y se realiza un replanteamiento en la Ecuación V puesto que ahora se encuentra expuesta a las condiciones ambientales y es necesario considerar las pérdidas que ocurren a través de ella.

El término modificado es el correspondiente al flujo de calor que sale del panel, ahora considera una pérdida radiativa y convectiva hacia el ambiente.

$$q_{sale} = \left[\frac{1}{R_{cond_{cov}} + \frac{1}{R_{conv_2}} + \frac{1}{R^*rad_2}} \right] [T_{cov} - T_{env}]$$

$$q_{sale} = \left[\frac{1}{\left[R_{cond_{cov}} + \frac{(R_{conv_2})(R^*rad_2)}{R_{conv_2} + R^*rad_2} \right] \leftarrow e_2} \right] [T_{cov} - T_{env}] \quad (3.54)$$

De este modo las Ecuaciones obtenidas para el estudio dos son las siguientes:

Ecuación de la capa de Vidrio

$$\underbrace{(a_1 + a_2 + a_P^0 a_1 a_2)}_{A_1} T_{glass} - \underbrace{(a_1)}_{A_2} T_{EV A1} = \underbrace{a_2 T_{env} + a_1 a_2 \alpha_1^* G_{solar} + a_P^0 a_1 a_2 T_{glass}^{old}}_{B_1} \quad (I)$$

Ecuación de la capa 1 de Etileno Acetato de Vinilo

$$\underbrace{-b_2}_{A_3} T_{glass} + \underbrace{(b_1 + b_2 + a_P^0 b_1 b_2)}_{A_4} T_{EV A1} - \underbrace{b_1}_{A_5} T_{cell} = \underbrace{b_1 b_2 \tau_1 \alpha_2^* G_{solar} + a_P^0 b_1 b_2 T_{EV A1}^{old}}_{B_2} \quad (II)$$

Ecuación de la Celda Fotovoltaica

$$\underbrace{-c_2}_{A_6} T_{EV A1} + \underbrace{(c_1 + c_2 + a_P^0 c_1 c_2)}_{A_7} T_{cell} - \underbrace{c_1}_{A_8} T_{EV A1} = \underbrace{-c_1 c_2 EPP_{cell} + a_P^0 c_1 c_2 T_{cell}^{old}}_{B_3} \quad (III)$$

Ecuación de la capa 2 de Etileno Acetato de Vinilo

$$\underbrace{-d_2}_{A_9} T_{cell} + \underbrace{(d_1 + d_2 + a_P^0 d_1 d_2)}_{A_{10}} T_{EVA2} - \underbrace{d_1}_{A_{11}} T_{cov} = \underbrace{a_P^0 d_1 d_2 T_{EVA2}^{old}}_{B_4} \quad (IV)$$

Ecuación de la Cubierta posterior del panel

$$\underbrace{-e_2}_{A_{12}} T_{EVA2} + \underbrace{(e_1 + e_2 + a_P^0 e_1 e_2)}_{A_{13}} T_{cov} = \underbrace{e_1 T_{env} + a_P^0 e_1 e_2 T_{cov}^{old}}_{B_5} \quad (V)$$

Matriz resultante del sistema PV

$$\begin{pmatrix} A_1 & A_2 & 0 & 0 & 0 \\ A_3 & A_4 & A_5 & 0 & 0 \\ 0 & A_6 & A_7 & A_8 & 0 \\ 0 & 0 & A_9 & A_{10} & A_{11} \\ 0 & 0 & 0 & A_{12} & A_{13} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_{glass} \\ T_{EVA1} \\ T_{cell} \\ T_{EVA2} \\ T_{cov} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{pmatrix}$$

3.5 Diagrama de flujo computacional

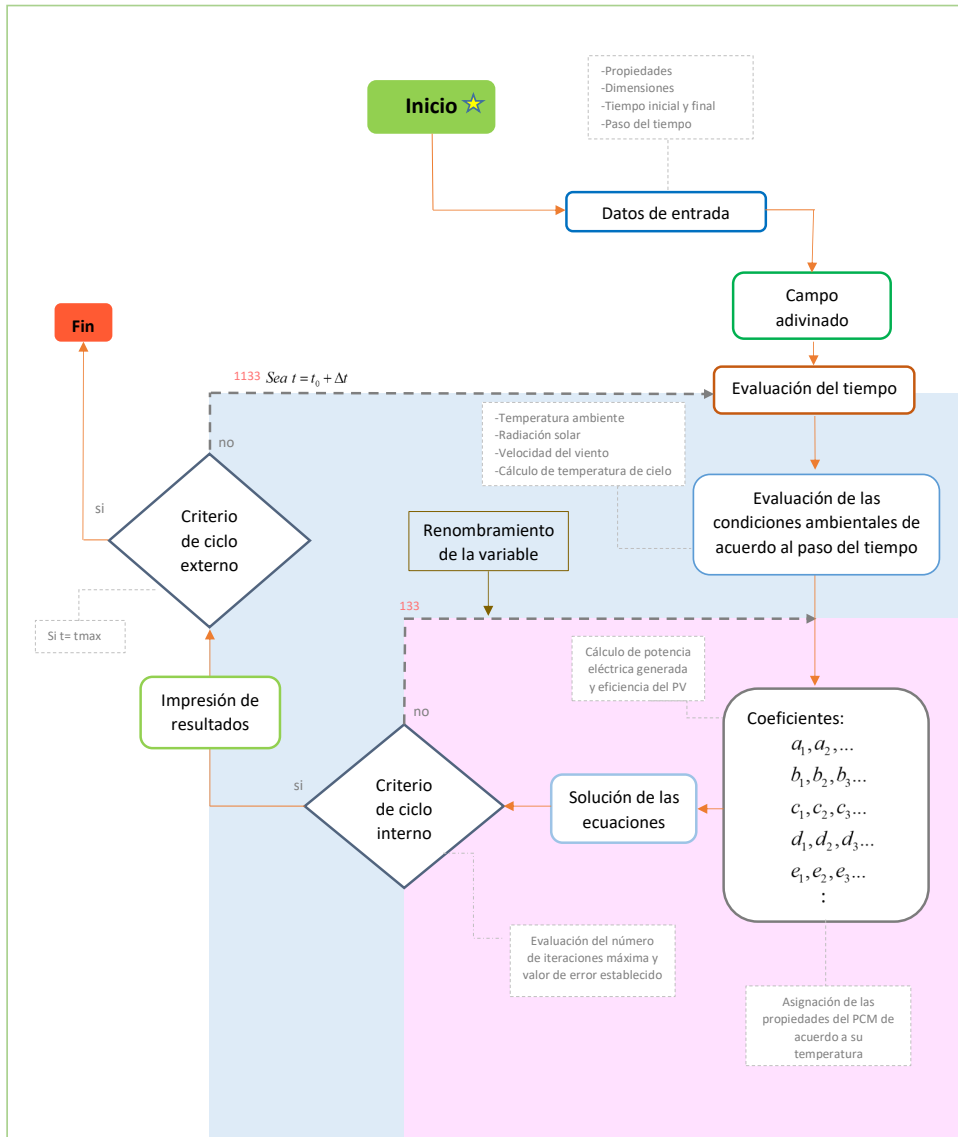


Figura 3.4. Diagrama de flujo de los ciclos computacionales empleados para resolver el problema de un sistema PV-PCM.

3.6 Radiación total absorbida

La energía solar total que incide sobre la unidad de área de una superficie horizontal puede representarse como:

$$G_{solar} = GD \cdot \cos\theta + Gd \quad (3.55)$$

Donde: G_{solar} es la energía solar absorbida, GD la radiación directa, θ el ángulo de incidencia de radiación directa y Gd la radiación difusa [Duffie et al., 2020].

El ángulo de incidencia θ es el ángulo de la radiación directa entre la superficie y la normal a esa superficie. La relación para calcular dicho ángulo en superficies inclinadas se presenta en la siguiente Ecuación:

$$\begin{aligned} \cos\theta = & \sin\delta \sin\phi \cos\beta - \sin\delta \cos\phi \sin\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\phi \cos\beta \cos\omega \\ & + \cos\delta \sin\phi \sin\beta \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega \end{aligned} \quad (3.56)$$

Donde:

- Latitud $\phi \leftarrow$ Ubicación angular al Norte o Sur del ecuador

$$(-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ)$$

- Declinación $\delta \leftarrow$ Posición angular del Sol al mediodía solar con respecto al plano del Ecuador ($-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$)

Puede ser calculado mediante la siguiente relación:

$$\delta = 23.45^\circ \sin[360(284 + n)/365^\circ] \quad (3.57)$$

Siendo n el número de día durante un año

- Declive $\beta \leftarrow$ Ángulo entre el plano de la superficie y la horizontal

$$(0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ)$$

- Ángulo horario $\omega \leftarrow$ Desplazamiento angular del Sol al Este y Oeste del meridiano local debido al movimiento de rotación (15° por hora).
- Ángulo azimutal $\gamma \leftarrow$ Desviación de la proyección en un plano horizontal de la normal a la superficie desde el meridiano local, con cero hacia el Sur, Este negativo y Oeste positivo

$$(-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ)$$

3.7 Producción de energía eléctrica

La producción de energía eléctrica está dada en términos de la temperatura del panel fotovoltaico y la temperatura de referencia dada por las condiciones del diseño [Skoplaki and Palyvos, 2009].

$$EPP_{cell} = \eta_{T_{ref}} G_{solar}(\alpha_1) [1 - \beta_{ref}(T_{cell} - T_{ref})] \quad (3.58)$$

Donde:

- $G_{solar} \leftarrow$ Radiación solar
- $\eta_{T_{ref}} \leftarrow$ Eficiencia del panel fotovoltaico bajo la temperatura de referencia ($T_{ref} = 28^\circ C$ y $\eta_{T_{ref}} = 0.108$)
- $\beta_{ref} \leftarrow$ Coeficiente de temperatura del módulo fotovoltaico, calculado mediante:

$$\beta_{ref} = \frac{1}{T_0 - T_{ref}} \quad (3.59)$$

La fórmula para el cálculo de la eficiencia eléctrica se obtuvo mediante la Ecuación:

$$\eta_{cell} = \eta_{T_{ref}} [1 - \beta_{ref}(T_{cell} - T_{ref})] x 100 \quad (3.60)$$

4

CAPÍTULO

Metodología de solución numérica

En este Capítulo se da una breve descripción del método de Balances Globales de Energía empleado para resolver el sistema de estudio. Se presenta la verificación del método empleando con la realización de diferentes ejercicios que van desde la transferencia de calor unidimensional por conducción hasta problemas que involucran la transferencia de calor conjugada en estado permanente, problemas de multi-material en estado transitorio y problemas que involucran el fenómeno de cambio de fase. De forma adicional, se presenta un análisis de la dependencia temporal para los códigos desarrollados correspondientes al Estudio 1 y Estudio 2 en estado transitorio.

4.1 Método de Balances Globales de Energía

El método de Balances Globales de Energía está basado en la Primera Ley de la Termodinámica que establece que el intercambio del flujo térmico o intercambio de calor en un sistema es equivalente a la diferencia entre el calor que entra al sistema y el calor que sale, más el intercambio de calor en el interior del mismo. La Primera Ley de la Termodinámica también es conocida como el Principio de Conservación de Energía, y establece que, en un sistema o volumen de control, la energía no se crea ni se destruye sólo se transforma en otro tipo de energía y en dicha transformación la energía total del sistema, permanece constante.

El método de Balances Globales de Energía es aplicado para determinar la cantidad de energía que se intercambia y acumula en un sistema desde el punto de vista macroscópico. Es decir, en los balances de energía se analizan los efectos globales del sistema sin prestar mayor interés en la fenomenología que ocurre en el interior del mismo. Siendo de vital importancia la relación que tiene dicho sistema con las condiciones de su entorno, es decir, sus condiciones de frontera.

La analogía del método de Balances Globales de Energía está basada en la analogía de los circuitos eléctricos, específicamente en la Ley de Ohm la cual establece que el voltaje o diferencia de potencial en un sistema es igual a la corriente que circula a través de él, multiplicada por una resistencia eléctrica. Presentando el mismo concepto para un sistema termodinámico, se establece que la diferencia de temperaturas es igual al flujo de calor multiplicado por una resistencia térmica, dicha analogía se muestra en la Figura 4.1. Para la obtención de dichas resistencias térmicas debe tomarse en cuenta el mecanismo de transferencia de calor que esté presente en el sistema.

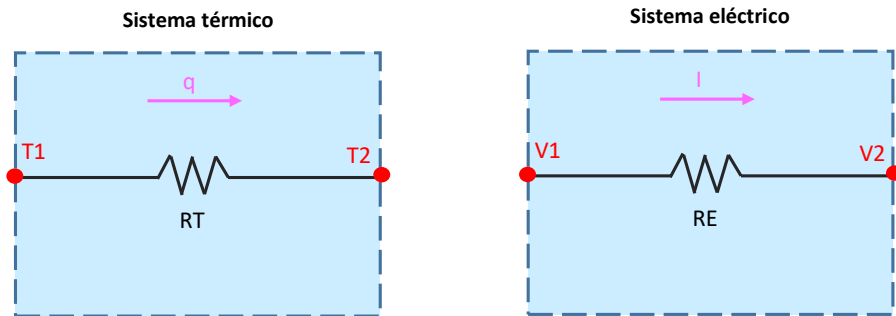


Figura 4.1. Representación del circuito eléctrico correspondiente a un sistema térmico y eléctrico.

4.1.1. Diagrama eléctrico del sistema PV-PCM analizado

A continuación, se presenta el diagrama de resistencias eléctricas empleado para representar el sistema PV-PCM.

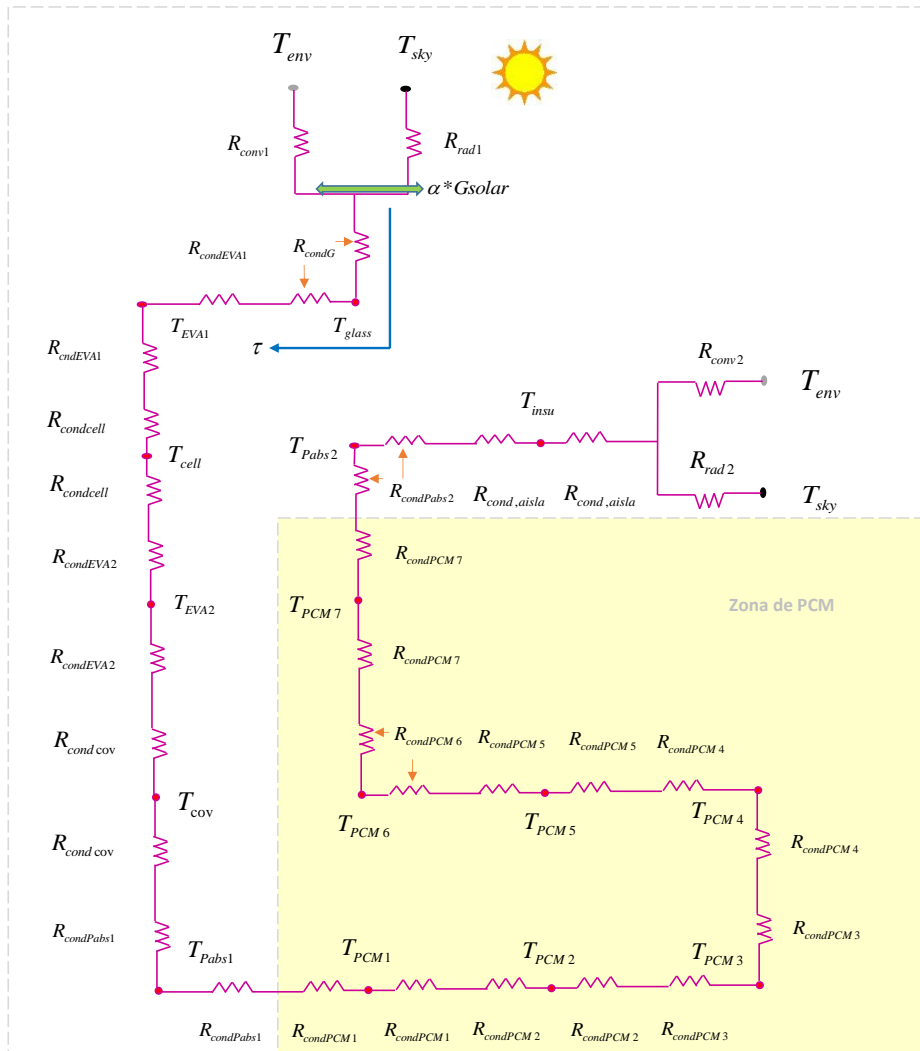


Figura 4.2. Diagrama eléctrico del sistema PV-PCM.

4.2 Verificación de problemas de transferencia de calor por conducción con solución analítica

En esta primera etapa de verificación se presentaron cuatro problemas de conducción de calor para los cuales se obtuvo su solución analítica y se realizó la comparación del resultado analítico con los resultados obtenidos numéricamente al implementar el método de balances de energía.

4.2.1. Caso 1. Barra con un material homogéneo y condiciones de frontera de primera clase en estado permanente

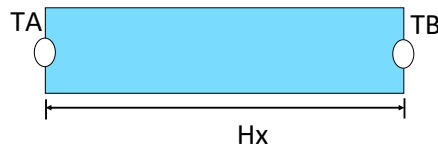


Figura 4.3. Modelo físico del Caso 1.

Modelo matemático

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial T}{\partial x} \right] = 0 \quad \text{para} \quad 0 < x < Hx \quad (4.1)$$

Condiciones de frontera

$$\begin{aligned} T &= TA \quad \text{en} \quad x = 0 \\ T &= TB \quad \text{en} \quad x = Hx \end{aligned} \quad (4.2)$$

Solución analítica obtenida

$$T(x) = \frac{TB - TA}{Hx} x + TA \quad \text{para} \quad 0 \leq x \leq Hx \quad (4.3)$$

Tabla 4.1. Comparación de los resultados analíticos y numéricos: Caso 1

Nodos	Solución analítica	Solución numérica
1	10	10
2	30	30
3	50	50
4	70	70
5	90	90

Los resultados obtenidos son para una $TA = 0^{\circ}C$ y una $TB = 100^{\circ}C$, la longitud Hx es igual a 1 metro, y la conductividad térmica del material es de $\lambda = 1.74W/mK$. El número de iteraciones alcanzado en la solución numérica fue de 110. La comparación entre los resultados obtenidos presenta un grado de error de aproximadamente 0%.

4.2.2. Caso 2. Barra con un material homogéneo y condiciones de frontera de tercera clase en estado permanente

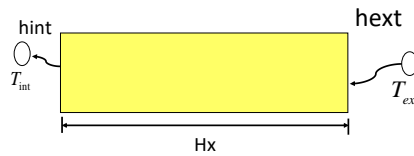


Figura 4.4. Modelo físico del Caso 2.

Modelo matemático

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial T}{\partial x} \right] = 0 \quad \text{para} \quad 0 < x < Hx \quad (4.4)$$

Condiciones de frontera

$$\begin{aligned} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} &= h_{int}(T - T_{int}) \quad \text{en } x = 0 \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial x} &= h_{ext}(T_{ext} - T) \quad \text{en } x = Hx \end{aligned} \quad (4.5)$$

Solución analítica obtenida

$$T(x) = \left[\frac{T_{ext} - T_{int}}{\frac{\lambda}{h_{int}} + \frac{\lambda}{h_{ext}} + Hx} \right] \left[x + \frac{\lambda}{h_{int}} + T_{int} \right] \quad \text{para } 0 \leq x \leq Hx \quad (4.6)$$

Tabla 4.2. Comparación de los resultados analíticos y numéricos: Caso 2

Nodos	Solución analítica	Solución numérica
1	71.32	71.32
2	65.74	65.74
3	60.16	60.16
4	54.59	54.59
5	49.01	49.01

Los resultados obtenidos son para una $T_{ext} = 100^{\circ}C$ y una $T_{int} = 0^{\circ}C$, una $h_{ext} = 3.75$ y $h_{int} = 2.1$, la longitud Hx es igual a 0.5 metros, y la conductividad térmica del material es de $\lambda = 1.74W/mK$. El número de iteraciones alcanzado en la solución numérica fue de 595. La comparación entre los resultados obtenidos presenta un grado de error de aproximadamente 0%.

4.2.3. Caso 3. Barra con dos materiales homogéneos y condiciones de frontera de primera clase en estado permanente

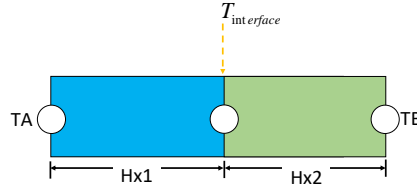


Figura 4.5. Modelo físico del Caso 3.

Modelo matemático

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial T}{\partial x} \right] = 0 \quad \text{para} \quad 0 < x < Hx \quad (4.7)$$

Condiciones de frontera

$$\begin{aligned} T &= TA \quad \text{en} \quad x = 0 \\ T &= TB \quad \text{en} \quad x = Hx \end{aligned} \quad (4.8)$$

Solución analítica obtenida

$$\begin{aligned} T1(x) &= \left[\frac{T_{interface} - T_{int}}{Hx1} \right] x + T_{int} \quad \text{para} \quad 0 \leq x \leq Hx1 \\ T2(x) &= \left[\frac{T_{ext} - T_{interface}}{Hx2 - Hx1} \right] (x - Hx1) + T_{interface} \\ &\quad \text{para} \quad Hx1 \leq x \leq (Hx1 + Hx2) \\ T_{interface} &= \frac{T_{int} + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cdot \frac{Hx1}{(Hx - Hx1)} T_{ext}}{1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cdot \frac{Hx1}{(Hx - Hx1)}} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Tabla 4.3. Comparación de los resultados analíticos y numéricos: Caso 3

Nodos	Solución analítica	Solución numérica
1	9.97	9.97
2	29.93	29.92
3	49.88	49.87
4	69.84	69.82
5	89.79	89.77
6	99.78	99.76
7	99.81	99.78
8	99.83	99.81
9	99.85	99.83
10	99.87	99.85
11	99.87	99.87
12	99.89	99.89
13	99.92	99.92
14	99.94	99.94
15	99.96	99.96

Los resultados obtenidos son para una $TA = 0^{\circ}C$ y una $TB = 100^{\circ}C$, la longitud Hx es igual a 1 y $Hx1$ es igual a 0.3 metros, y la conductividad térmica del material 1 es de $\lambda_1 = 0.039W/mK$ y el material 2 igual a $\lambda_2 = 35W/mK$. El número de iteraciones alcanzado en la solución numérica fue de 769. La comparación entre los resultados obtenidos presenta un grado de error de aproximadamente 0.023%.

4.2.4. Caso 4. Barra con dos materiales homogéneos y condiciones de frontera de tercera clase en estado permanente

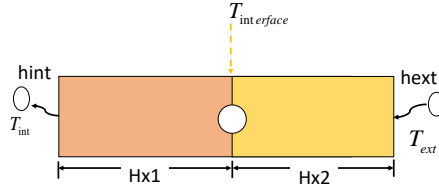


Figura 4.6. Modelo físico del Caso 4.

Modelo matemático

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial T}{\partial x} \right] = 0 \quad \text{para } 0 < x < Hx \quad (4.10)$$

Condiciones de frontera

$$\begin{aligned} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} &= h_{int}(T - T_{int}) \quad \text{en } x = 0 \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial x} &= h_{ext}(T_{ext} - T) \quad \text{en } x = Hx \end{aligned} \quad (4.11)$$

Solución analítica obtenida

$$\begin{aligned} T1(x) &= \left[\frac{T_{interface} - T_{int}}{\frac{\lambda_1}{h_{int}} + Hx1} \right] \left[x + \frac{\lambda_1}{h_{int}} \right] + T_{int} \quad \text{para } 0 \leq x < Hx1 \\ T2(x) &= \left[\frac{T_{ext} - T_{interface}}{\frac{\lambda_2}{h_{ext}} + Hx2} \right] (x - Hx1) + T_{interface} \\ &\text{para } Hx1 < x \leq (Hx1 + Hx2) \\ T_{interface} &= \frac{a_1 T_{int} + a_2 T_{ext}}{a} \end{aligned} \quad (4.12)$$

Donde : $a = a_1 + a_2$, $a_1 = \frac{\lambda_1}{\frac{\lambda_1}{h_{int}} + Hx1}$ y $a_2 = \frac{\lambda_2}{\frac{\lambda_2}{h_{ext}} + Hx2}$

Tabla 4.4. Comparación de los resultados analíticos y numéricos: Caso 4

Nodos	Solución analítica	Solución numérica
1	86.01	86.02
2	68.05	68.06
3	50.10	50.11
4	32.1	32.15
5	14.18	14.19
6	5.19	5.21
7	5.17	5.19
8	5.15	5.17
9	5.13	5.15
10	5.11	5.13
11	5.09	5.11
12	5.07	5.09
13	5.05	5.07
14	5.03	5.05
15	5.01	5.03

Los resultados obtenidos son para una $T_{ext} = 100^{\circ}C$ y una $T_{int} = 0^{\circ}C$, una $h_{ext} = 3.75$ y $h_{int} = 2.1$, la longitud Hx es igual a 1 metro, HX1= 0.30 metros, y la conductividad térmica del material 1 es de $0.039W/mK$ y del material 2 de $35W/mK$. El número de iteraciones alcanzado en la solución numérica fue de 34807. La comparación entre los resultados obtenidos presenta un grado de error de aproximadamente 0.39%.

4.3 Verificación de un problema bidimensional de conducción de calor en estado transitorio con multi material

Para la segunda etapa de verificación se obtuvieron los resultados de un problema de múltiples materiales propuesto por Patankar en 1980. Se modeló por un tiempo máximo de cinco mil segundos y los resultados obtenidos se compararon con los presentados por el autor.

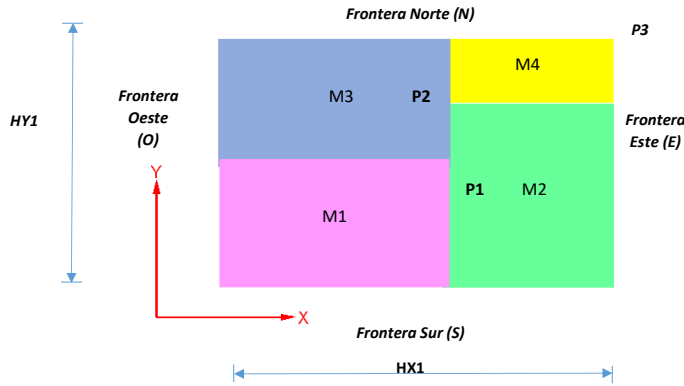


Figura 4.7. Modelo físico del Caso multi material.

Modelo matemático

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho^*T) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right] + g \quad \text{para } 0 < x < Hx \quad (4.13)$$

Condiciones de frontera

$$\text{Norte: } Q_{flux} = 60W/m^2$$

$$\text{Sur: } T_B = 23^\circ C$$

$$\text{Este: } T = 8 + 0.005t^\circ C$$

$$\text{Oeste: } T_A = 33^\circ C, h = 9 \frac{W}{m^2K}$$

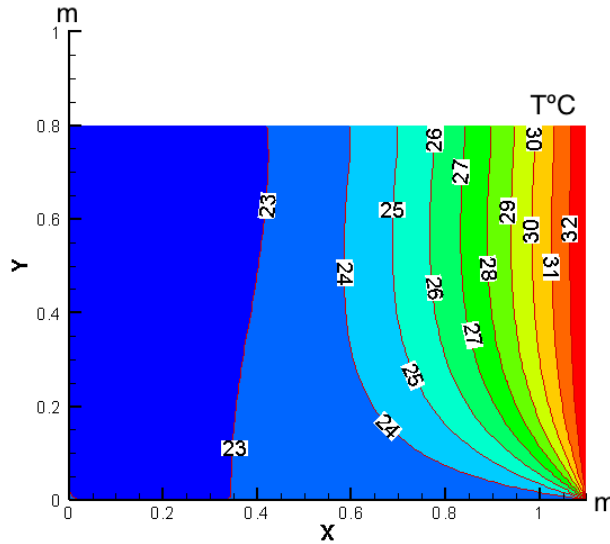


Figura 4.8. Resultados del caso multi material.

Se logró realizar un programa que simula la transferencia de calor por conducción en una placa plana bidimensional, con una solución numérica que emplea el método de Volumen Finito. La placa se compone de cuatro materiales homogéneos, por lo cual se empleó una interpolación armónica media propuesta por Patankar en 1978 para la evaluación del coeficiente de difusión, con el fin de obtener un menor margen de error en comparación con una interpolación lineal, debido a que las propiedades de los materiales son muy diferentes, y se busca que la temperatura se distribuya de forma adecuada [Patankar, 2018].

Con los resultados obtenidos de la independencia de malla se propone un mallado de 70 x 70, con un paso del tiempo de 0.5 s. El problema es resultado en estado transitorio, hasta un tiempo de modelación máximo de 5000 segundos. Se presentan condiciones de frontera de primera, segunda y tercera clase, adicionando una más de primera clase con dependencia temporal. El método de solución de ecuaciones diferenciales utilizado fue el método de Jacobi, y se aplicó una relajación en el mismo para ayudar a obtener más rápido la convergencia del problema.

4.4

Verificación de la solución al problema de cambio de fase de Stefan

Para la tercera etapa de verificación se obtuvieron los resultados al problema de cambio de fase de Stefan resuelto en CFD que fue propuesto por Solomon en 1979. El modelo fue planteado como aislado, con una condición de frontera de primera clase con una temperatura $TA = 95^\circ C$. El método que se utilizó para resolver el modelo matemático fue el método de C_P efectivo y el material de cambio de fase empleado fue un N eicosano. El tiempo de modelación máxima fue de una hora con pasos del tiempo de 1 segundo [Solomon, 1979].

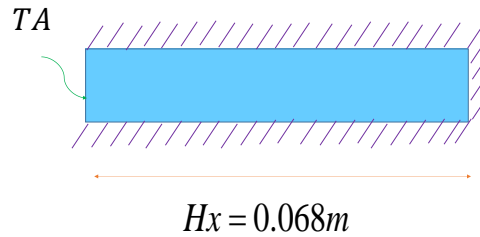


Figura 4.9. Modelo físico del problema de cambio de fase.

Modelo matemático

$$\rho C_{P,eff} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] \quad \text{para } 0 < x < Hx \quad (4.14)$$

Condiciones de frontera

$$\begin{aligned} T &= TA \quad \text{en } x = 0 \\ Q_{flux} &= 0W/m^2 \quad \text{en } x = Hx \end{aligned} \quad (4.15)$$

Tabla 4.5. Propiedades del material en el problema de Stefan

$C_{P,L}$	$2.01kJ/kg^{\circ}C$
$C_{P,S}$	$2.21kJ/kg^{\circ}C$
ρ_L	$778kg/m^3$
ρ_S	$856kg/m^3$
K	$1.5x10^{-4}kJ/m^{\circ}C$
H_L	$247kJ/kg$

Resultados obtenidos

En la Tabla 4.5 mostrada a continuación se presentan los resultados obtenidos del estudio realizado comparado con los resultados mostrados por Solomon en 1917 y los de obtenidos por Arici en 2018. Para la obtención de los valores se empleó una interpolación lineal y dos dígitos después del punto.

Tabla 4.6. Comparación de los resultados obtenidos del problema de Stefan

X(cm)	Solomon (1979)	Arici et. al. (2018)	Estudio realizado	% de error del estudio realizado
0	95	95.00	95.00	0
0.002	86.78	86.60	86.60	0.21
0.004	78.6	78.21	78.59	0.01
0.006	70.52	69.84	70.89	0.52
0.008	62.58	61.51	63.25	1.07
0.01	54.83	53.22	55.78	1.73
0.012	47.29	44.95	48.61	2.79
0.014	40.02	36.70	41.51	3.72
0.016	35.72	35.32	36.29	1.60
0.018	34.18	33.96	34.76	1.70
0.02	32.73	32.65	33.26	1.62
0.022	31.38	31.39	31.87	1.56
0.024	30.13	30.20	30.55	1.39
0.026	28.99	29.09	29.39	1.38
0.028	27.95	28.07	28.33	1.36
0.03	27.01	27.13	27.34	1.36
0.032	26.17	26.29	26.49	1.22
0.034	25.42	25.54	25.73	1.22
0.036	24.75	24.87	25.03	1.13
0.038	24.17	24.28	24.41	0.99
0.04	23.66	23.77	23.88	0.93
0.042	23.21	23.32	23.43	0.95
0.044	22.83	22.93	23.03	0.88
0.046	22.51	22.60	22.68	0.76
0.048	22.23	22.32	22.39	0.72
0.05	22	22.08	22.14	0.64
0.052	21.81	22.88	21.93	0.55
0.054	21.65	21.71	21.76	0.51
0.056	21.52	21.57	21.62	0.46
0.058	21.41	21.45	21.51	0.47
0.06	21.32	21.36	21.47	0.70
0.062	21.25	21.28	21.32	0.33
0.064	21.2	21.22	21.34	0.66
0.066	21.15	21.17	21.29	0.66
0.068	21.12	21.13	21.29	0.80

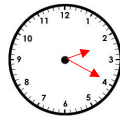
El mayor error porcentual que se obtuvo en el presente estudio fue del 3%, con lo cual se puede concluir que el método de Cp efectivo utilizado resulta adecuado para la solución de problemas de cambio de cambio de fase. El resultado podrá ser mejor aproximado a los resultados presentados por el autor empleando una interpolación de mayor exactitud y más dígitos al realizar las operaciones. Los resultados son los correspondientes a un total de 35 nodos y la convergencia de ciclo interno se obtuvo con un total de 51 iteraciones empleando el método de Jacobi.

4.5 Análisis de independencia temporal del Estudio 1: Panel fotovoltaico

A continuación, se presenta el análisis de independencia temporal realizado para el Estudio 1, sistema de componentes de un panel fotovoltaico o PV. El análisis se realizó tomando en cuenta el día más cálido del año registrado en la ciudad de Villahermosa, Tabasco para el registro de datos meteorológicos ESIME proporcionados por Conagua, correspondiente al 30 de Mayo del 2018 para un horario de 14:10 a 15:10, mismo en el que se registra una temperatura máxima de $39.69^{\circ}C$. En el análisis se registró la temperatura de la celda fotovoltaica obtenida (temperatura de interés para estudio) en intervalos de 10 minutos. Se tomaron en cuenta siete pasos de tiempo: de 1, 5, 10, 15, 30, 45 y 60 segundos. Y se mantuvieron fijos los valores de radiación solar. Se concluyó que el paso del tiempo más adecuado para el Estudio 1 es de 15 segundos.



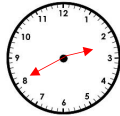
Tiempo: 10 min		
Delta t	Tcell	% Error
1s	38.3357	
5s	38.4161	0.2097
10s	38.5160	0.4703
15s	38.6154	0.7295
30s	38.9107	1.4997
45s	38.8392	1.3133
60s	39.4886	3.0073



Tiempo: 20 min		
Delta t	Tcell	% Error
1s	51.1755	
5s	51.2209	0.0888
10s	51.2778	0.2000
15s	51.3347	0.3111
30s	51.5044	0.6428
45s	51.1403	0.0688
60s	51.8386	1.2959



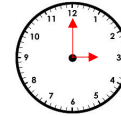
Tiempo: 30 min		
Delta t	Tcell	% Error
1s	60.4274	
5s	60.4476	0.0336
10s	60.4718	0.0735
15s	60.4952	0.1122
30s	60.5632	0.2248
45s	60.6299	0.3351
60s	60.6947	0.4424



Tiempo: 40 min		
Delta t	Tcell	% Error
1s	66.5349	
5s	66.5353	0.0006
10s	66.5344	0.0007
15s	66.5261	0.0031
30s	66.5261	0.0131
45s	66.4381	0.1455
60s	66.5117	0.0348



Tiempo: 50 min		
Delta t	Tcell	% Error
1s	70.1604	
5s	70.1480	0.0178
10s	70.1309	0.0421
15s	70.1131	0.0675
30s	70.0582	0.1457
45s	69.9275	0.3320
60s	69.9496	0.3005



Tiempo: 60 min		
Delta t	Tcell	% Error
1s	71.9370	
5s	71.9269	0.0140
10s	71.9153	0.0301
15s	71.9043	0.0454
30s	71.8734	0.0884
45s	71.8710	0.0917
60s	71.8165	0.0674

4.6

Análisis de independencia temporal del Estudio 2: Panel fotovoltaico compuesto con PCM

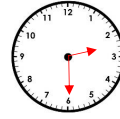
A continuación se presenta el análisis de independencia temporal realizado para el Estudio 2, sistema acoplado de un panel fotovoltaico con un material de cambio de fase o PCM. Al igual que para el Estudio 1 se tomó en cuenta el día más cálido del año registrado en la ciudad de Villahermosa, Tabasco para el registro ESIME correspondiente al 30 de Mayo del 2018 para un horario de 14:10 a 15:10. En el análisis se registró la temperatura de la celda fotovoltaica obtenida en intervalos de 10 minutos. Se tomaron en cuenta siete pasos de tiempo: de 1, 5, 10, 15, 30, 45 y 60 segundos, y una radiación solar constante. El PCM empleado para la evaluación temporal fue un RT28HC, uno de los materiales de cambio de fase propuestos para analizar. Concluyendo que el paso del tiempo más adecuado para el Estudio 2 es de 30 segundos.



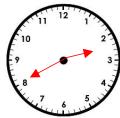
Tiempo: 10 min		
Delta t	Tcell	% Error
1s	33.5343	
5s	33.5895	0.1646
10s	33.6581	0.3690
15s	33.7262	0.5721
30s	33.9283	1.1750
45s	33.8729	1.0098
60s	34.3251	2.3581



Tiempo: 20 min		
Delta t	Tcell	% Error
1s	45.8844	
5s	45.8681	0.0354
10s	45.8945	0.0221
15s	45.8970	0.0275
30s	45.9053	0.0456
45s	45.9147	0.0662
60s	45.9230	0.0842



Tiempo: 30 min		
Delta t	Tcell	% Error
1s	45.8844	
5s	45.8681	0.0354
10s	45.8945	0.0221
15s	45.8970	0.0275
30s	45.9053	0.0456
45s	45.9147	0.0662
60s	45.9230	0.0842



Tiempo: 40 min		
Delta t	Tcell	% Error
1s	47.7395	
5s	47.7116	0.0583
10s	47.7398	0.0006
15s	47.7359	0.0075
30s	47.7244	0.0316
45s	47.6897	0.1042
60s	47.7026	0.0772



Tiempo: 50 min		
Delta t	Tcell	% Error
1s	48.5900	
5s	48.5590	0.0638
10s	48.5893	0.0013
15s	48.5845	0.0112
30s	48.5699	0.0413
45s	48.5358	0.1116
60s	48.5411	0.1005



Tiempo: 60 min		
Delta t	Tcell	% Error
1s	48.9806	
5s	48.9498	0.0628
10s	48.9831	0.0050
15s	48.9809	0.0006
30s	48.9757	0.0099
45s	48.9760	0.0093
60s	48.9684	0.0249

4.7 Selección del PCM óptimo

A continuación, se presentan los perfiles de las temperaturas obtenidas con la implementación de diferentes materiales de cambio de fase, referentes al día más cálido y más frío del año para la ciudad de Villahermosa, Tabasco.

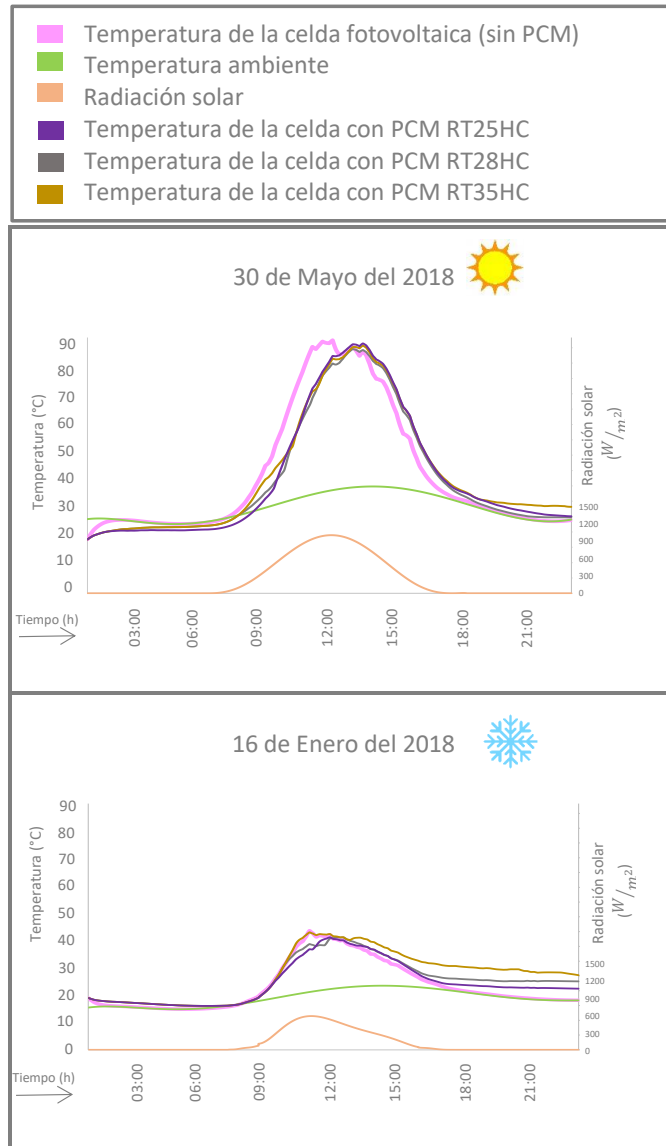


Figura 4.10. Selección del PCM para el Estudio 2.

Tabla 4.7. Propiedades de PCM evaluados

Espesor	$Hx = 55x10^{-3}m$
Densidad de sólido	$\rho_S = 880kg/m^3$
Densidad de líquido	$\rho_L = 770kg/m^3$
C. Específico de sólido	$C_P = 2000J/(kg \cdot K)$
C. Específico de líquido	$C_P = 2000J/(kg \cdot K)$
Conductividad térmica	$\lambda = 0.2W/(m \cdot K)$
PCM	RT35HC
Temperatura de sólido	$T_s = 34^{\circ}C$
Temperatura de líquido	$T_l = 36^{\circ}C$
Calor latente	$Hls = 250000$
PCM	RT28HC
Temperatura de sólido	$T_s = 27^{\circ}C$
Temperatura de líquido	$T_l = 29^{\circ}C$
Calor latente	$Hls = 250000$
PCM	RT25HC
Temperatura de sólido	$T_s = 22^{\circ}C$
Temperatura de líquido	$T_l = 26^{\circ}C$
Calor latente	$Hls = 210000$

Resultados obtenidos

Al comparar los resultados de temperatura de la celda fotovoltaica (línea color rosa) con los obtenidos de los diferentes PCM, a simple vista es posible detectar que se obtiene una mayor disminución de temperatura con el PCM RT28HC, seguido por el RT25HC y finalmente el RT35HC. La selección de los materiales de cambio de fase se realizó de acuerdo a una temperatura cercana a la temperatura óptima de operación de la celda fotovoltaica seleccionada ($28^{\circ}C$). En la Tabla siguiente se muestran los resultados de las temperaturas máximas obtenidas para caso y la diferencia porcentual obtenida.

Tabla 4.8. Resultados de selección del PCM

Día	Temp. PV	Temp. PV-PCM (RT25HC)	Dif. %	Temp. PV-PCM (RT28HC)	Dif. %	Temp. PV-PCM (RT35HC)	Dif. %
C	94.01°C	92.78°C	1.30	90.70°C	3.52	91.96°C	2.18
F	45.94°C	43.4°C	5.50	43.40°C	5.52	45.33°C	1.32

Como es posible observar, la mejora más significativa para ambos días evaluados se presenta con el uso del PCM RT28HC, es por esto que se emplea dicho PCM para la evaluación del sistema PV-PCM o Estudio 2, los resultados obtenidos se presentan a continuación en el Capítulo 5.

5

CAPÍTULO

Resultados de la modelación del sistema PV-PCM

En este Capítulo, se presenta el análisis de los resultados obtenidos de la simulación de un sistema de panel fotovoltaico con la implementación de un material de cambio de fase (PCM). Primero se presentan las propiedades y dimensiones de los componentes del sistema evaluado.

Posteriormente, se muestran los gráficos correspondientes a los perfiles de temperatura, comparando los obtenidos en los Estudios 1 y 2 para los días más cálidos y más fríos de cada mes, correspondientes al año 2018 en la ciudad de Villahermosa, Tabasco.

Asimismo, se muestran los gráficos obtenidos con los valores correspondientes a la Eficiencia eléctrica y a la Potencia eléctrica generada por el sistema para cada día. Finalmente, se presenta un análisis económico que permite visualizar la viabilidad del sistema evaluado.

5.1 Componentes del sistema

A continuación se presentan los elementos que conforman el sistema PV-PCM. Se muestra una ilustración representativa de cada elemento en el cual se adicionan los flujos de calor y posición en que se localizan los nodos de cada temperatura incógnita del elemento evaluado. En la parte inferior de cada sección se adiciona una Tabla con las propiedades y espesores de cada material utilizado.

5.1.1. Vidrio

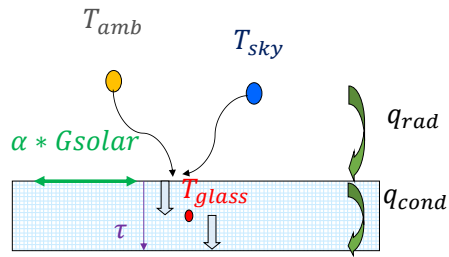


Tabla 5.1. Propiedades del vidrio (Elemento 1)

[Ma et al., 2018, Smith et al., 2014]

Espesor	$Hx = 3.2mm$
Densidad	$\rho = 2500kg/m^3$
Calor específico	$C_P = 750J/(kg \cdot K)$
Conductividad térmica	$\lambda = 1.04W/(m \cdot K)$
Absortividad	$\alpha = 0.05$
Transmisividad	$\tau = 0.95$

5.1.2. Etileno Acetato de Vinilo

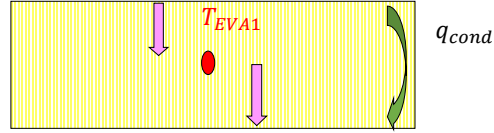


Tabla 5.2. Propiedades de EVA (Elemento 2 y 4)
[Ma et al., 2018, de Oliveira et al., 2018]

Espesor	$Hx = 5mm$
Densidad	$\rho = 935kg/m^3$
Calor específico	$C_P = 2500J/(kg \cdot K)$
Conductividad térmica	$\lambda = 0.29W/(m \cdot K)$
Absortividad	$\alpha = 0.9$

5.1.3. Celda fotovoltaica

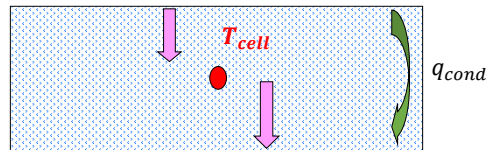


Tabla 5.3. Propiedades de la celda fotovoltaica (Elemento 3) [Ma et al., 2018]

Espesor	$Hx = 0.2mm$
Densidad	$\rho = 2330kg/m^3$
Calor específico	$C_P = 700J/(kg \cdot K)$
Conductividad térmica	$\lambda = 150W/(m \cdot K)$

5.1.4. Placa absorbedora

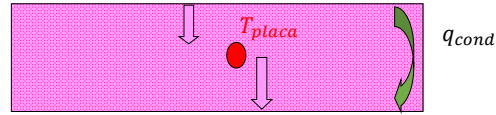


Tabla 5.4. Propiedades de la placa absorbedora (Elemento 6 y 14)
[Smith et al., 2014]

Espesor	$Hx = 1x10^{-4}m$
Densidad	$\rho = 2700kg/m^3$
Calor específico	$C_P = 900J/(kg \cdot K)$
Conductividad térmica	$\lambda = 237W/(m \cdot K)$

5.1.5. Aislamiento

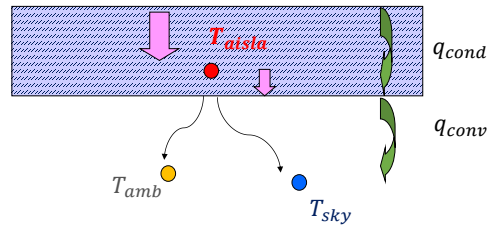


Tabla 5.5. Propiedades de la capa de aislamiento (Elemento 15)
[Preet et al., 2017]

Espesor	$Hx = 5x10^{-3}m$
Densidad	$\rho = 220kg/m^3$
Calor específico	$C_P = 795J/(kg \cdot K)$
Conductividad térmica	$\lambda = 0.04W/(m \cdot K)$

5.1.6. Material de cambio de fase

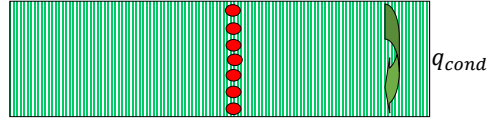


Tabla 5.6. Propiedades del PCM empleado (Elemento 7 a 13)
[Rubitherm-Technologies, 2020]

Espesor	$Hx = 55 \times 10^{-3} m$
Densidad de sólido	$\rho_S = 880 kg/m^3$
Densidad de líquido	$\rho_L = 770 kg/m^3$
C. específico de sólido	$C_{P,s} = 2000 J/(kg \cdot K)$
C. específico de líquido	$C_{P,l} = 2000 J/(kg \cdot K)$
Conductividad térmica	$\lambda = 0.2 W/(m \cdot K)$
Número de divisiones de PCM	$n = 7$
Temperatura de sólido	$T_S = 27^\circ C$
Temperatura de líquido	$T_L = 29^\circ C$
Calor latente	$Hls = 250000$

5.2 Resultados de temperatura

A continuación, se presentan los gráficos correspondientes a las temperaturas obtenidas. Las resultantes del Estudio 1 se muestran en color rosa y las del Estudio 2 en color gris para cada día seleccionado del año, presentando en la Figura 5.1 las correspondientes a los días cálidos de cada mes y en la Figura 5.2 las correspondientes a los días fríos. En color verde se adiciona la temperatura ambiente obtenida mediante los polinomios creados con la información proporcionada por ESIME, la escala de temperaturas se muestra de lado izquierdo de los gráficos. La evaluación se realiza para las 24 horas de cada día, es decir, es posible observar el comportamiento de la temperatura incluso cuando la radiación solar no se encuentra presente. La gráfica correspondiente a la radiación solar se muestra en color salmón en la parte inferior de cada día y su escala se muestra de lado derecho de los gráficos. Para la transformación de la radiación solar horizontal proporcionada por ESIME, se realizó un procedimiento de descomposición solar angular considerando lo mencionado en el apartado del Capítulo 3 sobre el modelo matemático, realizando así su transformación a radiación inclinada. Al obtener los valores correspondientes se calcularon los polinomios para su representación y se seccionó el día en un mínimo de tres partes para que los resultados fueran más exactos. En cuanto a los datos de la velocidad del viento empleados se utilizaron los proporcionados por ESIME, realizando las interpolaciones correspondientes para obtener los datos de cada paso del tiempo.

El PCM empleado es una parafina RT28HC de la marca Rubitherm caracterizado por tener una alta capacidad de almacenamiento de energía térmica y que no presenta efecto de sobreenfriamiento.

Comparación de la temperatura de celda fotovoltaica obtenida con la implementación del PCM RT28HC

Gráficos referentes al día más cálido de cada mes
 Ciudad: Villahermosa, Tabasco 2018

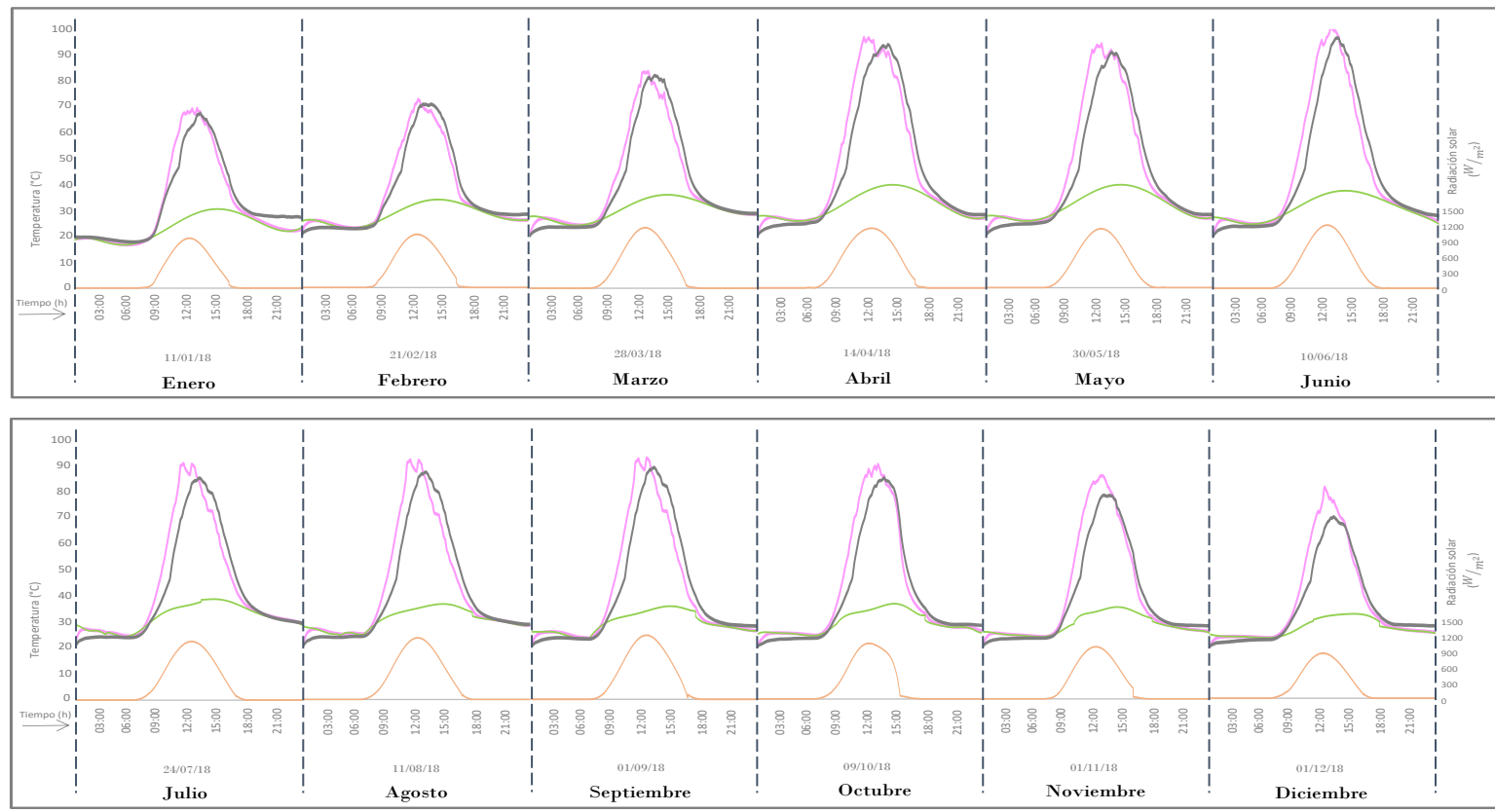
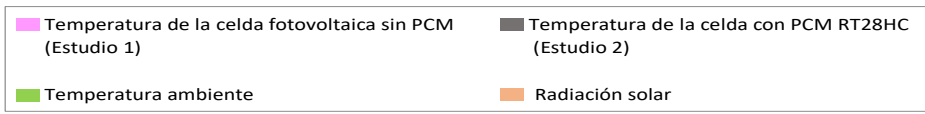


Figura 5.1. Resultados del comportamiento de las temperaturas para días cálidos.

Comparación de la temperatura de celda fotovoltaica obtenida con la implementación del PCM RT28HC

Gráficos referentes al día más frío de cada mes
Ciudad: Villahermosa, Tabasco 2018

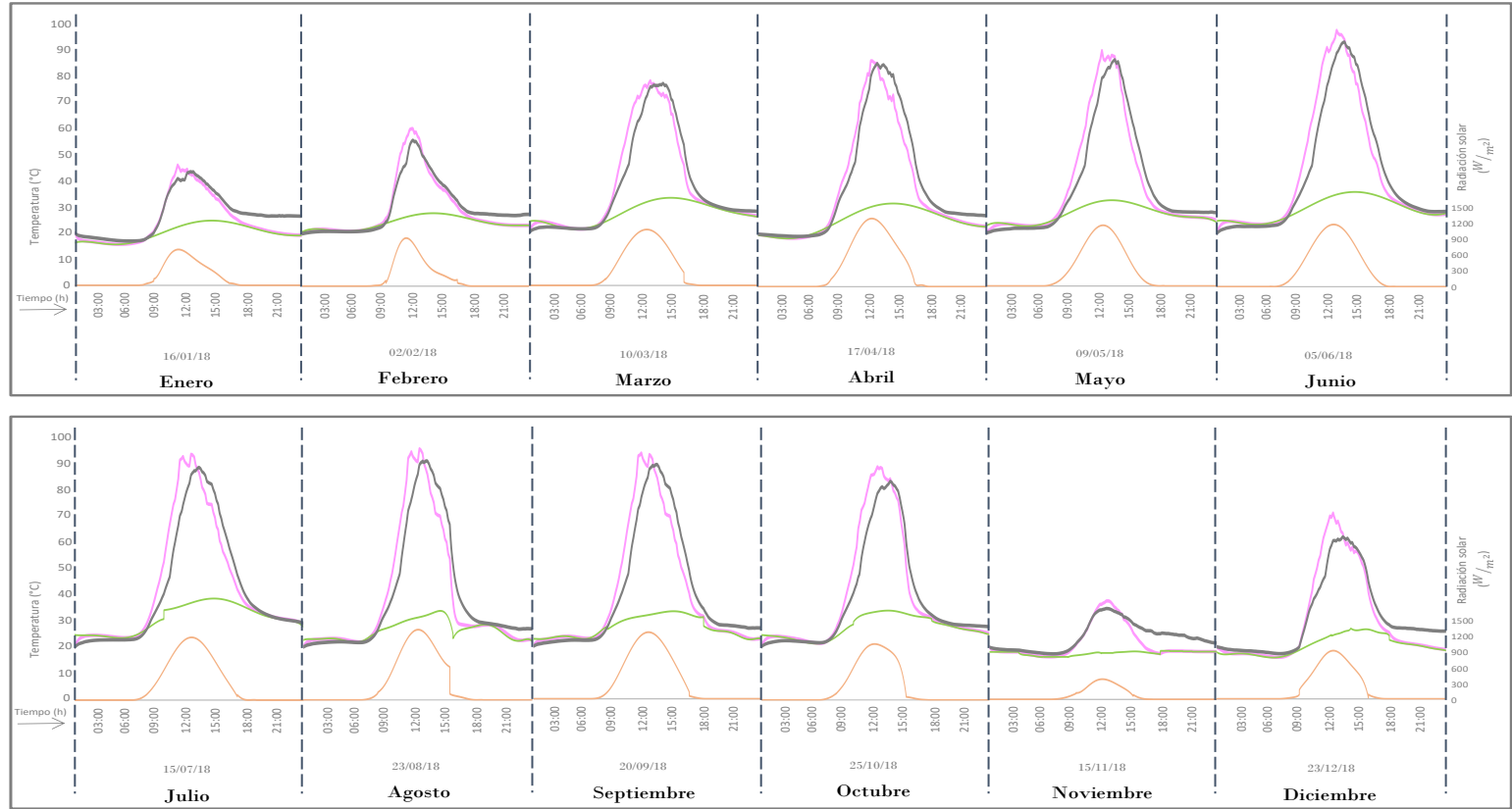
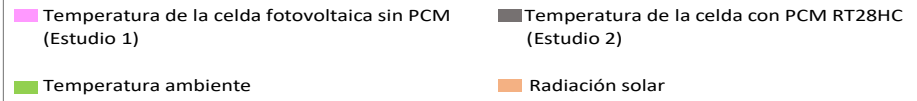


Figura 5.2. Resultados del comportamiento de las temperaturas para días fríos.

Las temperaturas graficadas son las correspondientes a las obtenidas en el componente de Celda Fotovoltaica, componente número 3 en ambos casos de estudio, debido a que al ser la responsable de llevar a cabo el proceso fotoeléctrico requiere una mayor estabilidad en su temperatura de operación. El efecto fotoeléctrico es explicado con mayor detalle en el Anexo A.

A simple vista es posible detectar en las gráficas anteriores que tanto para los días cálidos y fríos, la temperatura obtenida con el uso del PCM presenta una curva con mayor estabilidad, es decir las oscilaciones que ocurren no son tan drásticas como las obtenidas por el panel fotovoltaico sin PCM. De igual manera resulta notorio que la temperatura máxima que la celda alcanza en el pico de la curva es menor para todos los casos de días evaluados. Al analizar más a fondo los resultados de temperaturas de cada caso se logró obtener una disminución en la diferencia de temperaturas máximas alcanzadas por la celda de $11.46^{\circ}C$ para el día con mayor éxito (01 de Diciembre del 2018), y $1.03^{\circ}C$ para el día con menor mejoría (10 de Marzo del 2018). Para el día que registra la temperatura ambiente más elevada del año, 30 de Mayo del 2018, se obtuvo una disminución de $3.31^{\circ}C$ y para el día con menor temperatura ambiente, 16 de Enero del 2018, se obtuvo una diferencia de $2.54^{\circ}C$. Demostrando así que la implementación de un material de cambio de fase en un sistema solar fotovoltaico presenta mejoras durante todos los días del año.

En las primeras horas del día el valor de temperatura de la celda sin PCM adquiere un valor similar a la temperatura ambiente, proceso que se mantiene hasta que comienzan a incidir los primeros valores de radiación solar. Para el caso el Estudio 2 la celda mantiene una temperatura generalmente menor a la temperatura ambiente durante el mismo intervalo de tiempo.

Una vez que la radiación solar se hace presente los valores de temperatura comienzan a elevarse de manera exponencial, sin embargo, la temperatura de la celda del Estudio 2 no se incrementa de una forma tan abrupta, sino que retrasa por algunos minutos más su calentamiento, el proceso de retraso en el aumento de energía es debido a la intervención del material de cambio de fase, puesto que como fue explicado en el Capítulo 2, el PCM tiene la característica

de poseer un alto calor latente con lo cual, la capacidad de almacenar grandes cantidades de energía durante su proceso de cambio de fase es mayor. Para el caso particular del PCM seleccionado RT28HC el cambio de fase ocurre entre los 27 y 29°C , durante ese intervalo de tiempo el PCM se encuentra en zona de mezcla. Al almacenar la mayor cantidad de energía posible de acuerdo a su capacidad, la fracción líquida del material es igual a 1, es decir el material ha cambiado completamente su fase de sólido a líquido. Dicho proceso de almacenamiento de energía retrasa el calentamiento del sistema, retrasando así el instante de tiempo en que la celda alcanza su temperatura máxima. Durante el proceso de liberación de energía el comportamiento es similar, disminuyendo gradualmente su temperatura hasta alcanzar la temperatura de cambio de fase del material. En el caso del Estudio 2 el PCM almacena energía manteniéndose a esa temperatura ($\approx 28^{\circ}\text{C}$) durante el intervalo de tiempo posterior a las horas de radiación solar incidente. La temperatura óptima de operación del panel seleccionado para el estudio es del 28°C , es decir la temperatura mantenida permite el correcto funcionamiento del equipo, sin importar que la energía esté siendo almacenada, misma energía que puede ser aprovechada para algún otro proceso térmico. En el caso del Estudio 1 la temperatura disminuye hasta empatar nuevamente con la temperatura ambiente, resultando irrelevante puesto que al no haber incidencia de radiación no se encuentra presente el efecto fotoeléctrico y la producción de energía en ese intervalo de tiempo es nula.

5.3

Resultados de producción eléctrica

A continuación se presentan los gráficos de los resultados de eficiencia y potencia eléctrica obtenidos de la simulación. El cálculo de dichos valores fueron registrados en cada paso de tiempo, empleando las fórmulas mostradas en el Capítulo 3. Como ya ha sido mencionado con anterioridad el aumento de temperatura en la celda fotovoltaica disminuye su eficiencia, por lo tanto al lograr una disminución de temperatura por mínima que sea ocasiona un cambio en la curva de su eficiencia, hecho que es posible observar en los gráficos mostrados a continuación. En la Figura 5.3 se presentan los gráficos

correspondientes a los días más cálidos de cada mes y en la Figura 5.4 los correspondientes a los días fríos.

Los gráficos de la parte superior representan el comportamiento de la eficiencia, misma que es acotada en la parte superior izquierda. En color amarillo punteado se muestra la eficiencia del Estudio 1 (panel fotovoltaico sin PCM) y es comparada con la respectiva del Estudio 2 en color azul. Como es posible observar, al igual que en el comportamiento de sus temperaturas, la curva correspondiente al sistema PV-PCM presenta menores oscilaciones que la correspondiente al Estudio 1. Las curvas se manifiestan hacia el lado contrario de las curvas de temperatura, es decir, entre más crece la curva de temperatura, más decrece la de eficiencia. Enfocándonos en el análisis de los días evaluados anteriormente; día con mayor y menor disminución de temperatura y día más cálido y más frío del año, los resultados obtenidos fueron un aumento en la eficiencia eléctrica del 0.51, 0.05, 0.14 y 0.11 % respectivamente.

De igual manera se presentan los gráficos obtenidos correspondientes a la potencia eléctrica producida por el panel fotovoltaico, en color rosa punteado se muestra la curva correspondiente al estudio 1 y en color morado la correspondiente al estudio 2. Las unidades en que ésta fue registrada fueron W/h. El aumento de potencia obtenido como valor pico en la curva correspondiente a los días evaluados con anterioridad fue de 0.23, 0.24, 0.18 y 0.07 respectivamente. Al observar lo anterior, es posible concluir que el comportamiento responsable del calentamiento del sistema fotovoltaico no es debido únicamente a la temperatura ambiente, sino que existe una interrelación de los valores de radiación solar y velocidad del viento que influyen fuertemente en el rendimiento de dicho sistema. Se debe considerar que el día que obtuvo una mayor disminución de temperatura en la celda (01 de Diciembre del 2018) también es el tercer día con menor radiación solar registrada (valor de 895.47 W/m^2), sin embargo, debido a que la radiación solar no fue favorable, no resultó ser el día con el mayor aumento de potencia eléctrica generada.

Comparación de la eficiencia y potencia eléctrica obtenida con la implementación del PCM RT28HC

Gráficos referentes al día más cálido de cada mes
 Ciudad: Villahermosa, Tabasco 2018



- ▭ Eficiencia del Panel Fotovoltaico (sin PCM)
- ▭ Eficiencia del Panel con PCM RT28HC
- ▭ Potencia eléctrica producida (sin PCM)
- ▭ Potencia eléctrica con PCM RT28HC

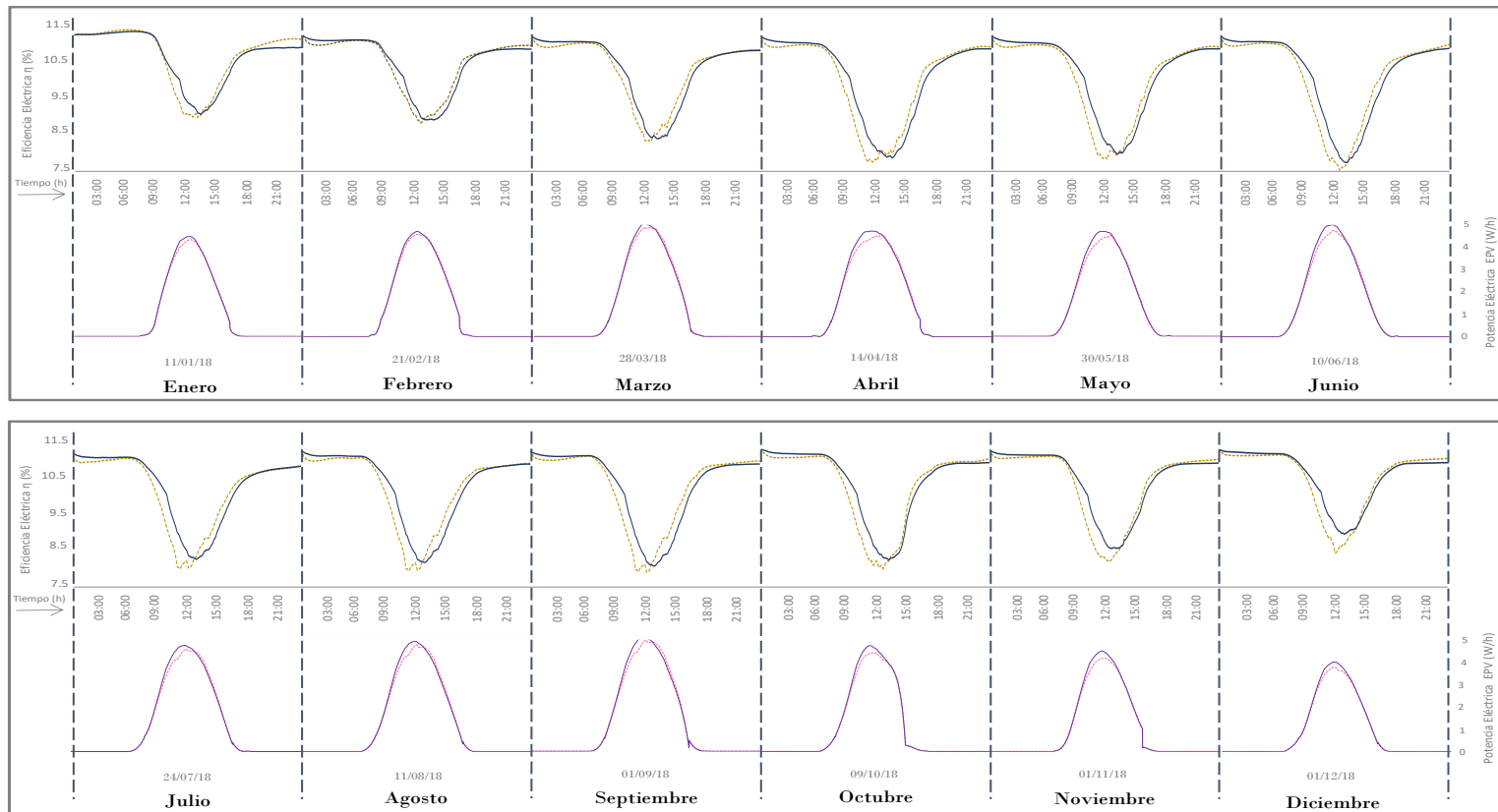


Figura 5.3. Resultados del comportamiento de la eficiencia y potencia eléctrica para días cálidos

Comparación de la eficiencia y potencia eléctrica obtenida con la implementación del PCM RT28HC

Gráficos referentes al día más frío de cada mes
 Ciudad: Villahermosa, Tabasco 2018



- ▭ Eficiencia del Panel Fotovoltaico (sin PCM)
- ▭ Eficiencia del Panel con PCM RT28HC
- ▭ Potencia eléctrica producida (sin PCM)
- ▭ Potencia eléctrica con PCM RT28HC

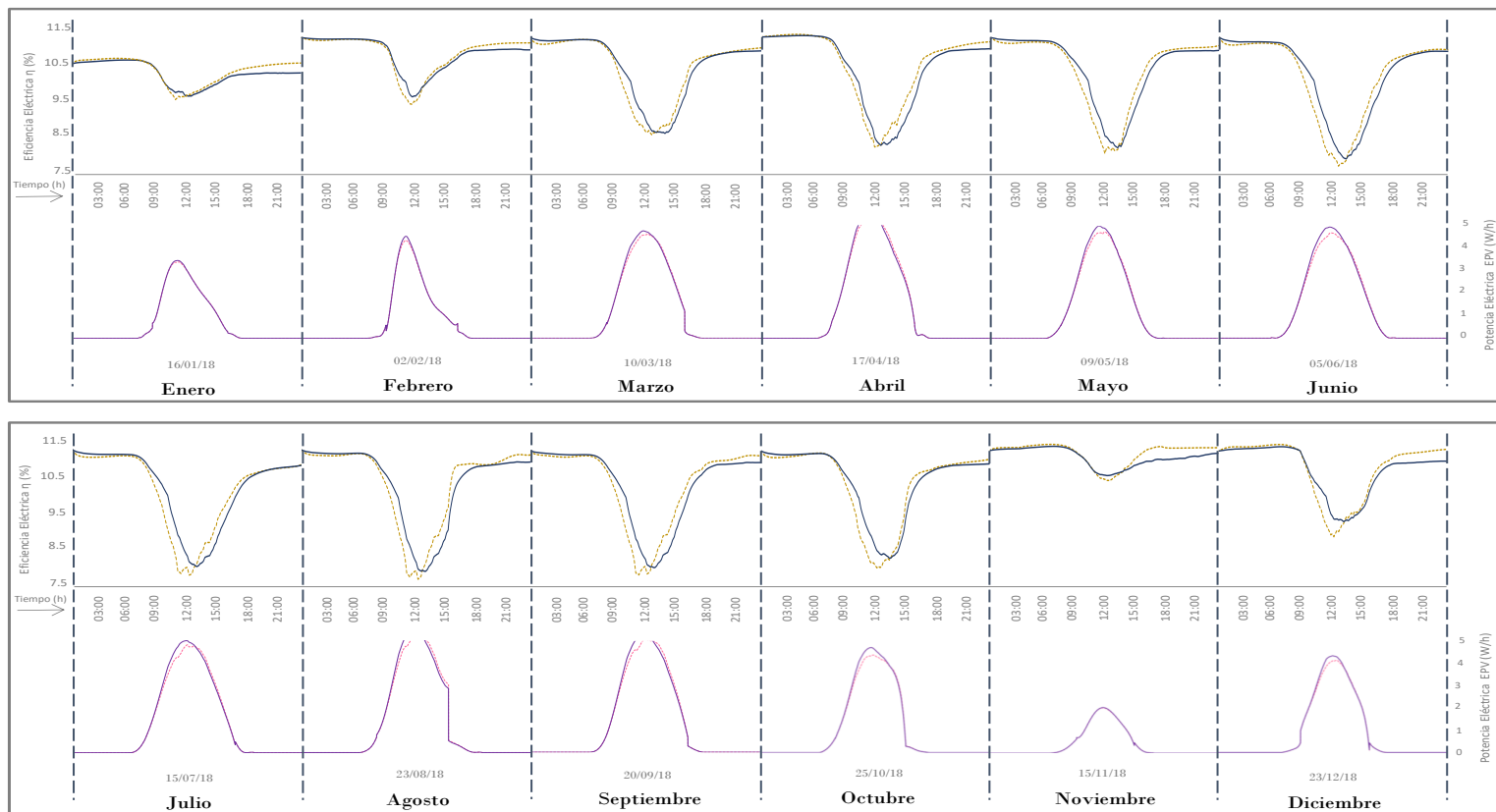


Figura 5.4. Resultados del comportamiento de la eficiencia y potencia eléctrica para días fríos

5.4 Análisis económico

Para realizar el análisis económico del sistema PV-PCM propuesto se toma en cuenta el análisis de costo de ciclo de vida, el cual toma en cuenta el valor del dinero en el tiempo, incluyendo el valor de inflación para estimar futuros gastos. El costo de ciclo de vida es definido como la suma de todos los costos asociados con un sistema de suministro de energía el cual puede ser anticipado para un periodo de tiempo seleccionado [Kalogirou, 2013]. Para calcular el análisis de costo de ciclo de vida o LCC por sus siglas en inglés “Life Cycle Cost” se realiza un balance.

Basándose en el análisis de costos realizado por [Sohani and Sayyaadi, 2020] se considera la ecuación 5.1:

$$LCC = IPP + OC - RI \quad (5.1)$$

Donde: IPP es la compra inicial, OC son los costos de operación en la vida útil y RI son los reingresos por reventa.

Tomando en cuenta lo anterior y adecuando los términos, el balance de LCC involucra lo mostrado en la ecuación 5.2 [Tariq et al., 2020].

$$LCC = - \begin{bmatrix} inversión \\ inicial \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} operación \ y \\ mantenimiento \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} costo \ de \\ energía \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} valor \\ residual \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

5.4.1. Inversión inicial

Para calcular el monto total de la inversión inicial, elemento 1 de la Ecuación 5.2, deben considerarse los siguientes costos adicionales mostrados en la Ecuación 5.3.

$$\begin{bmatrix} inversión \\ inicial \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} costo \ de \\ equipo \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} costo \ de \\ instalación \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} valor \\ residual \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

El costo del equipo para el sistema PV-PCM analizado involucra los componentes mostrados en la Tabla 5.7 [Tariq et al., 2020].

Tabla 5.7. Componentes del sistema PV-PCM

Componente	Precio en pesos Mexicanos
Panel Fotovoltaico	\$500.00
Inversor de corriente	\$1, 271.00
Placas absorbedoras	\$120.00
Material de cambio de fase	\$1, 327.7
Capa de aislamiento	\$300.00
Estructura del equipo	\$1, 200.00
Costo total	\$4, 718.7

En la Tabla 5.8 se muestran los montos finales para el cálculo de la inversión inicial.

Tabla 5.8. Inversión inicial

Parámetro	Costo en pesos Mexicanos
Equipo	\$4, 718.7
Instalación	\$800.00
Costo total	\$5, 518.7

Los costos de instalación fueron considerados como una aproximación a los costos regulares en los estados del Sureste de la República Mexicana.

5.4.2. Costo de operación y mantenimiento

Para calcular el costo por operación y mantenimiento, elemento 2 de la Ecuación 5.2 se toma en cuenta la Ecuación propuesta por [Tripathy et al., 2017] mostrada en la Ecuación 5.4.

$$\text{operación y mantenimiento} = M \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (5.4)$$

Donde: M es el mantenimiento anual, e i la tasa de interés, $i = 0.1$ [Maatallah et al., 2019].

Para el cálculo del mantenimiento anual se considera el 5% del primer costo anual [Tariq and Sheikh, 2018].

En cuanto al cálculo del primer costo anual se considera lo propuesto por [Maatallah et al., 2019].

$$\text{primer costo anual} = \text{costo inicial} \times \text{factor de recuperación} \quad (5.5)$$

Donde:

$$\text{factor de recuperación} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (5.6)$$

Los resultados del cálculo de operación y mantenimiento están dados en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9. Costo de operación y mantenimiento

Parámetro	Costo en pesos Mexicanos
Primer costo anual	\$382.51
Mantenimiento anual	\$19.12
Operación y mantenimiento	\$173.55

A los costos de operación y mantenimiento se deben sumar los costos por reemplazar partes del equipo por vida útil [Tripathy et al., 2017].

Considerando un cambio de inversor en la mitad de vida del panel fotovoltaico, es decir entre los 12 y 13 años, y un reemplazo del PCM cada 5 años, se emplea la ecuación propuesta por [Sohani et al., 2018].

$$\text{costo por} \\ \text{reemplazo} = C \frac{(1 + inf)^{i-1}}{(1 + d)^i} \quad (5.7)$$

Donde:

- C : costo del artículo que va a ser reemplazado
- inf : la tasa de inflación
- j : el año en que el artículo se reemplaza
- d : la tasa de interés

La tasa de inflación anual registrada para el estado de Tabasco por CONACO 2018 es de 3.8%. Agregando el valor obtenido por costo de reemplazo de partes al costo de operación y mantenimiento se obtienen los valores mostrados en la Tabla 5.10:

Tabla 5.10. Costo por reemplazo

Parámetro	Costo en pesos Mexicanos
Operación y mantenimiento	\$3,991.65
Remplazos	\$4,180.61
Costo total	\$8,172.61

5.4.3. Costo de energía

El costo de energía, tercer término de la Ecuación 5.2, es el ingreso generado por el sistema PV-PCM y puede ser calculado mediante la Ecuación propuesta por [Kalogirou, 2013]. Adecuando los términos la ecuación resulta en la Ecuación 5.8.

$$\text{costo de} \\ \text{energía} = \left[C_{el} \sum_{\text{primer mes}}^{\text{último mes}} (NMEPP)_{mes} \right] \quad (5.8)$$

Donde:

- $NMEPP$: es la Producción de energía eléctrica mensual neta, (“net-monthly-electrical-power-production”) calculada en la ecuación 5.9.
- C_{el} : es la tarifa de consumo eléctrico establecida por la Comisión Federal de Electricidad

Se considera la tarifa DAC, Servicio doméstico de alto consumo la cual se aplica a los servicios que destinen la energía para uso exclusivamente doméstico, individualmente a cada residencia, apartamento, apartamento en condominio o vivienda, considerada de alto consumo o que por las características del servicio así se requiera [CFE, 2020].

Los paneles fotovoltaicos sufren una tasa de degradación a lo largo de su vida, por ello se considera una tasa de degradación del 10 % en los primeros 10 años, 20 % de los 11 a los 20 años y 30 % de los 21 a los 25 años [Kalogirou, 2013].

Retomando el cálculo del término de $NMEPP$ empleada en la ecuación 8 es descrita en la ecuación 5.9.

$$NMEPP = \sum_{\text{primer día del mes}}^{\text{último día del mes}} [AxEPP_{cell}]_{\text{día}} x 10^{-3} \quad (5.9)$$

Donde:

- A : es el área del panel fotovoltaico, $A = 1m^2$
- EPP_{cell} : es la producción de energía eléctrica en la celda o potencia eléctrica en W/h

La potencia eléctrica total se obtiene mediante la integración numérica por la regla del trapecio de potencia obtenida cada 30 segundos utilizando la Ecuación:

$$\int_{30}^{86400} EPP_{cell}(t)dt = \frac{\Delta t}{2} \left[EPP_{cell=30} + \sum_{t=60}^{t=86370} 2 * EPP_{cell=(t)} + EPP_{cell=86400} \right] \quad (5.10)$$

5.4.4. Costo de valor residual

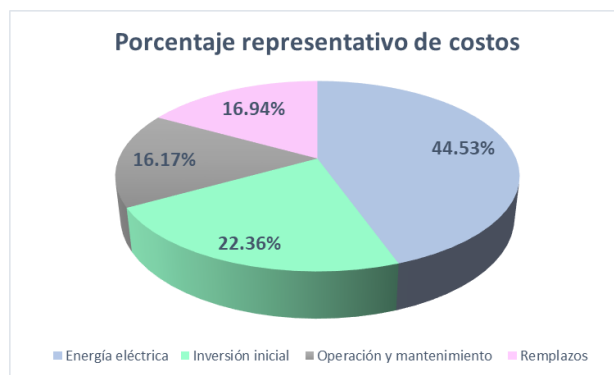
Finalmente para el cálculo del valor residual, valores generados por el equipo al final de su vida útil, se emplea la fórmula propuesta por [Sohani et al., 2018] mostrada en la Ecuación 5.11.

$$\text{valor residual} = \frac{0.15 \times \text{costo inicial}}{(1 + i)^j} \quad (5.11)$$

Donde:

- i : es la tasa de interés
- j : es el número de años

En la gráfica mostrada a continuación se presenta el porcentaje de costos equivalente a cada parámetro evaluado.



Como es posible observar el mayor porcentaje corresponde a la energía eléctrica producida, sin embargo; no resulta una inversión económica satisfactoria al colocarse un sistema PV-PCM con dimensiones de $1m^2$ puesto que para una

producción eléctrica significativa se requiere un área de recepción solar mayor a la evaluada. Por lo anterior se sugiere realizar un estudio muy específico adecuando el área de captación solar de acuerdo a los requerimientos que se exijan.

6

CAPÍTULO

Conclusiones y recomendaciones

En este Capítulo se presentan las conclusiones obtenidas de realizar la simulación dinámica de materiales de cambio de fase (PCM) para controlar la temperatura en paneles fotovoltaicos, evaluada para condiciones climáticas de la República Mexicana, así mismo se realizan algunas sugerencias para trabajos futuros.

6.1 Conclusiones

Con el fin de mejorar la eficiencia en los paneles fotovoltaicos, disminuida a causa de las elevadas temperaturas que presentan al estar expuestos a condiciones de radiación solar directa, se realizó la modelación numérica de un sistema PV-PCM, panel fotovoltaico acoplado con un material de cambio de fase. La ciudad evaluada fue la ciudad de Villahermosa, Tabasco.

Con base en los resultados obtenidos, se afirma que los objetivos y alcances planteados al principio se lograron de manera satisfactoria, y de acuerdo a los resultados presentados, se concluye lo siguiente:

- El impacto que se obtuvo de acoplar una capa de PCM al sistema solar fotovoltaico fue positivo. La mayor disminución de temperatura obtenida fue de $11.46^{\circ}C$ y la mínima de $1.03^{\circ}C$.

- Se observó que el material de cambio de fase cumple con una función de retardar el aumento de energía debido a su gran capacidad de almacenamiento, sin embargo; el PCM debe ser elegido meticulosamente para cada región que desee ser evaluada. De no ser así, la implementación de un PCM podría incluso aumentar la temperatura del panel.
- La implementación de un material de cambio de fase ayuda a disminuir la temperatura excesiva en los paneles fotovoltaicos mejorando su eficiencia, implicando una mejora en el ahorro energético y en la vida útil del equipo.
- La temperatura de la celda en tiempo real impacta de forma directa el cálculo de su eficiencia y potencia eléctrica.
- En los resultados obtenidos se pudo observar que los días con menor presencia de radiación solar, a pesar de disminuir en mayor número su temperatura al emplear el PCM no producían la misma cantidad de kW/h que los sistemas que estaban expuestos a niveles de radiación mayores. La relación entre temperatura y eficiencia es evidente, sin embargo; debería considerarse también la importancia de la radiación solar impactando la producción eléctrica.
- Se obtuvo una mayor disminución de temperatura en los días más cercanos a la fecha del solsticio de verano y solsticio de invierno, momento en que la tierra se encuentra en su mayor inclinación con respecto al sol. Dando pie a la interrogante de que si el ángulo de declinación de la tierra impacta de manera significativa en el aprovechamiento de energía solar fotovoltaica.

6.2 Recomendaciones para futuros trabajos

Con el fin de dar seguimiento a la búsqueda de mejorar la eficiencia de los sistemas solares fotovoltaicos con la disminución de su temperatura se sugieren los siguientes puntos:

- Realizar la evaluación de sistemas PV-PCM para otras regiones de la República Mexicana.
- Estudiar el impacto de la velocidad del viento, radiación solar y condiciones de humedad para obtener resultados más exactos del comportamiento de sistemas PV-PCM.
- Realizar el acople de un sistema PV-PCM con un sistema de enfriamiento adicional como lo son aletas, extractores de calor o sistemas de tuberías con fluido circundante.
- Emplear la combinación de múltiples materiales de cambio de fase para lograr una configuración óptima y funcional.
- Aprovechar el almacenamiento de energía en el PCM como método de calefacción de agua.
- Mejorar las propiedades de los componentes del panel fotovoltaico para mejorar su eficiencia autónoma.
- Realizar estudios experimentales para validar la mejora de eficiencia en los sistemas PV-PCM.

Bibliografía

- [Abdulmunem and Jalil, 2018] Abdulmunem, A. R. and Jalil, J. M. (2018). Indoor investigation and numerical analysis of pv cells temperature regulation using coupled pcm/fins. *International Journal of Heat and Technology*, 36(4):1212–1222.
- [Al-Waeli(a) et al., 2019] Al-Waeli(a), A. H., Kazem, H. A., Chaichan, M. T., and Sopian, K. (2019). Experimental investigation of using nano-pcm/nanofluid on a photovoltaic thermal system (pvt): technical and economic study. *Thermal Science and Engineering Progress*, 11:213–230.
- [Al-Waeli(b) et al., 2019] Al-Waeli(b), A. H., Sopian, K., Yousif, J. H., Kazem, H. A., Boland, J., and Chaichan, M. T. (2019). Artificial neural network modeling and analysis of photovoltaic/thermal system based on the experimental study. *Energy Conversion and Management*, 186:368–379.
- [Aly(a) et al., 2018] Aly(a), S. P., Ahzi, S., Barth, N., and Abdallah, A. (2018). Using energy balance method to study the thermal behavior of pv panels under time-varying field conditions. *Energy Conversion and Management*, 175:246–262.
- [(Aly(b) et al., 2018] (Aly(b), S. P., Barth, N., Figgis, B. W., and Ahzi, S. (2018). A fully transient novel thermal model for in-field photovoltaic modules using developed explicit and implicit finite difference schemes. *Journal of computational science*, 27:357–369.
- [Arıcı et al., 2018] Arıcı, M., Bilgin, F., Nižetić, S., and Papadopoulos, A. M. (2018). Phase change material based cooling of photovoltaic panel: a simplified numerical model for the optimization of the phase change material layer and general economic evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 189:738–745.

- [Atlas-global, 2020] Atlas-global (2020).
- [Bambrook and Sproul, 2016] Bambrook, S. and Sproul, A. (2016). A solvable thermal circuit for modelling pvt air collectors. *Solar Energy*, 138:77–87.
- [Barrera, 2010] Barrera, M. F. (2010). *Energía solar: electricidad fotovoltaica*. Editorial Liber Factory.
- [Barth et al., 2018] Barth, N., Al Otaibi, Z. S., and Ahzi, S. (2018). Irradiance, thermal and electrical coupled modeling of photovoltaic panels with long-term simulation periods under service in harsh desert conditions. *Journal of computational science*, 27:118–129.
- [Benlekkam et al., 2018] Benlekkam, M. L., Nehari, D., and Madani, H. I. (2018). The thermal impact of the fin tilt angle and its orientation on performance of pv cell using pcm. *International Journal of Heat and Technology*, 36(3):919–926.
- [Biwole et al., 2013] Biwole, P. H., Eclache, P., and Kuznik, F. (2013). Phase-change materials to improve solar panel’s performance. *Energy and Buildings*, 62:59–67.
- [Brano et al., 2014] Brano, V. L., Ciulla, G., Piacentino, A., and Cardona, F. (2014). Finite difference thermal model of a latent heat storage system coupled with a photovoltaic device: Description and experimental validation. *Renewable energy*, 68:181–193.
- [Britannica, 2020] Britannica (2020). Koppen climate classification.
- [Browne et al., 2016] Browne, M. C., Norton, B., and McCormack, S. J. (2016). Heat retention of a photovoltaic/thermal collector with pcm. *Solar Energy*, 133:533–548.
- [CFE, 2020] CFE (2020). Comisión federal de electricidad.
- [Ciulla et al., 2012] Ciulla, G., Brano, V. L., Cellura, M., Franzitta, V., and Milone, D. (2012). A finite difference model of a pv-pcm system. *Energy Procedia*, 30:198–206.
- [Climate-Data, 2020] Climate-Data (2020).

- [de Oliveira et al., 2018] de Oliveira, M. C. C., Cardoso, A. S. A. D., Viana, M. M., and Lins, V. d. F. C. (2018). The causes and effects of degradation of encapsulant ethylene vinyl acetate copolymer (eva) in crystalline silicon photovoltaic modules: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81:2299–2317.
- [Duffie et al., 2020] Duffie, J. A., Beckman, W. A., and Blair, N. (2020). *Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind*. John Wiley & Sons.
- [ESMAP, 2019] ESMAP, S. (2019). Wb, and ifc, “global solar atlas,”. *Glob. Sol. Atlas*, page 1.
- [Espejo Marín, 2004] Espejo Marín, C. (2004). La energía solar fotovoltaica en españa.
- [Gasquet, 1997] Gasquet, H. L. (1997). *Conversión de la luz solar en Energía Eléctrica: Manual Teórico y Práctico sobre los sistemas Fotovoltaicos*. Gasquet.
- [González Julián et al., 2018] González Julián, E., Xamán, J., Moraga, N. O., Chávez, Y., Zavala-Guillén, I., and Simá, E. (2018). Annual thermal evaluation of a double pane window using glazing available in the mexican market. *Applied Thermal Engineering*, 143:100–111.
- [Grossman, 2002] Grossman, G. (2002). Solar-powered systems for cooling, dehumidification and air-conditioning. *Solar energy*, 72(1):53–62.
- [Hasan et al., 2010] Hasan, A., McCormack, S., Huang, M., and Norton, B. (2010). Evaluation of phase change materials for thermal regulation enhancement of building integrated photovoltaics. *Solar Energy*, 84(9):1601–1612.
- [Hasan et al., 2015] Hasan, A., McCormack, S., Huang, M., Sarwar, J., and Norton, B. (2015). Increased photovoltaic performance through temperature regulation by phase change materials: Materials comparison in different climates. *Solar Energy*, 115:264–276.
- [Hasan et al., 2014] Hasan, A., McCormack, S. J., Huang, M. J., and Norton, B. (2014). Energy and cost saving of a photovoltaic-phase change materials (pv-

- pcm) system through temperature regulation and performance enhancement of photovoltaics. *Energies*, 7(3):1318–1331.
- [Hernández Pérez et al., 2018] Hernández Pérez, I., Xamán, J., Macías-Melo, E., Aguilar-Castro, K., Zavala-Guillén, I., Hernández-López, I., and Simá, E. (2018). Experimental thermal evaluation of building roofs with conventional and reflective coatings. *Energy and Buildings*, 158:569–579.
- [Ho et al., 2012] Ho, C.-J., Tanuwijaya, A., and Lai, C.-M. (2012). Thermal and electrical performance of a bipv integrated with a microencapsulated phase change material layer. *Energy and Buildings*, 50:331–338.
- [Huang et al., 2000] Huang, M., Eames, P., and Norton, B. (2000). The application of computational fluid dynamics to predict the performance of phase change materials for control of photovoltaic cell temperature in buildings. In *World renewable energy congress VI*, pages 2123–2126. Elsevier.
- [Huang et al., 2004] Huang, M., Eames, P., and Norton, B. (2004). Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials. *International Journal of heat and mass transfer*, 47(12-13):2715–2733.
- [Huang et al., 2006] Huang, M., Eames, P., and Norton, B. (2006). Comparison of a small-scale 3d pcm thermal control model with a validated 2d pcm thermal control model. *Solar energy materials and solar cells*, 90(13):1961–1972.
- [Huang et al., 2007] Huang, M., Eames, P., and Norton, B. (2007). Comparison of predictions made using a new 3d phase change material thermal control model with experimental measurements and predictions made using a validated 2d model. *Heat Transfer Engineering*, 28(1):31–37.
- [Huang et al., 2008] Huang, M., McCormack, S., Eames, P., and Norton, B. (2008). The effect of phase change material crystalline segregation on the building integrated photovoltaic system thermal performance. In *World Renewable Energy Congress-WREC X*, pages 1338–1343. Elsevier.
- [Huang(a) et al., 2011] Huang(a), M., Eames, P., Norton, B., and Hewitt, N. (2011). Natural convection in an internally finned phase change material heat

- sink for the thermal management of photovoltaics. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(7):1598–1603.
- [Huang(b), 2011] Huang(b), M. J. (2011). The effect of using two pcms on the thermal regulation performance of bipv systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(3):957–963.
- [INEGI, 2020] INEGI (2020).
- [Jiménez Xamán et al., 2019] Jiménez Xamán, C., Xamán, J., Moraga, N. O., Hernandez-Perez, I., Zavala-Guillen, I., Arce, J., and Jiménez, M. (2019). Solar chimneys with a phase change material for buildings: An overview using cfd and global energy balance. *Energy and Buildings*, 186:384–404.
- [Kalogirou, 2013] Kalogirou, S. A. (2013). *Solar energy engineering: processes and systems*. Academic Press.
- [Kant et al., 2019] Kant, K., Pitchumani, R., Shukla, A., and Sharma, A. (2019). Analysis and design of air ventilated building integrated photovoltaic (bipv) system incorporating phase change materials. *Energy Conversion and Management*, 196:149–164.
- [Karakilcik et al., 2006] Karakilcik, M., Dincer, I., and Rosen, M. A. (2006). Performance investigation of a solar pond. *Applied thermal engineering*, 26(7):727–735.
- [Khanna et al., 2019] Khanna, S., Newar, S., Sharma, V., Reddy, K., and Mallick, T. K. (2019). Optimization of fins fitted phase change material equipped solar photovoltaic under various working circumstances. *Energy Conversion and Management*, 180:1185–1195.
- [Li et al., 2019] Li, Z., Ma, T., Zhao, J., Song, A., and Cheng, Y. (2019). Experimental study and performance analysis on solar photovoltaic panel integrated with phase change material. *Energy*, 178:471–486.
- [Ma et al., 2018] Ma, T., Zhao, J., and Li, Z. (2018). Mathematical modelling and sensitivity analysis of solar photovoltaic panel integrated with phase change material. *Applied Energy*, 228:1147–1158.

- [Maatallah et al., 2019] Maatallah, T., Zachariah, R., and Al-Amri, F. G. (2019). Exergo-economic analysis of a serpentine flow type water based photovoltaic thermal system with phase change material (pvt-pcm/water). *Solar Energy*, 193:195–204.
- [Malvi et al., 2011] Malvi, C., Dixon-Hardy, D., and Crook, R. (2011). Energy balance model of combined photovoltaic solar-thermal system incorporating phase change material. *Solar Energy*, 85(7):1440–1446.
- [McAdams, 1942] McAdams, W. H. (1942). *Heat transmission*. McGraw-hill.
- [Mehling and Cabeza, 2008] Mehling, H. and Cabeza, L. F. (2008). *Heat and cold storage with PCM*, volume 308. Springer.
- [Mercado et al., 2007] Mercado, M. V., Esteves, A., and Filippín, C. (2007). Sistema de calefacción solar radiante.“. *Mediciones experimentales de invierno y evaluación con software de simulación térmica SIMEDIF” ENTAC (Encontro Nacional de Tecnología no Ambiente Construido)*, pages 334–344.
- [Moraga et al., 2016] Moraga, N. O., Xamán, J. P., and Araya, R. H. (2016). Cooling li-ion batteries of racing solar car by using multiple phase change materials. *Applied Thermal Engineering*, 108:1041–1054.
- [Murcia, 2008] Murcia, H. R. (2008). Desarrollo de la energía solar en colombia y sus perspectivas. *Revista de ingeniería*, 28:83–89.
- [Nižetić et al., 2018] Nižetić, S., Arıcı, M., Bilgin, F., and Grubišić-Čabo, F. (2018). Investigation of pork fat as potential novel phase change material for passive cooling applications in photovoltaics. *Journal of cleaner production*, 170:1006–1016.
- [Norton et al., 2011] Norton, B., Eames, P. C., Mallick, T. K., Huang, M. J., McCormack, S. J., Mondol, J. D., and Yohanis, Y. G. (2011). Enhancing the performance of building integrated photovoltaics. *Solar Energy*, 85(8):1629–1664.
- [Park et al., 2014] Park, J., Kim, T., and Leigh, S.-B. (2014). Application of a phase-change material to improve the electrical performance of vertical-

- building-added photovoltaics considering the annual weather conditions. *Solar Energy*, 105:561–574.
- [Patankar, 2018] Patankar, S. (2018). *Numerical heat transfer and fluid flow*. Taylor & Francis.
- [Preet, 2018] Preet, S. (2018). Water and phase change material based photovoltaic thermal management systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82:791–807.
- [Preet et al., 2017] Preet, S., Bhushan, B., and Mahajan, T. (2017). Experimental investigation of water based photovoltaic/thermal (pv/t) system with and without phase change material (pcm). *Solar Energy*, 155:1104–1120.
- [Quiñonez and Hernández, 2013] Quiñonez, J. E. and Hernández, A. L. (2013). Evaluación y simulación computacional de un modelo físico-matemático del colector solar calentador de aire de doble paso en contracorriente diseñado para la calefacción de edificios.
- [Rajvikram et al., 2019] Rajvikram, M., Leponraj, S., Ramkumar, S., Akshaya, H., and Dheeraj, A. (2019). Experimental investigation on the abasement of operating temperature in solar photovoltaic panel using pcm and aluminium. *Solar Energy*, 188:327–338.
- [Rubitherm-Technologies, 2020] Rubitherm-Technologies (2020). Data sheet rt28hc.
- [Rukman et al., 2020] Rukman, N. S. B., Fudholi, A., Taslim, I., Indrianti, M. A., and Manyoe, I. N. (2020). Overview on recent photovoltaic module cooling methods: advances pvt systems. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 10(1):15.
- [Sarafraz et al., 2019] Sarafraz, M., Safaei, M. R., Leon, A. S., Tlili, I., Alkanhal, T. A., Tian, Z., Goodarzi, M., and Arjomandi, M. (2019). Experimental investigation on thermal performance of a pv/t-pcm (photovoltaic/thermal) system cooling with a pcm and nanofluid. *Energies*, 12(13):2572.

-
- [Sarwar et al., 2010] Sarwar, J., McCormack, S., Huang, M., Norton, B., et al. (2010). Experimental validation of cfd modelling for thermal regulation of photovoltaic panels using phase change material. In *Proceedings of the international conference on solar heating, cooling and buildings EuroSun*, volume 28.
- [Skoplaki and Palyvos, 2009] Skoplaki, E. and Palyvos, J. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar energy*, 83(5):614–624.
- [Smith et al., 2014] Smith, C. J., Forster, P. M., and Crook, R. (2014). Global analysis of photovoltaic energy output enhanced by phase change material cooling. *Applied energy*, 126:21–28.
- [Sohani and Sayyaadi, 2020] Sohani, A. and Sayyaadi, H. (2020). End-users’ and policymakers’ impacts on optimal characteristics of a dew-point cooler. *Applied Thermal Engineering*, 165:114575.
- [Sohani et al., 2018] Sohani, A., Sayyaadi, H., and Mohammadhosseini, N. (2018). Comparative study of the conventional types of heat and mass exchangers to achieve the best design of dew point evaporative coolers at diverse climatic conditions. *Energy conversion and management*, 158:327–345.
- [Solomon, 1979] Solomon, A. (1979). An easily computable solution to a two-phase stefan problem. *Solar energy*, 23(6):525–528.
- [Tanuwijava et al., 2013] Tanuwijava, A. O., Ho, C. J., Lai, C.-M., and Huang, C.-Y. (2013). Numerical investigation of the thermal management performance of mepcm modules for pv applications. *Energies*, 6(8):3922–3936.
- [Tariq and Sheikh, 2018] Tariq, R. and Sheikh, N. A. (2018). Numerical heat transfer analysis of maisotsenko humid air bottoming cycle—a study towards the optimization of the air-water mixture at bottoming turbine inlet. *Applied Thermal Engineering*, 133:49–60.
- [Tariq et al., 2020] Tariq, R., Xamán, J., Bassam, A., Ricalde, L. J., and Soberanis, M. E. (2020). Multidimensional assessment of a photovoltaic air

- collector integrated phase changing material considering mexican climatic conditions. *Energy*, 209:118304.
- [Tomar et al., 2018] Tomar, V., Tiwari, G., Bhatti, T., and Norton, B. (2018). Thermal modeling and experimental evaluation of five different photovoltaic modules integrated on prototipo test cells with and without water flow. *Energy conversion and management*, 165:219–235.
- [Tripathy et al., 2017] Tripathy, M., Joshi, H., and Panda, S. (2017). Energy payback time and life-cycle cost analysis of building integrated photovoltaic thermal system influenced by adverse effect of shadow. *Applied Energy*, 208:376–389.
- [Tzuc et al., 2019] Tzuc, O. M., Hernández-Pérez, I., Macias-Melo, E., Bassam, A., Xamán, J., and Cruz, B. (2019). Multi-gene genetic programming for predicting the heat gain of flat naturally ventilated roof using data from outdoor environmental monitoring. *Measurement*, 138:106–117.
- [United-Nations, 2015] United-Nations (2015). Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development. united nations sustainable knowledge platform. sustain dev goals.
- [Uriarte Flores et al., 2019] Uriarte Flores, J., Xamán, J., Chávez, Y., Hernández-López, I., Moraga, N. O., and Aguilar, J. (2019). Thermal performance of walls with passive cooling techniques using traditional materials available in the mexican market. *Applied Thermal Engineering*, 149:1154–1169.
- [Velasco, 2009] Velasco, J. (2009). *Energías renovables*. Reverté.
- [Waqas et al., 2018] Waqas, A., Ji, J., Xu, L., Ali, M., Alvi, J., et al. (2018). Thermal and electrical management of photovoltaic panels using phase change materials—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92:254–271.
- [Xamán et al., 2015] Xamán, J., Hernández-López, I., Alvarado-Juárez, R., Hernández-Pérez, I., Álvarez, G., and Chávez, Y. (2015). Pseudo transient numerical study of an earth-to-air heat exchanger for different climates of méxico. *Energy and Buildings*, 99:273–283.

- [Zhao et al., 2019] Zhao, J., Ma, T., Li, Z., and Song, A. (2019). Year-round performance analysis of a photovoltaic panel coupled with phase change material. *Applied Energy*, 245:51–64.

A

APÉNDICE

Paneles fotovoltaicos

La tecnología fotovoltaica consiste en aprovechar la energía proveniente del Sol y transformarla en energía eléctrica sin la intervención de algún equipo que genere calor por medio del efecto fotoeléctrico. Los sistemas fotovoltaicos pueden ser contruidos del tamaño que se desee según la cantidad de energía que se requiera producir. Así mismo pueden ser interconectados para que la potencia de salida sea mayor.

Las celdas fotovoltaicas consisten en dos o más capas delgadas de material semiconductor que al estar expuesto a la radiación solar directa propicia el efecto fotovoltaico. En la Figura A.1 se muestra un arreglo de paneles fotovoltaicos.



Figura A.1. Arreglo de paneles fotovoltaicos.

A.1 Fenomenología del proceso de conversión de energía

La energía solar puede ser aprovechada de manera pasiva, sin el uso de algún dispositivo que la convierta en otro tipo de energía, siendo aprovechada para iluminación y calefacción en edificaciones dependiendo de su orientación, diseño, etc. Así mismo la energía solar es utilizada de forma activa, principalmente en dos vías: la foto térmica y la fotovoltaica. La primera de ellas transforma de energía proveniente del sol en energía calorífica, por otro lado, la vía fotovoltaica se enfoca en transformar la energía solar en energía eléctrica por medio del efecto fotovoltaico.

El efecto fotovoltaico está presente en las celdas fotovoltaicas que se encuentran en conexiones dentro de los paneles fotovoltaicos, los cuales realizan el trabajo producir energía eléctrica a partir de energía solar [Espejo Marín, 2004].

Las celdas fotovoltaicas o solares son construidas de un material semiconductor como el Silicio, el cual cuenta con cuatro electrones en su última orbita. El Silicio puro o intrínseco cumple con la regla del octeto, la cual dice, que los átomos tienden a cumplir sus últimos niveles de energía con una cantidad de ocho electrones, para alcanzar la estabilidad y formen un enlace llamado covalente, compartiendo electrones en su último nivel, comportándose como un aislante, es por eso que el Silicio debe ser dopado con otro semiconductor, es decir, se deben agregar impurezas a su composición química, y dichas impurezas sólo podrán provenir de otro material semiconductor, este nuevo semiconductor dopado es llamado semiconductor extrínseco.

En el caso de las celdas fotovoltaicas una placa de Silicio es dopada con Fósforo que contiene cinco electrones en su última capa, lo cual provoca que la regla de octeto si se cumpla y adicional se deja libre un electrón por cada cadena, formando un material tipo N (negativo), tal como se muestra en la Figura A.2 a).

Adicional a esta placa dopada con Fósforo, se coloca otra placa de ligeramente mayor espesor, pero ésta es dopada con Boro y se coloca en la parte posterior adyacente a la primera placa. El Boro tiene un electrón menos que el Silicio, por lo que las cadenas de Silicio-Boro no cumplen la regla del octeto, dejando libre un hueco, formando un material tipo P (positivo) mostrado en la Figura A.2 b) [Barrera, 2010].

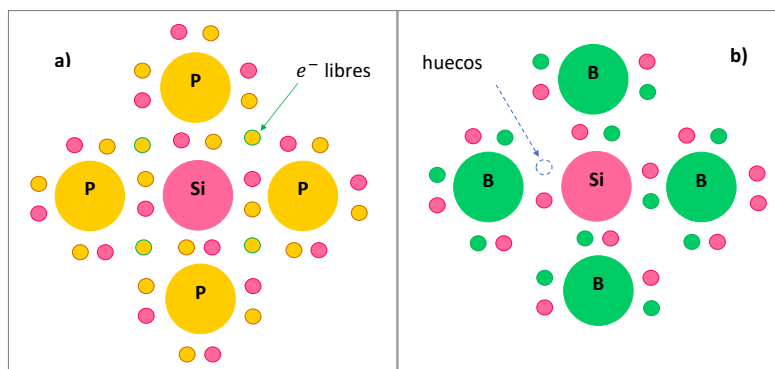


Figura A.2. Unión Silicio-Fósforo y Silicio-Boro.

Al incidir la energía solar, la cual transporta energía electromagnética mediante los fotones, y ser absorbida sobre la placa de semiconductor tipo N, tiene la energía suficiente para desplazar los electrones que habían quedado libres en dicho material, desplazándolos hacia los huecos libres adyacentes del material tipo P. Así la zona inmediata de la frontera que los separa queda cargada negativamente en el semiconductor P, y positivamente en el N, formando un enlace P-N. Estos campos provocan el movimiento de los electrones produciendo un campo eléctrico y por consecuencia una corriente eléctrica. Los materiales tipo P y tipo N se ejemplifican en la Figura A.3.

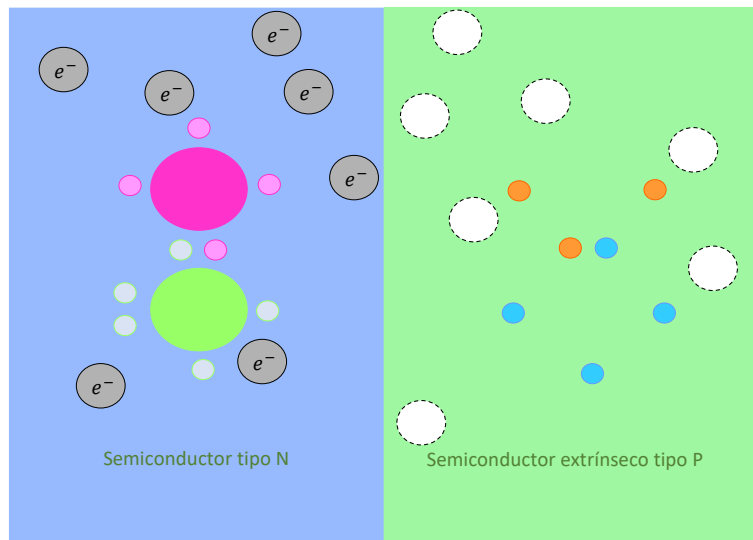


Figura A.3. Representación de material tipo N y tipo P.

Es importante recalcar que el material semiconductor no tiene la capacidad de almacenar energía eléctrica, su único papel es generarla mediante la transformación de la energía radiante que incide sobre él.

El funcionamiento de los paneles fotovoltaicos depende de diversas condiciones variables, sin embargo, se han establecido ciertas condiciones de trabajo nominales, tales como una temperatura de funcionamiento de $25^{\circ}C$ y una radiación solar de $1000 W/m^2$, cuando el panel trabaja bajo estas condiciones se dice que está trabajando en valores pico [Espejo Marín, 2004].

A.2 Aplicaciones de la generación solar fotovoltaica

Una vez realizada la conversión de energía solar a eléctrica previamente explicada, la energía que produce el panel se puede aprovechar de dos maneras distintas. La primera de ellas mediante instalaciones aisladas (bancos de baterías), y mediante instalaciones conectadas a la red eléctrica.

Las instalaciones aisladas de uso particular suelen tener potencias que comprenden de los 3 y 5 kWp, sin embargo, existen instalaciones utilizadas para edificios bioclimáticos o públicos que suelen tener potencias de entre 5 y 100 kWp. Para ambos casos es requerido contar con un convertidor de corriente continua a alterna para hacer uso de la energía almacenada en las baterías y realizar el abastecimiento de electrodomésticos [Espejo Marín, 2004].

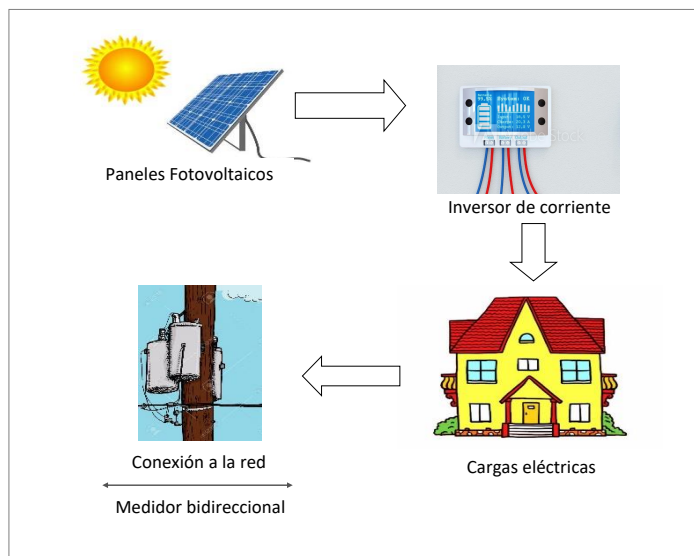


Figura A.4. Instalación conectada a la red eléctrica.

En el caso de las instalaciones conectadas a la red eléctrica, estas cuentan con potencias superiores a los 100kWp y es muy común su uso en empresas. Al igual que las instalaciones aisladas requieren un inversor de corriente alterna que esté a la misma tensión y frecuencia que la ofrecida por la compañía eléctrica.

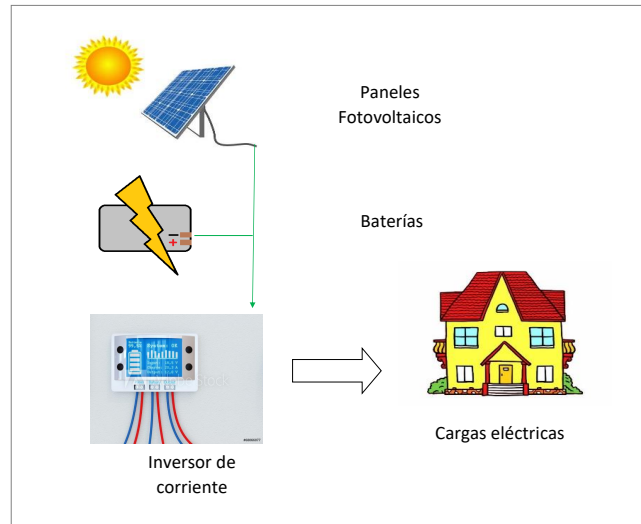


Figura A.5. Instalación aislada.

Los sistemas fotovoltaicos pueden ser utilizados solos o en conjunto con otros equipos. Las aplicaciones de la energía generada mediante paneles fotovoltaicos incluyen el sector de comunicaciones, potencia, supervisión, iluminación, bombas de agua y cargas de baterías [Kalogirou, 2013].

B

APÉNDICE

Antecedentes y conceptos fundamentales de PCM

B.1

Antecedentes de materiales de cambio de fase

El problema de cambio de fase de líquido a sólido y viceversa es conocido como el "*Stefan problem*", el cual conduce el estudio de cambio de fase al derretimiento de hielo. El problema de Stefan también es conocido como "problema de frontera móvil", en el cual la interface de frontera móvil está en función del tiempo y el espacio.

El nombre del problema de Stefan proviene de Jozef Stefan quién en 1891 formuló el problema de encontrar la distribución de temperatura y la historia del frente helado de una losa de agua solidificante. Aunque los problemas de frontera móvil fueron anteriormente estudiados por Lamé y Clapeyron en 1831, la secuencia de artículos de 1889 y 1891 dio su nombre a esta familia de problemas.

Stefan comenzó su análisis utilizando un modelo de conservación de energía en la interface líquida/sólida y asumiendo un perfil de temperatura lineal dentro del hielo y mostró a partir de un modelo simple que el cuadrado del espesor del hielo era función lineal del tiempo.

Stefan definió un número adimensional conocido como el número de Stefan (Ste), el cual gobierna la cantidad de solidificación y fusión. El número de Stefan se muestra en la Ecuación (B.1) y éste define la razón de calor sensible y calor latente.

$$Ste = \frac{C_P (T_m - T_0)}{L} \quad (B.1)$$

Donde:

- $C_P \leftarrow$ Calor específico del material (J/kg)
- $T_0 \leftarrow$ Temperatura circundante (K)
- $T_m \leftarrow$ Temperatura de punto de fusión del material (K)
- $L \leftarrow$ Calor latente de fusión (J/kg)

El concepto de calor sensible y calor específico fueron descubiertos por el escocés Joseph Black a mediados del siglo XVIII, quién realizó una serie de experimentos desarrollados con agua y hielo en la Universidad de Glasgow.

B.2 Proceso termodinámico presente en el proceso de almacenamiento de energía térmica

Los métodos de almacenamiento de energía empleados para calentar o enfriar algún cuerpo o superficie tienen la necesidad de ser reversibles. Dichos métodos de almacenamiento pueden clasificarse en procesos químicos y procesos físicos, éstos últimos a su vez se dividen en calor sensible y calor latente.

Calor sensible

Se define como la energía requerida para cambiar la temperatura de una sustancia o material sin que ocurra un cambio de fase. La temperatura aumenta a medida que se agrega energía, como en la Figura B.1, al agregar calor proveniente del sol la temperatura aumenta.

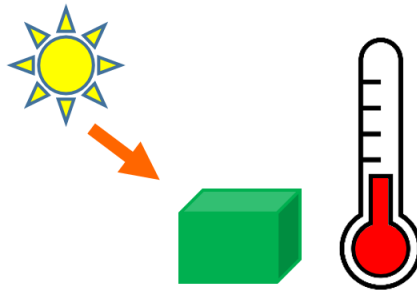


Figura B.1. Representación ilustrativa de calor sensible al agregar energía.

Como se observa en la Figura B.2, cuando la temperatura es removida del objeto y la temperatura disminuye, también recibe el nombre de calor sensible.

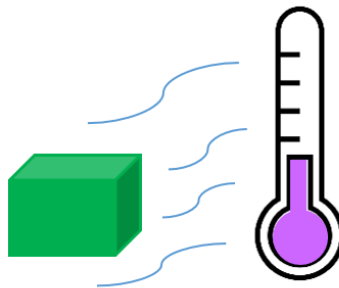


Figura B.2. Representación ilustrativa de calor sensible al remover energía.

Es la forma más común de almacenamiento de energía (almacenamiento de calor). La proporción de calor almacenado en relación con el aumento de temperatura es la capacidad calorífica y se representa en la Ecuación B.2.

$$\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (\text{B.2})$$

Donde:

- $c \leftarrow$ es la capacidad calorífica específica
- $m \leftarrow$ masa de almacenamiento de materia

La capacidad calorífica dependerá de la cantidad de material (su volumen o masa).

El calor sensible suele ser utilizado en materiales sólidos como la piedra o ladrillos y en los líquidos como el agua.

Calor latente

Es la energía absorbida o liberada por una sustancia o material durante el proceso de cambio de fase. Si la sustancia cambia de sólido a líquido necesita absorber energía del ambiente circundante para extender las moléculas en un volumen más grande y fluido. En caso contrario se emite energía y las moléculas al perder energía por el movimiento y vibración se vuelven más cercanas como se observa en la Figura B.3.

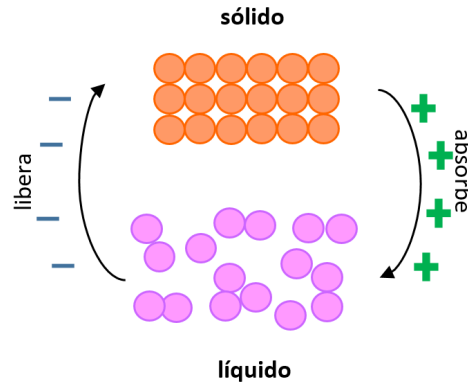


Figura B.3. Representación ilustrativa de calor latente a nivel molecular.

El calor latente es el calor almacenado durante el proceso de cambio de fase. Éste puede manifestarse en el cambio de fase de:

- sólido - líquido
- líquido - vapor
- sólido - sólido

B.3 Proceso de cambio entre fases

El calor latente de cambio de fase sólido-líquido por fusión y solidificación tiene grandes capacidades para almacenar calor dependiendo del material seleccionado. Este cambio de fase también puede llamarse entalpía de cambio de fase, entalpía de fusión o calor de fusión.

Durante la fusión no ocurre un cambio significativo en el volumen (cambio menor al 10%), si el contenedor es adecuado para el volumen mayor de ambas fases, que generalmente es el líquido, no ocurre un cambio en la presión y por consecuencia la fusión y solidificación de almacenamiento del material ocurre con una temperatura constante. Esta temperatura de fusión también se conoce como temperatura de cambio de fase.

El calor suministrado sobre el proceso de fusión se llama calor latente. Debido a que ocurre un cambio muy pequeño en el volumen, el calor almacenado es igual a una diferencia de entalpía que ocurre entre el sólido y la fase líquida.

El cambio de fase sólido-sólido tiene las mismas características que el sólido-líquido, con la diferencia de que no posee una gran entalpía de cambio de fase. Al igual que con el cambio de fase sólido-líquido, el sólido-sólido puede ser combinado con otros materiales dependiendo las aplicaciones. Por esta razón cuando hablamos de cambio de fase en general, los términos temperatura de cambio de fase y entalpía de cambio de fase se utilizan en lugar de temperatura de fusión y entalpía de fusión.

Para el caso del calor latente de cambio de fase líquido-vapor por evaporación y condensación posee una gran entalpía de cambio de fase y su proceso depende fuertemente de las condiciones de frontera.

Los sistemas cerrados con volumen constante y los volúmenes cerrados con presión constante resultan no adecuados para almacenamiento de calor. En el caso de los sistemas abiertos (presión ambiental) la única técnica de material empleado es el agua. Si sólo se utiliza un componente el proceso es llamado

evaporación-condensación homogénea, si se agrega un segundo componente se transforma a una evaporación-condensación heterogénea.

B.4 Calor de reacción química

Cuando se lleva a cabo una reacción química en el material, ocurre una diferencia entre la entalpía de la sustancia al final de la reacción y la entalpía de la sustancia al inicio de la reacción. Esta diferencia en la entalpía se conoce como calor de reacción.

Cuando la sustancia absorbe energía en forma de calor se llama reacción endotérmica, si por el contrario la sustancia desprende energía como luz y calor se llama reacción exotérmica.

B.5 Aplicaciones de almacenamiento de calor latente (cambio de fase sólido-líquido)

Las aplicaciones en el uso del PCM suelen ser en el control de temperatura y en el almacenamiento y suministro de calor o frío con un pequeño cambio de temperatura.

Control de temperatura

En la Figura B.4 se observa que el calor puede ser añadido o sustraído del material sin cambio significativo en su temperatura. Por esta razón el PCM puede ser utilizado para mantener estable la temperatura en aplicaciones. Por ejemplo, para mantener estable la temperatura en el interior de las edificaciones.

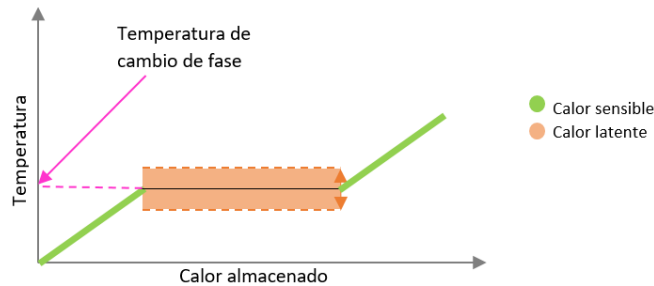


Figura B.4. Campo potencial de aplicación del PCM para control de temperatura.

Almacenamiento o suministro de calor o frío con alta densidad de almacenamiento

Como es posible observar en la Figura B.5, el PCM también es capaz de absorber o liberar grandes cantidades de calor con un cambio muy pequeño en su temperatura.

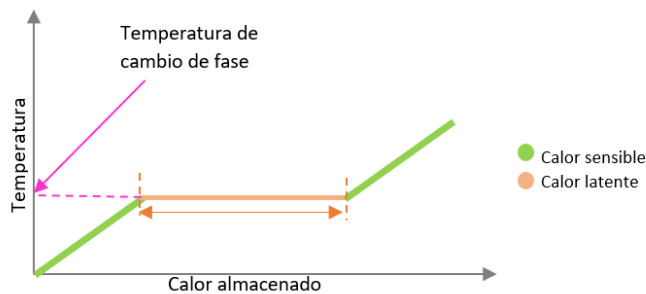


Figura B.5. Campo potencial de aplicación del PCM para almacenamiento de calor.

En la Tabla B.1 mostrada por Mehling y Cabeza (2008), en la que se evalúa la densidad en diferentes materiales, es posible observar que los PCM tienen la capacidad de absorber de tres a cuatro veces más calor por unidad de volumen que el calor en sólidos o líquidos en un intervalo de 20°C . Por lo tanto si se tiene una demanda de calor, una buena opción es almacenar calor en el PCM en lugar de almacenar energía eléctrica y convertir la energía eléctrica en calor bajo demanda.

Tabla B.1. Comparación de las densidades típicas de diferentes métodos de almacenamiento de energía

	MJ/m^3	kJ/kg	Comment
Sensible heat			
granite	50	17	$\Delta T = 20^\circ C$
water	84	84	$\Delta T = 20^\circ C$
Latent heat of melting			
water	306	330	melting temperature $0^\circ C$
paraffins	180	200	melting temperature $5^\circ C - 130^\circ C$
salt hydrates	300	200	melting temperatures $5^\circ C - 130^\circ C$
salts	600-1500	300-700	melting temperatures $300^\circ C - 800^\circ C$
Latent heat of evaporation			
water	2452	2450	ambient conditions
Heat of chemical reaction			
H_2 gas (oxidation)	11	120000	300K,1bar
H_2 gas (oxidation)	2160	120000	300K,200bar
H_2 liquid (oxidation)	8400	120000	20K,1bar
fossil gas	32	-	300K,1bar (Diekmann et. al. 1997)
gasoline (petroleum)	33000	43200	(Diekmann et. al. 1997)
Electrical energy			
zinc/manganese oxide battery	-	180	(Diekmann et. al. 1997)
lead battery	-	70-180	(Diekmann et. al. 1997)

Destacando datos observados en la misma Tabla se puede recalcar que los PCM de parafinas y sales hidratadas que usualmente son los más utilizados por diversos autores en la literatura, poseen una temperatura de fusión de 5 a 130°C.



**TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO**

cenidet[®]
*Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico*