



ACREDITADA INSTITUCIONALMENTE  
POR SU EXCELENCIA ACADEMICA

**Departamento de Ingeniería Mecánica**  
**Programa de maestría en Ingeniería Mecánica**

**Tesis de Maestría**

EVALUACIÓN ANALÍTICA Y EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE  
CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA A BAJA TEMPERATURA CON  
TECNOLOGÍA DE ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIAL DE CAMBIO  
DE FASE (PCM) EN TÉRMINOS ENERGÉTICOS Y EXERGÉTICOS

Autor:

Anggie Z. Rincón Ortega

Director:

Mauricio Carmona García, Ph.D.

2019

EVALUACIÓN ANALÍTICA Y EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE  
CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA A BAJA TEMPERATURA CON  
TECNOLOGÍA DE ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIAL DE  
CAMBIO DE FASE (PCM) EN TÉRMINOS ENERGÉTICOS Y EXERGÉTICOS

---

**Trabajo presentado como requisito de grado para optar el título de:  
Magíster en Ingeniería Mecánica**

**Autor:**

Anggie Z. Rincón Ortega

**Director:**

Ing. Mauricio Carmona García, MSc, Ph.D.

Universidad del Norte  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ingeniería Mecánica  
Barranquilla, Atlántico  
2019

*A mis padres: Nelfa Ortega y Jorge Rincón*

*Su apoyo, confianza y gran amor son el impulso para ser mejor cada día y la  
fortaleza para alcanzar mis sueños*

# Agradecimientos

El autor expresa sus agradecimientos a:

Dios, por permitirme vivir esta grandiosa etapa de mi vida, darme sabiduría para alcanzar cada objetivo propuesto y poner en mi camino cada persona que hizo parte del proceso.

Mi familia, por apoyarme y animarme en cada paso y decisión importante en mi carrera profesional, es una fortuna contar con una familia unida y llena de amor.

Al profesor Mauricio Carmona García, por su guía, consejos, profesionalismo y compañía indispensable en este proceso formativo, su amistad estuvo primero que todo, y por eso estaré eternamente agradecida.

A mis compañeros y amigos, Mario Palacio, Eduar Pérez, Alberto Palacio, Adriana Rincón, Iván Pornoy, Blanca Foliaco, Jhonnys Bustillo, Daniel Quintero, Lisneider Sánchez, Iván Gómez, y Luz Ahumada por su apoyo incondicional.

Al programa de becas “Formación de Capital Humano de alto nivel” del departamento Norte de Santander.

# Resumen

En este trabajo se evaluó en términos energéticos y exergéticos la utilización de la tecnología de acumulación de energía térmica con material de cambio de fase (PCM) en tanques de almacenamiento y colectores solares de placa plana, en comparación con tecnologías tradicionales para aplicaciones de calentamiento de agua a baja temperatura. Para el cumplimiento de los objetivos se desarrollaron modelos térmicos de los sistemas bajo estudio basados en la primera y segunda ley de la termodinámica, paralelamente se llevaron a cabo pruebas experimentales en ciclos típicos de operación con un colector solar de placa plana y un tanque de almacenamiento de agua a escala laboratorio, se utilizaron para cada caso, un equipo con incorporación de tecnología de almacenamiento con PCM y un equipo testigo con tecnología tradicional de almacenamiento de energía con calor sensible, éste último sirve como línea base para comparación energética y exergética, ya que fueron sometidos a las mismas condiciones operacionales, como PCM se utilizaron ceras de parafinas con diferentes temperaturas de fusión y propiedades térmicas. Finalmente, de acuerdo a los resultados obtenidos con la evaluación de las eficiencias se realizó un análisis para comparar el costo de la tecnología de almacenamiento en comparación con tecnologías tradicionales.

A partir del análisis comparativo, se encontró que la utilización de PCM como almacenamiento térmico influye positivamente en las temperaturas de los componentes y el rendimiento del colector solar, ya que se tiene disponibilidad de agua caliente en horario nocturno hasta las primeras horas del segundo día, con una eficiencia energética hasta 1.3 % mayor respecto al colector sin PCM, sin alterar significativamente la eficiencia exergética del dispositivo. Respecto al tanque de almacenamiento, se encontró que bajo las condiciones de operación analizadas la incorporación de PCM tiene una diferencia en el rendimiento energético y exergético poco apreciables respecto al tanque sin PCM. Adicionalmente, se realizó un análisis comparativo de la aplicación de un sistema de calentamiento solar de agua, incorporando un colector solar con y sin PCM con un sistema de apoyo (calentador eléctrico y a gas), para suministrar agua caliente de uso doméstico a una vivienda unifamiliar, se determinó que el consumo de energía en kWh y m<sup>3</sup> de gas del sistema de apoyo se reducía utilizando la tecnología de acumulación de energía térmica con PCM.

# Contenido

1.	Introducción .....	13
1.1.	Marco teórico .....	13
1.1.1.	Aprovechamiento de energía solar térmica.....	13
1.1.2.	Almacenamiento de energía térmica.....	13
1.1.3.	Análisis de exergía.....	15
1.2.	Estado del arte.....	15
1.3.	Planteamiento del problema y justificación.....	18
1.4.	Objetivos.....	19
1.4.1.	Objetivo General .....	19
1.4.2.	Objetivos específicos.....	19
1.5.	Estructura del documento.....	19
2.	Modelos energéticos.....	21
2.1.	Modelo energético para el colector solar .....	21
2.2.	Modelo energético del tanque de almacenamiento con PCM .....	22
2.2.1.	Modelo térmico del tanque .....	23
2.2.2.	Modelo térmico del material de cambio de fase.....	28
2.2.3.	Implementación en software .....	30
3.	Modelos exergéticos .....	33
3.1.	Análisis exergético de un sistema de almacenamiento con PCM .....	33
3.2.	Análisis exergético del colector solar .....	36
3.2.1.	Balance de exergía en la cubierta de vidrio .....	37
3.2.2.	Balance de exergía en la placa absorbedora.....	38
3.2.3.	Balance de exergía en el PCM .....	39
3.3.	Análisis exergético del tanque de almacenamiento .....	41
4.	Experimentación .....	43
4.1.	Colector solar de placa plana con PCM .....	43
4.2.	Tanque de almacenamiento con PCM.....	44
4.3.	Material de cambio de fase .....	45
4.4.	Instrumentación .....	46
4.4.1.	Estación meteorológica.....	47
4.4.2.	Unidad de adquisición de datos de temperatura .....	47
4.4.3.	Rotámetro .....	48
4.5.	Bancos de experimentación .....	48
4.5.1.	Colector solar .....	49
4.5.2.	Tanque de almacenamiento.....	50
4.6.	Protocolos de experimentación .....	50
4.7.	Validación del modelo del tanque de almacenamiento.....	52
5.	Evaluación del desempeño .....	56
5.1.	Colector solar.....	56
5.1.1.	Análisis comparativo .....	56
5.2.	Tanques de almacenamiento .....	69
5.2.1.	Análisis comparativo .....	69

5.3. Análisis comparativo de consumo energético .....	73
6. Conclusiones y propuestas de trabajos a futuro.....	80
6.1. Conclusiones .....	80
6.2. Propuesta de trabajos a futuro .....	82
7. Referencias.....	83

# Nomenclatura

<b>Caracteres latinos</b>	<b>Unidades</b>	
$c_p$	Calor específico	kJ/kg K
$d_i$	Diámetro interno	mm
$d_o$	Diámetro externo	mm
$g$	Gravedad	m/s <sup>2</sup>
$h_c$	Coefficiente de transferencia de calor por convección	W/m <sup>2</sup>
$h$	Entalpía	kJ
$h_{ls}$	Entalpía de fusión	kJ/kg
$\dot{H}_T$	Flujo de radiación solar global	W/m <sup>2</sup>
$i$	Nodo i	-
$k$	Conductividad térmica	W/m K
$L$	Longitud	mm
$m$	Masa	Kg
$\dot{m}$	Flujo másico	Kg/s
$Nu$	Número de Nusselt	-
$Pr$	Número de Prandtl	-
$\dot{Q}$	Flujo de calor	W
$Ra$	Número de Rayleigh	-
$Re$	Número de Reynolds	-
$T$	Temperatura	°C
$t$	Tiempo	S
$\dot{V}$	Flujo volumétrico	m <sup>3</sup> /s
$\dot{X}$	Flujo de exergía	J

## Símbolos griegos

$\alpha$	Difusividad térmica	mm <sup>2</sup> /s
$\beta$	Coefficiente de compresibilidad	1/K
$\eta$	Eficiencia	%
$\rho$	Densidad	Kg/m <sup>3</sup>
$\nu$	Viscosidad cinemática	m <sup>2</sup> /s
$\lambda$	Fracción fundida del PCM	-
$\tau$	Transmitancia	-

## Subíndices

amb	Ambiente
c	Cubierta de vidrio
carc	Carcaza de tanque
carg	Carga
conv	Convección
dest	Destruída
desc	Descarga

en	Energética
ex	Exergética
ent	Entrada
I	Interno
ini	Estado inicial
ins	Aislamiento
inf	Inferior
lat	Latente
<i>l<sub>s</sub></i>	Calor latente de fusión
mod	Módulo de PCM
O	Externo
sal	Salida
P	Placa absorbadora
PCM	Material de cambio de fase
rad	Radiación
sal	Salida
sen	Sensible
sup	Superior
w	Agua
wind	Aire exterior

### **Acrónimos**

PCM	Material de cambio de fase
PIR	Periodo de retorno de inversión
TIR	Tasa interna de retorno
VAN	Valor actual neto

# Lista de figuras

Figura 1.1 Clasificación de las sustancias utilizadas para almacenamiento térmico (Adaptado de Abhat, 1983) .....	14
Figura 1.2 Relación entre temperatura de fusión y entalpía de diferentes PCM (Tomada de Oliver et al., 2012) .....	15
Figura 1.3 Evolución del estado del arte (Análisis bibliométrico en la base de datos SCOPUS) .....	16
Figura 2.1 Esquema del colector solar con PCM (Adaptada de Carmona & Palacio, 2019) .....	21
Figura 2.2 Temperatura observada vs predicha por el modelo térmico en el colector solar (adaptada de Carmona & Palacio, 2019) .....	21
Figura 2.3 Representación de tanques de almacenamiento de agua caliente con PCM estudiados en literatura especializada (Adaptado de Kee et al., 2018) .....	23
Figura 2.4 Esquema de discretización del tanque con PCM .....	24
Figura 2.5 Interacciones de energía en el nodo i dentro del tanque (Adaptada de Bony & Citherlet, 2007) .....	25
Figura 2.6 Volumen de control diferencial con PCM en el tanque .....	29
Figura 2.7 Esquema de discretización del material de cambio de fase (PCM) en el tanque .....	29
Figura 2.8 Estructura del modelo térmico del tanque en Simulink .....	31
Figura 3.1 Balance exergético para un sistema de almacenamiento por calor latente típico .....	33
Figura 3.2 Transferencia de calor en un colector solar con PCM (Tomada de Carmona & Palacio, 2019) .....	36
Figura 3.3 Balance de exergía en la cubierta de vidrio .....	37
Figura 3.4 Balance de exergía en la placa absorbidora .....	38
Figura 3.5 Balance de exergía en el PCM .....	39
Figura 3.6 Discretización de las capas de PCM en el colector solar .....	40
Figura 4.1 Componentes del colector solar con PCM (Carmona & Palacio, 2019) .....	43
Figura 4.2 Componentes del tanque de almacenamiento con PCM .....	44
Figura 4.3 Macroencapsulado del PCM .....	46
Figura 4.4 Estación meteorológica .....	47
Figura 4.5 Unidad de adquisición de datos y medidores de temperaturas en las plataformas experimentales .....	48
Figura 4.6 Rotámetro .....	48
Figura 4.7 Plataforma experimental de los colectores con y sin PCM .....	49
Figura 4.8 Contenedores sin pasta térmica (Izquierda) y con pasta térmica (Derecha) .....	49
Figura 4.9 Plataforma experimental del tanque de almacenamiento con PCM .....	50
Figura 4.10 Comparación de temperaturas experimentales y estimadas por el modelo en los nodos del tanque .....	53
Figura 4.11 Temperatura del modelo y experimental en el interior del PCM del tanque de almacenamiento .....	54
Figura 4.12 Gráfica observada vs predicha de temperatura del modelo y temperatura experimental .....	54
Figura 4.13 Estratificación térmica en el tanque de almacenamiento .....	55
Figura 5.1 Medición experimental para un día de alta, media y baja radiación solar .....	57
Figura 5.2 Condiciones experimentales de velocidad del viento, temperatura ambiente y temperatura de entrada .....	57
Figura 5.3 Temperatura experimental de la cubierta de vidrio con y sin PCM .....	57
Figura 5.4 Temperatura experimental de la placa absorbidora con y sin PCM .....	58
Figura 5.5 Temperatura experimental de salida del agua del colector con y sin PCM .....	58
Figura 5.6 Exergía transferida al agua en el colector solar con y sin PCM .....	59
Figura 5.7 Temperatura de la capa superior de PCM para alta, media y baja radiación .....	59
Figura 5.8 Flujo de calor almacenado y suministrado por el PCM para alta, media y baja radiación .....	60
Figura 5.9 Eficiencia energética y exergética del colector solar con y sin PCM .....	60
Figura 5.10 Diagramas de Pareto para los tres escenarios planteados del colector solar con y sin PCM .....	63
Figura 5.11 Superficie de respuesta obtenida con los niveles óptimos del colector para el día de media radiación .....	66
Figura 5.12 Exergía transferida al agua con la configuración experimental y condiciones óptimas .....	67
Figura 5.13 Eficiencias de primera y segunda ley experimental y optima, con y sin PCM .....	68
Figura 5.14 Exergía destruida en el interior de las capas de PCM durante el proceso de fusión y solidificación .....	69
Figura 5.15 Escenario 1 y 2 de la temperatura de entrada del tanque de almacenamiento .....	70
Figura 5.16 Temperaturas de salida en el tanque de agua en el escenario 1 y 2 con y sin PCM .....	70
Figura 5.17 Temperatura del PCM en el tanque de almacenamiento escenario 1 y 2 .....	71
Figura 5.18 Flujos de calor del PCM en el tanque de almacenamiento de agua .....	72
Figura 5.19 Comparación de la eficiencia energética y exergética del tanque con y sin PCM .....	72

Figura 5.20 Estrategia de control propuesta P&ID..... 74  
Figura 5.21 Temperatura de salida de agua del colector en condiciones optimas y con aumento de PCM ..... 74



# Lista de tablas

Tabla 1.1 Clasificación y aplicaciones de la energía solar térmica (Adaptado de Islam & Morimoto, 2018).....	13
Tabla 1.2 Resumen de trabajos de colectores y tanques de almacenamiento con implementación de PCM .....	18
Tabla 2.1 Descripción de los nodos en el tanque con PCM.....	24
Tabla 2.2 Variables de entrada del modelo del tanque de almacenamiento .....	31
Tabla 2.3 Factores de entrada del modelo del tanque de almacenamiento .....	32
Tabla 4.1 Especificaciones del colector solar con PCM (Adaptada de Carmona & Palacio, 2019).....	43
Tabla 4.2 Especificaciones del tanque de almacenamiento con PCM .....	45
Tabla 4.3 Propiedades térmicas de las ceras de parafina utilizadas en la fase de experimentación (Rubitherm Technologies, 2016) .....	45
Tabla 4.4 Instrumentación y variables medidas en la plataforma experimental del colector solar .....	46
Tabla 4.5 Especificaciones técnicas de la estación meteorológica .....	47
Tabla 4.6 Especificaciones técnicas de los sensores de temperatura de la unidad de adquisición de datos AT4532 ..	48
Tabla 4.7 Especificaciones técnicas del rotámetro .....	48
Tabla 4.8 Procedimiento experimental para el colector solar .....	51
Tabla 4.9 Protocolo experimental para el tanque de almacenamiento.....	52
Tabla 4.10 Resultados de validación experimental.....	55
Tabla 5.1 Fechas de los días de análisis del colector solar para tres escenarios.....	56
Tabla 5.2 Parámetros de diseño y operación del colector solar explorados para optimización.....	61
Tabla 5.3 Configuraciones con mayor eficiencia en el colector con PCM.....	64
Tabla 5.4 Configuraciones con mayor eficiencia en el colector sin PCM .....	64
Tabla 5.5 Modelos de regresión de eficiencia exergética para los tres escenarios .....	65
Tabla 5.6 Valores óptimos de los parámetros del colector con y sin PCM para los tres escenarios.....	66
Tabla 5.7 Exergía destruida en los componentes del colector.....	68
Tabla 5.8 Parámetros y condiciones de operación del colector con y sin PCM .....	75
Tabla 5.9 Datos técnicos de calentador eléctrico y calentador a gas (Tomado de HACEB, 2018, 2019) .....	75
Tabla 5.10 Composición y propiedades del gas vigente en Barranquilla (tomando de PROMIGAS, 2019) .....	75
Tabla 5.11 Comparación del consumo de energía y cantidad de agua calentada con un colector con y sin PCM.....	76
Tabla 5.12 Resultados del indicador de consumo para un colector con y sin PCM .....	76
Tabla 5.13 Comparación del valor actual y proyectado del precio bolsa de la energía eléctrica y el gas natural (Tomada de UPME, 2017) .....	77
Tabla 5.14 Comparación de COP\$/m <sup>3</sup> de agua con electricidad y gas natural .....	77
Tabla 5.15 Ganancia en \$COP del consumo de m <sup>3</sup> de gas, de un colector con y sin PCM respecto al calentador a gas por año.....	78
Tabla 5.16 Inversión inicial en \$COP del colector solar con y sin PCM .....	78
Tabla 5.17 Resultados de PRI y TIR de la implementación de un colector con y sin PCM .....	79

# 1. Introducción

## 1.1. Marco teórico

### 1.1.1. Aprovechamiento de energía solar térmica

El uso de los sistemas de energía solar térmica ha protagonizado un gran desarrollo debido a una base razonable de costos iniciales y una estructura relativamente simple (Jafarkazemi & Ahmadifard, 2013), el aprovechamiento de la energía solar puede llevarse a cabo a partir de formas pasiva y activa, en la utilización pasiva no se requiere ningún dispositivo o mecanismo para captar la radiación solar, mientras la utilización activa se basa en el uso de un elemento denominado “colector” para captar la radiación. Como se muestra en la Tabla 1.1, los sistemas de energía solar térmica pueden catalogarse según la temperatura de operación en sistemas de baja temperatura, media temperatura y alta temperatura (Islam & Morimoto, 2018).

Temperatura de operación	Energía solar térmica		
	Baja (<120 °C)	Media (120 – 400 °C)	Alta (>400 °C)
<b>Sistema de conversión</b>	Colector solar de baja temperatura	Granjas solares	Generador de torre central
<b>Aplicaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Agua caliente para uso domestico</li> <li>➤ Cocción de alimentos</li> <li>➤ Secado</li> <li>➤ Destilación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Desalinización</li> <li>➤ Generación de calor industrial</li> <li>➤ Acondicionamiento de aire</li> <li>➤ Cocción de alimentos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Generación de energía</li> <li>➤ Refrigeración industrial</li> <li>➤ Generación de calor industrial</li> <li>➤ Desalinización</li> </ul>

Tabla 1.1 Clasificación y aplicaciones de la energía solar térmica (Adaptado de Islam & Morimoto, 2018)

La temática de investigación de este trabajo se encuentra enmarcada en el aprovechamiento de energía solar térmica de baja temperatura, específicamente en la aplicación de calentamiento de agua para uso doméstico. En este contexto, este tipo de sistemas se compone principalmente de una unidad colectora y un sistema de almacenamiento. La unidad recolectora consiste en un captador solar de un material selectivo que absorbe la energía solar, transfiere el calor al agua que fluye a través de una tubería y se almacena en un tanque de almacenamiento aislado para disposición final (Sansaniwal et al., 2018). Diferentes colectores, como el colector de placa plana, el colector de tubos de vacío, el colector plástico y el colector parabólico compuesto se utilizan ampliamente en aplicaciones de calentamiento de agua. Sin embargo, el más utilizado para estas aplicaciones a nivel mundial es el colector solar de placa plana (Pandey & Chaurasiya, 2017).

### 1.1.2. Almacenamiento de energía térmica

La energía solar térmica presenta dos características principales innatas muy importantes que la diferencian de las fuentes energéticas convencionales, estas son la dispersión e intermitencia. Debido a esto existe la necesidad del uso de tecnologías de acumulación o almacenamiento de energía térmica, con el fin de que pueda ser utilizada en momentos de demanda. La energía térmica se puede almacenar como un cambio en la energía interna de un material como calor sensible, calor latente, reacciones termoquímicas o una combinación de estas (Sharma et al., 2009).

Entre las técnicas de almacenamiento, la acumulación de energía térmica por calor latente de fusión es una alternativa con gran potencial en comparación a las tecnologías tradicionales, dado que presenta una mayor capacidad de almacenamiento por unidad de volumen, donde el estado sólido-líquido es el más interesante dentro de los posibles cambios de fase, ya que, aunque la cantidad de energía almacenada es inferior, presenta una menor variación de volumen en comparación a los otros cambios de estado. Los materiales de cambio de fase sólido-líquido más comunes en el rango de temperaturas 20 °C a 80 °C son las ceras de parafina, sales hidratadas, mezclas eutécticas y ácidos grasos (Oliver et al., 2012). En la Figura 1.1 se muestra la clasificación de las sustancias utilizadas para almacenamiento térmico según Abhat (1983), donde los materiales orgánicos como las ceras, grasas y sus ésteres, han sido recomendados como materiales acumuladores en aplicaciones de baja temperatura (Oliver et al., 2012).



Figura 1.1 Clasificación de las sustancias utilizadas para almacenamiento térmico (Adaptado de Abhat, 1983)

La Figura 1.2 muestra la relación entre temperatura de fusión y entalpía de las familias químicas de materiales de cambio de fase (PCM), puede observarse que las ceras de parafina poseen un amplio rango de temperaturas de operación en la región de generación térmica de baja temperatura. Estos materiales tienen un bajo costo respecto a otros de similares propiedades, una baja actividad química y un reducido potencial corrosivo. De esta manera, la estrategia de almacenamiento de energía térmica utilizada para esta investigación es el almacenamiento de calor latente de fusión con utilización de ceras de parafina como PCM.

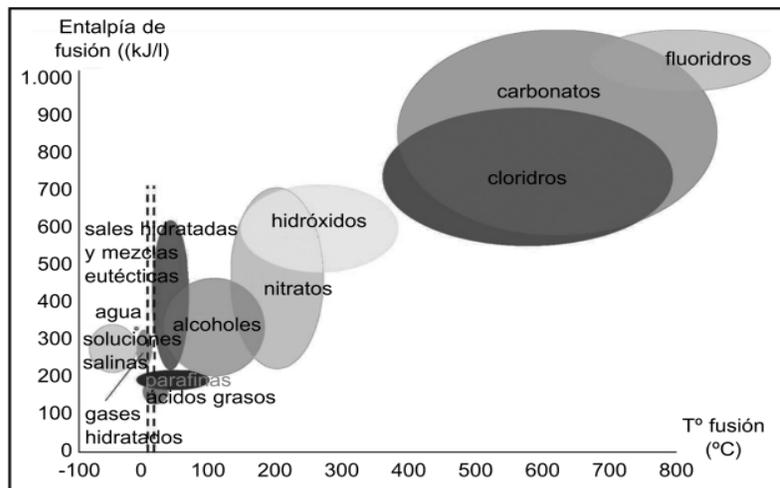


Figura 1.2 Relación entre temperatura de fusión y entalpía de diferentes PCM (Tomada de Oliver et al., 2012)

### 1.1.3. Análisis de exergía

La exergía se define como la propiedad que permite determinar el potencial de trabajo útil máximo que puede producir un sistema en dos estados especificados, es también denominada como energía disponible. La exergía de un sistema en un estado especificado depende de las condiciones del medio, así como de las propiedades del sistema, por lo tanto, está dada por la combinación entre sistema y ambiente y no del sistema exclusivamente (Oliver et al., 2012). Para la evaluación del rendimiento de un sistema, el análisis energético puede describir la conservación cuantitativa de la energía. Sin embargo, la debilidad de este análisis es el hecho de no tener en cuenta la degradación de la calidad de la energía que se produce cuando se convierte de una forma a otra, o intercambia entre los materiales y las corrientes a lo largo de los procesos de transferencia de calor (Kalogirou, 2004). En este trabajo se realiza una comparación basada en la evaluación del rendimiento exergético de la tecnología de almacenamiento térmico con PCM en un colector solar de placa plana, y un tanque de almacenamiento de agua frente a tecnologías convencionales para aplicaciones de calentamiento solar de agua, ya que a diferencia del análisis energético, el análisis exergético proporciona criterios de mejora de eficiencias generales, así como el uso racional de los recursos naturales para la evaluación y optimización de los sistemas de energía (Ibrahim & Dincer, 2001).

## 1.2. Estado del arte

La implementación de la tecnología de almacenamiento de energía térmica con PCM en aplicaciones de energía solar, es un tema de investigación que se encuentra en constante crecimiento desde mediados del año 2002 como puede observarse en la Figura 1.3. La temática abarcada en esta investigación consiste en evaluar la utilización de PCM en un sistema de calentamiento de agua con energía solar para uso doméstico, específicamente en un colector solar de placa plana y un tanque de almacenamiento de agua. De acuerdo a esto, los resultados de búsqueda en bases de datos indican que a la fecha se han reportado 2622 trabajos relacionados en aplicaciones de PCM en energía solar en general, 325 específicamente en colectores solares de placa plana y 341 publicaciones en tanques de almacenamiento de agua, si bien es un tema que se encuentra en un estado de evolución, el número de publicaciones sigue siendo bajo comparado con otras aplicaciones de energía solar, como es la energía solar

fotovoltaica que registra 45753 publicaciones. Con base a esto se puede afirmar que la temática de investigación abordada en este trabajo es relevante y aún cuenta con potencial en el área de estudio.

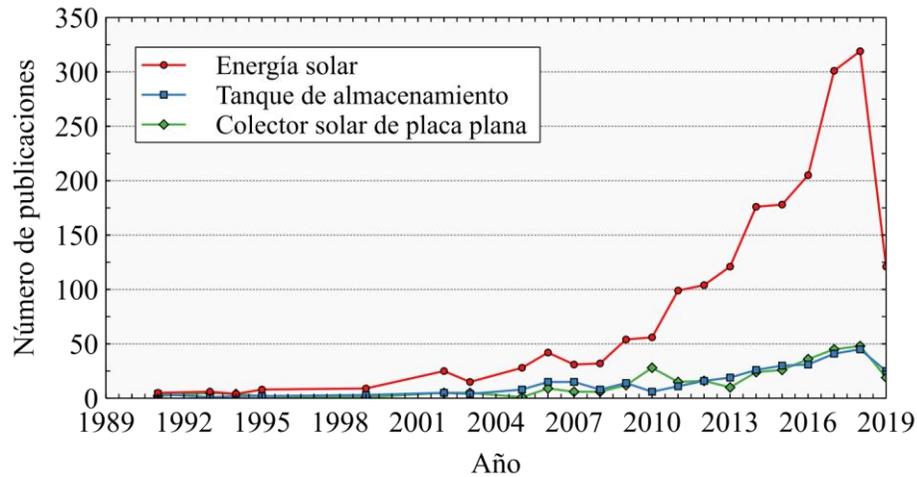


Figura 1.3 Evolución del estado del arte (Análisis bibliométrico en la base de datos SCOPUS)

Por otra parte, conocer el rendimiento de las unidades de almacenamiento de energía térmica es un aspecto de gran importancia para su utilización en diferentes aplicaciones, éste puede evaluarse a partir de dos enfoques, aplicando el principio de conservación de energía, y aplicando el principio de exergía, basado en la segunda ley. No obstante, autores como Verma et al. (2008) enfatizan la necesidad del análisis de exergía para los sistemas de almacenamiento de energía térmica, ya que proporciona la información necesaria para llevar a cabo una comparación con tecnologías tradicionales y un análisis termo económico, se considera que el análisis de segunda ley debe tomarse como un aspecto principal en los trabajos de investigación futuros relacionados con almacenamiento de energía térmica. A continuación, se presentan trabajos que se han desarrollado en materia de análisis exergéticos en sistemas de almacenamiento de energía térmica por calor latente: Li (2015), realizó una revisión sobre técnicas relacionadas con el caudal del fluido de transferencia de calor y la temperatura de entrada, la dimensión de la unidad de almacenamiento, y la temperatura de fusión, aditivos y el sub enfriamiento del PCM para proporcionar perspectivas de mejora de rendimiento de energía y exergía en sistemas de almacenamiento térmico por calor latente. Xu et.al. (2016), desarrollaron un modelo matemático de exergía para el proceso de carga y descarga en un tanque de almacenamiento con tres PCM en cascada que funden a diferente temperatura, encontraron que la máxima eficiencia exergética se puede obtener aumentando la temperatura de entrada del fluido de transferencia de calor. Ereğ & Dincer (2008), realizaron un análisis de eficiencia exergética de un sistema de almacenamiento de calor latente alrededor de tubo cilíndrico durante la carga mediante un modelo numérico, los resultados muestran que la generación de entropía es crucial en tales sistemas y debe minimizarse para aumentar la eficiencia de la exergía y, por ende, el rendimiento del sistema. Ramayya & Ramesh (1998), estudiaron en términos de eficiencia de primera y segunda ley el efecto del calentamiento sensible en el PCM antes de la fusión y sub enfriamiento después de la solidificación, sobre el rendimiento del sistema de almacenamiento de calor latente durante el ciclo completo de carga y descarga, las conclusiones muestran que la eficiencia de primera ley aumenta cuando aumenta el grado de almacenamiento por calor sensible por encima del punto de fusión en estado líquido, ya que se puede almacenar más energía térmica

en el sistema y la eficiencia general de la segunda ley, es mayor con calentamiento sensible y sub enfriamiento en comparación con el almacenamiento de calor latente exclusivamente. Por otra parte, en distintas investigaciones se han implementado diferentes maneras para evaluar el rendimiento en captadores solares y tanques de almacenamiento con incorporación de PCM. En la Tabla 1.2 se resume una lista de trabajos de acuerdo a la evaluación del rendimiento en base a la eficiencia energética y exergética mediante simulación (Sim) o enfoque experimental (Exp), donde los trabajos marcados con asterisco (\*) realizan una comparación simultánea con y sin incorporación de tecnología PCM.

Año	Sistema con PCM	Ubicación geográfica	Trabajo	Primera ley		Segunda ley	
				Exp	Sim	Exp	Sim
2007	Tanques	Francia	Second law analysis of latent thermal storage for solar system (Kousksou et al., 2007)		✓		✓
2008	Colector	Elazığ, Turquía	Energy and exergy analysis of a latent heat storage system with phase change material for a solar collector (Koca et al., 2008)	✓		✓	
2009	Colector	Marrakech, Marruecos	Numerical analysis of a coupled solar collector latent heat storage unit using various phase change materials for heating the water (Qarnia, 2009)		✓		
2010	Tanques	Zarqa, Jordania	Experimental investigation on the use of water-phase change material storage in conventional solar water heating systems (Al-Hinti et al., 2010)	✓			
2011	Tanques*	Francia	PCM storage for solar DHW: From an unfulfilled promise to a real benefit ( Kousksou et al., 2011)		✓		
2012	Colector	Beijing, China	Exergy analysis of two-phase change materials storage system for solar thermal power with finite-time thermodynamics (Li, 2015)		✓		✓
2013	Tanques	Isfahán, Irán	Phase change material for enhancing solar water heater, an experimental approach (Fazilati & Alemrajabi, 2013)	✓		✓	
2013	Colector	Baghdad, Iraq	A storage domestic solar hot water system with a back layer of phase change material (Khalifa et al., 2013)	✓			
2014	Colector *	Nanjing, China	Thermal performance of a solar storage packed bed using spherical capsules filled with PCM having different melting points (Yang, et al., 2014)		✓		✓
2014	Tanques	Kuala Lumpur, Malaysia	Performance investigation of thermal energy storage system with Phase Change Material (PCM) for solar water heating application (Mahfuzet al., 2014)	✓		✓	
2014	Colector *	Perak, Malaysia	Performance evaluation of a solar water heater integrated with a PCM nanocomposite TES at various inclinations (Al-Kayiem & Lin, 2014)	✓			
2016	Colector	Meknès, Marruecos	Exergy analysis of solar desalination still combined with heat storage system using phase change material (PCM) (Asbik et al., 2016)		✓		✓
2017	Colector	Gabes, Tunisia	Numerical analysis of charging and discharging performance of an integrated collector storage solar water heater (Hamed et al., 2017)		✓		✓

2017	Colector	Barranquilla, Colombia	Exergy analysis of a flat plate solar collector with latent heat storage by phase change material for water heating applications at low temperature (Rincón & Carmona, 2017)	✓
2018	Colector	Barranquilla, Colombia	Experimental analysis of a flat plate solar collector with integrated latent heat thermal storage (Carmona, et al., 2018)	✓
2018	Tanques	Beijing, China	Thermal performance assessment and improvement of a solar domestic hot water tank with PCM in the mantle (Deng et al., 2018)	✓
2018	Colector*	Nanjing, China	Experimental study on the performance of a novel solar water heating system with and without PCM (Wu et al., 2018)	✓
2019	Colector*	Barranquilla, Colombia	Thermal modelling of a flat plate solar collector with latent heat storage validated with experimental data in outdoor conditions (Carmona & Palacio, 2019)	✓

Tabla 1.2 Resumen de trabajos de colectores y tanques de almacenamiento con implementación de PCM

Como puede apreciarse en la lista de trabajos citados en la revisión bibliográfica, la evaluación del rendimiento en sistemas de almacenamiento de energía térmica con material de cambio de fase en colectores solares y tanques de almacenamiento de agua, a la fecha no se ha llevado a cabo un estudio basado en la primera y segunda ley de la termodinámica mediante simulación y enfoque experimental de manera simultánea y bajo las mismas condiciones de operación con sistemas testigos de tecnología convencional. De esta manera, se puede afirmar que la temática abarcada es acertada y presenta buen potencial de investigación.

### 1.3. Planteamiento del problema y justificación

En el marco de la aplicación de calentamiento solar de agua para uso doméstico, la tecnología de almacenamiento de energía térmica por calor latente mediante la utilización de PCM, se proyecta como una tecnología prometedora para superar los retos técnicos en términos de dispersión e intermitencia de la radiación solar. Debido a esto, a lo largo del tiempo se ha incrementado el interés por el desarrollo de investigaciones que abordan el tema. Sin embargo, para la evaluación del rendimiento de esta tecnología, específicamente utilizada en colectores solares y tanques de almacenamiento, se ha limitado al análisis de primera ley de la termodinámica, así mismo, no se han desarrollado trabajos relacionados con estos sistemas que evalúen el rendimiento bajo una comparación con sistemas testigos con tecnología tradicional mediante la aplicación de modelos y datos experimentales de manera simultánea.

El propósito principal de un sistema de almacenamiento de energía térmica no consiste solamente en almacenar la energía, sino almacenar energía útil (Bejan, 1978). Siendo así, el análisis energético se vuelve incompleto para evaluar el rendimiento de una unidad de almacenamiento térmico, ya que no se obtiene información sobre la utilidad de la energía, mientras que la eficiencia exergética permite medir la calidad de la energía almacenada y recuperada durante la carga y descarga del material, teniendo en cuenta la generación de entropía y por lo tanto la destrucción de exergía que se presenta a causa de las irreversibilidades internas y externas del sistema durante el ciclo (Jegadheeswaran et al., 2010).

De esta manera, con el propósito de conocer la viabilidad de la tecnología de almacenamiento térmico con PCM en comparación con tecnologías tradicionales para calentamiento solar de agua, se propone evaluar en términos energéticos y exergéticos el rendimiento de un sistema de captación por colector solar de placa plana y un tanque de almacenamiento a partir del desarrollo

de modelos reducidos y datos experimentales, bajo las mismas condiciones de operación en los sistemas de estudio con acumulación de energía y sistemas testigos con tecnología tradicional.

## 1.4. Objetivos

### 1.4.1. Objetivo General

Evaluar mediante modelos analíticos y experimentales un sistema de calentamiento solar de agua a baja temperatura con tecnología de almacenamiento térmico con material de cambio de fase (PCM) en términos energéticos y exergéticos.

### 1.4.2. Objetivos específicos

1. Desarrollar y aplicar un modelo energético de un colector solar de placa plana y un tanque de almacenamiento con acumulación de energía térmica con PCM
2. Desarrollar modelos de exergía para un sistema de colector solar de placa plana y un tanque de almacenamiento con tecnología de acumulación de energía térmica con PCM
3. Obtener datos experimentales con un colector solar de placa plana y un tanque de almacenamiento de agua caliente, con y sin acumulación de energía térmica por PCM en ciclos típicos de operación
4. Comparar el desempeño energético y exergético de un colector solar de placa plana y un tanque de almacenamiento de agua caliente con acumulación de energía térmica con PCM y sistemas testigos con tecnología tradicional basados en los datos experimentales y datos obtenidos por los modelos implementados

## 1.5. Estructura del documento

El desarrollo de actividades desarrolladas para el cumplimiento de cada uno de los objetivos específicos y del objetivo general de la investigación se presenta a continuación del capítulo 2 al capítulo 5 del presente documento. En el capítulo 2 inicialmente se presenta el modelo térmico utilizado para el colector solar con incorporación de PCM, en la segunda parte se describen las ecuaciones de balance de energía, variables y factores de entrada del modelo térmico desarrollado para el tanque de almacenamiento con PCM y el modelo bidimensional para el PCM. En el capítulo 3 se establecen las ecuaciones y los balances de exergía utilizados para el desarrollo de modelos exergéticos, inicialmente para un sistema de almacenamiento térmico con PCM, y posteriormente para el colector solar y el tanque de almacenamiento con y sin incorporación de PCM.

En el capítulo 4 se presenta la fase experimental del colector solar y el tanque de almacenamiento con sistemas testigos con tecnología convencional, se describen los componentes de las plataformas, las condiciones experimentales de los bancos de experimentación y el establecimiento de las pruebas bajo condiciones reales, finalmente presentan los resultados de validación del modelo térmico desarrollado para el tanque de almacenamiento.

En el capítulo 5 se muestra el análisis del rendimiento energético y exergético del colector solar y el tanque de almacenamiento de agua con PCM en comparación con sistemas con tecnología convencional, el análisis comparativo se realizó mediante datos experimentales y la utilización

de los modelos desarrollados. Posteriormente, en base a los resultados comparativos se planteó un escenario de operación conectando un sistema de calentamiento solar de agua con un calentador eléctrico y un calentador a gas como sistema de apoyo, para determinar el consumo en kWh y m<sup>3</sup> de gas, se realiza una comparación de costos con valor actual y una proyección al 2031 de la bolsa de kWh de electricidad y el m<sup>3</sup> de gas.

Finalmente se presentan las conclusiones y propuesta para trabajos futuros en el capítulo 6.

## 2. Modelos energéticos

### 2.1. Modelo energético para el colector solar

Para llevar a cabo la evaluación del rendimiento del sistema de calentamiento solar de agua con tecnología de almacenamiento térmico con PCM en un colector solar de placa plana y un tanque aislado como sistema de almacenamiento, se utilizarán modelos térmicos simplificados: un modelo térmico para un colector solar modificado para instalar contenedores de PCM bajo la placa absorbidora, y un modelo térmico desarrollado para el tanque de almacenamiento descrito en la sección posterior. La Figura 2.1 muestra una representación gráfica del colector solar con incorporación de PCM propuesto por Carmona et al. (2015).

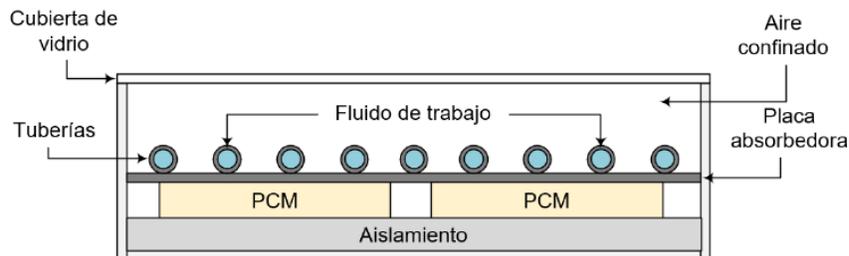


Figura 2.1 Esquema del colector solar con PCM (Adaptada de Carmona & Palacio, 2019)

El modelo térmico reducido del colector solar desarrollado por Carmona & Palacio (2019), fue validado con datos experimentales recopilados en condiciones exteriores de un prototipo real, en la Figura 2.2 puede observarse que los valores predichos por el modelo se ajustan apropiadamente a los datos de temperatura tomados experimentalmente en cada uno de los componentes del colector.

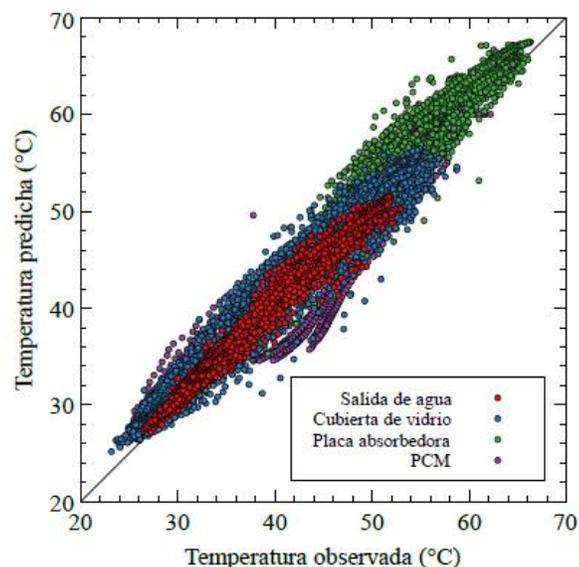


Figura 2.2 Temperatura observada vs predicha por el modelo térmico en el colector solar (adaptada de Carmona & Palacio, 2019)

El modelo permite evaluar el rendimiento del colector con y sin incorporación de PCM bajo condiciones de frontera dinámicas y diferentes escenarios de operación, con la posibilidad de

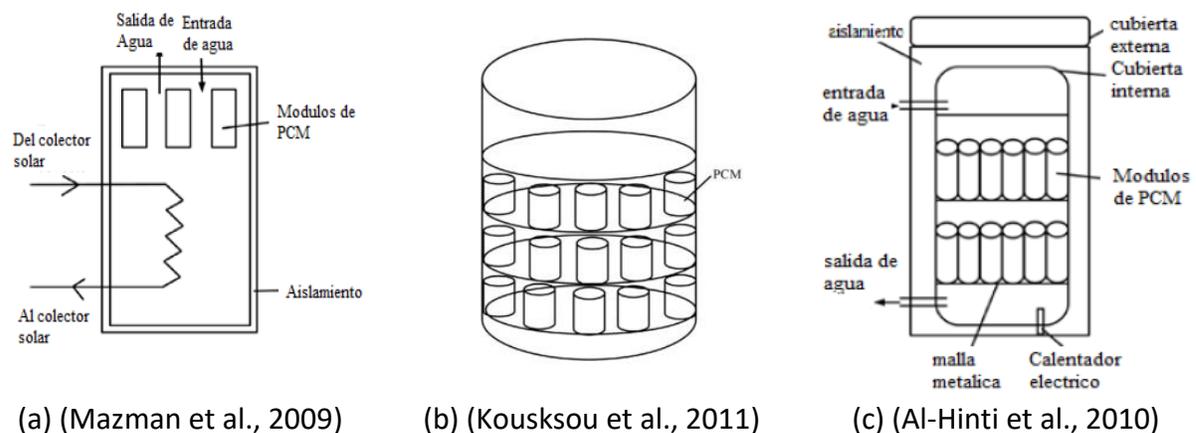
estudiar ciclos completos de carga y descarga del PCM, adicional permite analizar el comportamiento térmico de cada uno de los componentes.

A partir de la aplicación de las ecuaciones utilizadas en el modelo térmico del colector solar se desarrolló un modelo exergético para el colector con y sin PCM, el cual se describirá en detalle en el capítulo 3. Respecto a la experimentación, las pruebas con el colector solar de placa plana y el tanque de almacenamiento se realizaron en sistemas separados, y serán descritas en la sección de experimentación de este documento.

## 2.2. Modelo energético del tanque de almacenamiento con PCM

Durante la última década, la mayoría de estudios sobre aplicaciones de calentamiento de agua para uso doméstico utilizando PCM como acumulador de energía térmica, concluyen que el uso de PCM en dispositivos de agua caliente para aumentar la capacidad de almacenamiento térmico, apunta a un mejoramiento del desempeño global en sistemas de calentamiento mediante energía solar (T. Kousksou et al., 2011). Sin embargo, el tema de investigación es bastante amplio, ya que existe un gran número de posibles configuraciones del PCM, cuya disposición varía según el tipo de dispositivo o sistema de calentamiento, esto a su vez impone un reto en cuestiones de metodologías de diseño debido a las diversas alternativas, para el desarrollo de esta investigación es deseable una metodología de modelado que incluya cálculos rápidos de los principales parámetros térmicos, obteniendo un modelo basado en correlaciones semi-empíricas que se pueden usar para conseguir diseños preliminares del dispositivo, sirviendo como preevaluador de diferentes configuraciones y obteniendo estimaciones de rendimiento térmico bajo diferentes condiciones de operación.

Los trabajos de tipo experimental de dispositivos de agua caliente con incorporación de PCM en el campo de la energía solar han sido estudiados por diferentes autores, de acuerdo con el artículo de revisión presentado por Kee et al. (2018), se han estudiado diferentes diseños para la incorporación de PCM en los tanques de almacenamiento de agua caliente, típicamente se insertan dentro del tanque botellas de aluminio con PCM en el interior (Figura 2.3a, Figura 2.3b, Figura 2.3c), cilindros de diferentes materiales llenos con PCM (Figura 2.3d), o cápsulas esféricas (Figura 2.3e). También se ha investigado la inmersión de la tubería del fluido calo portador en el PCM (Figura 2.3f).



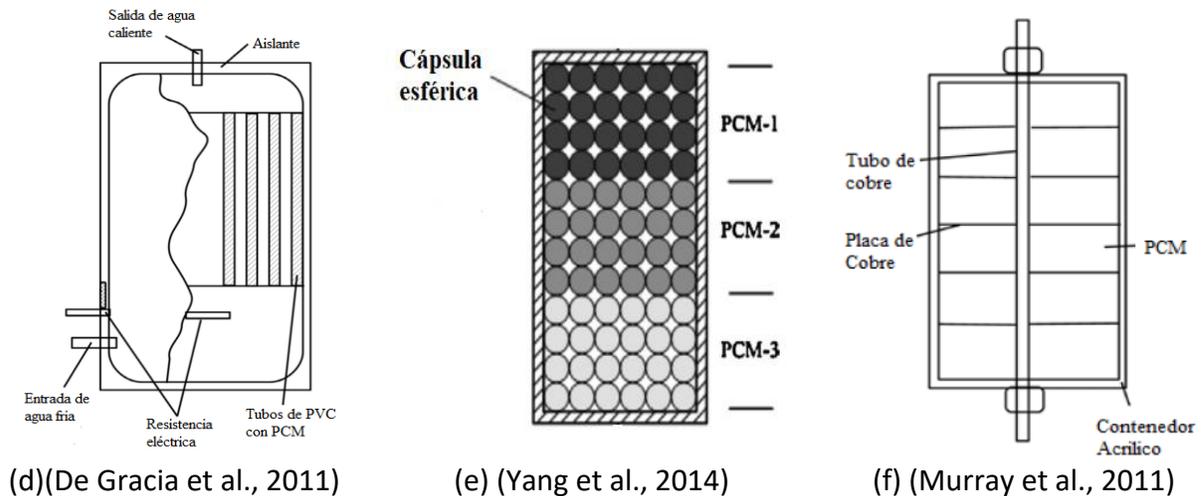


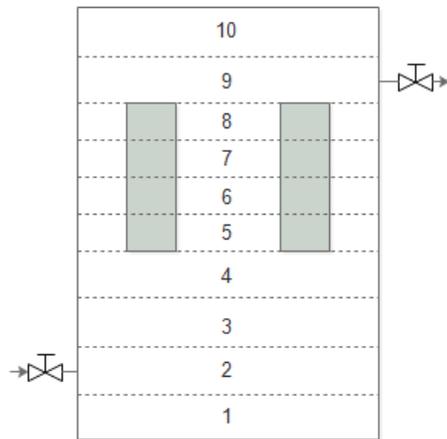
Figura 2.3 Representación de tanques de almacenamiento de agua caliente con PCM estudiados en literatura especializada (Adaptado de Kee et al., 2018)

De los anteriores diseños, se selecciona como caso de estudio en esta investigación los tanques de almacenamiento con sistema directo (Figura 5a, Figura 5b, Figura 5c o Figura 5d) debido a que permite emplear la tecnología en dispositivos existentes sin realizar mayores cambios constructivos en los diseños. Se tomará como opción inicial de estudio la configuración de tanque con sistema directo con incorporación de cilindros (Figura 5d), ya que presenta mayor capacidad de adquisición en Colombia.

A partir de esto, se desarrollará un modelo térmico reducido para el tanque de almacenamiento con incorporación de PCM con la capacidad de evaluar el rendimiento, bajo diferentes escenarios de operación y con la posibilidad de estudiar el comportamiento térmico del PCM durante los ciclos de carga y descarga. A continuación, se presentarán los supuestos sobre los que se fundamenta el modelo térmico del tanque y el PCM, ecuaciones de gobierno, detalles de programación en software del modelo, las variables y parámetros de entrada, los parámetros de simulación y las variables de salida.

### 2.2.1. Modelo térmico del tanque

El modelo térmico se fundamenta en los mecanismos de transferencia de calor y masa que intervienen en los balances de energía dentro del agua y el PCM en el tanque. El modelo está basado en un enfoque multinodo, que consiste en dividir el dominio del tanque en N capas verticales, en la Figura 2.4 se ilustra la discretización multicapa del tanque, donde se establecieron 10 capas a lo largo del tanque, la descripción de cada capa se puede observar en la Tabla 2.1.



Nodo	Descripción
1 – 4	Sólo contienen agua y se encuentran por debajo del nivel de los módulos de PCM
5 – 8	Corresponden a los nodos que contienen los módulos con PCM
9	Sólo contienen agua y se encuentran por encima del nivel de los módulos de PCM
10	Espacio de aire en la parte superior del tanque

Figura 2.4 Esquema de discretización del tanque con PCM      Tabla 2.1 Descripción de los nodos en el tanque con PCM

El modelo se fundamenta en los siguientes supuestos:

- La temperatura del agua en cada nodo es uniforme
- El transporte de masa dentro del tanque es unidimensional, en dirección vertical
- El tanque y los nodos se consideran sistemas abiertos en estado transitorio
- No hay generación de calor dentro del tanque (i.e. no hay dispositivos de calefacción)
- Las energías potenciales y cinéticas son despreciables en comparación con la energía interna y la entalpía

Por otra parte, con el fin de determinar si el PCM se puede considerar como una masa concentrada, se calculó el número de Biot en los módulos de PCM mediante la ecuación 2.1 (Incropera et al., 1999):

$$Bi = \frac{hL_c}{k} \quad (2.1)$$

Siendo  $h$ , el coeficiente de transferencia de calor en la superficie,  $L_c$  la longitud característica de la botella y  $k$  la conductividad térmica del material.

Dando como resultado  $Bi \approx 0.2 > 0.1$ . Lo cual indica que el PCM sólido no se comporta como una masa concentrada dentro del tanque de almacenamiento, por lo que se debe hacer un modelo transitorio multidimensional para el PCM. Se aprovecha la simetría del sistema para reducir el modelo a una condición bidimensional axi-simétrica.

#### Balance de energía en el nodo $i$ :

Se elige un nodo intermedio de agua como volumen de control para el análisis. En la Figura 2.5 se pueden observar las interacciones de masa y energía que involucran al volumen de control.

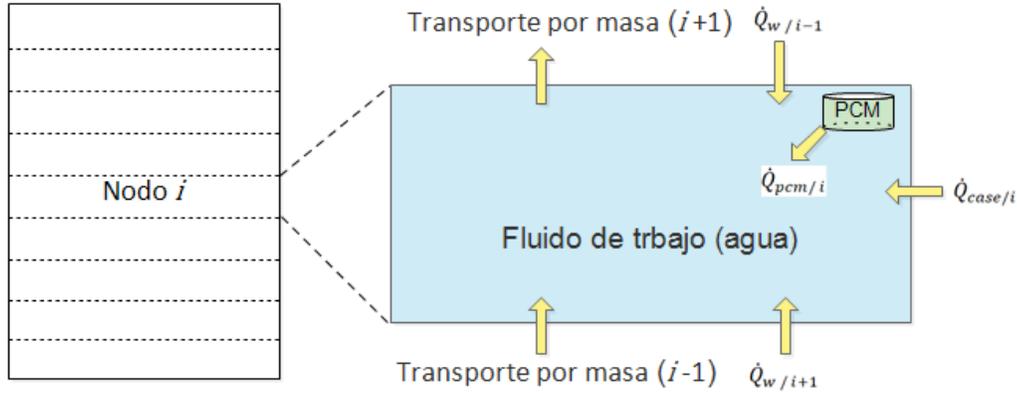


Figura 2.5 Interacciones de energía en el nodo  $i$  dentro del tanque (Adaptada de Bony & Citherlet, 2007)

Teniendo en cuenta las suposiciones del modelo, el balance de energía para el agua es:

$$C_{w/i} m_{w/i} \frac{dT_{w/i}}{dt} = \dot{Q}_{w/i-1} + \dot{Q}_{w/i+1} + \dot{Q}_{PCM/i} + \dot{Q}_{carc/i} + \dot{m}_w (C_{w/i-1} T_{w/i-1} - C_{w/i+1} T_{w/i+1}) \quad (2.2)$$

Siendo,  $C_w$  el calor específico del agua,  $\dot{m}_w$  es el flujo de masa en el tanque.

Donde las transferencias de calor corresponden a:

$\dot{Q}_{w/i+1}$  = Transferencia de calor entre el agua del nodo superior y el agua del nodo  $i$

Transferencia de calor entre el agua del nodo inferior y el agua del nodo  $i$

$\dot{Q}_{PCM/i}$  = Transferencia de calor entre los módulos con PCM y el agua del nodo  $i$

$\dot{Q}_{carc/i}$  = Transferencia de calor entre la carcasa del tanque y el agua del nodo  $i$

### Relaciones de masa para el nodo $i$ : $m_{w/i}$ y $\dot{m}_w$

La masa del agua contenida en el nodo  $i$  en el instante dado se obtiene mediante la expresión:

$$m_{w/i} = \frac{\pi}{4} (d_{I,carc,i}^2 - N_{mod/i} d_{O,mod}^2) L_i \rho_{w/i} \quad (2.3)$$

Donde  $N_{mod/i}$  es el número de módulos de PCM,  $d_{I,carc,i}$  y  $d_{O,mod}$  el diámetro interno del tanque y diámetro externo del módulo de PCM respectivamente,  $L_i$  la longitud del nodo  $i$ .

El flujo másico se obtiene de la ecuación:

$$\dot{m}_w = \dot{V}_{w/in} * \rho_{w/in} \quad (2.4)$$

Donde  $\dot{V}_{w/in}$  y  $\rho_{w/in}$  corresponden al flujo volumétrico de agua y la densidad del agua en la entrada del tanque respectivamente.

### Transferencia de calor entre el agua de nodos adyacentes al nodo $i$ $\dot{Q}_{w/i\pm 1}$ :

La transferencia de calor con el agua de nodos adyacentes se considera por conducción (Bony, 2007):

$$\dot{Q}_{w/i-1} = \frac{\pi}{4} (d_{I,carc,i}^2 - N_{mod/i-1} d_{O,mod}^2) \frac{k_{w/i}}{L_i} (T_{w/i-1} - T_{w/i}) \quad (2.5)$$

$$\dot{Q}_{w/i+1} = \frac{\pi}{4} (d_{I,carc,i}^2 - N_{mod/i+1} d_{O,mod}^2) \frac{k_{w/i}}{L_i} (T_{w/i+1} - T_{w/i}) \quad (2.6)$$

Donde  $d_{I,carc,i}$  es el diámetro interno del tanque,  $d_{O,mod}$  es el diámetro externo de los módulos de PCM,  $L_i$  es la altura del nodo, y  $k_{w/i}$  es la conductividad térmica del agua.

### Transferencia de calor entre los módulos con PCM y el agua del nodo $i$ $\dot{Q}_{PCM/i}$ :

Esta transferencia de calor se considera por convección y se expresa como:

$$\dot{Q}_{PCM/i} = h_{,mod/i} (N_{mod/i} \pi d_{O,mod} L_i) (T_{O,mod/i} - T_{w/i}) \quad (2.7)$$

Para tanques con un diámetro grande, la velocidad del fluido y el número de Reynolds son pequeños, por lo que la convección natural gobierna el proceso de transferencia de calor (Incropera et al., 1999).

Mediante la comparación de los números de Grashof y Reynolds en el rango de operación del tanque se confirmó que cumple con el criterio  $\frac{Gr}{Re^2} \gg 1$ . Entonces, se utiliza la correlación de Churchill para superficie vertical dada por la ecuación (Incropera et al., 1999):

$$Nu_{mod/i} = \frac{h_{,mod/i} L_i}{k} = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 (Ra_{PCM/i})^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (2.8)$$

Donde:

$$Ra_{PCM/i} = \frac{g \beta |T_{O,mod/i} - T_{w/i}| L_i^3}{\nu^2} Pr$$

$$k, Pr, \beta, \nu, \alpha @ T = \frac{T_{O,mod/i} + T_{w/i}}{2} \quad (\text{propiedades del agua})$$

Adicionalmente, mediante un análisis de transferencia de calor se obtiene la temperatura superficial externa de los módulos con PCM, expresada por la siguiente ecuación:

$$\frac{\dot{Q}_{PCM/i}}{N_{mod/i}} = \frac{T_{I,mod/i} - T_{O,mod/i}}{\frac{\ln \frac{d_{O,mod}}{d_{I,mod}}}{2\pi L_i k_{mod}}} \quad (2.9)$$

$$T_{O,mod/i} = T_{I,mod/i} - \frac{\dot{Q}_{PCM/i}}{N_{mod/i}} \left( \frac{\ln \frac{d_{O,mod}}{d_{I,mod}}}{2\pi L_i k_{mod}} \right)$$

Siendo,  $T_{O,mod}$  la temperatura externa de los módulos de PCM.

Se debe tener presente que el signo depende de la convención de signos estándar. La temperatura superficial interna del módulo se obtiene como condición de frontera en el modelo del PCM, la cual se presentará en el método de entalpías de la siguiente sección.

**Transferencia de calor entre la carcasa del tanque y el agua del nodo i:  $\dot{Q}_{carc/i}$** 

La transferencia de calor entre la superficie interna de la carcasa del tanque y el agua del nodo ocurre por convección:

$$\dot{Q}_{carc,i/i} = h_{carc,i/i}(\pi d_{I,carc,i} L_i)(T_{I,carc,i/i} - T_{w/i}) \quad (2.10)$$

Una vez más, la transferencia de calor se considera como convección libre y se utiliza la correlación de Churchill para superficie vertical:

$$Nu_{carc,i/i} = \frac{h_{carc,i/i} L_i}{k} = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 (Ra_{carc,i/i})^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (2.11)$$

$$Ra_{carc,i/i} = \frac{g\beta |T_{I,carc,i/i} - T_{w/i}| L_i^3}{\nu^2} Pr$$

$$k, Pr, \beta, \nu, \alpha @ T = \frac{T_{I,carc,i/i} + T_{w/i}}{2} \quad (\text{propiedades del agua})$$

Por otra parte, la temperatura superficial interna de la carcasa del tanque se evalúa mediante:

$$\dot{Q}_{carc,i/i} = \frac{T_{O,carc,o/i} - T_{I,carc,i/i}}{\frac{\ln \frac{d_{O,carc,i}}{d_{I,carc,i}}}{2\pi L_i k_{carc}} + \frac{\ln \frac{d_{O,ins}}{d_{I,ins}}}{2\pi L_i k_{ins}} + \frac{\ln \frac{d_{O,carc,o}}{d_{I,carc,o}}}{2\pi L_i k_{carc}}} \quad (2.12)$$

$$T_{I,carc,i} = T_{O,carc,i} - \dot{Q}_{carc,i} \left( \frac{\ln \frac{d_{O,carc,i}}{d_{I,carc,i}}}{2\pi L_i k_{carc}} + \frac{\ln \frac{d_{O,ins}}{d_{I,ins}}}{2\pi L_i k_{ins}} + \frac{\ln \frac{d_{O,carc,o}}{d_{I,carc,o}}}{2\pi L_i k_{carc}} \right)$$

Donde  $h_{carc/i}$  es el coeficiente de transferencia de calor de la carcasa,  $T_{O,carc,o/i}$  y  $T_{I,carc,i/i}$  son las temperaturas externa e interna de la carcasa, respectivamente,  $k_{carc}$  es la conductividad térmica de la carcasa, y  $k_{ins}$  es la conductividad térmica del aislante.

El signo depende de la convención de signos estándar. La temperatura superficial externa de la carcasa del tanque se obtiene mediante la ecuación de convección con el aire ambiente:

$$\dot{Q}_{carc,o/i} = h_{carc,o/i} \pi d_{O,carc,o} L_i (T_{amb} - T_{O,carc,o/i}) \quad (2.13)$$

$$T_{O,carc,o/i} = T_{amb} - \frac{\dot{Q}_{carc,o/i}}{h_{carc,o/i} \pi d_{O,carc,o} L_i}$$

La transferencia de calor con el aire ambiente ocurre por convección libre:

$$Nu_{carc,o/i} = \frac{h_{carc,o/i} L_i}{k} = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 (Ra_{carc,o/i})^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (2.14)$$

$$Ra_{carc,o/i} = \frac{g\beta |T_{o,carc,o/i} - T_{amb}| L_i^3}{\nu^2} Pr$$

$$k, Pr, \beta, \nu, \alpha @ T = \frac{T_{o,carc,o/i} + T_{amb}}{2} \quad (\text{propiedades del aire})$$

### Consideraciones para el nodo inferior del tanque

Para el caso del primer nodo (nodo inferior) se calcula adicionalmente la transferencia de calor por la tapa inferior del tanque, la cual se evalúa como una superficie horizontal con convección libre. La correlación utilizada es (Incropera et al., 1999):

$$Nu_{inf,I} = \frac{h_{inf,in} L_c}{k} = 0.27 Ra_{inf,I}^{1/4} \quad (\text{agua - superficie}) \quad (2.15)$$

$$Nu_{inf,O} = \frac{h_{inf,out} L_c}{k} = 0.27 Ra_{inf,O}^{1/4} \quad (\text{aire - superficie}) \quad (2.16)$$

Donde la longitud característica se define como la relación entre el área superficial y el perímetro  $L_c = A/p$ .

### Consideraciones para el nodo superior del tanque

En el caso de último nodo (nodo superior) se incluye la transferencia de calor con el aire atrapado en el tanque. Esto se modela como una cámara de aire encerrado en posición horizontal y se calcula como (Incropera et al., 1999):

$$\dot{Q}_{sup,air} = h_{sup,air} \left( \frac{\pi}{4} d_{I,case,I}^2 \right) (T_{w/sup} - T_{sup}) \quad (2.17)$$

$$Nu_{sup,air} = 1 + 1.44 \left[ 1 - \frac{1708}{Ra_{air}} \right]^+ + \left[ \frac{Ra_{air}^{1/3}}{18} - 1 \right]^+ \quad (\text{propiedades del aire}) \quad (2.18)$$

La notación  $[ ]^+$  indica que, si la cantidad entre corchetes es negativa, debe igualarse a cero.

## 2.2.2. Modelo térmico del material de cambio de fase

Para describir el comportamiento del cambio de fase del material se utiliza el método de entalpías (Voller, 1990). En este caso, aprovechando la geometría de los módulos, es conveniente un modelo bidimensional utilizando coordenadas cilíndricas en las direcciones radial y longitudinal (r,z). Como puede observarse en la Figura 2.6 se selecciona un volumen de control diferencial cilíndrico dentro del módulo de PCM, para la programación el PCM se discretizó en cuatro capas por cada nodo de agua, como puede observarse en la Figura 2.7 (Esen & Ayhan, 1996).

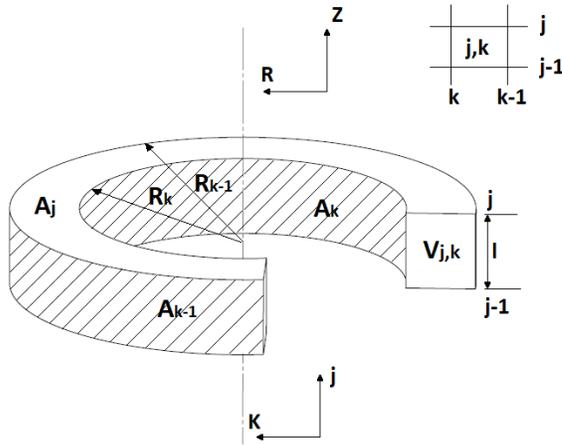


Figura 2.6 Volumen de control diferencial con PCM en el tanque

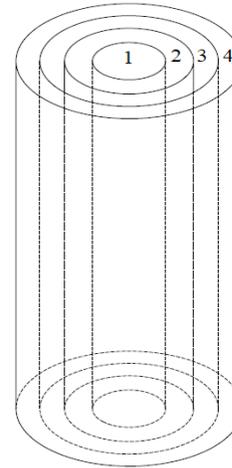


Figura 2.7 Esquema de discretización del material de cambio de fase (PCM) en el tanque

Según Teamah et al. (2017), la transferencia de calor en el PCM ocurre por el mecanismo de conducción, sea que se encuentre en fase líquida, sólida o en mezcla. Ellos calcularon la conductividad efectiva para las condiciones asintóticas y encontraron que la contribución debido a la convección natural es insignificante. A continuación, se aplica la ecuación de entalpía al volumen de control descrito, donde se obtiene la expresión descrita por Esen & Ayhan (1996):

$$\rho V_{j,k} \left( \frac{\partial h_{PCM}}{\partial t} \right)_{j,k} = -k_{PCM} A_k \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_k + k_{PCM} A_{k-1} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{k-1} + k_{PCM} A_j \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)_j - k_{PCM} A_{j-1} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{j-1} \quad (2.19)$$

Donde, según la notación de la Figura 2.4, se tiene:

- $V_{j,k}$  = Volumen del elemento diferencial de PCM j, k
- $\rho$  = Densidad del PCM
- $k_{PCM}$  = Conductividad del PCM
- $h_{PCM}$  = Entalpía específica del PCM
- $T$  = Temperatura del PCM
- $A$  = Área de transferencia de calor (según se indique en el sistema de coordenadas)

Las áreas de transferencia y el volumen ocupado por el volumen de control se calculan mediante las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} A_k &= 2\pi r_k l \\ A_{k-1} &= 2\pi r_{k-1} l \\ A_j &= A_{j-1} = \pi(r_{k-1}^2 - r_k^2) \\ V_{j,k} &= \pi(r_{k-1}^2 - r_k^2) l \end{aligned} \quad (2.20)$$

**Modelo de entalpía para el material de cambio de fase**

La entalpía específica  $h_{PCM}$  se define según la fase en que se encuentre el PCM (Voller, 1990):

$$h_{PCM}(T) = \begin{cases} C_{p,s}T & T < T_{m1} \\ C_{p,s}T_{m1} + \frac{h_{sl}(T - T_{m1})}{T_{m2} - T_{m1}} & T_{m1} \leq T \leq T_{m2} \\ C_{p,l}(T - T_{m2}) + h_{sl} + C_{p,s}T_{m1} & T > T_{m2} \end{cases} \quad (2.21)$$

Donde  $C_{p,s}$  y  $C_{p,l}$  son los calores específicos del estado sólido y líquido respectivamente;  $h_{sl}$  es la entalpía de cambio de fase sólido-líquido;  $T_{m1}$  es la temperatura al inicio del cambio de fase y  $T_{m2}$  al final del cambio de fase.

La densidad y la conductividad se consideran constantes para el caso de una sola fase (totalmente líquido o sólido). En el caso de mezcla se utiliza interpolación en función de la temperatura del estado. El modelo térmico tiene la capacidad de estimar la fracción fundida del material mediante (Nabavitatabayai et al., 2014):

$$\lambda = \begin{cases} 0 & T < T_{m1} \\ \frac{T - T_{m1}}{T_{m2} - T_{m1}} & T_{m1} \leq T \leq T_{m2} \\ 1 & T > T_{m2} \end{cases} \quad (2.22)$$

### Formulación en diferencias finitas

A continuación, se realiza la formulación en diferencias finitas de la ecuación diferencial del método de la entalpía, para evaluar sus derivadas numéricamente. Para el instante de solución  $n$ , las diferencias finitas utilizadas para las componentes del gradiente de temperatura son:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_k &= 2 \frac{T_{j,k}^n - T_{j,k+1}^n}{r_{k-1} - r_{k+1}} \\ \left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{k-1} &= 2 \frac{T_{j,k}^n - T_{j,k-1}^n}{r_k - r_{k-2}} \\ \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_j &= -\frac{T_{j,k}^n - T_{j+1,k}^n}{l} \\ \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{j-1} &= \frac{T_{j,k}^n - T_{j-1,k}^n}{l} \end{aligned} \quad (2.23)$$

La diferencia finita para evaluar la tasa de cambio de la entalpía específica en un intervalo de tiempo  $\Delta t$  esta dada por la expresión:

$$\left(\frac{\partial h_{PCM}}{\partial t}\right)_{j,k} = \frac{h_{PCM,j,k}^n - h_{PCM,j,k}^{n-1}}{\Delta t} \quad (2.24)$$

### 2.2.3. Implementación en software

Las ecuaciones del modelo térmico del tanque de almacenamiento con el PCM fueron implementadas en el entorno grafico de Simulink y Matlab, donde fueron resueltas mediante el solver ODE 45 con paso de tiempo variable. Para la programación del modelo se establecieron 10 nodos en el tanque como se ilustró en la Figura 2.4 asimismo, para la programación del PCM

se discretizó en cuatro capas por cada nodo de agua como puede observarse en la Figura 2.7, con un total de 16 capas a lo largo del módulo de PCM. Por otra parte, el modelo requiere como datos de entrada las condiciones de operación, factores de diseño, propiedades de los materiales y factores de configuración de la simulación, las cuales se describirán posteriormente. En la Figura 2.8 se ilustra la estructura del modelo desarrollado en Simulink.

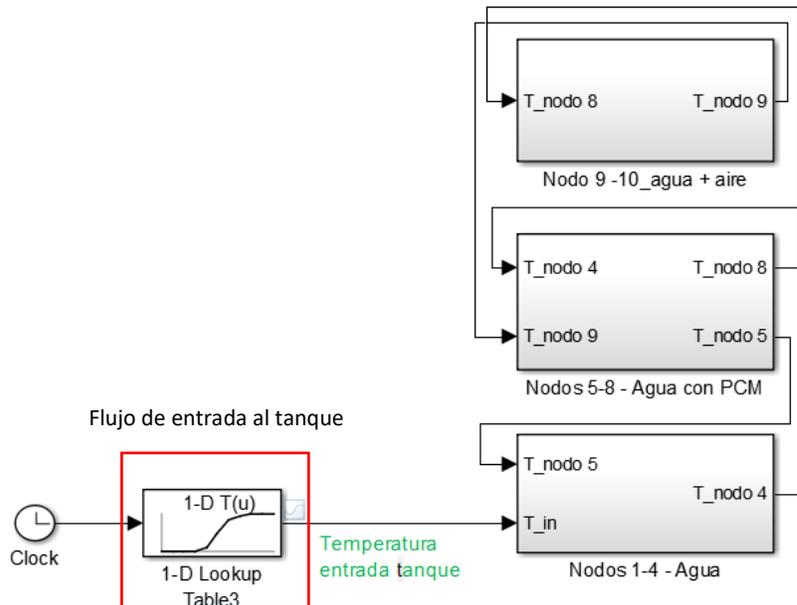


Figura 2.8 Estructura del modelo térmico del tanque en Simulink

**Variables de entrada**

Las variables de entrada al modelo se indican en la Tabla 2.2 y representan las condiciones de operación del tanque de almacenamiento. Asimismo, las propiedades del agua se consideran como una función de la temperatura y el aire es considerado como un gas ideal, las cuales son variadas en el dominio discretizado para cada paso temporal.

Variable	Notación	Unidades
Temperatura ambiente	$T_{amb}$	°C
Caudal de agua	$\dot{V}_w$	L/min
Temperatura de entrada del agua	$T_I$	°C
<b>Propiedades del agua y aire</b>		
Densidad	$\rho$	Kg/m <sup>3</sup>
Calor específico	$C_p$	J/kg K
Conductividad	$k$	W/m K
Viscosidad cinemática	$\nu$	m <sup>2</sup> /s
Prandtl	$Pr$	-
Difusividad	$\alpha$	m <sup>2</sup> /s
Coefficiente de dilatación térmica	$\beta$	1/K

Tabla 2.2 Variables de entrada del modelo del tanque de almacenamiento

### Factores de entrada

Los factores de entrada corresponden a las dimensiones y propiedades de los materiales del tanque de almacenamiento y los módulos de PCM. Los factores de entrada utilizados corresponden a los valores constructivos del tanque experimental y se indican en la Tabla 2.3.

Factor	Valor
<b>Tanque</b>	
<i>Longitud</i>	550 (mm)
<i>Diámetro</i>	440 (mm)
<i>Espesor lámina</i>	0.6 (mm)
<i>Conductividad de la lamina</i>	60.2 (W/m K)
<b>Módulos de PCM</b>	
<i>Punto de fusión</i>	51 – 57 (°C)
<i>Calor latente de fusión</i>	170 (KJ/kg)
<i>Densidad</i>	880 (kg/m <sup>3</sup> )
<i>Conductividad térmica PCM</i>	0.2 (W/m K)
<i>Número de módulos</i>	8
<i>Longitud</i>	200 (mm)
<i>Espesor</i>	0.3 (mm)
<i>Diámetro externo</i>	50 (mm)
<i>Conductividad módulo</i>	15.1 (W/m K)
<b>Aislamiento térmico</b>	
<i>Conductividad térmica</i>	0.023 (W/m K)
<i>Espesor</i>	30 (mm)

Tabla 2.3 Factores de entrada del modelo del tanque de almacenamiento

### Variables de salida

A partir de las variables y factores de entrada, el modelo estima el comportamiento térmico del tanque de almacenamiento con incorporación de PCM, dando como variables de salida la distribución de temperatura en todo el dispositivo, los flujos de calor entre los componentes, la energía almacenada, el comportamiento térmico del PCM y la eficiencia energética del dispositivo.

Para calcular la eficiencia energética, el tanque se considera como un intercambiador de calor (T. Kousksou et al., 2007), se determina mediante la ecuación:

$$\eta_{en} = \frac{T_{in}(t) - T_{out}(t)}{T_{in}(t) - T_{ini}} \quad (2.25)$$

Donde  $T_{in}$ ,  $T_{out}$  y  $T_{ini}$ , corresponden a la temperatura de entrada y salida de agua y temperatura inicial, correspondiente a la temperatura inicial del agua dentro del tanque (temperatura ambiente) respectivamente.

### 3. Modelos exergéticos

Durante el desarrollo de este capítulo, se plantearán las ecuaciones utilizadas para el análisis exergético en los sistemas bajo estudio. Inicialmente se establecen las ecuaciones para un sistema de almacenamiento térmico con PCM en base a investigaciones encontradas en la literatura científica, posteriormente se presentan las ecuaciones utilizadas para el balance y análisis exergético en el colector solar y por último las ecuaciones para el tanque de almacenamiento. Las ecuaciones de exergía fueron programadas en el entorno grafico de Simulink acoplado con el modelo energético de cada dispositivo.

#### 3.1. Análisis exergético de un sistema de almacenamiento con PCM

El análisis de exergía en sistemas de almacenamiento térmico con PCM ha sido estudiado para diferentes configuraciones y aplicaciones por autores como: T. Kousksou et al. (2007), Koca et al. (2008), Asbik et al. (2015), Hamed et al. (2016). Cada análisis en particular se adapta a la necesidad del sistema donde se esté utilizando la energía almacenada. Mediante la aplicación y el análisis de la primera y segunda ley de la termodinámica se identifican las irreversibilidades que se presentan durante los ciclos, relacionando el ciclo de carga y descarga al comportamiento de fusión y solidificación del material respectivamente. Las irreversibilidades externas están relacionadas con el fluido de transferencia de calor utilizado para recuperar la energía almacenada en el PCM. Sin embargo en el material se presentan irreversibilidades internas, según Adebisi et al. (1987) la destrucción de exergía dentro del medio de almacenamiento a causa de irreversibilidades internas es insignificante en comparación con la diferencia de temperaturas entre el medio de almacenamiento y el fluido de trabajo, de esta manera, Adebisi (1991), propuso estudiar únicamente las irreversibilidades externas relacionadas con el flujo del fluido de transferencia de calor y su interacción con la unidad de almacenamiento.

En la Figura 3.1 se ilustra el balance de exergía típico de un sistema de almacenamiento con calor latente, en este análisis se tiene como PCM una parafina y agua como fluido de transferencia de calor. Las expresiones correspondientes para el proceso de carga y descarga pueden obtenerse de manera similar.

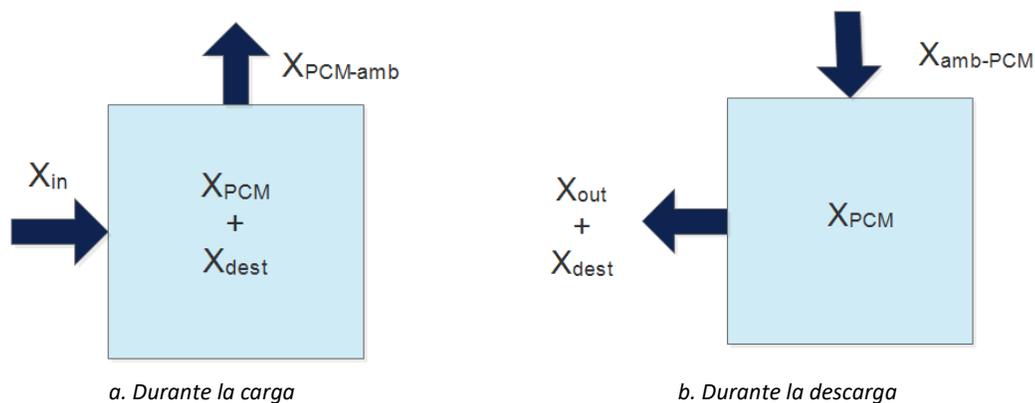


Figura 3.1 Balance exergético para un sistema de almacenamiento por calor latente típico

Para realizar el análisis exergético del sistema de almacenamiento, inicialmente se tiene la expresión del balance de exergía durante la carga y descarga respectivamente, en este caso para el material de cambio de fase, se tienen las expresiones:

$$\frac{dX_{PCM,carg}}{dt} = \dot{X}_{ent} - \dot{X}_{PCM-amb} - \dot{X}_{dest} \quad (3.1)$$

$$\frac{dX_{PCM,desc}}{dt} = \dot{X}_{amb-PCM} - \dot{X}_{sal} - \dot{X}_{dest} \quad (3.2)$$

Donde  $\dot{X}_{ent}$  y  $\dot{X}_{sal}$  es la exergía de entrada y salida,  $\dot{X}_{dest}$  la exergía destruida y  $\dot{X}_{amb-PCM}$  la exergía transferida con los alrededores.

Para determinar la exergía total almacenada por el PCM, se tiene que, durante la carga el material tiene un almacenamiento sensible antes y después del proceso de fusión, y un almacenamiento latente durante el proceso de cambio de fase. En consecuencia, la siguiente expresión describe el cambio de exergía interna en el sistema de almacenamiento:

$$\frac{dX_{PCM}}{dt} = \frac{dU}{dt} - P \frac{dV}{dt} - T_{amb} \frac{dS}{dt} \quad (3.3)$$

Siendo el cambio de volumen igual a cero, y el cambio de entropía dado por:

$$dS = \frac{dU}{T} \quad (3.4)$$

Donde la energía para cambio de fase está dada por:

$$\begin{aligned} U &= U_f + \lambda U_{ls} \\ dU &= dU_{sen} + dU_{lat} \\ dU &= C dT + h_{ls} d\lambda \end{aligned} \quad (3.5)$$

Donde,  $\lambda$  corresponde a la fracción fundida del material,  $U_f$  y  $U_{ls}$  a la energía interna de la fase líquida y la fase líquida-sólida respectivamente.

Reemplazando en la ecuación (3.3), la exergía total almacenada en el sistema está dada por la siguiente expresión:

$$\frac{dX_{PCM}}{dt} = C_{PCM} \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{PCM}}\right) \frac{dT}{dt} + h_{ls} \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{PCM}}\right) \frac{d\lambda}{dt} \quad (3.6)$$

Para la tasa de exergía de entrada suministrada por el fluido de transferencia de calor durante la carga, se expresa como el cambio en la exergía de flujo como resultado de la transferencia de calor en la siguiente ecuación (Demirel & Öztürk, 2006):

$$\dot{X}_{ent} = \dot{m}_w C_w \left[ (T_{w,sal} - T_{w,ent}) - T_{amb} \ln \left( \frac{T_{w,ent}}{T_{w,sal}} \right) \right] \quad (3.7)$$

Para el balance exergético del sistema de almacenamiento durante la descarga, se tienen ecuaciones similares. Sin embargo, debe tenerse en cuenta el flujo de calor transferido al fluido de trabajo desde el material de cambio de fase, llamando a dicho flujo como calor útil, ya que es

el calor ganado por el agua por la transferencia de calor entre éste y el PCM. Entonces, la exergía de salida durante la descarga está dada por:

$$\dot{X}_{sal} = \dot{m}_w C_w \left[ (T_{w,sal} - T_{w,ent}) - T_{amb} \ln \left( \frac{T_{w,ent}}{T_{w,sal}} \right) \right] \quad (3.8)$$

Por otra parte, la destrucción de exergía es la medición directa de la generación de entropía y las irreversibilidades, un sistema de almacenamiento térmico óptimo es aquel en donde la generación de entropía es mínima, sin embargo, la optimización de un sistema mediante la minimización de la generación de entropía es diferente de la del análisis de exergía (Mujumdar et al., 1997). Para sistemas de almacenamiento térmico con calor latente, la generación de entropía neta durante el proceso de carga o descarga se expresa como (Tarik et al., 2008):

$$\dot{S}_{gen} = \dot{S}_{flujo} + \frac{dS_{PCM}}{dt} + \frac{dS_w}{dt} \quad (3.9)$$

Donde  $\dot{S}_{flujo}$  es la transferencia de entropía debido a la transferencia de calor entre el material y el fluido de trabajo,  $\frac{dS_{PCM}}{dt}$  y  $\frac{dS_w}{dt}$  corresponden a la variación de entropía en el PCM y el agua respectivamente. La destrucción de exergía durante el proceso del sistema de almacenamiento, ya sea de carga o descarga se determina mediante el balance de exergía, calculando el cambio de exergía en el material y despejando directamente el último término  $\dot{X}_{dest}$ .

Aunque las eficiencias basadas en la energía de los sistemas de almacenamiento térmico son razonables y ampliamente aplicadas, se pueden definir eficiencias más significativas basadas en la exergía (Rosen, 1992). Al igual que las ecuaciones anteriormente planteadas, la eficiencia exergética se puede evaluar para el proceso de carga, de descarga o para el ciclo completo de carga/descarga del material. Durante la carga, el fluido de trabajo transfiere la exergía al PCM y parte de esta exergía se almacena en el material, por lo tanto, la exergía almacenada se considera como resultado deseado en la definición de eficiencia, de esta manera, la expresión que define la eficiencia de exergía durante la carga está dada por (Watanabe & Kanzawa, 1995):

$$\eta_{carg} = \frac{\dot{X}_{PCM}}{\dot{X}_{ent}} \quad (3.10)$$

Donde,  $X_{PCM}$  es la exergía almacenada en el material durante el proceso de carga.

Para el modo de descarga se pueden obtener expresiones similares. Durante la solidificación, la exergía de salida es la ganada por el fluido de trabajo debido a la transferencia de calor con el PCM, por lo tanto, se puede dar la siguiente expresión para la eficiencia de exergía del sistema durante el proceso de descarga.

$$\eta_{desc} = \frac{\dot{X}_{pcm-w}}{\dot{X}_{PCM}} \quad (3.11)$$

Siendo  $X_{pcm-w}$  la exergía transferida del PCM al agua durante la descarga. Esta expresión proporciona la exergía total transferida al agua en relación con la máxima exergía disponible con el PCM (Watanabe & Kanzawa, 1995). Alternativamente la eficiencia exergética general para el ciclo de carga y descarga del material se da como (Kaygusuz et al., 2004):

$$\eta_{ex,total} = \frac{\dot{X}_{sal}}{\dot{X}_{ent}} \quad (3.12)$$

Donde,  $X_{sal}$  corresponde a la exergía transferida al agua durante todo el ciclo.

Se ha encontrado que diferentes formas de eficiencias exergéticas son desarrolladas y evaluadas en trabajos de investigación como: Watanabe & Kanzawa (1995), Gong & Mujumdar (1997), Ramayya & Ramesh (1998). Sin embargo, se ha demostrado que la evaluación de la eficiencia total de la exergía es un mejor enfoque que limitarse solo a los modos de carga o descarga (Li, 2015).

### 3.2. Análisis exergético del colector solar

Para llevar a cabo el análisis en términos de exergía en el colector solar con PCM, inicialmente se establecen los flujos de calor que intervienen en los balances de energía de los componentes principales del colector, mediante la utilización de las ecuaciones utilizadas en el modelo energético desarrollado por Carmona & Palacio (2019), se establecieron los balances de exergía para los componentes principales del sistema. En la Figura 3.2 se observan los flujos de calor que se presentan en el sistema, una parte de la radiación incidente es absorbida por la cubierta de vidrio y otra parte es transmitida a la placa absorbidora, que se encarga de absorber la radiación, incrementando su energía interna. De esta forma, se crea un cambio de temperatura que genera un flujo de calor transmitido al agua, al PCM y pérdidas generadas por radiación y convección hacia los alrededores.

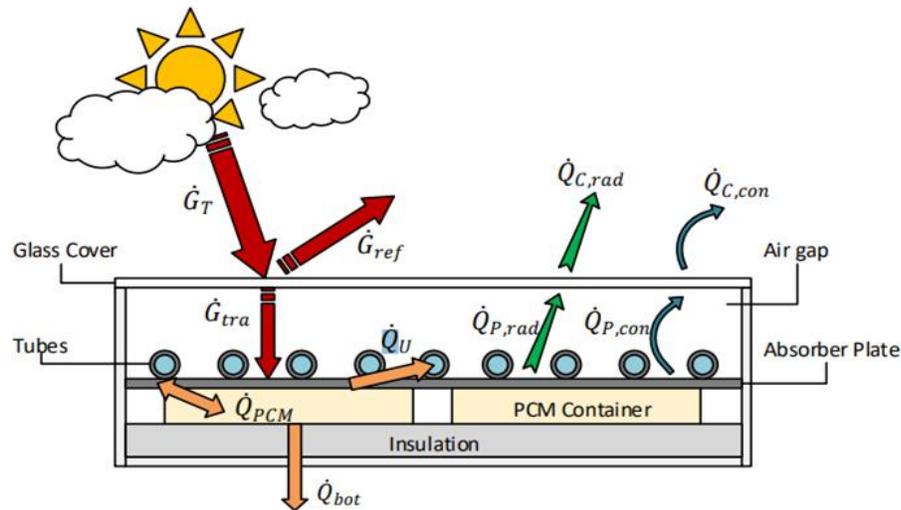


Figura 3.2 Transferencia de calor en un colector solar con PCM (Tomada de Carmona & Palacio, 2019)

La transferencia de exergía en el colector se rige principalmente por la transferencia de calor, está dada por la ecuación (Asbik et al., 2016):

$$\dot{X}_Q = \dot{Q} \left( 1 - \frac{T_{amb}}{T_k} \right) \quad (3.13)$$

Donde  $\dot{Q}$  hace referencia al flujo de calor,  $T_{amb}$  a la temperatura ambiente y  $T_k$  a la temperatura de frontera.

### 3.2.1. Balance de exergía en la cubierta de vidrio

Los términos que intervienen en el balance de exergía en la cubierta de vidrio se ilustran en la Figura 3.3 y se encuentran relacionados con la ecuación 3.14:

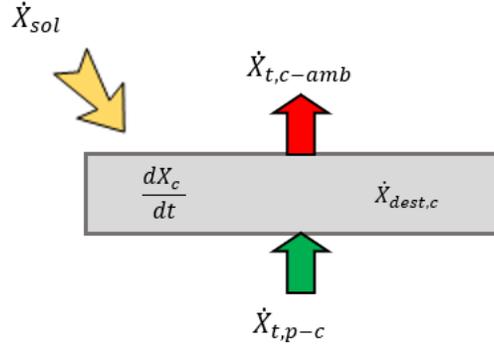


Figura 3.3 Balance de exergía en la cubierta de vidrio

$$\frac{dx_c}{dt} = \dot{X}_{sol} + \dot{X}_{t,p-c} - \dot{X}_{t,c-amb} - \dot{X}_{dest} \quad (3.14)$$

El cambio de exergía en la cubierta está dado por la ecuación:

$$\frac{dx_c}{dt} = m_c C_c \left( 1 - \frac{T_{amb}}{T_c} \right) \frac{dT}{dt} \quad (3.15)$$

Donde  $T_{amb}$  es la temperatura ambiente y  $T_c$  la temperatura de la cubierta de vidrio.

Respecto a la exergía transferida por radiación, Petela (1964), introdujo un término correspondiente a la emisión por radiación y calculó la exergía de radiación solar absorbida como:

$$\dot{X}_{sol} = \dot{H}_T \left[ 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{T_{amb}}{T_{sol}} \right)^4 - \frac{4}{3} \left( \frac{T_{amb}}{T_{sol}} \right) \right] \quad (3.16)$$

Donde  $T_{sol}$  es la temperatura del sol, tomada aproximadamente como 5800 K (Hu, 2006).

La exergía transferida de la placa absorbidora y del colector al medio ambiente  $\dot{X}_{t,p-c}$  y  $\dot{X}_{t,c-amb}$  están dadas por las ecuaciones:

$$\dot{X}_{t,p-c} = \dot{X}_{t,p-c,rad} + \dot{X}_{t,p-c,conv} \quad (3.17)$$

$$\dot{X}_{t,c-amb} = \dot{X}_{t,c-amb,rad} + \dot{X}_{t,c-amb,conv} \quad (3.18)$$

Donde:

$$\dot{X}_{t,c-amb,rad} = \dot{Q}_{c,rad} \left[ 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{T_{amb}}{T_c} \right)^4 - \frac{4}{3} \left( \frac{T_{amb}}{T_c} \right) \right] \quad (3.19)$$

$$\dot{X}_{t,p-c,rad} = \dot{Q}_{p,rad} \left[ 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{T_{amb}}{T_p} \right)^4 - \frac{4}{3} \left( \frac{T_{amb}}{T_p} \right) \right] \quad (3.20)$$

$$\dot{X}_{t,c-amb,conv} = \dot{Q}_{c,conv} \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_c}\right) \quad (3.21)$$

$$\dot{X}_{t,p-c,conv} = \dot{Q}_{p,conv} \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_p}\right) \quad (3.22)$$

Donde  $T_p$  y  $T_c$  corresponden a la temperatura de la placa y de la cubierta de vidrio respectivamente.

Despejando la ecuación 3.14, se tiene la destrucción de exergía en la cubierta de vidrio:

$$\dot{X}_{dest,c} = \dot{X}_{sol} - \dot{X}_{t,c-amb} + \dot{X}_{t,p-c} - m_c C_c \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_c}\right) \frac{dT}{dt} \quad (3.23)$$

### 3.2.2. Balance de exergía en la placa absorbidora

Para el balance de exergía en la placa absorbidora se tiene en cuenta el proceso de almacenamiento y liberación de energía del material de cambio de fase, durante el proceso de carga la placa absorbe radiación solar y transfiere calor al fluido de trabajo y al PCM, mientras que, durante el proceso de descarga el PCM transfiere la energía almacenada a la placa absorbidora para calentar el agua. Los términos que intervienen en el balance de exergía en la placa absorbidora durante la carga y descarga se ilustran en la Figura 3.4, y se encuentran relacionados con las ecuaciones 3.24 y 3.25:

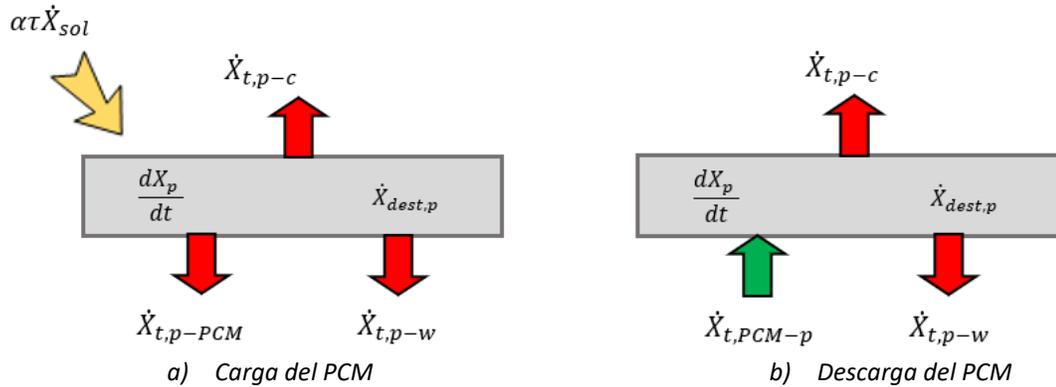


Figura 3.4 Balance de exergía en la placa absorbidora

Durante la carga:

$$\frac{dx_{p,carg}}{dt} = \alpha\tau\dot{X}_{sol} - \dot{X}_{t,p-c} - \dot{X}_{t,p-PCM,carg} - \dot{X}_{p-w} - \dot{X}_{dest,p} \quad (3.24)$$

Durante la descarga:

$$\frac{dx_{p,desc}}{dt} = -\dot{X}_{t,p-c} - \dot{X}_{t,PCM-p,desc} - \dot{X}_{p-w} - \dot{X}_{dest,p} \quad (3.25)$$

Donde:

$$\frac{dx_p}{dt} = m_p C_p \left( 1 - \frac{T_{amb}}{T_p} \right) \frac{dT}{dt} \quad (3.26)$$

$$\dot{X}_{t,p-pcm,carg} = \dot{Q}_{P,con} \left( 1 - \frac{T_{amb}}{T_p} \right) \quad (3.27)$$

$$\dot{X}_{t,pcm-p,desc} = \dot{Q}_{desc} \left( 1 - \frac{T_{amb}}{T_{PCM}} \right) \quad (3.28)$$

$$\dot{X}_{p-w} = \dot{m} C_p \left[ (T_{w,ent} - T_{w,sal}) - T_{amb} \ln \left( \frac{T_{w,ent}}{T_{w,sal}} \right) \right] \quad (3.29)$$

$T_{w,ent}$  y  $T_{w,sal}$  corresponden a la temperatura de entrada y salida del agua en el colector respectivamente. Similar al balance de exergía en la cubierta de vidrio, reemplazando en las ecuaciones 3.24 y 3.25 se determina la destrucción de exergía en la placa absorbidora durante la carga y descarga del material.

### 3.2.3. Balance de exergía en el PCM

Al igual que para la placa absorbidora, el PCM se analiza durante el proceso de almacenamiento y liberación de energía almacenada. Los términos que intervienen en el balance de exergía en el PCM se ilustran en la Figura 3.5.

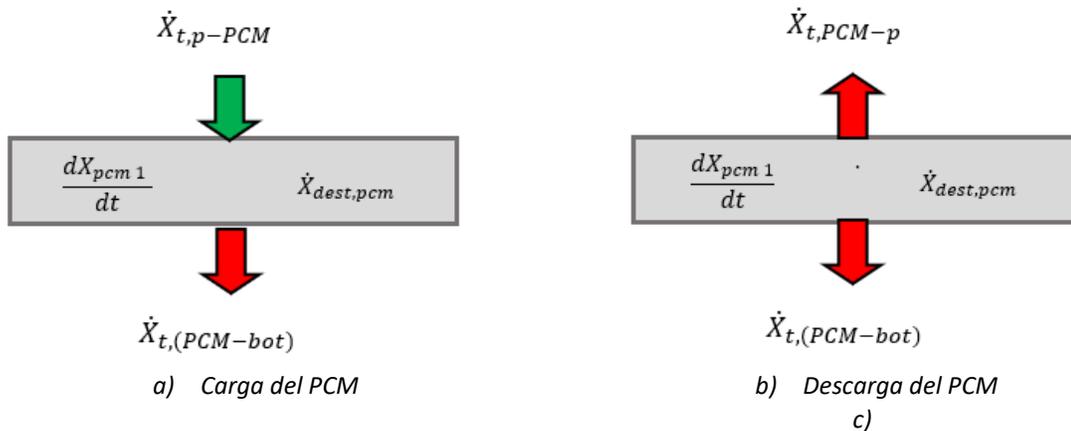


Figura 3.5 Balance de exergía en el PCM

Para la modelación del comportamiento del material, se discretizó en N capas como se muestra en la Figura 3.6

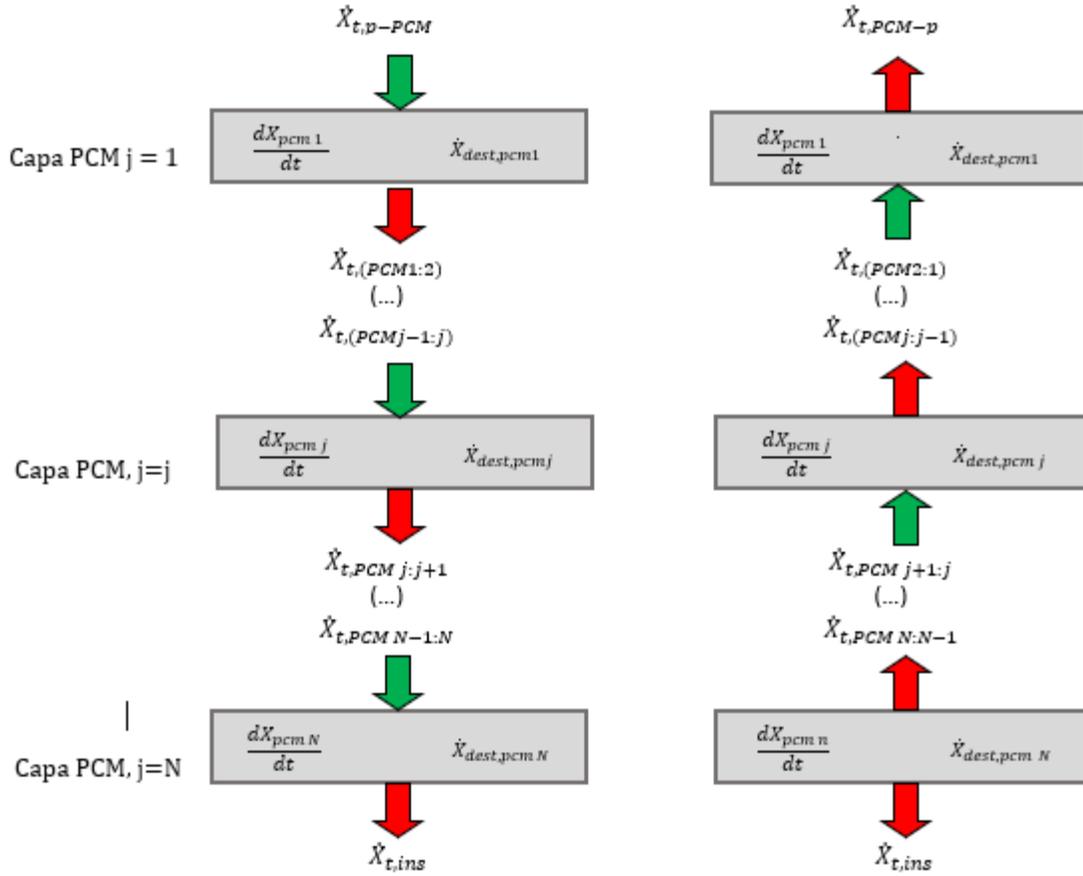


Figura 3.6 Discretización de las capas de PCM en el colector solar

Los términos se encuentran relacionados como sigue. Para capa  $j=1$  de PCM durante la carga y descarga:

$$\frac{dX_{PCM1,carg}}{dt} = \dot{X}_{t,(p-PCM1)carg} - \dot{X}_{t,(PCM1:2)carg} - \dot{X}_{(dest,PCM1)carg} \quad (3.30)$$

$$\frac{dX_{PCM1,desc}}{dt} = -\dot{X}_{t,(PCM1-p)desc} + \dot{X}_{t,(PCM2:1)desc} - \dot{X}_{(dest,PCM1)desc}$$

Para una j-ésima capa  $j=j$  de PCM durante la carga y descarga:

$$\frac{dX_{PCMj,carg}}{dt} = \dot{X}_{t,(PCMj-1:j)carg} - \dot{X}_{t,(PCM j:j+1)carg} - \dot{X}_{(dest,PCMj)carg} \quad (3.31)$$

$$\frac{dX_{PCMj,desc}}{dt} = \dot{X}_{t,(PCMj+1:j)desc} - \dot{X}_{t,(PCM j:j-1)desc} - \dot{X}_{(dest,PCMj)desc}$$

Para la capa inferior  $j = N$  durante carga y descarga:

$$\frac{dX_{PCM N,carg}}{dt} = \dot{X}_{t,(PCM N-1:j)carg} - \dot{X}_{t,ins} - \dot{X}_{(dest,PCM N)carg} \quad (3.32)$$

$$\frac{dX_{PCMn,desc}}{dt} = -\dot{X}_{t,(PCMn:N-1)carg} - \dot{X}_{t,ins} - \dot{X}_{(dest,PCMn)desc}$$

Donde el cambio de exergía en el interior del PCM está dado por:

$$\frac{dX_{PCM}}{dt} = C_{pcm} \left( 1 - \frac{T_{amb}}{T_{PCM}} \right) \frac{dT}{dt} + h_{ls} \frac{d\lambda}{dt} \quad (3.33)$$

Para determinar la destrucción de exergía en el PCM, se despeja la ecuación 3.31 y 3.32 para la carga y la descarga en cada capa respectivamente.

Finalmente, la eficiencia exergética general del colector solar con PCM, para el ciclo completo de carga y descarga del material está dada por la siguiente expresión:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{X}_{sal}}{\dot{X}_{ent}} = \frac{\dot{X}_{p-w}}{\dot{X}_{sol}} \quad (3.34)$$

Donde  $\dot{X}_{sal}$  es la exergía total transferida al agua durante todo el día, y  $\dot{X}_{ent}$  es la exergía de entrada total transferida por radiación solar.

### 3.3. Análisis exergético del tanque de almacenamiento

Para evaluar el comportamiento exergético en el tanque de almacenamiento con incorporación de PCM, se determinan las exergías de flujo de entrada y salida de agua a partir de las ecuaciones (Yang et al., 2014):

$$\dot{X}_{sal} = \dot{m}C_w \left[ (T_{w,sal} - T_{amb}) - T_{amb} \ln \left( \frac{T_{amb}}{T_{w,sal}} \right) \right] \quad (3.35)$$

$$\dot{X}_{ent} = \dot{m}C_w \left[ (T_{w,ent} - T_{amb}) - T_{amb} \ln \left( \frac{T_{amb}}{T_{w,ent}} \right) \right] \quad (3.36)$$

El cálculo de la eficiencia exergética se realiza similar a la eficiencia energética, donde el tanque se considera como un intercambiador de calor, como la relación entre la exergía transferida al agua y la exergía máxima transferible (T. Kousksou et al., 2007). La eficiencia está dada por la ecuación:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{X}_w}{\dot{X}_{max}} \quad (3.37)$$

Donde:

$$\dot{X}_w = \dot{m}C_w \left[ (T_{w,ent} - T_{w,sal}) - T_{amb} \ln \left( \frac{T_{w,ent}}{T_{w,sal}} \right) \right] \quad (3.38)$$

$$\dot{X}_{max} = \dot{m}C_w \left[ (T_{in} - T_{ini}) - T_{amb} \ln \left( \frac{T_{in}}{T_{ini}} \right) \right] \quad (3.39)$$

Siendo  $X_w$ , la exergía transferida al agua durante el ciclo completo de carga y descarga,  $T_{w,ent}$  y  $T_{w,sal}$ , las temperaturas del agua de entrada y salida del dispositivo de almacenamiento

respectivamente.  $T_{amb}$  y  $T_{ini}$  la temperatura ambiente y la temperatura del estado inicial en el sistema respectivamente.

La exergía total almacenada en el PCM en el interior del tanque de almacenamiento, está dada por la siguiente expresión:

$$\frac{dX_{PCM}}{dt} = C_{PCM} \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{PCM}}\right) \frac{dT}{dt} + h_{ts} \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{PCM}}\right) \frac{d\lambda}{dt} \quad (3.40)$$

## 4. Experimentación

Las plataformas y campañas experimentales del colector solar de placa plana y el tanque de almacenamiento descritas en esta sección fueron desarrolladas en conjunto con el equipo de trabajo del proyecto de investigación “Evaluación de la tecnología de acumulación de energía solar térmica con PCM para aplicaciones de calentamiento de agua. Un enfoque térmico, exergético y económico” en el marco de la convocatoria COLCIENCIAS: 656 de 2014 titulada "Es tiempo de volver". A continuación, se detallarán los componentes principales de las plataformas experimentales.

### 4.1. Colector solar de placa plana con PCM

El prototipo de colector utilizado para el desarrollo de la investigación propuesto por Carmona et al. (2015) fue diseñado y construido a escala demostrativa con componentes comerciales, en la Figura 4.1 se observan los componentes y dimensiones principales del colector y sus especificaciones se indican en la Tabla 4.1.

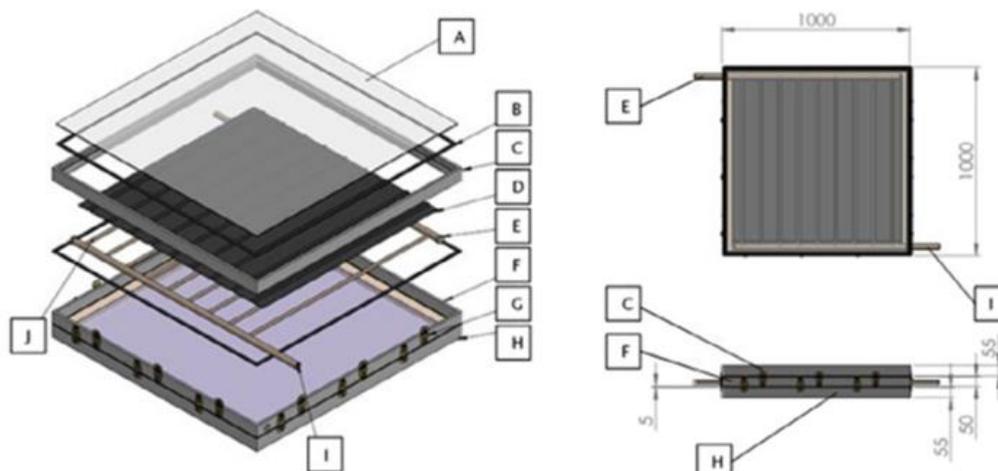


Figura 4.1 Componentes del colector solar con PCM (Carmona & Palacio, 2019)

Ítem	Descripción	Especificación
A	Cubierta de vidrio	Espesor: 4mm
B	Sello	-
C	Carcasa superior	Espesor: 4 mm – Aluminio
D	Placa absorbedora	Espesor: 1 mm – Cobre
E	Entrada de agua	Diámetro: 25.4mm – Cobre
F	Carcasa intermedia	Espesor: 4 mm – Aluminio
G	Cerraduras de seguridad	-
H	Carcasa inferior	Aislamiento interno de poliuretano
I	Salida de agua	Diámetro: 25.4mm – Cobre
J	Tuberías	Diámetro: 12.7 mm Separación: 100 mm - Cobre

Tabla 4.1 Especificaciones del colector solar con PCM (Adaptada de Carmona & Palacio, 2019)

El colector solar está compuesto por tres carcasas conectadas con bisagras entre sí: la carcasa superior que contiene la cubierta de vidrio, la carcasa intermedia donde se aloja la placa absorbidora y la carcasa inferior donde se encuentra la cavidad para la instalación de los contenedores de PCM. La instalación de bisagras entre las carcasas permite acceder a los componentes internos del colector.

## 4.2. Tanque de almacenamiento con PCM

Para este trabajo se utilizó un tanque de acumulación de 50 litros, suficiente para suministrar agua caliente sanitaria a vivienda de una persona (Cózar, 2006), diseñado y construido a escala demostrativa con componentes comerciales. Respecto a la relación de altura diámetro en el tanque (H/D) se escogió el valor trabajado por uno de los mayores fabricantes colombianos en tanques de almacenamiento (Haceb), quienes utilizan una relación de 1.32 para sus modelos de 50 litros, correspondientes a un diámetro de 0.38 m y una altura de 0.43 m. La incorporación de PCM en el tanque de almacenamiento se realizó de manera directa insertando cilindros metálicos dentro del tanque, los cilindros están soportados por una base que asegura su sujeción, en la Figura 4.2 puede observarse los componentes principales del tanque de almacenamiento y sus especificaciones técnicas se indican en la Tabla 4.2.

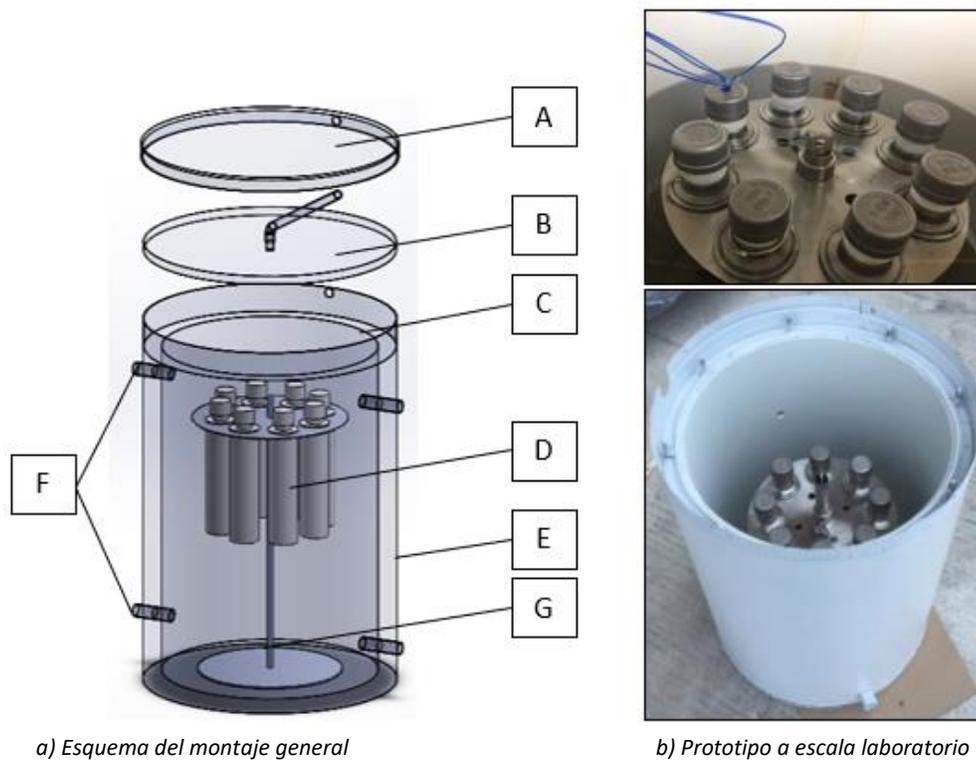


Figura 4.2 Componentes del tanque de almacenamiento con PCM

Ítem	Descripción	Especificación
A	Tapa superior del tanque	Diámetro: 450 mm – Acero
B	Tapa intermedia	Diámetro: 450 mm – Acero
C	Tanque	Aislamiento interno de poliuretano
D	Botellas contenedoras de PCM	Altura: 200 mm – Acero inoxidable
E	Lamina externa	Espesor: 0.6 mm – Acero
F	Entrada y salida de agua	Diámetro: 12.7 mm
G	Soporte de botellas de PCM	Acero Inoxidable

Tabla 4.2 Especificaciones del tanque de almacenamiento con PCM

El tanque está compuesto por dos láminas de acero, una interna de 3 mm de espesor y una externa de 0.6 mm, se ubicó como material aislante poliuretano expandido en medio de las dos laminas, en la base del tanque y en la tapa. El PCM se ubicó en 8 botellas de acero inoxidable soportadas en una base en el interior del tanque de almacenamiento.

### 4.3. Material de cambio de fase

En la Tabla 4.3 se presentan las ceras de parafina utilizadas con sus propiedades térmicas suministradas por la ficha técnica del fabricante Rubitherm Technologies (2016).

Propiedades	PCM 55	PCM 45	Unidades
Temperatura de fusión	51 – 57	41 – 46	°C
Capacidad de almacenamiento	170	160	kJ/kg
Calor específico	2000	2000	J/kg
Conductividad térmica	0.2	0.2	W/m-K
Densidad en estado sólido	880	880	Kg/m <sup>3</sup>
Densidad en estado líquido	770	770	Kg/m <sup>3</sup>

Tabla 4.3 Propiedades térmicas de las ceras de parafina utilizadas en la fase de experimentación (Rubitherm Technologies, 2016)

Para el colector solar, el PCM fue macroencapsulado en cuatro contenedores metálicos de 0.4 m de ancho por 0.4 m de largo con 0.03 m de espesor. Para el tanque de almacenamiento fue macroencapsulado en ocho botellas metálicas de 0.2 m de largo por 0.05 m de diámetro. El llenado se realizó vertiendo el PCM en estado líquido en los contenedores, inicialmente precalentados hasta la temperatura de fusión del PCM (ver Figura 4.3), con el fin de evitar que el choque térmico entre el PCM y las paredes de los contenedores ocasionara solidificación del material que pudiesen albergar cavidades de aire. La masa de material en estado líquido correspondiente a un contenedor fue de 4.2 kg y 0.26 kg para el colector solar y el tanque de almacenamiento respectivamente. Finalmente, los contenedores del colector solar fueron ubicados bajo la placa absorbadora y los contenedores cilíndricos dentro del tanque de almacenamiento en el soporte metálico que asegura su sujeción, como se muestra en la Figura 4.3b.



4.3a. Llenado de PCM de los contenedores del colector (Izq.) y contenedores del tanque (Der.)



4.3b. Ubicación de contenedores de PCM en el colector (Izq.) y el tanque (Der.)

Figura 4.3 Macroencapsulado del PCM

#### 4.4. Instrumentación

Los equipos de medición para las plataformas experimentales del colector solar y el tanque de almacenamiento constan de tres componentes principales: la estación meteorológica, las unidades de adquisición de datos de temperatura y los rotámetros. En la Tabla 4.4 se listan las variables que permiten medir cada uno de estos equipos, en las secciones siguientes se describen sus especificaciones técnicas.

Instrumento	Banco experimental	Variable medida	Unidades
<i>Estación meteorológica</i>	Colector solar	Radiación solar	W/m <sup>2</sup>
		Temperatura ambiente	°C
		Velocidad del viento	m/s
<i>Unidad de adquisición de datos de temperatura (termopares tipo k)</i>	Colector solar	Temperatura cubierta de vidrio	°C
		Temperatura placa absorbadora	°C
		Temperatura entrada de agua	°C
		Temperatura salida de agua	°C
	Tanque de almacenamiento	Temperatura de PCM	°C
		Temperatura entrada de agua	°C
		Temperatura salida de agua	°C
		Temperatura nodos de agua	°C
<i>Rotámetro</i>	Colector solar – Tanque de almacenamiento	Temperatura de PCM	°C
		Caudal de agua	L/min

Tabla 4.4 Instrumentación y variables medidas en la plataforma experimental del colector solar

#### 4.4.1. Estación meteorológica

La estación utilizada para medir las condiciones meteorológicas es una estación Davis Vantage Pro 2 mostrada en la Figura 4.4. Esta estación se ubicó cerca a los colectores con el fin de medir las condiciones ambientales de operación local como la temperatura ambiente, radiación solar y velocidad del viento. En la Tabla 4.5 se presentan las especificaciones técnicas de los sensores de interés de la estación meteorológica.



Figura 4.4 Estación meteorológica

Sensor	Especificación	Valor	Unidades
<i>Temperatura</i>	Rango	-40 - 65	°C
	Resolución	0.1	°C
	Precisión	±0.3	°C
<i>Piranómetro</i>	Rango	0 – 1800	W/m <sup>2</sup>
	Resolución	1	W/m <sup>2</sup>
	Precisión	±5	%
<i>Anemómetro</i>	Rango	0 – 89	m/s
	Resolución	0.4	m/s
	Precisión	±5	%

Tabla 4.5 Especificaciones técnicas de la estación meteorológica

#### 4.4.2. Unidad de adquisición de datos de temperatura

Las unidades de adquisición de datos utilizadas para registrar la temperatura de los termopares ubicados en la plataforma experimental de los colectores solares y el tanque de almacenamiento fueron unidades Applent Instruments AT4532 mostrada en la Figura 4.5. Para el colector solar se utilizaron 28 termopares tipo k ubicados en los componentes principales del colector, distribuidos de la siguiente manera: 4 sensores en la entrada del agua, 4 sensores en la salida de agua, 4 en la cubierta de vidrio, 8 en la placa absorbadora y 8 en el PCM. Para el tanque de almacenamiento se utilizaron 19 termopares tipo k distribuidos de la siguiente manera: 3 sensores en la entrada de agua, 3 sensores en la salida de agua, 4 en los nodos de agua debajo de las botellas con PCM, 4 en los nodos de agua con PCM, 4 en el interior de la botella con PCM, 1 en el nodo de agua sobre las botellas. Las especificaciones de los sensores de temperatura de la unidad de adquisición de datos se presentan en la Tabla 4.6.

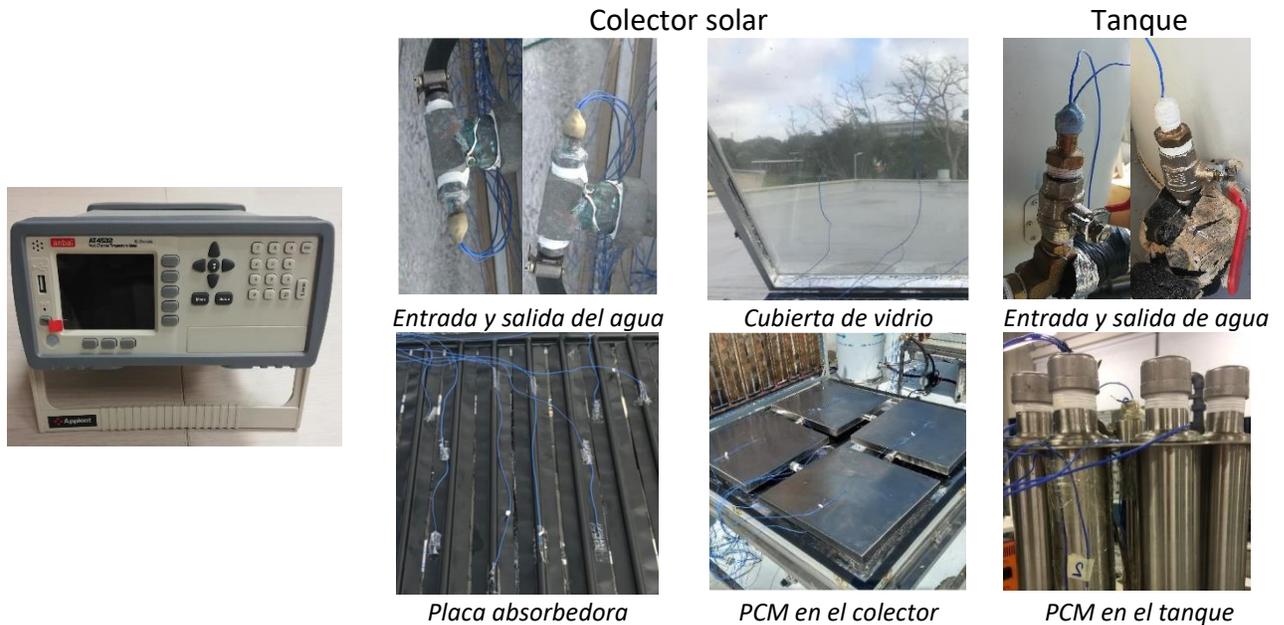


Figura 4.5 Unidad de adquisición de datos y medidores de temperaturas en las plataformas experimentales

Especificación	Valor	Unidades
Rango	-200 – 1300	°C
Resolución	0.1	°C
Precisión	1	°C

Tabla 4.6 Especificaciones técnicas de los sensores de temperatura de la unidad de adquisición de datos AT4532

### 4.4.3. Rotámetro

Para medir el caudal de agua en la entrada de los colectores y en el tanque de almacenamiento se utilizaron rotámetros Dwyer RMB 83 SSV como el mostrado en la Figura 4.6, en la Tabla 4.7 se presentan las especificaciones técnicas de los rotámetros.



Figura 4.6 Rotámetro

Especificación	Valor	Unidades
Rango	0 – 1.2	L/min
Resolución	0.05	L/min
Precisión	±3	%

Tabla 4.7 Especificaciones técnicas del rotámetro

## 4.5. Bancos de experimentación

Se utilizaros dos bancos de experimentación para el colector solar y el tanque de almacenamiento, para el colector solar se utilizaron dos colectores solares, uno con PCM y otro sin PCM con el fin de llevar a cabo pruebas simultáneas de las dos tecnologías bajo las mismas

condiciones de operación. Por otra parte, para el tanque de almacenamiento se utilizó una plataforma experimental en condiciones de laboratorio, las pruebas experimentales se llevaron a cabo bajo las mismas condiciones para evaluar el comportamiento del tanque con y sin incorporación de PCM. A continuación, se describen detalladamente las plataformas experimentales utilizadas para el colector solar y el tanque de almacenamiento de agua.

#### 4.5.1. Colector solar

El banco de experimentación del colector solar se puede observar en la Figura 4.7, donde se ilustra la instalación de los dos colectores solares con y sin PCM en funcionamiento simultáneo.

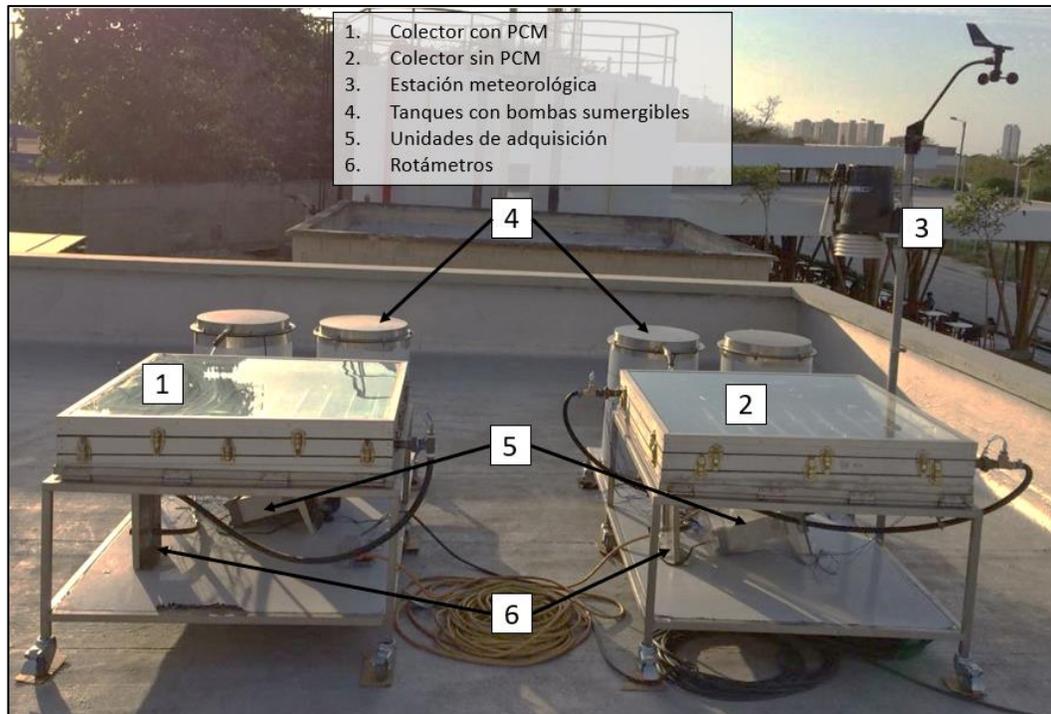


Figura 4.7 Plataforma experimental de los colectores con y sin PCM

Los materiales de los elementos estructurales se elaboraron completamente en aluminio y acero inoxidable, dado las condiciones ambientales y de corrosión de la ciudad de Barranquilla, se aplicó pasta térmica entre la placa absorbidora y los contenedores de PCM con el fin de mejorar la conductancia de contacto entre los dos componentes (Ver Figura 4.8)



Figura 4.8 Contenedores sin pasta térmica (Izquierda) y con pasta térmica (Derecha)

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en las instalaciones de la Universidad del Norte en Barranquilla, Colombia. La campaña experimental con un banco preliminar se realizó entre septiembre de 2016 hasta marzo de 2017, posterior al desarrollo de las mejoras a la plataforma experimental las pruebas con el segundo banco se realizaron desde marzo de 2018 hasta junio del mismo año.

#### 4.5.2. Tanque de almacenamiento

La plataforma establecida para llevar a cabo las pruebas experimentales del tanque se ilustra en la Figura 4.9, la configuración consiste en un tanque de almacenamiento de agua aislado térmicamente que contiene capsulas cilíndricas de acero inoxidable con PCM en su interior, un calentador eléctrico que simula el comportamiento del colector solar elevando la temperatura del agua sobre la temperatura de fusión del PCM durante un tiempo determinado (representando las horas de radiación solar en un día típico), un rotámetro y una bomba de circulación. Con el fin de evaluar y comparar la utilización del PCM dentro del tanque, las pruebas con y sin incorporación de PCM se realizaron bajo las mismas condiciones con un mismo protocolo experimental detallado en la sección posterior de este capítulo.

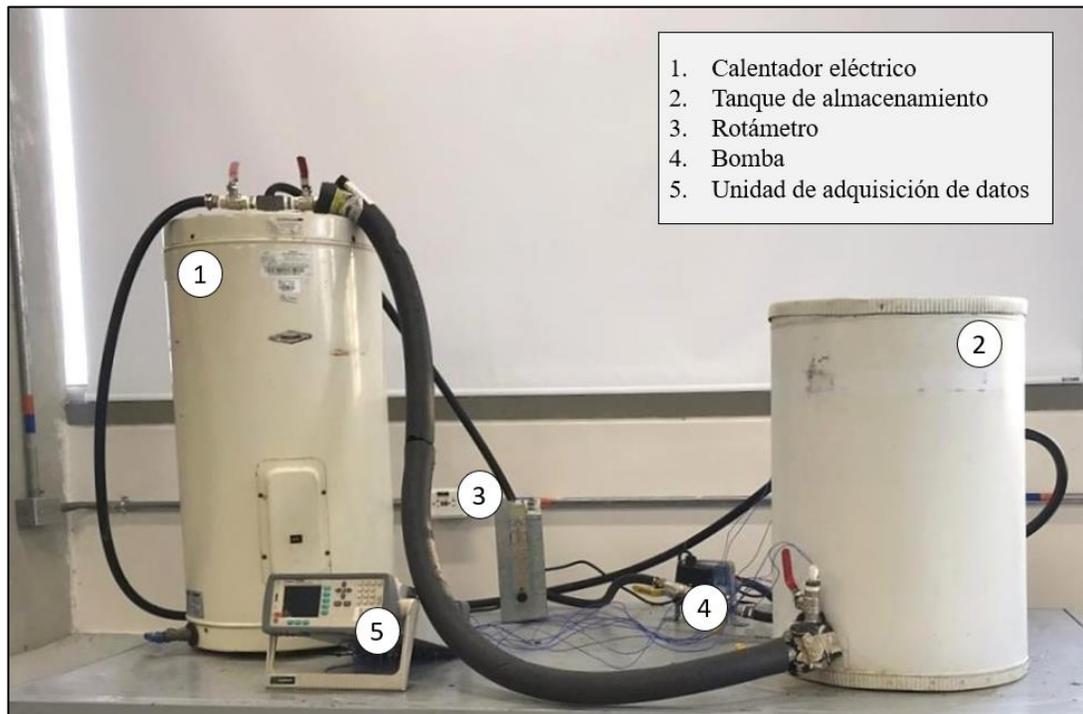


Figura 4.9 Plataforma experimental del tanque de almacenamiento con PCM

Las pruebas se llevaron a cabo en el laboratorio de sistemas termofluidos de la Universidad del Norte bajo condiciones controladas, la campaña experimental se realizó en junio del 2018 hasta septiembre del mismo año.

#### 4.6. Protocolos de experimentación

Para llevar a cabo las pruebas experimentales con el colector solar y el tanque de almacenamiento, se planteó un procedimiento con el fin de tener un monitoreo continuo de las variables de cada banco experimental. Las pruebas con el colector consistieron en operar día y

noche durante varios meses en condiciones reales externas, se establecieron unos pasos a seguir para cada prueba antes, durante y después de iniciar la recolección de datos como se indica en la Tabla 4.8.

Recolección de datos	Pasos
<i>Antes</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Establecimiento de caudal de trabajo</li> <li>2. Configuración del reloj de la unidad de adquisición de datos</li> <li>3. Establecimiento de tiempo de muestreo de datos</li> <li>4. Configuración de estación meteorología</li> <li>5. Inicio de registro de datos</li> </ol>
<i>Durante</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Verificación del reloj y de la toma de datos en la unidad de adquisición</li> <li>2. Limpieza de la superficie del colector</li> <li>3. Verificación del caudal de trabajo</li> </ol>
<i>Después</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Descarga de datos de la estación meteorológica</li> <li>2. Descarga de datos de la unidad de adquisición</li> <li>3. Mantenimiento de tuberías, tanque y bomba de recirculación</li> </ol>

Tabla 4.8 Procedimiento experimental para el colector solar

Por otra parte, para las pruebas con el tanque de almacenamiento se planteó un protocolo experimental basado en mediciones tomadas en dispositivos similares reportadas en la literatura especializada para ciclos típicos de operación, como los presentados por Yang et al. (2014), Vikram et al. (2016) y Cabeza et al. (2006). De esta manera, se establecieron una serie de pruebas con diferentes configuraciones variando el caudal de entrada y salida, y la temperatura de entrada, estas configuraciones son indicadas en la Tabla 4.9. Las pruebas se realizaron en condiciones de laboratorio, cuya duración depende de cada escenario.

	Carga	Tiempo de carga	Descarga	Tiempo de descarga
1	<b>Ciclo de carga bajo condiciones de entrada que provienen de un colector solar:</b> se introduce agua a condiciones de alta temperatura desde el calentador de agua eléctrico que simula la curva de operación del colector, el caudal de entrada es constante a lo largo de la prueba. La temperatura del agua va aumentando desde temperatura ambiente simulando el calentamiento de agua en el colector, el agua saldrá del tanque en la misma cantidad para ser llevada al calentador de agua eléctrico	Hasta que funda por completo el PCM ( $T_{PCM} > T_m$ )	<b>Bajo condiciones constantes de salida:</b> se retira agua a la temperatura que se encuentre en el tanque y a caudal de entrada constante a lo largo de la prueba, simulando el proceso de suministro de agua caliente a la carga, el agua de línea ingresará al tanque en la misma cantidad y será calentada por el PCM.	Hasta que solidifique por completo el PCM ( $T_{PCM} > T_m$ )
2	<b>Ciclo de carga (fundición) bajo condiciones constantes de entrada:</b> se introduce agua a condiciones de temperatura y caudal de entrada constante a lo largo de la prueba, el agua saldrá del tanque en la misma cantidad para ser llevada al calentador de agua eléctrico. La carga terminará en el momento que se funda todo el material	Hasta que se funda completamente el PCM ( $T_{PCM} > T_m$ )	<b>Ciclo de descarga por lotes:</b> descarga a la temperatura que se encuentre el agua en el tanque, 3 descargas al día de 15 minutos cada una hasta completar el volumen del tanque. 1.1 L/min (0.0185 kg/s) a las 10 horas, 1.1 L/min (0.0185 kg/s) a las 16 horas, 1.1 L/min (0.0185 kg/s) a las 22 horas.	Al finalizar el día (24 horas)
	<b>Combinación de tipo de carga y descarga para las pruebas experimentales</b>		<b>Prueba 1.</b> Carga 1 – Descarga 1 <b>Prueba 2.</b> Carga 2 – Descarga 1 <b>Prueba 3.</b> Carga 1 – Descarga 2 <b>Prueba 4.</b> Carga 2 – Descarga 2	

Tabla 4.9 Protocolo experimental para el tanque de almacenamiento

Los protocolos descritos en la Tabla 4.9 fueron seguidos en las pruebas para el tanque sin la incorporación de módulos de PCM. Para asegurarse que los tiempos de carga y descarga fueran los mismos, se tomó como base la duración de carga y descarga de las pruebas del tanque con PCM en cada prueba.

#### 4.7. Validación del modelo del tanque de almacenamiento

La validación del modelo del tanque de almacenamiento con PCM se realizó mediante la comparación de resultados estimados por el modelo con los obtenidos experimentalmente en condiciones de laboratorio, los datos de temperaturas del agua y el PCM se registraron minuto a minuto. En la Figura 4.10 se observa de forma comparativa las temperaturas en los nodos inferiores de agua (Nodo 2 y nodo 4), nodos de agua – PCM (Nodo 5 y nodo 7), y nodo superior de agua (Nodo 9) para las cuatro pruebas experimentales.

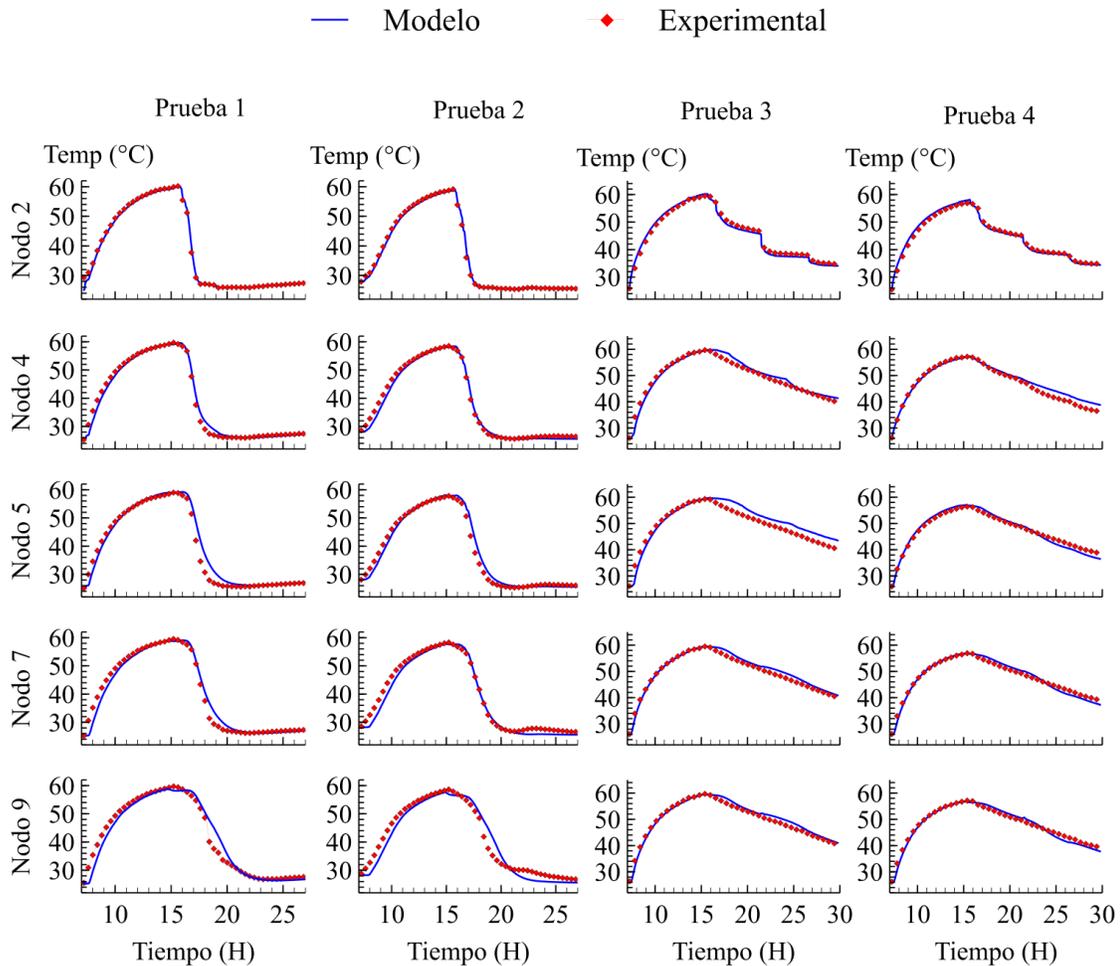


Figura 4.10 Comparación de temperaturas experimentales y estimadas por el modelo en los nodos del tanque

Asimismo, para la validación del modelo térmico dentro del PCM, la Figura 4.11 muestra la temperatura observada y la predicha por el modelo en dos nodos intermedios del módulo, nodo 2 y nodo 3. Puede observarse que el modelo responde adecuadamente al cambio de fase y al comportamiento térmico del material durante la carga y la descarga en las dos pruebas. Es importante notar que, en los cuatro resultados, el cambio de fase ocurre en el intervalo reportado por el fabricante en la ficha técnica del material (51 – 57 °C), y que las estimaciones temporales coinciden para la solidificación y fusión del PCM en las pruebas experimentales y los resultados estimados por el modelo.

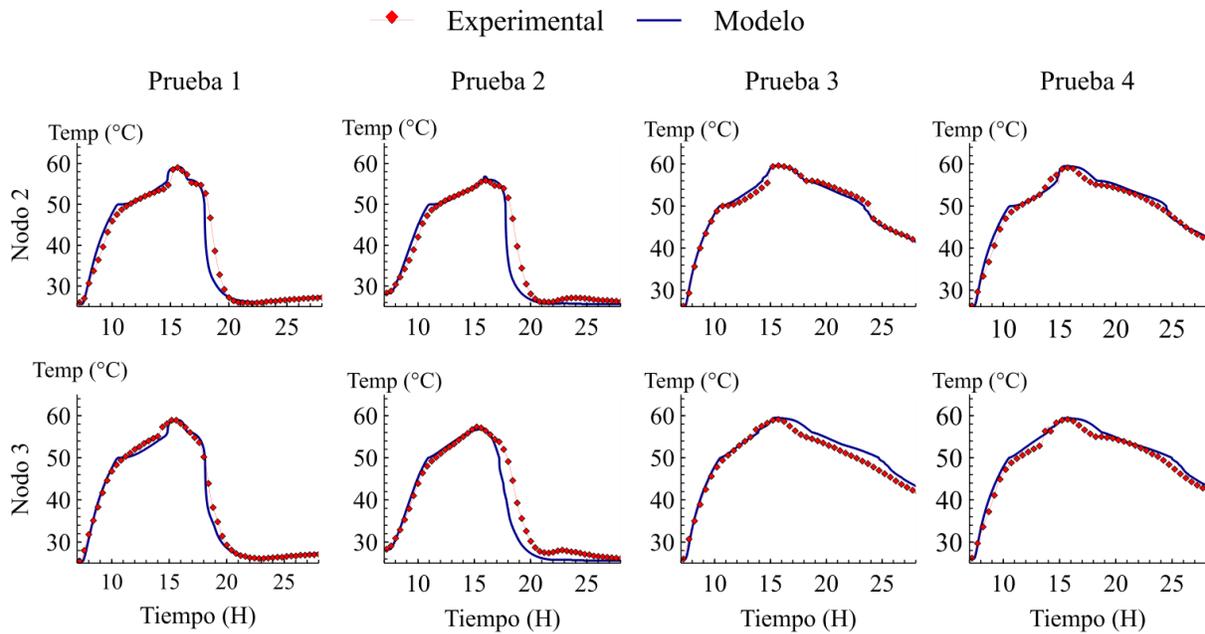


Figura 4.11 Temperatura del modelo y experimental en el interior del PCM del tanque de almacenamiento

De las Figuras 4.10 y 4.11, se puede afirmar que, para las diferentes condiciones experimentales, existe una adecuada correspondencia entre el comportamiento de las temperaturas del agua y el PCM estimadas por el modelo con los resultados obtenidos experimentalmente. Esto se corrobora en el gráfico de temperaturas observadas vs predichas por el modelo mostrado en la Figura 4.12, en el que se aprecia cómo los valores predichos por el modelo se ajustan apropiadamente en todo el rango de cada una de las temperaturas registradas experimentalmente.

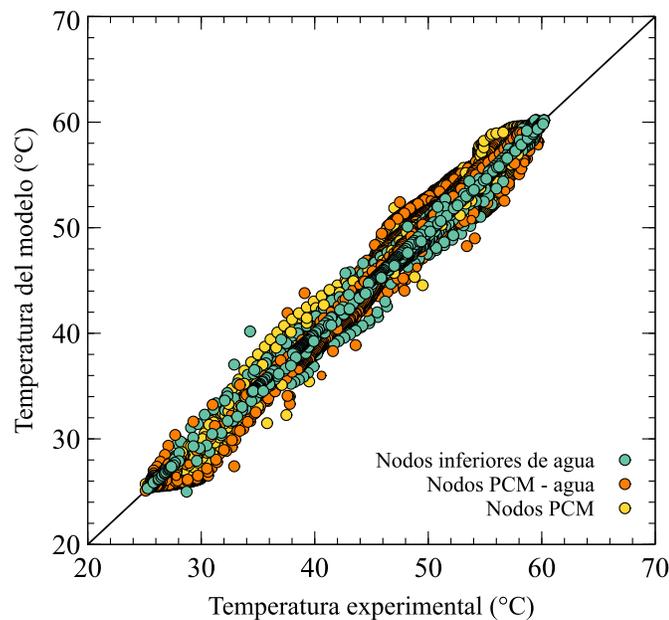


Figura 4.12 Gráfica observada vs predicha de temperatura del modelo y temperatura experimental

Finalmente, los resultados del proceso de validación se resumen en la Tabla 4.10, que muestra el error absoluto medio (MAE) del modelo para la estimación de las temperaturas en los diferentes nodos del tanque de almacenamiento. Puede observarse que el modelo puede estimar las temperaturas de los nodos inferiores y superiores de agua, los nodos intermedios de agua – PCM, y del PCM con desviaciones inferiores a 1.86 °C respecto a los datos experimentales.

Variable de salida	MAE	Unidades
Temperatura de nodos inferiores de agua (Nodo 1 – Nodo 4)	0.89	°C
Temperatura nodos intermedios agua – PCM (Nodo 5 – Nodo 8)	1.10	°C
Temperatura Nodo superior (Nodo 9)	1.86	°C
Temperatura de PCM	1.14	°C

Tabla 4.10 Resultados de validación experimental

A partir de los resultados obtenidos, el modelo térmico del tanque de almacenamiento de agua con PCM presentado en el capítulo 2 del documento fue validado bajo diferentes condiciones de operación.

Por otra parte, durante el proceso de acumulación de energía térmica, la estratificación es un fenómeno que ocurre usualmente en los tanques de almacenamiento debido a las fuerzas de flotabilidad, proporcionando una mejora en la eficiencia y el rendimiento energético y exergético (Tatsidjoudoung et al., 2013). Este proceso hace posible tener la temperatura más alta en la parte superior y la temperatura más baja en la parte inferior del tanque. En la Figura 4.13 se puede observar la diferencia de temperatura entre la parte superior e inferior del tanque en los nodos del 1 al 9 en el proceso de carga y descarga, a causa de la estratificación térmica que se presenta durante las cuatro diferentes pruebas experimentales.

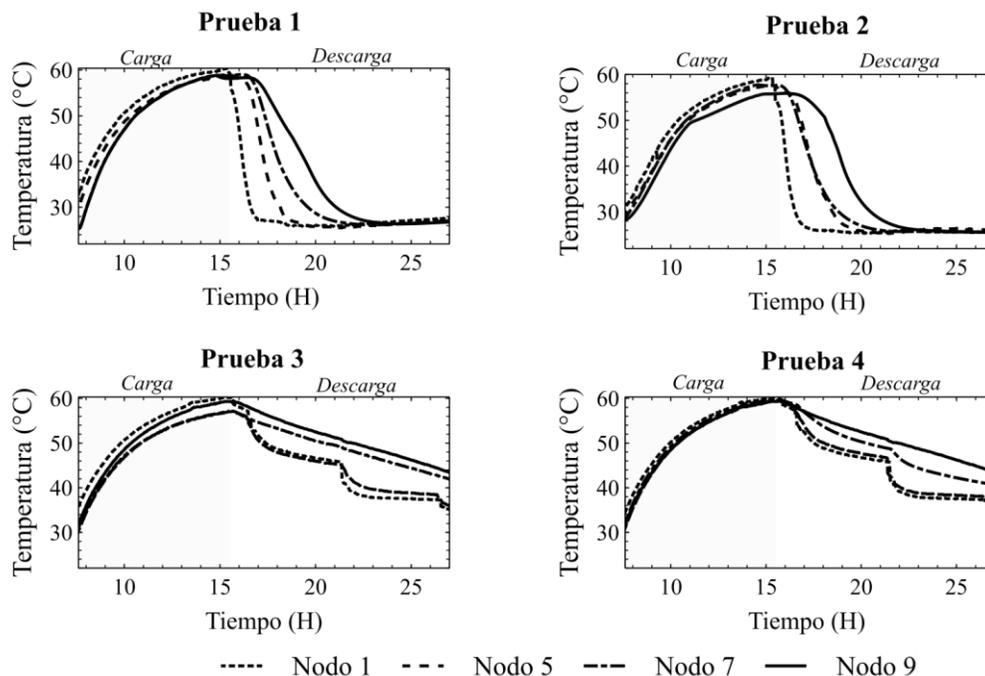


Figura 4.13 Estratificación térmica en el tanque de almacenamiento

## 5. Evaluación del desempeño

En este capítulo se presenta la evaluación del desempeño de la tecnología de almacenamiento térmico con PCM en un colector solar de placa plana y un tanque de almacenamiento de agua en comparación con sistemas testigos con tecnología tradicional. El análisis se llevó a cabo a partir de resultados experimentales y mediante la utilización de modelos. La evaluación comparativa del colector solar se realizó para tres días típicos de operación: alta, media y baja radiación. Para el tanque de almacenamiento se analizaron dos escenarios: bajo condiciones constantes de entrada y descarga por lotes.

La evaluación del desempeño se llevó a cabo a partir del comportamiento en términos de eficiencias de primera y segunda ley para las dos tecnologías. Adicionalmente, se planteó un escenario de aplicación para calentamiento de agua de uso doméstico, que consistió en conectar el sistema de calentamiento por energía solar con un sistema de apoyo de un calentador eléctrico o un calentador a gas, se estableció como indicador el consumo de energía adicional para tener disponibilidad de agua caliente por 24 horas, con el uso de la tecnología con PCM en comparación con el uso de la tecnología tradicional.

En la primera sección de este capítulo se muestra la evaluación comparativa del colector solar con y sin PCM, mientras el análisis del tanque de almacenamiento se desarrolla en la segunda sección, por último, se presentan los resultados comparativos bajo el estudio de la aplicación del sistema solar para calentamiento de agua de uso doméstico.

### 5.1. Colector solar

#### 5.1.1. Análisis comparativo

Para llevar a cabo el análisis comparativo de las dos tecnologías y la evaluación del desempeño del colector solar se consideraron tres escenarios de estudio con diferentes condiciones experimentales, correspondientes a un día de alta, media y baja radiación incidente promedio en la campaña experimental donde se utilizó el PCM con un rango de temperatura de fusión de 41 °C – 46 °C y propiedades mostradas en el capítulo 4 de experimentación. El tiempo de observación establecido para cada caso fue de 24 horas entre dos días consecutivos, con el fin de analizar el almacenamiento y liberación de la energía térmica del PCM durante el día, las horas nocturnas y las primeras horas del día siguiente, el periodo de tiempo observado empezó desde las 7:00 am del primer día hasta las 6:00 am del segundo día (tercer día calendario). Las fechas de los días analizados se listan en la Tabla 5.1.

Escenario	Radiación promedio	Unidades	Día 1	Día 2
1. Radiación alta	6000	W/m <sup>2</sup> día	16-05-2018	17-05-2018
2. Radiación media	4500	W/m <sup>2</sup> día	29-04-2018	30-04-2018
3. Radiación baja	2500	W/m <sup>2</sup> día	27-04-2018	28-04-2018

Tabla 5.1 Fechas de los días de análisis del colector solar para tres escenarios

Las condiciones de experimentación y operación para cada escenario de estudio se presentan en la Figura 5.1 y 5.2. En la Figura 5.1 se muestran las curvas de radiación incidente para cada caso, mientras en la Figura 5.2 se presenta la curva de temperatura ambiente, temperatura de entrada del agua y velocidad del viento durante el tiempo de experimentación.

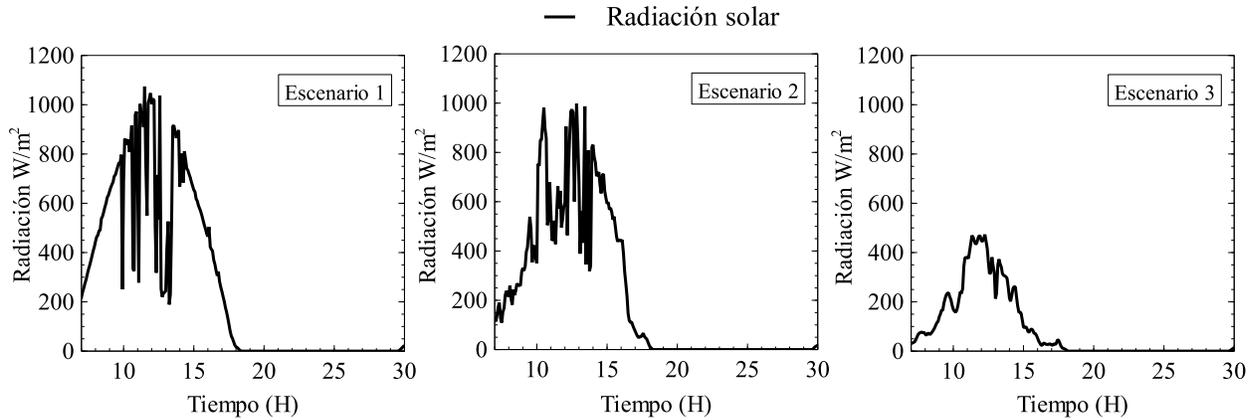


Figura 5.1 Medición experimental para un día de alta, media y baja radiación solar

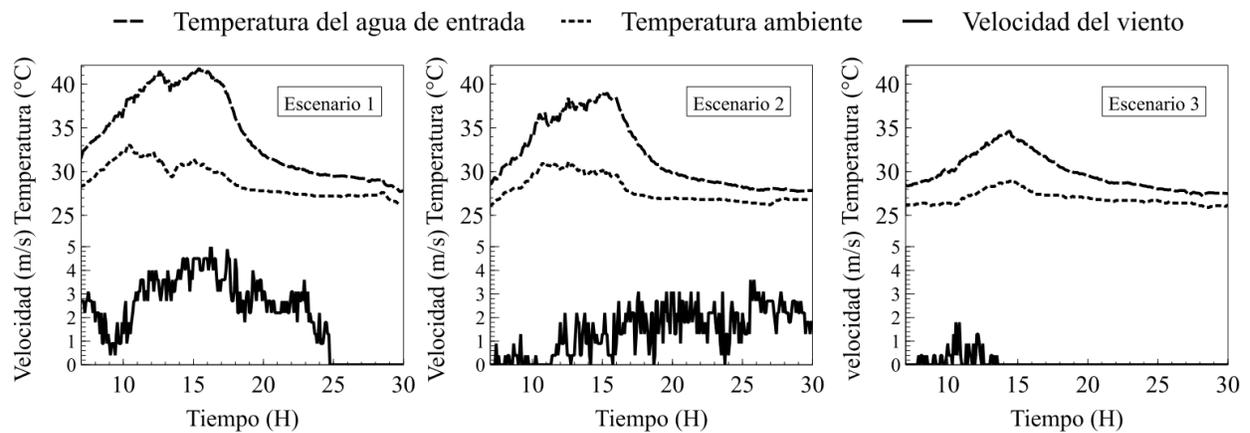


Figura 5.2 Condiciones experimentales de velocidad del viento, temperatura ambiente y temperatura de entrada

En este capítulo inicialmente se analizará experimentalmente de forma comparativa el rendimiento energético y exergético del sistema con tecnología PCM y con tecnología tradicional, en las Figuras 5.3, 5.4 y 5.5 se presenta las medidas de temperatura de los componentes principales del colector y temperatura de salida del agua, para los dos sistemas y los tres escenarios planteados.

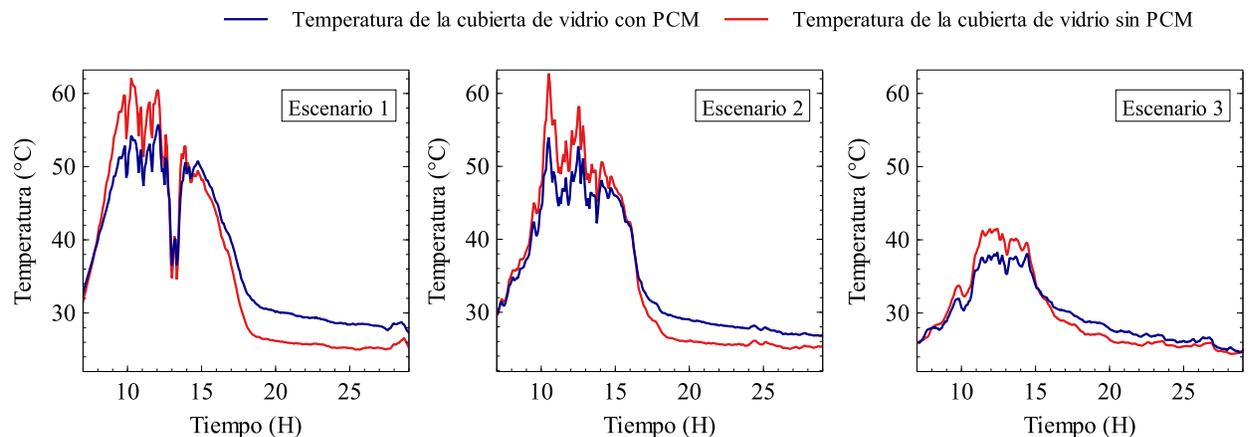


Figura 5.3 Temperatura experimental de la cubierta de vidrio con y sin PCM

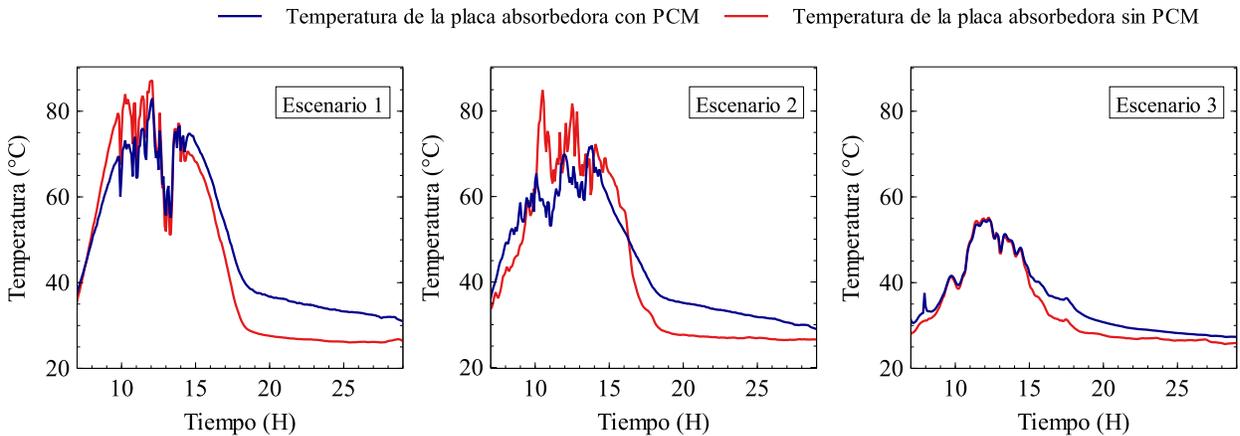


Figura 5.4 Temperatura experimental de la placa absorbedora con y sin PCM

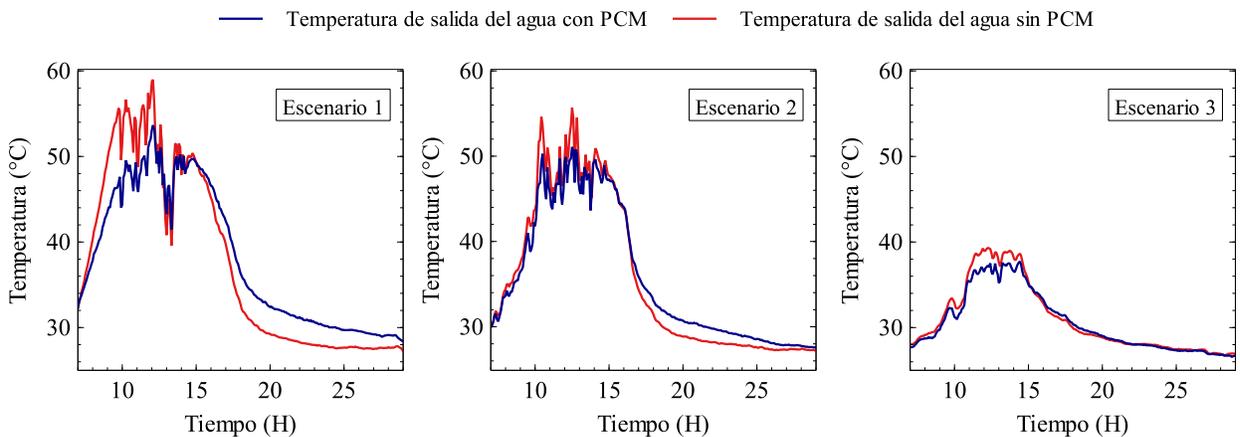


Figura 5.5 Temperatura experimental de salida del agua del colector con y sin PCM

Puede observarse que para los tres escenarios bajo estudio, las temperaturas de operación del colector que contiene PCM son más bajas en las horas del día, pero son mayores durante la noche y las primeras horas del segundo día en comparación con el sistema con tecnología tradicional sin PCM, este comportamiento se debe al almacenamiento de energía térmica del material durante las horas de radiación solar y su funcionamiento como fuente de calor durante la noche, de esta manera se evidencia el efecto que tiene la inclusión de PCM en el colector para las temperaturas de todos los componentes del sistema, principalmente en la placa absorbedora y la salida del agua.

La diferencia de temperatura en el colector con PCM respecto al colector sin PCM es más notable el día de mayor radiación, con una diferencia de temperaturas de 4 °C en la cubierta de vidrio y de 7 °C en la placa absorbedora hasta las 7:00 am del segundo día, mientras que para el día con media radiación la diferencia de temperatura en la cubierta de vidrio es de 3 °C y 5 °C en la placa absorbedora, y para el día con baja radiación de 0.2 °C y 3 °C para la cubierta y la placa respectivamente. Se observa que, para el día de baja radiación la diferencia de temperaturas entre el sistema con PCM y sin PCM disminuye durante la noche hasta las primeras horas del segundo día. Este comportamiento se presenta de forma similar en la temperatura de salida del agua mostrada en la Figura 5.5, en las gráficas se observa que mientras en el día de alta radiación la diferencia de temperatura entre los dos sistemas se mantiene en 3.5 °C hasta el otro día, en

los otros dos escenarios esta diferencia de temperatura disminuye hasta igualarse a las 28.5 horas y 20 horas el día de media y baja radiación respectivamente. Por otra parte, el comportamiento en términos exergéticos del colector con y sin PCM se analiza respecto a la exergía disponible transferida al agua durante las 24 horas como se muestra en la Figura 5.6 para los tres escenarios de estudio.

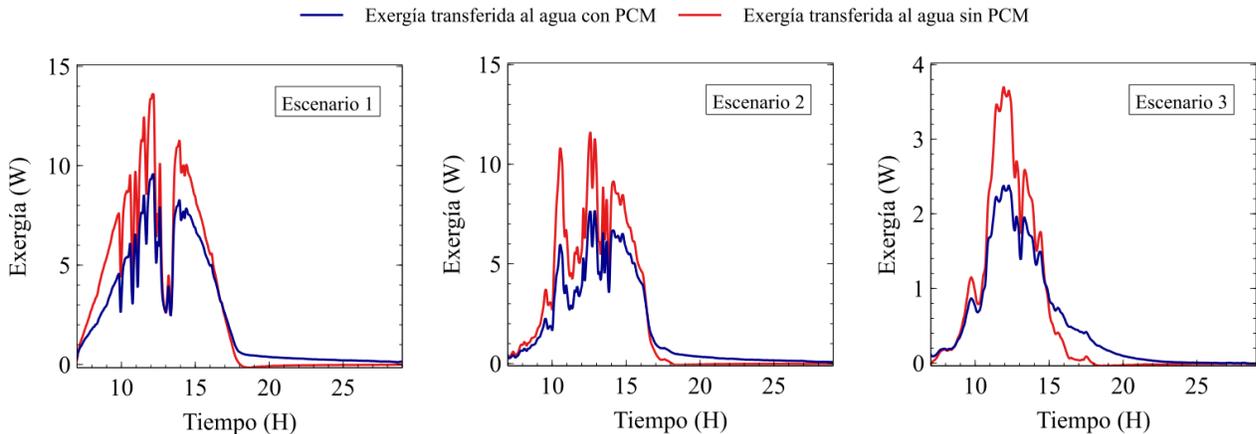


Figura 5.6 Exergía transferida al agua en el colector solar con y sin PCM

Se observa que a diferencia del sistema con tecnología tradicional, en el colector con PCM se tiene exergía disponible en la noche o en las horas de ausencia de radiación solar durante el día en los tres escenarios, de manera similar a los resultados anteriores, se aprecia que la curva de exergía transferida al agua para el colector sin almacenamiento térmico llega a cero inmediatamente cae de radiación solar, por el contrario, en el colector con PCM se tiene disponibilidad de agua caliente hasta las primeras horas del segundo día para los días de alta y media radiación, y hasta las 24:00 horas del primer día en el escenario de baja radiación, este comportamiento se asocia al efecto del PCM en el colector, el cual puede evidenciarse en la Figura 5.7, que muestra la temperatura de la capa superior del material para los tres escenarios.

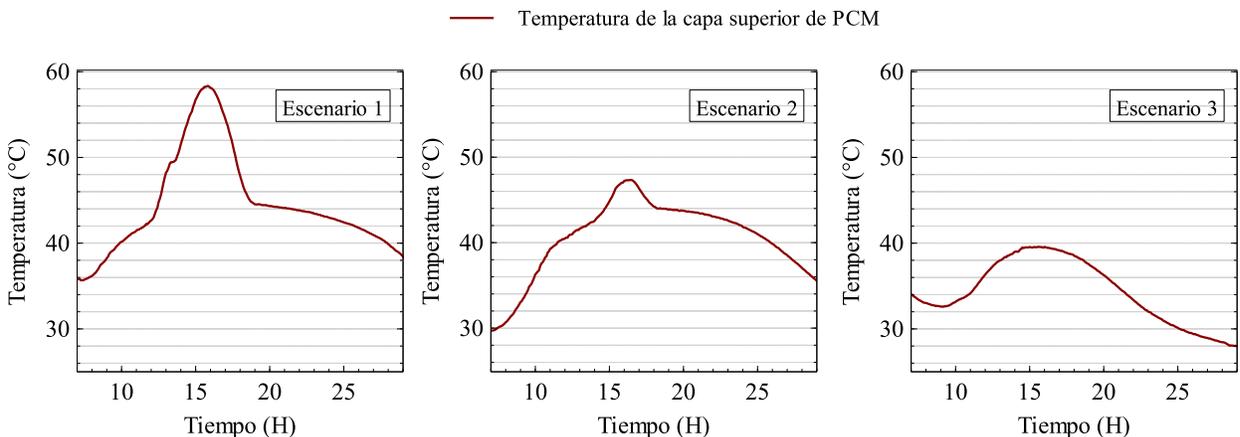


Figura 5.7 Temperatura de la capa superior de PCM para alta, media y baja radiación

Como se observa en la gráfica, en el tercer escenario el PCM no alcanza el rango de temperatura de fusión de 41 °C – 46 °C, por lo que el material no se alcanza a fundir y solamente almacena calor sensible, es decir que para el día de baja radiación, el PCM seleccionado no almacena la energía térmica suficiente para mantener el agua caliente durante toda la noche y hasta las

primeras horas del segundo día, a diferencia de los primeros dos escenarios, donde el PCM alcanza su temperatura de fusión y se observa como en las horas de la noche la temperatura se mantiene y baja lentamente, esto es un indicador del almacenamiento por calor latente. Este comportamiento se ve con más claridad en la Figura 5.8, donde se muestra los flujos de calor del PCM hacia la placa absorbidora durante el proceso de carga (área gris, valores positivos) y descarga (área blanca, valores negativos) para los tres escenarios analizados.

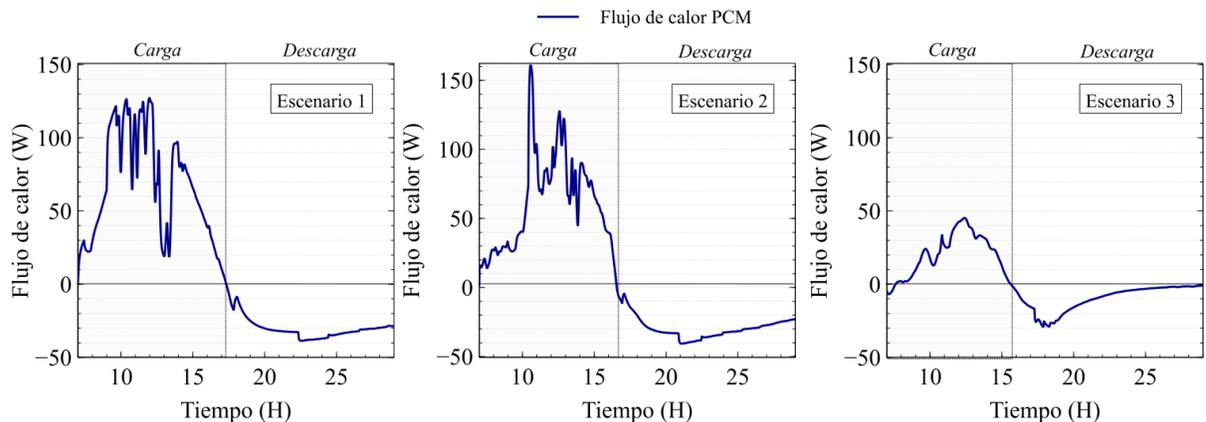


Figura 5.8 Flujo de calor almacenado y suministrado por el PCM para alta, media y baja radiación

A partir de estos resultados se observa que el flujo de calor del PCM presenta valores más bajos y decae con mayor velocidad el día de baja radiación, por el contrario, en los primeros dos escenarios el flujo de calor del PCM tiene valores más altos y una mejor estabilidad durante la noche. Se puede inferir que el PCM utilizado para llevar a cabo el análisis cumple su función como fuente de calor durante la noche en los días donde se presenta alta y media radiación, mientras que para el día de baja radiación el material no cumple esta función.

El rendimiento del colector solar se mide basado en la disponibilidad de agua caliente que puede obtenerse durante las 24 horas, en la Figura 5.9 se muestra de forma comparativa la eficiencia de primera y segunda ley para cada escenario en el tiempo de análisis establecido.

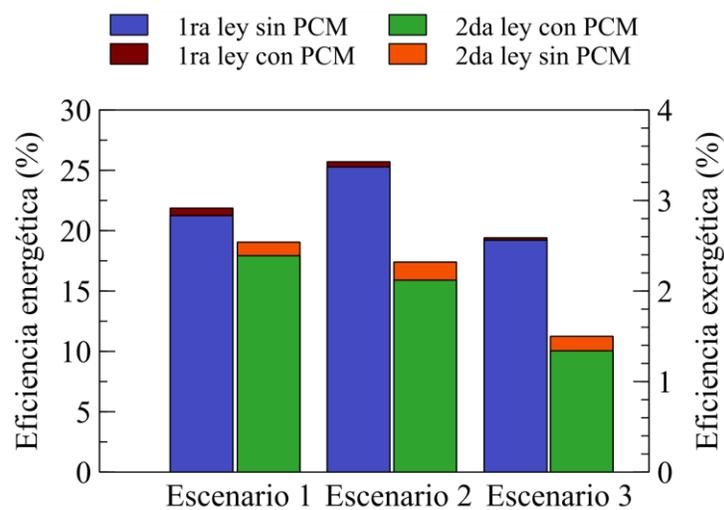


Figura 5.9 Eficiencia energética y exergética del colector solar con y sin PCM

Como se observa en el diagrama de barras de la Figura 5.9, la eficiencia del colector con PCM respecto al colector sin PCM es mayor para los tres escenarios en términos energéticos, mientras que la eficiencia exergética es menor en todos los escenarios. De acuerdo a los resultados comparativos de la temperatura de los componentes principales, la temperatura de salida del agua y la exergía disponible, se observa que la inclusión de PCM en el colector permite tener disponibilidad de agua caliente durante la noche y hasta las primeras horas del segundo día, sin tener un efecto negativo en el rendimiento exergético mayor al 0.16 % y sin perjudicar el rendimiento energético del dispositivo. No obstante, se pudo observar que, para el día de baja radiación, el PCM seleccionado no cumple su función debido a las condiciones experimentales. Con el fin de encontrar el punto de máxima eficiencia exergética del sistema se realizó una optimización de algunos parámetros de diseño y operación del colector con y sin PCM, los resultados de la optimización se muestran en la siguiente sección.

### Optimización de los parámetros del colector solar

Para llevar a cabo una comparación más profunda del rendimiento del colector solar con incorporación de PCM respecto al colector con tecnología tradicional, se amplió la región de estudio a través de la evaluación y variación de parámetros fundamentales de diseño y operación del sistema, mediante la utilización del modelo exergético del colector presentado en el capítulo 3. En la Tabla 5.2 se muestran los parámetros del colector experimentales y los niveles mínimos y máximos seleccionados para establecer posibles escenarios de operación en los casos de alta, media y baja radiación.

Parámetros de diseño y operación	Valor experimental	Rangos de región de exploración		Unidades
		Mínimo	Máximo	
<i>Conductancia de contacto (Placa-PCM)</i>	12	10	50	W/m <sup>2</sup> °C
<i>Área de transferencia de calor</i>	0.88	0.6	1	m <sup>2</sup>
<i>Caudal del flujo de agua</i>	0.2	0.2	1	L/min
<i>Espesor del PCM</i>	0.03	0.01	0.03	m
<i>Rango de temperatura de fusión de PCM</i>	45	35	55	°C

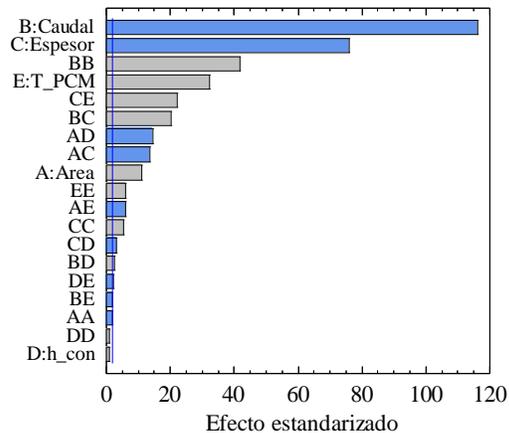
Tabla 5.2 Parámetros de diseño y operación del colector solar explorados para optimización

Los niveles mínimos y máximos de los parámetros se establecieron a partir de los siguientes criterios: para la conductancia de contacto, experimentalmente con la aplicación de pasta térmica se logró un contacto térmico de 12 W/m<sup>2</sup> °C entre la placa absorbadora y el PCM, a partir del modelo energético del colector solar se encontró que un valor de 50 W/m<sup>2</sup> °C hace referencia a un contacto perfecto, y 10 W/m<sup>2</sup> °C a la condición experimental sin pasta térmica entre los dos componentes. Para el área de transferencia de calor, se seleccionó un nivel máximo de 1 m<sup>2</sup> por el tamaño del colector solar a escala laboratorio utilizado en el desarrollo experimental, con el fin de obtener resultados por m<sup>2</sup> y un nivel mínimo de 0.6 m<sup>2</sup> por el área experimental de los contenedores de PCM. Los niveles del caudal, se seleccionaron a partir de la escala de 0.2 a 1 L/min del flujómetro utilizado para la campaña experimental, además, de mantenerse en el rango de caudal utilizados para sistemas de calentamiento solar de agua. Respecto al espesor del PCM, a partir de resultados de trabajos previos del grupo de investigación, Palacio 2018, encontró que para un espesor menor a 0.01 m en las condiciones experimentales evaluadas, el PCM se funde antes de las 12 horas y no almacena la energía suficiente para mantener agua caliente en horario

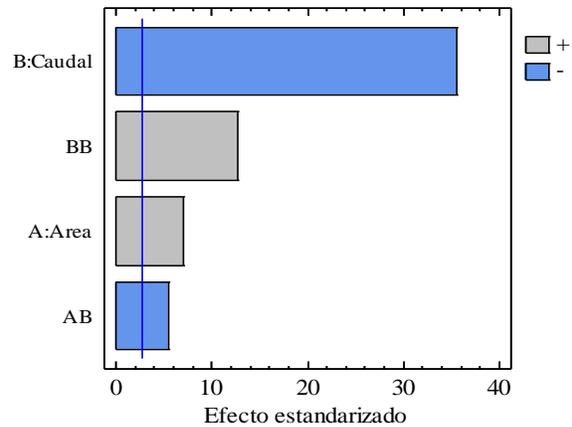
nocturno, además como se observó en la comparación experimental en la sección anterior, para un espesor de 0.03 m el PCM no logra fundirse completamente en el escenario de baja radiación. Los niveles para la temperatura de fusión del PCM se seleccionaron a partir de las fichas técnicas de las ceras de parafina disponibles para la experimentación.

Posterior a la selección de parámetros y establecer los niveles mínimos y máximos para ampliar la región de estudio con los dos colectores, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad para la eficiencia exergética del colector solar, mediante la aplicación de la metodología de diseño factorial  $2^k$ , con el fin de determinar cuáles de estos parámetros y sus interacciones son más influyentes para un día de alta, media y baja radiación. Se implementó un factorial  $2^5$  con puntos centrales para el colector con almacenamiento térmico y un  $2^2$  con puntos centrales para el colector con tecnología tradicional, la diferencia de factores influyentes del colector con y sin PCM, se debe a que en el colector con almacenamiento térmico existen los factores relacionados con las características del PCM, dando como resultado 243 y 9 posibles configuraciones respectivamente para cada escenario evaluado. Para realizar las corridas se utilizó el modelo energético y exergético del colector solar validado experimentalmente.

Después de obtener los resultados de la eficiencia exergética para todas las posibles configuraciones dentro de los parámetros de diseño y condiciones de operación seleccionados de los dos sistemas, se determinó, mediante un análisis estadístico el efecto de todos los factores y sus interacciones para la eficiencia, con base a esto, se comprobaron cuáles efectos son menos significativos y se eliminaron. En la Figura 5.10 se presentan los diagramas de Pareto con los factores de primer y segundo orden significativos para la eficiencia de segunda ley, para el colector con PCM (izquierda) y el colector sin PCM (derecha) en los tres escenarios evaluados.



a) Diagrama de Pareto escenario 1 con PCM



b) Diagrama de Pareto escenario 1 sin PCM

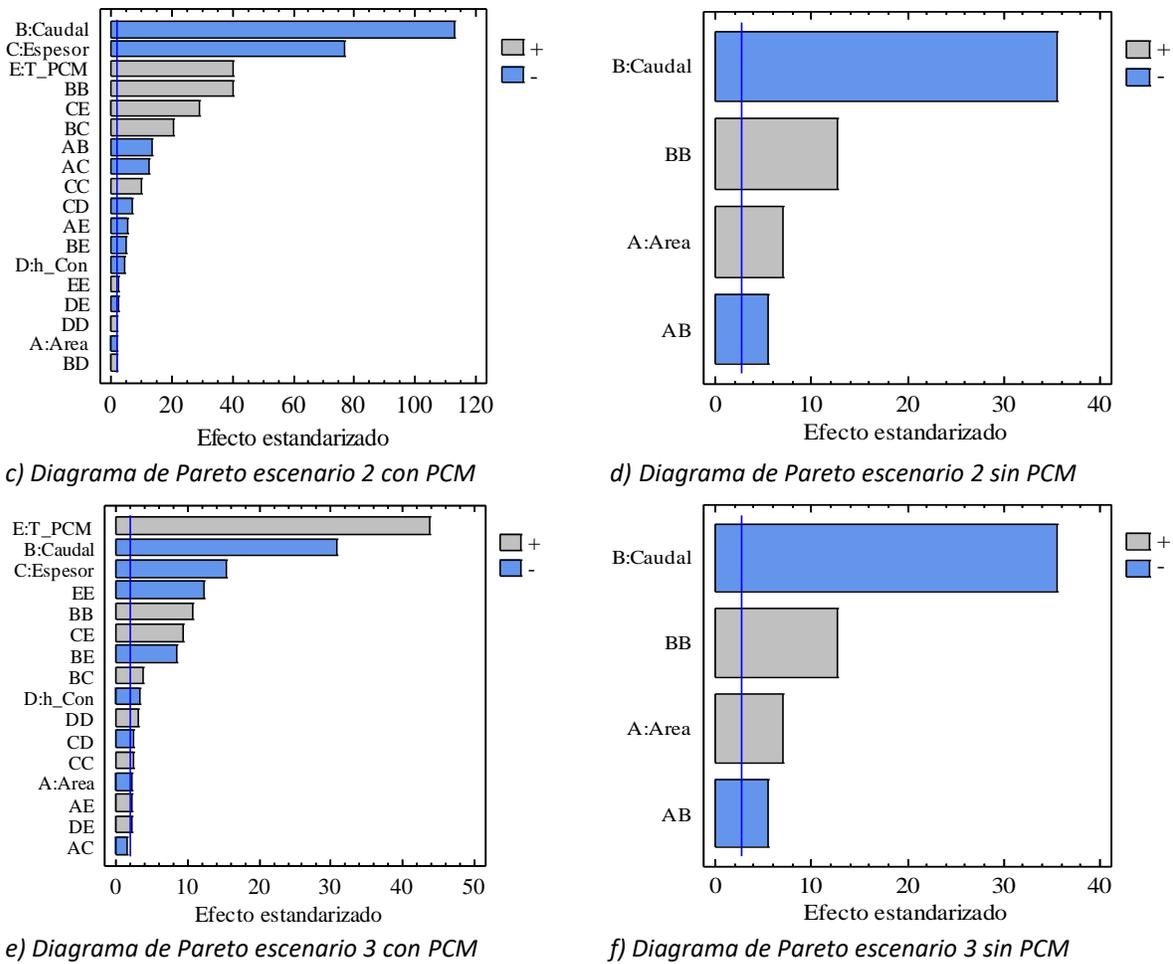


Figura 5.10 Diagramas de Pareto para los tres escenarios planteados del colector solar con y sin PCM

Puede observarse que, para el colector solar con PCM en el día de alta radiación (Figura 5.10a), 18 factores pueden considerarse en el análisis, incluyendo los factores de primer orden que tienen efectos significativos a excepción del factor D (Conductancia de contacto). Sin embargo, no es conveniente excluirlo del análisis, ya que tiene interacciones de segundo orden significativas (DE, CD,BD), por otra parte, para los días de media y baja radiación en el colector con PCM (Figura 5.10c y 5.9e), se repiten con un efecto mayor o menor, los factores que son significativos para el día de alta radiación. Por otro lado, el colector sin incorporación de PCM no tiene variación en los efectos de los factores evaluados entre los tres escenarios planteados para los días con diferentes condiciones ambientales (Figuras 5b, 5d y 5f), los dos parámetros de primer orden, caudal y área son significativos al igual que las interacciones BB (caudal-caudal) y AB (área-caudal) con el mismo efecto para los tres escenarios.

Por otra parte, en base a los resultados de las 243 y 9 posibles condiciones propuestas para los dos colectores, se determinaron las condiciones y los parámetros de diseño que favorecen la eficiencia exergética del dispositivo. En las Tabla 5.3 y 5.4 se presentan a manera de ejemplo, 5 configuraciones con mayor eficiencia exergética de las 243 posibles en el colector con PCM y 5 con mayor eficiencia de 9 posibles en el colector sin PCM.

<i>Alta radiación</i>						
<i>Corrida</i>	<i>Temperatura de fusión PCM (°C)</i>	<i>Espesor PCM (m)</i>	<i>Área (m<sup>2</sup>)</i>	<i>Caudal (L/min)</i>	<i>Conductancia de contacto (W/m<sup>2</sup> °C)</i>	<i>Eficiencia exergética (%)</i>
1	55	0.01	1	0.2	50	2.47
2	55	0.01	1	0.2	30	2.43
3	45	0.01	1	0.2	50	2.42
4	45	0.01	1	0.2	30	2.42
5	55	0.01	1	0.2	10	2.41
<i>Media radiación</i>						
1	55	0.01	1	0.2	50	2.28
2	35	0.01	1	0.2	30	2.22
3	35	0.01	1	0.2	50	2.21
4	45	0.01	1	0.2	50	2.21
5	55	0.01	1	0.2	30	2.21
<i>Baja radiación</i>						
1	55	0.01	0.8	0.2	50	1.55
2	55	0.02	0.8	0.2	50	1.52
3	55	0.01	1	0.2	10	1.52
4	55	0.01	0.8	0.2	30	1.48
5	55	0.01	1	0.2	30	1.47

Tabla 5.3 Configuraciones con mayor eficiencia en el colector con PCM

<i>Alta radiación</i>			
<i>Corrida</i>	<i>Caudal (L/min)</i>	<i>Área (m<sup>2</sup>)</i>	<i>Eficiencia exergética (%)</i>
1	0.2	1	2.56
2	0.2	0.8	2.52
3	0.2	0.6	2.33
4	0.6	1	1.94
5	0.6	0.8	1.91
<i>Media radiación</i>			
1	0.2	1	2.40
2	0.2	0.8	2.33
3	0.2	0.6	2.16
4	0.6	1	1.76
5	0.6	0.8	1.72
<i>Baja radiación</i>			
1	0.2	1	1.56
2	0.2	0.8	1.46
3	0.2	0.6	1.37
4	0.6	1	1.17
5	0.6	0.8	1.14

Tabla 5.4 Configuraciones con mayor eficiencia en el colector sin PCM

Una vez se obtuvieron los factores significativos para la eficiencia exergética en los dos colectores, se planteó para cada escenario un modelo de regresión simple que describe el rendimiento en términos de la segunda ley a partir de la variación de parámetros fundamentales de diseño y operación del sistema. A continuación, en la Tabla 5.5 se presenta el modelo de regresión para cada escenario, derivado a partir de los datos obtenidos. Para el colector sin PCM se obtuvo un mismo modelo de regresión para los tres escenarios debido a que los efectos de los factores significativos se repiten.

<b>Radiación</b>	<b>Colector con PCM</b>
<b>Alta</b>	$\eta_{ex} = 2.4887 + 1.44175A - 1.67565B - 43.8544C + 0.00128164D - 0.0171333E - 0.188758AA - 0.491514AB - 18.328AC - 0.00790345AE + 0.995598BB + 13.7085BC + 0.0008017BD - 0.00136963BE + 199.301CC - 0.0431823CD + 0.598647CE + 0.0000079476DD - 0.0000286361DE + 0.000225148EE$
<b>Media</b>	$\eta_{ex} = 2.4325 + 0.874912A - 1.49101B - 57.0772C + 0.00112808D - 0.00728197E - 0.433457AB - 16.4335AC - 0.00687192AE + 0.917436BB + 13.1648BC + 0.000622342BD - 0.00316292BE + 371.308CC - 0.0896792CD + 0.755168CE + 0.0000203427DD - 0.0000312609DE + 0.000099887EE$
<b>Baja</b>	$\eta_{ex} = -0.47499 - 0.220935A - 0.493863B - 31.4344C - 0.00512076D + 0.0861666E - 4.0395AC + 0.00565468AE + 0.468276BB + 4.67819BC - 0.0105375BE + 166.624CC - 0.0619986CD + 0.462819CE + 0.0000547195DD + 0.000053453DE - 0.000861738EE$
<b>Radiación</b>	<b>Colector sin PCM</b>
<b>Alta, media y baja</b>	$\eta_{ex} = 1.29669 - 1.10884A + 0.532431E + 0.800484AA - 0.444686AE$

Tabla 5.5 Modelos de regresión de eficiencia exergética para los tres escenarios

Donde, A: Área (Placa absorbadora-PCM), B: Caudal, C: Espesor del PCM, D: conductancia de contacto (Placa absorbadora – PCM) y E: Temperatura de fusión PCM para el colector con PCM y A: Área (placa absorbadora) y B: Caudal, para el colector sin PCM.

Una vez se obtuvo el modelo de regresión en cada escenario para la variable de respuesta, se procedió a encontrar un punto donde las condiciones y los parámetros de diseño favorecen la eficiencia exergética del colector solar con y sin PCM dentro de las condiciones de experimentación. Se utilizó la herramienta Explore de Statgraphics® para encontrar los niveles óptimos de cada factor sobre la superficie de respuesta generada para el día de alta, media y baja radiación, la superficie de respuesta obtenida para los tres días evaluados tiene el mismo comportamiento, ya que los valores óptimos del colector con y sin PCM son iguales para los tres escenarios, sin embargo, difiere en los resultados de la eficiencia exergética en cada configuración por las condiciones ambientales. En la Figura 5.11 se observa la superficie de respuesta obtenida para el día de media radiación para el colector con y sin PCM, y los valores óptimos de los parámetros de los dos colectores para los tres escenarios se muestran en la Tabla 5.6.

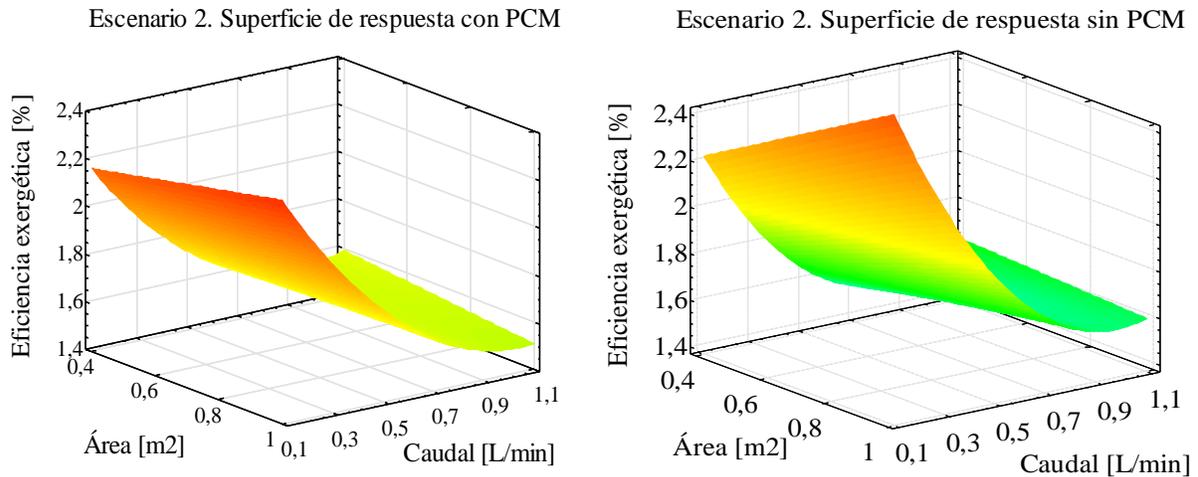


Figura 5.11 Superficie de respuesta obtenida con los niveles óptimos del colector para el día de media radiación

Factor	Valor óptimo		Unidades
	Con PCM	Sin PCM	
Área	1.0	1.0	m <sup>2</sup>
Caudal	0.2	0.2	L/min
Temperatura de fusión PCM	55.0	-	°C
Espesor PCM	0.01	-	m
Conductancia térmica de contacto	50.0	-	W/m <sup>2</sup> C

Tabla 5.6 Valores óptimos de los parámetros del colector con y sin PCM para los tres escenarios

Según los resultados obtenidos por el modelo en el proceso de optimización, se encontró que los parámetros de diseño y operación que mejoran la eficiencia exergética del colector solar con PCM, es una mayor área de transferencia de calor entre la placa absorbidora y el material, el mínimo caudal de agua, un contacto perfecto entre la placa y el PCM, y una temperatura de fusión de 55 °C con un espesor de 0.01 m para el PCM. Y, por otra parte, para el colector con tecnología convencional, una mayor área de la placa absorbidora y un mínimo caudal de agua. Estos parámetros favorecen el rendimiento exergético de los colectores en los tres escenarios evaluados.

Una vez establecidas las condiciones experimentales y los parámetros de diseño para el punto óptimo de la eficiencia exergética del colector con y sin PCM, se realiza una comparación del comportamiento en condiciones óptimas de las dos tecnologías respecto a los resultados experimentales. En la Figura 5.12 se ilustra la exergía transferida al agua de los dos colectores con la configuración óptima respecto a la experimental para cada escenario evaluado.

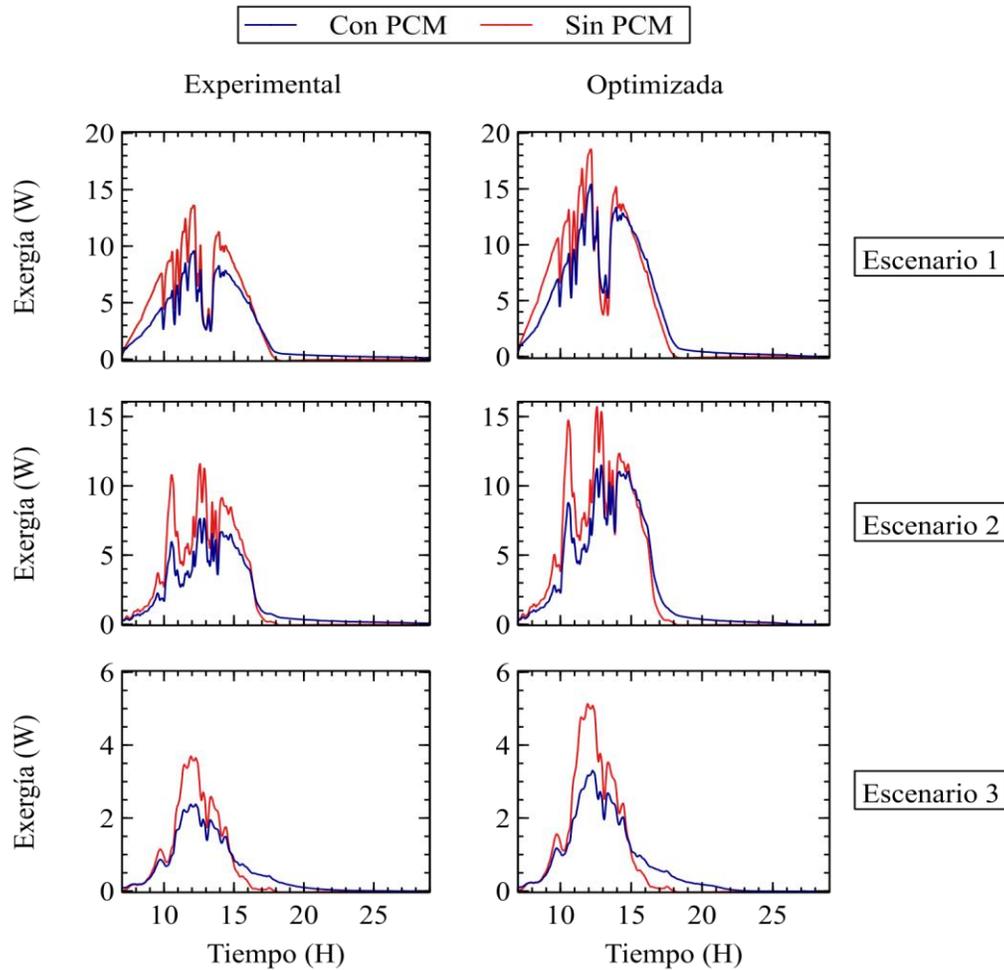


Figura 5.12 Exergía transferida al agua con la configuración experimental y condiciones óptimas

Según los resultados obtenidos por el modelo, se puede observar que la disponibilidad de agua caliente aumenta significativamente en la configuración con los parámetros y condiciones óptimas respecto a los resultados experimentales para los dos sistemas en cada escenario. El comportamiento de los colectores se mantiene debido a que el colector sin incorporación de PCM tiene mayor disponibilidad durante el día, sin embargo, es igual a cero inmediatamente cae la radiación solar, mientras que el colector con almacenamiento térmico tiene disponibilidad de agua caliente durante toda la noche hasta el segundo día. En la Figura 5.13, se muestran los resultados de las eficiencias de primera y segunda ley de los dos sistemas con la configuración óptima según las estimaciones del modelo, respecto a los valores experimentales durante el tiempo de análisis.

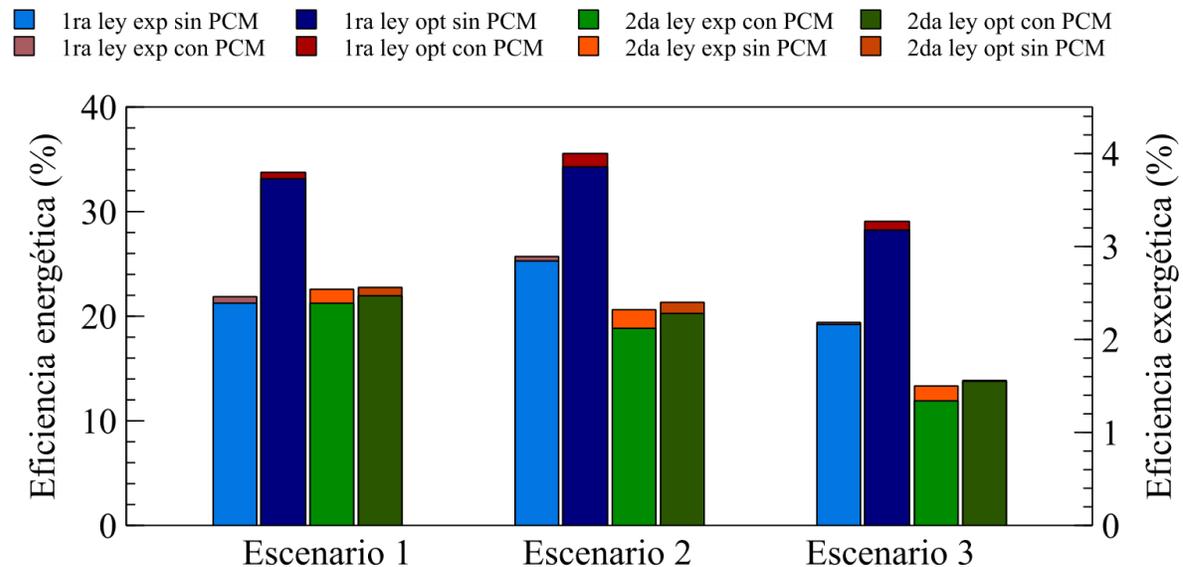


Figura 5.13 Eficiencias de primera y segunda ley experimental y óptima, con y sin PCM

De acuerdo a los resultados comparativos mostrados en el diagrama de barras de la Figura 5.13, se puede observar que la eficiencia aumenta con la configuración en condiciones óptimas hasta un 11.9 % y 11.2 % para la primera ley y un 0.2 % y 0.1 % en la segunda ley para el colector solar con y sin PCM respectivamente. El rendimiento energético del colector con PCM sigue siendo mayor respecto al colector sin PCM, mientras que la eficiencia exergética es mayor en el colector con tecnología convencional en los tres escenarios. Sin embargo, se observa que el colector con PCM permite tener disponibilidad de agua caliente durante la noche hasta las primeras horas del segundo día con una diferencia positiva en la eficiencia de primera ley de 1.31 %, sin tener un efecto negativo mayor al 0.1 % en la segunda ley respecto al colector sin PCM en condiciones óptimas.

Adicional al análisis del rendimiento, se presentan los resultados de destrucción de exergía en los componentes principales del colector, durante el tiempo de análisis para los tres escenarios de estudio. En la Tabla 5.7 se muestra la destrucción de exergía en la cubierta de vidrio y la placa absorbidora para los dos sistemas y las capas de PCM (para el colector con PCM) con los parámetros de operación y diseño óptimos.

Componente	Alta radiación		Media radiación		Baja radiación		Unidades
	Con PCM	Sin PCM	Con PCM	Sin PCM	Con PCM	Sin PCM	
Cubierta de vidrio	132.8	110	152	136	105.7	97.9	Wh
Placa absorbidora	2608	3078.7	2129	2454	879.2	978.8	Wh
PCM	454.9	-	316.9	-	91.1	-	Wh

Tabla 5.7 Exergía destruida en los componentes del colector

De acuerdo a los resultados, se puede observar que la destrucción de exergía en la placa absorbidora es mayor que en la cubierta de vidrio, debido a las irreversibilidades que se generan a causa de las altas temperaturas de operación del componente y el proceso de transferencia de

calor al agua y al PCM durante el proceso de carga del material. Por otra parte, se observa que, para todos los casos, en la placa absorbidora del colector sin almacenamiento térmico se destruye más exergía en comparación con el colector con PCM, lo cual indica que al tener mayor disponibilidad de agua caliente por la utilización del sistema de almacenamiento térmico se generan menos irreversibilidades en el colector con incorporación de PCM. La destrucción de exergía en el PCM se calculó por capas, esto es mostrado en la Figura 5.14 para un día típico de alta radiación, donde la capa 1 es la capa más cercana a la placa absorbidora (capa superior del PCM) y la capa 5 es la capa más cercana al aislamiento (capa inferior del PCM).

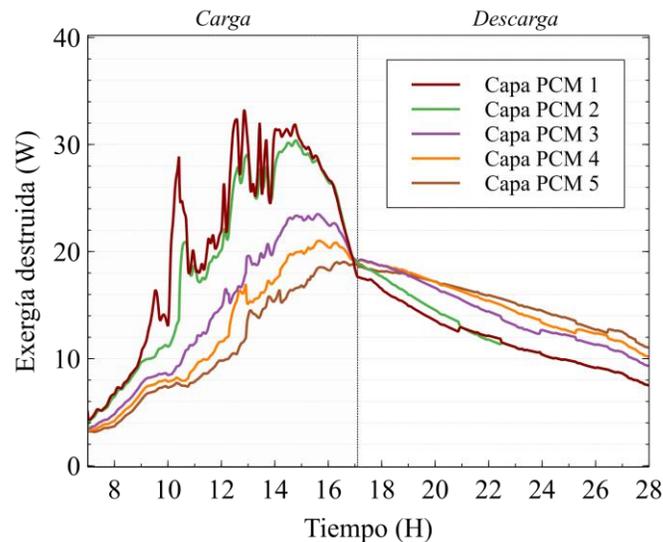


Figura 5.14 Exergía destruida en el interior de las capas de PCM durante el proceso de fusión y solidificación

Se observa que, durante todo el día se destruye mayor exergía en el interior del PCM durante el proceso de carga cuando la primera capa de material se funde, es decir que durante la transición de fase se genera mayor entropía en el PCM, debido a la cantidad de energía absorbida o restaurada como calor latente, por otra parte, se aprecia que durante el proceso de descarga de material después de las 5:00 pm se destruye más exergía en las capas inferiores, esto se asocia al comportamiento de transferencia de calor ascendente del material, donde las capas inferiores transfieren la energía almacenada a la capa superior para calentar la placa absorbidora, parte de la exergía que se debe transferir al agua durante la noche hasta las primeras horas del segundo día es destruida.

## 5.2. Tanques de almacenamiento

### 5.2.1. Análisis comparativo

Para llevar a cabo la evaluación comparativa del rendimiento del tanque de almacenamiento de agua con y sin PCM, se establecieron dos escenarios con dos condiciones de descarga diferentes de acuerdo a la experimentación realizada en el laboratorio, para el primer escenario la descarga de agua se realizó manteniendo constante el caudal de entrada, mientras que en el segundo escenario la descarga se hace por lotes, 3 descargas de 15 minutos cada una. El tiempo de análisis para los escenarios fue de 24 horas con inicio a las 7:00 am. En la Figura 5.15 se ilustra la temperatura de entrada del agua en cada caso.

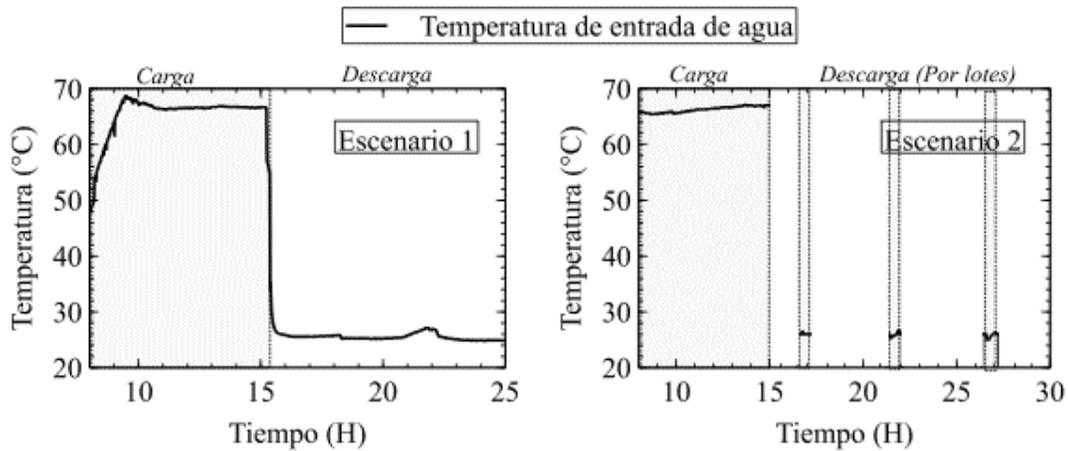


Figura 5.15 Escenario 1 y 2 de la temperatura de entrada del tanque de almacenamiento

La carga para ambos casos se realizó simulando la entrada de agua proveniente de un colector solar durante 8 horas, a una temperatura ascendente para el escenario 1 y constante para el 2 como se observa en la Figura 5.15. Para la descarga 1 se introdujo agua a temperatura ambiente manteniendo el caudal constante durante la prueba, la segunda descarga se realizó en 3 lotes introduciendo agua a temperatura ambiente durante 15 minutos correspondientes a los escalones de la gráfica de la derecha que simulan la utilización del agua almacenada en el tanque 3 veces, antes de empezar con las descargas se apagó el flujo de agua y se cierran las válvulas durante 1 hora, posterior a terminar cada descarga se repite el procedimiento de cerrar las válvulas y dejar en reposo el sistema durante 5 horas, este comportamiento discontinuo en la temperatura de entrada de agua se observa en la gráfica derecha de la Figura 5.15.

En esta sección del capítulo se realizará una comparación en base a los resultados experimentales del rendimiento del tanque con y sin incorporación de PCM, para ello, las pruebas experimentales de las dos tecnologías se llevaron a cabo bajo las mismas condiciones de operación en el laboratorio. En la Figura 5.16 se presentan las temperaturas de salida en el tanque para los dos escenarios con y sin PCM.

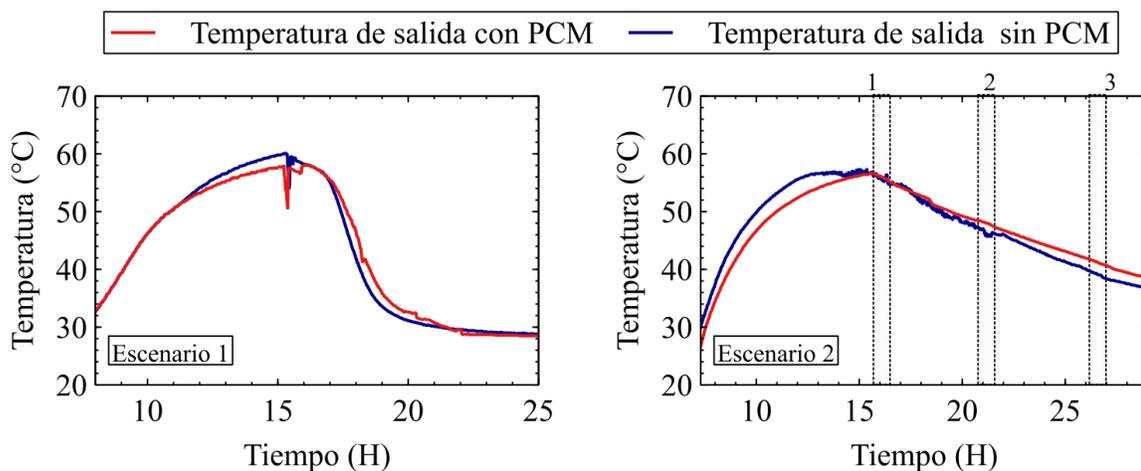


Figura 5.16 Temperaturas de salida en el tanque de agua en el escenario 1 y 2 con y sin PCM

Se observa que la temperatura de salida del agua del tanque con incorporación de PCM es hasta 1.7 °C menos respecto al tanque sin PCM en los dos escenarios durante el proceso de carga, este

resultado indica el proceso de almacenamiento de energía térmica del material. Respecto al proceso de descarga, en el escenario 1 se puede observar que para el tanque sin PCM la temperatura disminuye con mayor velocidad cuando se introduce una corriente de agua a temperatura ambiente en comparación al tanque con PCM, este comportamiento se asocia a la liberación de energía térmica almacenada por calor latente del PCM. Sin embargo, no se tiene disponibilidad de agua caliente por 24 horas respecto al tanque sin PCM, ya que las temperaturas se igualan aproximadamente a las 8:00 pm, de este resultado se puede inferir que el PCM no tiene gran influencia para la temperatura de salida en el tanque para el escenario 1. Por otra parte, en el escenario 2 se observa que la pendiente en la curva de la temperatura a la salida del agua en el tanque con PCM es menos pronunciada respecto al tanque sin almacenamiento térmico, y hay una diferencia de 1 °C y 1.5 °C para la segunda y tercera descarga de agua respectivamente, manteniendo mayor disponibilidad de agua caliente el tanque con PCM debido a la liberación de energía almacenada por el material. Respecto al comportamiento del PCM utilizado, en la Figura 5.17 se presenta la temperatura del material en el nodo intermedio de la botella para los dos escenarios.

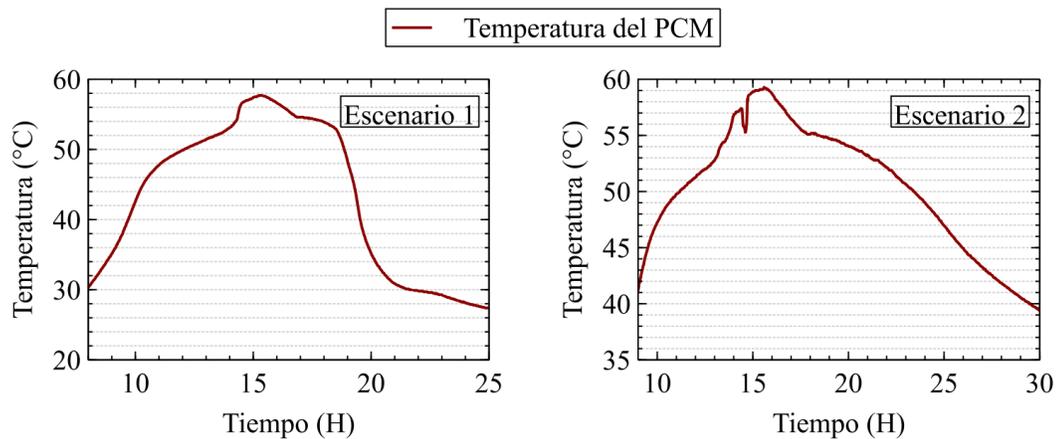


Figura 5.17 Temperatura del PCM en el tanque de almacenamiento escenario 1 y 2

Se observa que para ambas condiciones de operación el material alcanza su temperatura de fusión (51 – 55 °C). Sin embargo, para el segundo escenario la liberación de energía por calor latente tiene una mayor duración por la condición de reposo de 5 horas entre cada descarga, a diferencia del escenario 1, donde la descarga de agua constante es reemplazada por carga de agua a temperatura ambiente, y la liberación de energía almacenada por el PCM se hace en un menor tiempo, este efecto se puede observar con mayor detalle en los flujos de calor entre las botellas de PCM y el agua mostrados en la Figura 5.18 para las 8 botellas obtenidos mediante el modelo validado anteriormente.

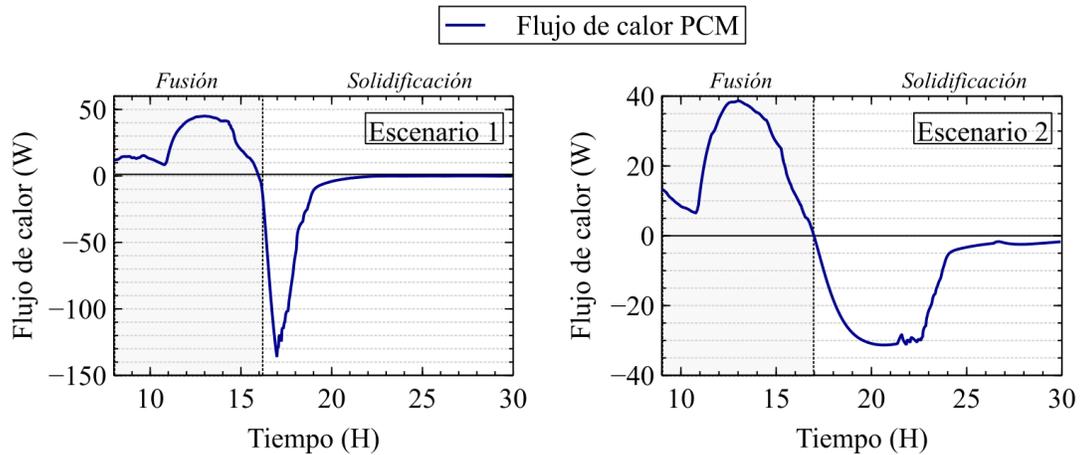


Figura 5.18 Flujos de calor del PCM en el tanque de almacenamiento de agua

En las gráficas se puede observar el comportamiento del PCM dentro del tanque en los dos escenarios, donde el área gris hace referencia al flujo de calor durante la fusión del material (positivo) y el área de color blanco al flujo transferido desde el PCM al agua durante la solidificación del material (negativo). En el escenario 1 el PCM libera la energía almacenada a una mayor velocidad comparado con en el escenario 2, donde la energía almacenada por calor latente se libera por completo hasta las 24:00 horas, antes de la última descarga de agua del tanque, es decir que la diferencia de temperatura a la salida de agua entre el tanque con y sin PCM a partir de las 24:01 es calentamiento por calor sensible debajo del punto de fusión del PCM. A partir de estos resultados se puede inferir que, aunque el PCM almacena y libera energía térmica, la cantidad de material utilizada para las condiciones de operación de los dos escenarios no es suficiente para mantener la disponibilidad de agua caliente durante 24 horas el primer escenario, mientras que, para el segundo escenario aunque se tiene disponibilidad de agua caliente durante un tiempo más prolongado en el tanque con PCM, en comparación con la tecnología tradicional, se hace necesario encontrar las condiciones de operación óptimas con la cantidad de PCM adecuada, para tener mayor disponibilidad de agua caliente durante 24 horas. Finalmente, para comparar el rendimiento del tanque con y sin PCM en términos energéticos y exergéticos, en la Figura 5.19 se presenta la eficiencia de primera y segunda ley de las dos tecnologías para los dos escenarios bajo estudio.

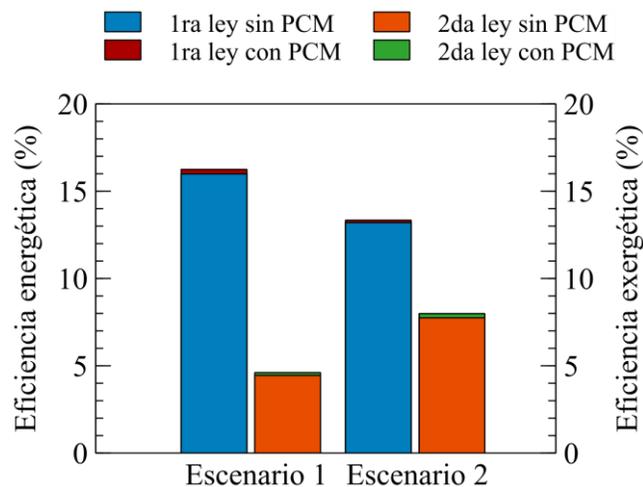


Figura 5.19 Comparación de la eficiencia energética y exergética del tanque con y sin PCM

En el diagrama de barras se puede observar que la inclusión de PCM en el tanque de almacenamiento aumenta las eficiencias con respecto al tanque sin PCM, 0.23 % y 0.14 % para el primer escenario y 0.16 % y 0.24 % para el segundo escenario en la eficiencia de primera y segunda ley respectivamente. A partir de estos resultados, se observa que para los dos escenarios el rendimiento energético y exergético del tanque de almacenamiento con incorporación de PCM es mejor respecto al tanque con tecnología convencional, sin embargo, como se observó en los resultados anteriores, es posible obtener mejores resultados para mantener mayor disponibilidad de agua caliente durante un tiempo más prolongado, estudiando condiciones de favorabilidad de la tecnología con PCM.

### 5.3. Análisis comparativo de consumo energético

Un sistema de calentamiento de agua solar convencional está compuesto por un captador solar y un tanque como dispositivo de acumulación de agua, en estos sistemas el almacenamiento se da por el incremento del calor sensible del fluido, la radiación solar calienta un fluido primario en el colector y posteriormente el fluido transfiere la energía térmica al agua almacenada en el tanque. El fluido circula en un ciclo entre el colector solar y el depósito de almacenamiento (Fazilati & Alemrajabi, 2013). Para el desarrollo de esta investigación se propuso la inclusión de PCM como sistema de acumulación de energía térmica por calor latente en el colector y el tanque para aumentar la densidad de almacenamiento del sistema, el análisis comparativo en los componentes se llevó a cabo en plataformas experimentales separadas para tener un mayor control sobre las variables de interés de cada dispositivo. Para comparar en términos económicos la tecnología de acumulación de energía térmica con PCM respecto a la tecnología tradicional, se plantea, a partir de los resultados obtenidos con el colector solar y el tanque de almacenamiento, un escenario de aplicación de calentamiento de agua para uso doméstico acoplado el sistema de calentador solar con un calentador eléctrico y un calentador a gas.

A partir del análisis del rendimiento energético y exergético del colector solar y el tanque de almacenamiento con PCM, en comparación con sistemas testigos con tecnología convencional, se determinó que la incorporación de PCM no altera de manera significativa el rendimiento del sistema para los escenarios estudiados en el tanque de almacenamiento, es por esto que para la evaluación comparativa en términos de consumo energético desarrollada en esta sección se excluye la incorporación del tanque de almacenamiento en el sistema de calentamiento solar de agua. De esta manera, se plantea un análisis comparativo con el colector solar con y sin PCM para mantener disponibilidad de agua caliente para uso doméstico durante 24 horas, el estudio consiste en mantener la salida de agua del sistema a una temperatura de operación, según (ATECYR, 2010) la temperatura para aplicaciones con agua sanitaria es de 35 °C, para ello, cuando la temperatura es superior durante las horas de radiación solar, se introduce agua desde la línea a temperatura promedio de 25 °C, por otra parte, cuando la temperatura del agua en la salida del sistema es inferior a 35 °C, se activa el sistema de calentamiento de apoyo, la evaluación del consumo energético se hace en términos del consumo eléctrico y consumo de gas basados en la energía adicional suministrada por el sistema de apoyo para un día típico de alta, media y baja radiación.

Para llevar a cabo las pruebas mediante el modelo térmico del colector, se implementó un lazo de control por retroalimentación tipo PID que manipula el flujo de salida de agua, para mantener la temperatura de operación en 35 °C. Por otra parte, se implementa una lógica de control On/Off

que activa una resistencia cuando la temperatura de operación es inferior a los 35°C y el controlador PID está saturado, es decir, ha cerrado completamente la válvula. La Figura 5.20 ilustra, con un P&ID, la estrategia de control propuesta.

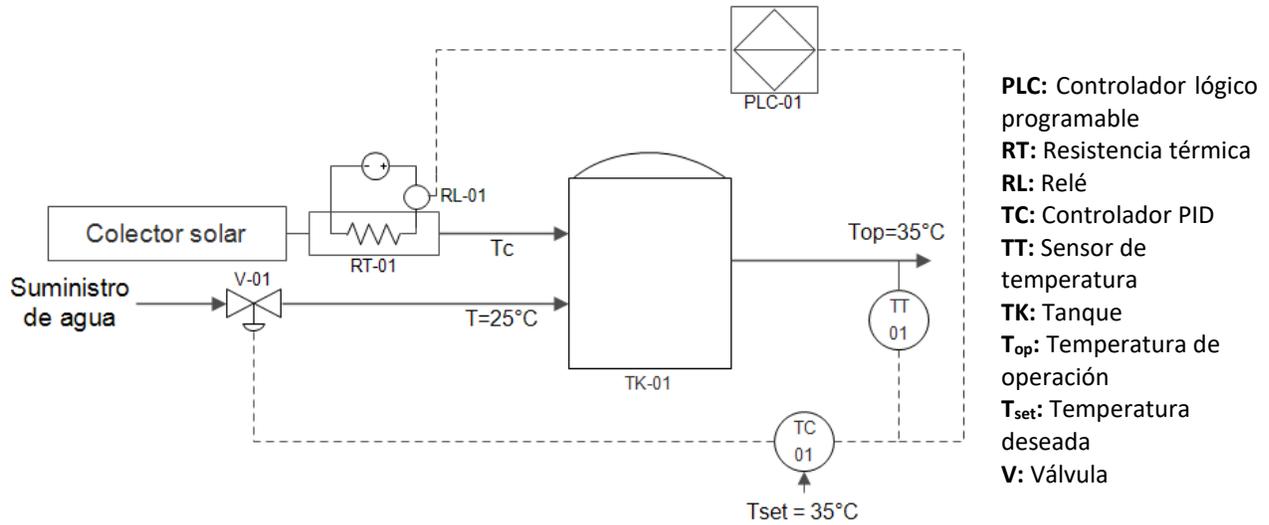


Figura 5.20 Estrategia de control propuesta P&ID

La comparación se realizó para los escenarios de alta, media y baja radiación establecidos en la evaluación del rendimiento del colector solar con y sin PCM, de acuerdo a los resultados obtenidos en la optimización de parámetros de diseño y operación del colector solar, el espesor de PCM para mejorar la eficiencia exergética es el valor mínimo (0.01 m), ya que, al disminuir la cantidad de PCM, el flujo de calor necesario para fundirlo disminuye y el calor transferido al agua es mayor durante día, dando como resultado mayor disponibilidad de agua caliente durante la carga y en consecuencia un mejor rendimiento exergético global por las altas temperaturas en el día, no obstante, este comportamiento afecta la temperatura de salida del agua durante las primeras horas del segundo día, debido a que la cantidad de PCM no es suficiente para mantener disponibilidad de agua caliente durante un tiempo más prolongado. En base a esto, para el siguiente análisis se aumentó el espesor de PCM a 0.015m, manteniéndose dentro de la región de operación con aumento de la eficiencia. La diferencia en la temperatura de la salida del agua en condiciones óptimas (Espesor PCM = 0.01 m) y con el aumento de PCM (Espesor PCM = 0.015 m) se presenta en la Figura 5.21.

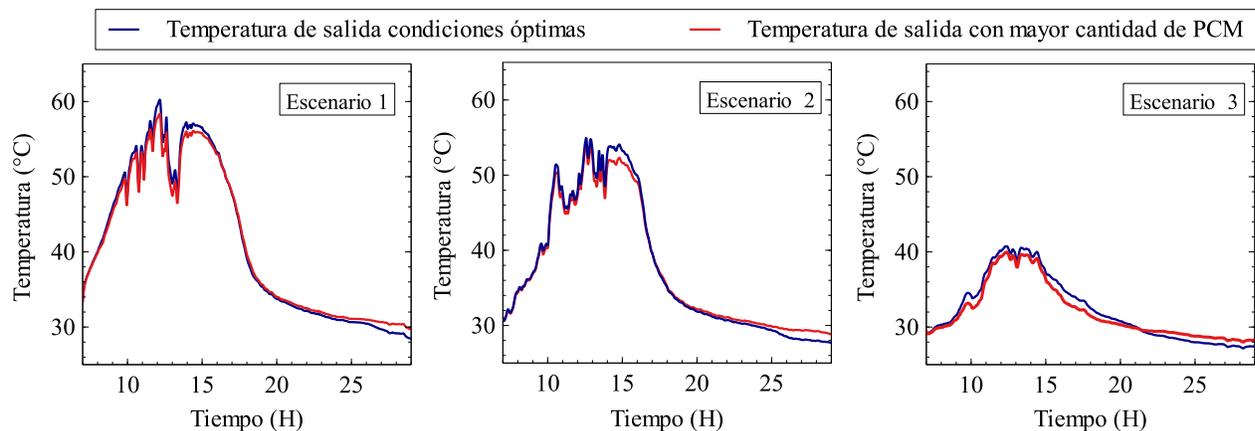


Figura 5.21 Temperatura de salida de agua del colector en condiciones óptimas y con aumento de PCM

Se observa que, para los tres escenarios, la temperatura de salida se mantiene hasta 1.5°C más alta hasta las primeras horas del segundo día con el aumento en la cantidad de PCM, y aunque disminuye durante el día, la condición es más favorable para mantener una temperatura de operación a 35 °C durante las primeras horas del segundo día, puesto que no se necesita energía adicional para aumentar la diferencia de temperatura de 1.5 °C que se obtiene aumentando la cantidad de PCM. Este comportamiento se asocia al proceso de almacenamiento/liberación de energía térmica del material, ya que al aumentar la masa el PCM absorbe más energía térmica para el proceso de almacenamiento durante el día, y en efecto, en la noche la cantidad de exergía disponible en el PCM es mayor.

A partir de estos resultados se evidencia que con la cantidad de PCM en condiciones óptimas la exergía disponible es mayor durante el día aumentando de esta manera la eficiencia, sin embargo, se libera completamente durante la noche. Por el contrario, cuando se aumenta la cantidad de PCM se tiene más exergía disponible en el material en horario nocturno hasta las primeras horas del segundo día, disminuyendo máximo hasta 2 °C la temperatura de salida de agua durante la carga del material para los tres escenarios. En la Tabla 5.8 se presentan los parámetros y condiciones de operación del colector con y sin PCM utilizados para llevar a cabo el análisis comparativo de consumo energético para un día de alta, media y baja radiación.

Factor	Condición de operación		Unidades
	Con PCM	Sin PCM	
Área	1.0	1.0	m <sup>2</sup>
Temperatura de fusión PCM	55.0	-	°C
Espesor PCM	0.015	-	m
Caudal	0.2	0.2	L/min
Conductancia térmica de contacto	50.0	-	W/m <sup>2</sup> C

Tabla 5.8 Parámetros y condiciones de operación del colector con y sin PCM

Los datos de técnicos del calentador eléctrico y a gas se presentan en la Tabla 5.9. Por otra parte, se muestran en la Tabla 5.10 las propiedades del gas provisto en la ciudad de Barranquilla tomando como referencia el suministro de la empresa PROMIGAS (2019).

	Calentador eléctrico	Calentador a gas
Potencia	200 W	-
Eficiencia	61 %	86 %
Capacidad	37 L	13 L

Tabla 5.9 Datos técnicos de calentador eléctrico y calentador a gas (Tomado de HACEB, 2018, 2019)

Propiedad	Valor
Poder calorífico bruto real, (@Pb y Tb), a 14.65 psia y 60°F (BTU/PC)	996.06
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	0.6894

Tabla 5.10 Composición y propiedades del gas vigente en Barranquilla (tomando de PROMIGAS, 2019)

De acuerdo a los resultados obtenidos con el modelo térmico del colector para el escenario de operación planteado para calentamiento solar de agua a 35 °C, se tiene el consumo eléctrico en Wh y m<sup>3</sup> de gas del sistema de apoyo para calentar una cantidad de agua en un día típico de alta,

media y baja radiación. En la Tabla 5.11 se presentan los resultados comparativos para un colector con PCM y uno con tecnología convencional.

Escenario	Alta radiación		Media radiación		Baja radiación	
	Con PCM	Sin PCM	Con PCM	Sin PCM	Con PCM	Sin PCM
Volumen de agua en un día a 35°C (L)	547.5	561.4	477.6	488.3	417.4	379.6
Consumo del calentador eléctrico (kWh)	1.10	1.37	1.45	1.66	2.16	1.97
Consumo del calentador a gas (m <sup>3</sup> )	0.12	0.15	0.16	0.18	0.24	0.22

Tabla 5.11 Comparación del consumo de energía y cantidad de agua calentada con un colector con y sin PCM

Se observa que, aunque con la utilización del colector sin PCM se obtiene mayor cantidad de agua caliente durante un día, el tiempo de operación del calentador de apoyo es más prolongado, incrementando de esta manera el consumo de energía. Para llevar a cabo una comparación adecuada, se estableció un indicador con el fin de evaluar la relación del consumo energético del calentador de apoyo por cantidad de masa de agua a 35 °C producida por el sistema, el indicador está dado para el consumo con el calentador eléctrico y el calentador a gas en la ecuación 5.1 y 5.2 respectivamente:

$$I_{\text{calentador electrico}} = \frac{\text{m}^3 \text{ de agua a } 35^{\circ}\text{C}}{\text{Consumo en kWh}} \quad (5.1)$$

$$I_{\text{calentador a gas}} = \frac{\text{m}^3 \text{ de agua a } 35^{\circ}\text{C}}{\text{Consumo de m}^3 \text{ de gas}} \quad (5.2)$$

En la Tabla 5.12 se presentan los resultados comparativos del indicador de consumo propuesto para un sistema de apoyo eléctrico o a gas integrado con un colector con y sin PCM.

Escenario	Calentador eléctrico (m <sup>3</sup> agua/kWh)		Calentador a gas (m <sup>3</sup> agua/m <sup>3</sup> de gas)	
	Con PCM	Sin PCM	Con PCM	Sin PCM
Radiación alta	0.50	0.41	4.40	3.62
Radiación media	0.33	0.29	2.91	2.61
Radiación baja	0.19	0.19	1.71	1.70

Tabla 5.12 Resultados del indicador de consumo para un colector con y sin PCM

A partir de estos resultados se observa que, el indicador de consumo con el colector con PCM es mayor hasta 0.3 respecto al colector sin PCM en los tres casos de radiación evaluados, tanto con la utilización de un calentador eléctrico y como con un calentador a gas. De esta manera se puede concluir que, con la aplicación de la tecnología de almacenamiento térmico con PCM en un colector solar de placa plana, se obtiene mayor cantidad de agua caliente a 35 °C por menor consumo de energía adicional, en comparación con un colector similar con tecnología convencional bajo las condiciones de operación y parámetros de diseño.

De acuerdo a los resultados obtenidos, la cantidad de agua promedio a 35 °C producidos en un mes por el sistema de calentamiento solar de agua con PCM es de 16 m<sup>3</sup> para los tres escenarios de radiación evaluados, según MINVIVIENDA (2015), en un informe presentado por la comisión de regulación de agua potable y saneamiento básico, el consumo promedio en Colombia en un hogar de 4 personas es de 15.6 m<sup>3</sup>. En efecto, el sistema con las condiciones evaluadas en esta

investigación es capaz de suplir la necesidad de agua caliente a una temperatura de operación de 35 °C para un hogar de 4 a 5 personas en condiciones como las presentadas en Barranquilla. Por otra parte, teniendo en cuenta los resultados del indicador propuesto, con el fin de determinar el sistema de apoyo adecuado en términos de costos, se realiza una comparación con valores actuales de precio bolsa de energía eléctrica en kWh, y gas natural en m<sup>3</sup> (Tabla 5.13) (UPME, 2019), versus proyecciones realizadas por la UPME (2017), en su plan de expansión de referencia, generación y transmisión del año 2016 al año 2031 en Colombia, en la Tabla 5.14 se presentan los resultados obtenidos en COP\$/m<sup>3</sup> de agua.

	Valor actual	Valor proyectado 2031	Unidades
<i>Electricidad</i>	208	187	COP\$/kWh
<i>Gas natural</i>	658	1096	COP\$/m <sup>3</sup>

Tabla 5.13 Comparación del valor actual y proyectado del precio bolsa de la energía eléctrica y el gas natural (Tomada de UPME, 2017)

Escenario	Calentador eléctrico (COP\$/m <sup>3</sup> agua)		Calentador a gas (COP\$/m <sup>3</sup> agua)	
	Precio de bolsa actual			
	Con PCM	Sin PCM	Con PCM	Sin PCM
<i>Radiación alta</i>	419.04	508.70	149.51	181.67
<i>Radiación media</i>	632.80	707.53	225.95	251.99
<i>Radiación baja</i>	1076.38	1082.19	384.65	386.55
Precio de bolsa proyectado 2031				
<i>Radiación alta</i>	376.73	457.34	249.03	302.60
<i>Radiación media</i>	568.91	636.09	376.35	419.73
<i>Radiación baja</i>	967.70	972.93	640.69	643.86

Tabla 5.14 Comparación de COP\$/m<sup>3</sup> de agua con electricidad y gas natural

En base al análisis comparativo de costos de energía eléctrica y gas natural, se infiere que actualmente es adecuado utilizar un calentador a gas como sistema de apoyo del calentador solar de agua por un costo hasta 300 pesos menos por metro cubico de agua caliente, aunque, según la proyección de costos presentado por la UPME (2017), debido a la escases de reservas de gas natural y el interés por las energías renovables para producción de energía eléctrica, el precio del kWh para el 2031 disminuye y el costo del metro cubico de gas natural aumentaría hasta 50 %, la utilización del calentador a gas seguiría siendo la mejor opción a largo plazo para el sistema de calentamiento solar de agua para uso doméstico.

Usando un calentador a gas, que es la tecnología más económica en Colombia, se observa que, para las condiciones de alta y media radiación, existe una diferencia hasta de COP\$ 53.57 por m<sup>3</sup> de agua caliente del colector con PCM respecto al sistema sin PCM, esto representa un incremento en el consumo de energía adicional del 17.7 % del sistema sin PCM. Por otra parte, mediante la aplicación del sistema con PCM propuesto, se elimina la necesidad de utilizar un tanque de almacenamiento, de esta manera se reduce el peso del sistema a diferencia del sistema con tecnología de calentamiento por energía solar convencional.

En base al a los resultados obtenidos para el escenario planteado, en un día de alta, media y baja radiación con un calentador a gas como sistema de apoyo, se determina el periodo de retorno de inversión (PRI), y la tasa interna de retorno (TIR), que representa la inclusión de PCM en un

colector solar tradicional. Para llevar a cabo el análisis se toma como sistema de referencia un calentador a gas para calentar el mismo volumen de agua que los colectores con y sin PCM en los tres escenarios evaluados. Para calcular el PRI se utilizó la siguiente ecuación (Sapag, 1991):

$$PRI = a + \frac{b - c}{d} \quad (5.3)$$

Donde:

- a* Año inmediato anterior en que se recupera la inversión
- b* Inversión Inicial
- c* Flujo de Efectivo Acumulado del año inmediato anterior en el que se recupera la inversión
- d* Flujo de efectivo del año en el que se recupera la inversión

Para calcular el TIR se utilizó la ecuación (Sapag, 1991):

$$VAN = -b + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1 + TIR)^t} \quad (5.4)$$

Donde:

- $F_t$  Son los flujos de dinero en cada periodo *t*
- b* Inversión Inicial
- n* Número de periodos de tiempo
- TIR* Flujo de efectivo del año en el que se recupera la inversión
- VAN* Valor actual neto

La ganancia en \$COP del consumo de m<sup>3</sup> de gas, de los colectores solares respecto al calentador a gas por año, y la inversión inicial de los colectores con y sin PCM, se presentan en la Tabla 5.15 y Tabla 5.16 respectivamente.

Escenario	Ganancia (\$COP)	
	Con PCM	Sin PCM
<i>Radiación alta</i>	\$ 140644	\$ 138098
<i>Radiación media</i>	\$ 110959	\$ 105435
<i>Radiación baja</i>	\$ 72772	\$ 96789

Tabla 5.15 Ganancia en \$COP del consumo de m<sup>3</sup> de gas, de un colector con y sin PCM respecto al calentador a gas por año

Sistema	Inversión inicial (\$COP)
<i>Colector solar con PCM</i>	\$ 562800
<i>Colector solar sin PCM</i>	\$ 470000

Tabla 5.16 Inversión inicial en \$COP del colector solar con y sin PCM

De acuerdo a la proyección de precios del gas natural presentado por UPME (2017), se toma un incremento del 3 % anual hasta el 2030. A partir de esto, se calculan los indicadores de PRI y TIR para el colector solar con y sin PCM presentados en la Tabla 5.17.

Sistema	Radiación alta		Radiación media		Radiación baja	
	PRI (años)	TIR (%)	PRI (años)	TIR (%)	PRI (años)	TIR (%)
<i>Colector Con PCM</i>	3.8	4.7	4.8	3.9	7.0	1.4
<i>Colector Sin PCM</i>	3.3	6.0	4.2	5.9	4.6	2.9

Tabla 5.17 Resultados de PRI y TIR de la implementación de un colector con y sin PCM

Se puede observar que la tasa interna de retorno para el colector solar con PCM, es menor respecto al colector sin PCM en los tres escenarios, debido al costo adicional de la implementación del sistema de almacenamiento en el sistema, sin embargo, la inversión adicional en el colector con PCM para un día típico de alta y media radiación se recupera en el mismo año, con una diferencia en el PRI de 6 y 7 meses respectivamente, mientras que para un día de baja radiación, existe una diferencia de 2.4 años en el PRI, debido a que las ganancias del colector con PCM en comparación al colector sin PCM respecto al calentador de gas, son inferiores a diferencia de los primeros dos escenarios, no obstante, los PRI obtenidos en los tres escenarios son aceptables, ya que la vida útil de un colector solar térmico es de 20 a 25 años (Albizzati, 2016).

## 6. Conclusiones y propuestas de trabajos a futuro

### 6.1. Conclusiones

En el desarrollo de la presente tesis de maestría se realizó un análisis comparativo en términos energéticos y exergéticos de un sistema de calentamiento solar de agua a baja temperatura, con incorporación de PCM como sistema de almacenamiento térmico. El análisis se llevó a cabo a partir de resultados experimentales y mediante modelos térmicos de un colector solar de placa plana y un tanque de almacenamiento de agua.

Se utilizó un modelo térmico para el colector solar de placa plana validado experimentalmente en condiciones reales, y se desarrolló un modelo térmico para el tanque de almacenamiento con la capacidad de evaluar el comportamiento bajo diferentes escenarios planteados, que permite estimar las temperaturas estratificadas del agua en el tanque y el comportamiento térmico del PCM, el modelo del tanque fue validado mediante datos experimentales en condiciones controladas de laboratorio. Posteriormente se desarrollaron modelos de exergía para el colector solar y el tanque con el fin de evaluar el comportamiento exergético y la eficiencia de segunda ley de los dispositivos.

Un aporte importante con el desarrollo de la investigación, consistió en la experimentación de un colector solar de placa plana y un tanque de almacenamiento con y sin PCM en funcionamiento simultáneo bajo las mismas condiciones de operación, para establecer una comparación del rendimiento del sistema con almacenamiento térmico respecto a las tecnologías convencionales. La experimentación con el colector solar y el tanque se realizó con dos plataformas por separado con el fin de tener un mayor control sobre las variables de interés de cada dispositivo. Cada plataforma contó con un sistema de instrumentación que permitió registrar las condiciones de operación y recolectar los datos experimentales en condiciones reales externas para el colector solar y en el laboratorio con condiciones ambientales controladas para el tanque de almacenamiento. Se realizaron campañas de medición para evaluar el comportamiento de las dos tecnologías bajo diferentes condiciones, para el colector solar se establecieron tres escenarios, un día típico de alta, media y baja radiación, mientras que para el tanque de almacenamiento se realizaron pruebas variando las condiciones de temperatura y caudal de la entrada y salida de agua del tanque.

Se realizó un análisis comparativo del colector y el tanque con y sin PCM, en base a los resultados experimentales del colector, se encontró que la inclusión de PCM influye en las temperaturas y el rendimiento del sistema. Se encontró que el rendimiento energético del colector con incorporación de PCM es mayor en comparación con el dispositivo con tecnología convencional en los tres escenarios, sin tener un efecto negativo en el rendimiento exergético mayor al 0.6 %. A partir de ello, mediante la utilización de los modelos validados, se realizó una optimización de parámetros de diseño y condiciones de operación en el colector, planteando diferentes configuraciones experimentales con la variación de los siguientes factores: área de la placa absorbadora y caudal de agua para los dos colectores, conductancia de contacto entre PCM y placa absorbadora, temperatura de fusión y espesor del PCM para el colector con almacenamiento térmico, de esta manera se encontraron las condiciones que favorecen el rendimiento exergético en los dos colectores, dando como resultado una mejora en la eficiencia hasta un 11.9 % y 11.2 % para la primera ley y un 0.2 % y 0.1 % en la segunda ley para el colector solar con y sin PCM respectivamente, adicionalmente, se encontró que con el colector con PCM

se tiene disponibilidad de agua en horario nocturno y en las primeras horas del segundo día, teniendo una eficiencia energética 1.31 % mayor en el colector con PCM, y un impacto poco apreciable en la eficiencia exergética.

Respecto a los resultados comparativos experimentales y mediante los modelos del tanque de almacenamiento, se determinó que, bajo las condiciones presentadas en este trabajo, la inclusión del PCM no presenta una diferencia significativa en el rendimiento energético y exergético del dispositivo en comparación con la tecnología convencional.

Se planteó un escenario de operación para el sistema de calentamiento con condiciones de temperatura de salida de agua a 35 °C para uso residencial. Para el análisis del colector con y sin PCM en el escenario de operación planteado, mediante el uso del modelo térmico del colector, se integró un sistema de apoyo con calentador eléctrico o a gas que se activa cuando la temperatura de operación es inferior a 35 °C, y una entrada de agua proveniente de la línea de suministro a 25 °C cuando la temperatura de operación es superior, para ello, se sintonizó un lazo de control PID que controla el flujo de salida de agua a 25 °C proveniente de la línea de suministro y una resistencia con control On/Off cuando la temperatura de operación es inferior. De acuerdo al consumo de energía del sistema de apoyo, se determinó la cantidad de agua calentada a 35 °C con el sistema con y sin PCM por energía consumida. Para llevar a cabo el análisis comparativo se propuso un indicador de consumo del sistema de apoyo con energía eléctrica en kWh y con gas en m<sup>3</sup>.

Mediante estos resultados se determinó que con la utilización del colector con incorporación de PCM se produce mayor masa de agua a 35 °C por menos consumo en kWh y m<sup>3</sup> de gas respecto a la tecnología convencional en un día, debido a que el almacenamiento por calor latente del PCM permite tener mayor disponibilidad de agua caliente durante el horario nocturno y las horas de ausencia de radiación solar. Finalmente se realizó una comparación de precios de kWh eléctrico y m<sup>3</sup> de gas en base a costos actuales y a una proyección al 2031, con el fin de establecer el sistema de apoyo adecuado para integrar con el colector solar con PCM, se determinó que en la actualidad y a un largo plazo, el sistema de apoyo con funcionamiento a gas tiene mejor rentabilidad respecto al sistema eléctrico. Bajo este mismo escenario, se encontró que la utilización de un colector sin PCM representa hasta un 17.7 % más en el consumo de energía adicional respecto al colector con PCM. Además, mediante la aplicación del sistema con PCM propuesto, se elimina la necesidad de utilizar un tanque de almacenamiento, de esta manera se reduce el peso del sistema a diferencia del sistema de calentamiento solar de agua con tecnología convencional.

Finalmente se determinó para el escenario planteado, en un día de alta, media y baja radiación con un calentador a gas como sistema de apoyo, el periodo de retorno de inversión (PRI), y la tasa interna de retorno (TIR), que representa la inclusión de PCM en un colector solar tradicional, se observó que, aunque la tasa interna de retorno para el colector solar con PCM es menor respecto al colector sin PCM en los tres escenarios, la inversión adicional en el colector con PCM para un día de alta y media radiación se recupera en el mismo año, con una diferencia en el PRI de 6 y 7 meses respectivamente y para un día de baja radiación, existe una diferencia en el PRI de 2.4 años. Se concluye que los periodos de retorno de la inversión de la tecnología con PCM se encuentran dentro del periodo de vida útil para un colector solar.

Los modelos térmicos de los dispositivos sirven como preevaluador para la etapa de diseño, ya que son una herramienta para evaluar el comportamiento bajo diferentes escenarios con un costo computacional reducido. Su utilización e integración se puede emplear para futuras investigaciones de evaluación de la tecnología.

En resumen, los resultados obtenidos mediante el desarrollo de esta investigación permiten concluir que la tecnología de almacenamiento térmico con PCM en el colector solar presenta gran potencial para los sistemas calentamiento solar de agua a baja temperatura para uso doméstico.

## 6.2. Propuesta de trabajos a futuro

Se propone estudiar diferentes escenarios operativos a los evaluados en esta investigación con el tanque de almacenamiento, mediante la utilización del modelo térmico validado. Además, realizar una optimización de los parámetros y condiciones de operación en el dispositivo, con el fin de encontrar una configuración que favorezca el rendimiento de la tecnología con PCM respecto a tecnologías convencionales.

Llevar a cabo el análisis del rendimiento del sistema de calentamiento solar, integrando un colector solar y un tanque de almacenamiento con incorporación de PCM.

Investigaciones futuras pueden llevar a cabo una comparación experimental de diferentes materiales de cambio de fase en los dos colectores, bajo las mismas condiciones de operación.

Realizar una campaña experimental con el tanque de almacenamiento con y sin PCM, conectado a un colector solar bajo condiciones ambientales reales.

Se propone realizar un análisis económico detallado, utilizando indicadores de consumo como el propuesto en el capítulo 5, como una herramienta para estimar el costo operacional del sistema de calentamiento solar de agua con incorporación de PCM.

## 7. Referencias

- A.Abhat. (1983). Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials. *Solar Energy*, 30(4), 313–332. Retrieved from <https://ezproxy.uninorte.edu.co:2270/science/article/pii/0038092X8390186X>
- Adebiyi, G. a. (1991). A Second-Law Study on Packed Bed Energy Storage Systems Utilizing Phase-Change Materials. *Journal of Solar Energy Engineering*, 113(3), 146. <https://doi.org/10.1115/1.2930486>
- Adebiyi, G. A. . L. . R. (1987). A second law analysis of phase-change thermal energy storage systems. *ASME*. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/279562731\\_A\\_second\\_law\\_analysis\\_of\\_phase-change\\_thermal\\_energy\\_storage\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/279562731_A_second_law_analysis_of_phase-change_thermal_energy_storage_systems)
- Al-Hinti, I., Al-Ghandoor, A., Maaly, A., Abu Naqeera, I., Al-Khateeb, Z., & Al-Sheikh, O. (2010). Experimental investigation on the use of water-phase change material storage in conventional solar water heating systems. *Energy Conversion and Management*, 51(8), 1735–1740. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.08.038>
- Al-Kayiem, H. H., & Lin, S. C. (2014). Performance evaluation of a solar water heater integrated with a PCM nanocomposite TES at various inclinations. *Solar Energy*, 109(1), 82–92. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.08.021>
- Albizzati, E. (2016). Evaluación de la sustentabilidad de instalaciones solares con colectores solares de placa plana y tubos evacuados, 32(3), 315–322. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.03.06>
- Asbik, M., Ansari, O., Bah, A., Zari, N., Mimet, A., & El-ghetany, H. (2015). Exergy analysis of solar desalination still combined with heat storage system using phase change material ( PCM ). *Des*, 381(2016), 26–37. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.11.031>
- Asbik, M., Ansari, O., Bah, A., Zari, N., Mimet, A., & El-ghetany, H. (2016). Exergy analysis of solar desalination still combined with heat storage system using phase change material ( PCM ), 381, 26–37.
- Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR). (2010). *Guía técnica-agua caliente sanitaria central. Ahorro y eficiencia energética en climatización*. Madrid.
- Bejan, A. (1978). Two Thermodynamic Optima in the Design of Sensible Heat Units for Energy Storage. *Journal of Heat Transfer*, 100(4), 708. <https://doi.org/10.1115/1.3450882>
- Bony, J. (2007). Numerical model and experimental validation of heat storage with phase change materials. *Energy and Buildings*, 39, 1065–1072. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.10.017>
- Bony, J., & Citherlet, S. (2007). Numerical model and experimental validation of heat storage with phase change materials. *Energy and Buildings*, 39(10), 1065–1072. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.10.017>
- Carmona, M., Caicedo, G., Gómez Vega, H., & Bula, A. (2015). Reduced Model for a Thermal Analysis of a Flat Plate Solar Collector With Thermal Energy Storage Using Phase Change Material (PCM). In *Volume 6B: Energy* (p. V06BT07A052). ASME. <https://doi.org/10.1115/IMECE2015-51865>
- Carmona, M., & Palacio, M. (2019). Thermal modelling of a flat plate solar collector with latent heat storage validated with experimental data in outdoor conditions. *Solar Energy*,

- 177(November 2018), 620–633. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.11.056>
- Carmona, M., Vega, M. P., & Martínez, A. (2018). Experimental analysis of a flat plate solar collector with integrated latent heat thermal storage, (September). <https://doi.org/10.25034/ijcua.2018.3672>
- De Gracia, A., Oró, E., Farid, M. M., & Cabeza, L. F. (2011). Thermal analysis of including phase change material in a domestic hot water cylinder. *Applied Thermal Engineering*, 31(17–18), 3938–3945. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.07.043>
- Demirel, Y., & Öztürk, H. H. (2006). Thermoeconomics of seasonal latent heat storage system. *International Journal of Energy Research*, 30(12), 1001–1012. <https://doi.org/10.1002/er.1206>
- Deng, J., Furbo, S., Kong, W., & Fan, J. (2018). Thermal performance assessment and improvement of a solar domestic hot water tank with PCM in the mantle. *Energy and Buildings*, 172, 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.058>
- El Qarnia, H. (2009). Numerical analysis of a coupled solar collector latent heat storage unit using various phase change materials for heating the water. *Energy Conversion and Management*, 50(2), 247–254. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.09.038>
- Erek, A., & Dincer, I. (2008). An approach to entropy analysis of a latent heat storage module. *International Journal of Thermal Sciences*, 47(8), 1077–1085. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2007.08.002>
- Esen, M., & Ayhan, T. (1996). Development of a model compatible with solar assisted cylindrical energy storage tank and variation of stored energy with time for different phase change materials. *Energy Conversion and Management*, 37(12), 1775–1785. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(96\)00035-0](https://doi.org/10.1016/0196-8904(96)00035-0)
- et al. Cabeza, L. F. (2006). Experimentation with a water tank including a PCM module. *Solar Energy Materials {&} Solar Cells*, 90, 1273–1282. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.08.002>
- Fazilati, M. A., & Alemrajabi, A. A. (2013). Phase change material for enhancing solar water heater, an experimental approach. *Energy Conversion and Management*, 71, 138–145. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.03.034>
- Gong, Z.-X., & Mujumdar, A. S. (1997). Thermodynamic optimization of the thermal process in energy storage using multiple phase change materials. *Applied Thermal Engineering*, 17(11), 1067–1083. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(97\)00012-4](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(97)00012-4)
- Haceb. (n.d.). Retrieved from <https://www.haceb.com>
- HACEB. (2018). *Ficha técnica calentador eléctrico*.
- HACEB. (2019). *Ficha técnica calentador a gas*.
- Hamed, M., Fallah, A., & Ben Brahim, A. (2017). Numerical analysis of charging and discharging performance of an integrated collector storage solar water heater. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(13), 8777–8789. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.11.179>
- Hamed, M., Fallah, A., & Brahim, A. Ben. (2016). Numerical analysis of charging and discharging performance of an integrated collector storage solar water heater, 2, 0–12. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.11.179>
- Hu, H. (2006). Thermoeconomics of seasonal latent heat storage system, (May), 1001–1012. <https://doi.org/10.1002/er.1206>
- Ibrahim Dincer, Y. A. C. (2001). *Energy, Entropy and Exergy Concepts and Their Roles in Thermal*

- Engineering*. <https://doi.org/10.3390/e3030116>
- Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T., & Lavine, A. (1999). *Heat and mass transfer* (6th ed.).
- Islam, M. P., & Morimoto, T. (2018). Advances in low to medium temperature non-concentrating solar thermal technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(March 2016), 2066–2093. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.030>
- Jafarkazemi, F., & Ahmadifard, E. (2013). Energetic and exergetic evaluation of flat plate solar collectors. *Renewable Energy*, 56, 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.10.031>
- Jegadheeswaran, S., Pohekar, S. D., & Kousksou, T. (2010). Exergy based performance evaluation of latent heat thermal storage system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2580–2595. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.051>
- José Manuel López-Cózar. (2006). *Manuales sobre energía renovable: Solar Térmica*. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía IDAE.
- Kalogirou, S. A. (2004). *Solar thermal collectors and applications. Progress in Energy and Combustion Science* (Vol. 30). <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2004.02.001>
- Kaygusuz, Ahmet Sari, K. (2004). Energy and Exergy Calculations of Latent Heat Energy Storage Systems. *Energy Sources*, 22(2), 117–126. <https://doi.org/10.1080/00908310050014090>
- Kee, S. Y., Munusamy, Y., & Ong, K. S. (2018). Review of solar water heaters incorporating solid-liquid organic phase change materials as thermal storage. *Applied Thermal Engineering*, 131, 455–471. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.032>
- Khalifa, A. J. N., Suffer, K. H., & Mahmoud, M. S. (2013). A storage domestic solar hot water system with a back layer of phase change material. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 44, 174–181. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.05.017>
- Koca, A., Oztop, H. F., Koyun, T., & Varol, Y. (2008). Energy and exergy analysis of a latent heat storage system with phase change material for a solar collector. *Renewable Energy*, 33(4), 567–574. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.03.012>
- Kousksou, T., Bruel, P., Cherreau, G., Leoussoff, V., & El Rhafiki, T. (2011). PCM storage for solar DHW: From an unfulfilled promise to a real benefit. *Solar Energy*, 85(9), 2033–2040. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.05.012>
- Kousksou, T., Rhafiki, T. El, Arid, A., Schall, E., & Zeraouli, Y. (2008). Power, Efficiency and Irreversibility of Latent Energy Systems. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 22(2), 234–239. <https://doi.org/10.2514/1.31227>
- Kousksou, T., Strub, F., Castaing Lasvignottes, J., Jamil, A., & Bédécarrats, J. P. (2007). Second law analysis of latent thermal storage for solar system. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91(14), 1275–1281. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2007.04.029>
- Li, G. (2015). Energy and exergy performance assessments for latent heat thermal energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 926–954. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.052>
- Mahfuz, M. H., Anisur, M. R., Kibria, M. A., Saidur, R., & Metselaar, I. H. S. C. (2014). Performance investigation of thermal energy storage system with Phase Change Material (PCM) for solar water heating application ☆, 57, 132–139.
- Mazman, M., Cabeza, L. F., Mehling, H., Nogues, M., Evliya, H., & Paksoy, H. O. (2009). Utilization of phase change materials in solar domestic hot water systems. *Renewable Energy*, 34(6), 1639–1643. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.10.016>
- MINVIVIENDA. (2015). *Comisión de regulación de agua potable y saneamiento básico*.

- Mujumdar, S. (1997). Thermodynamic of the thermal process in energy storage using multiple phase change materials, *17*(II), 1067–1083.
- Murray, R., Desgrosseilliers, L., Stewart, J., Osbourne, N., Marin, G., Safatli, A., ... White, M. A. (2011). Design of a Latent Heat Energy Storage System Coupled with a Domestic Hot Water Solar Thermal System, 3757–3764. <https://doi.org/10.3384/ecp110573757>
- Nabavitabatabayi, M., Haghghat, F., Moreau, A., & Sra, P. (2014). Numerical analysis of a thermally enhanced domestic hot water tank. *Applied Energy*, *129*, 253–260. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.081>
- Oliver, A., Neila, F. J., & García-Santos, A. (2012). PCM choosing and classification according to their characteristics for their application for thermal energy storage systems. *Materiales de Construcción*, *62*(305), 131–140. <https://doi.org/10.3989/mc.2012.58010>
- Palacio Vega, M. A. (2018). *Análisis térmico de un sistema de calentamiento de agua por energía solar a baja temperatura con acumulación de energía térmica*.
- Pandey, K. M., & Chaurasiya, R. (2017). A review on analysis and development of solar flat plate collector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *67*, 641–650. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.078>
- Petela, R. (1964). *Exergy of Heat Radiation*. *Journal of Heat Transfer* (Vol. 86). <https://doi.org/10.1115/1.3687092>
- PROMIGAS. (2019). Información operacional - Composición del gas vigente. Retrieved from <http://www.promigas.com/Es/BEO/Paginas/ComposicionGasVigente.aspx>
- Ramayya, A. V., & Ramesh, K. N. (1998). Exergy analysis of latent heat storage systems with sensible heating and subcooling of PCM. *International Journal of Energy Research*, *22*(5), 411–426. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-114X\(199804\)22:5<411::AID-ER367>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-114X(199804)22:5<411::AID-ER367>3.0.CO;2-Q)
- Rincón, A., & Carmona, M. (2017). Exergy analysis of a flat plate solar collector with latent heat storage by phase change material for water heating applications at low temperature, *1*(3), 43–48.
- Rosen, M. A. (1992). Appropriate thermodynamic performance measures for closed systems for thermal energy storage. *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, *114*(2), 100–105. <https://doi.org/10.1115/1.2929986>
- Rubitherm Technologies. (2016). *Data sheet PCM*.
- Sansaniwal, S. K., Sharma, V., & Mathur, J. (2018). Energy and exergy analyses of various typical solar energy applications : A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *82*(July 2017), 1576–1601. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.003>
- Sapag, N., & Sapag Chain, R. (1991). *Preparacion y Evaluacion de Proyectos*. (M.-H. Latinoamericana, Ed.). Mexico D.F.
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *13*(2), 318–345. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>
- Tatsidjodoung, P., Le Pierrès, N., & Luo, L. (2013). A review of potential materials for thermal energy storage in building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *18*, 327–349. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.025>
- Teamah, H. M., Lightstone, M. F., & Cotton, J. S. (2017). An alternative approach for assessing the benefit of phase change materials in solar domestic hot water systems. *Solar Energy*,

- 158(February), 875–888. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.10.033>
- UPME. (2017). *Plan de Expansión de Referencia Generación-Transmisión 2016-2030 Colombia*.
- UPME. (2019). Precio bolsa energía eléctrica actual en Colombia. Retrieved from <http://www1.upme.gov.co/Paginas/default.aspx>
- Verma, P., Varun, & Singal, S. K. (2008). Review of mathematical modeling on latent heat thermal energy storage systems using phase-change material. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(4), 999–1031. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.11.002>
- Vikram, D., Kaushik, S., Prashanth, V., & Nallusamy, N. (2016). An improvement in the solar water heating systems by thermal storage using. *ASME*, 1–8.
- Voller, V. R. (1990). Fas implicit finite-diference method for the analysis of phase change problems. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 17(2), 155–169. <https://doi.org/10.1080/10407799008961737>
- Watanabe, T., & Kanzawa, A. (1995). Second law optimization of a latent heat storage system with PCMS having different melting points. *Heat Recovery Systems and CHP*, 15(7), 641–653. [https://doi.org/10.1016/0890-4332\(95\)90044-6](https://doi.org/10.1016/0890-4332(95)90044-6)
- Wu, W., Dai, S., Liu, Z., Dou, Y., Hua, J., Li, M., ... Wang, X. (2018). Experimental study on the performance of a novel solar water heating system with and without PCM, 171(July), 604–612.
- Xu, Y., He, Y., Li, Y., & Song, H. (2016). Exergy analysis and optimization of charging–discharging processes of latent heat thermal energy storage system with three phase change materials, 123, 206–216. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.09.021>
- Yang, L., Zhang, X., & Xu, G. (2014). Thermal performance of a solar storage packed bed using spherical capsules filled with PCM having different melting points. *Energy and Buildings*, 68(PART B), 639–646. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.045>