



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE MATERIALES DE CAMBIO DE
FASE (PCMs) USADOS PARA EL INCREMENTO DE EFICIENCIA
TÉRMICA EN EL CALENTAMIENTO DE AGUA EN COLECTORES
SOLARES.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

JHOHAN MAURICIO ROJAS MEJIA
jhohan.rojas@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. ALVARO GONZALO XAVIER AGUINAGA BARRAGAN, PhD.
alvaro.aguinaga@epn.edu.ec

Quito, enero 2021

APROBACIÓN DEL DIRECTOR

Como director del trabajo de titulación: estudio experimental de materiales de cambio de fase (PCMs) usados para el incremento de eficiencia térmica en el calentamiento de agua en colectores solares desarrollado por Jhohan Mauricio Rojas Mejia, estudiante de la carrera de Ingeniería Mecánica, habiendo supervisado la realización de éste trabajo y realizado las correcciones correspondientes, doy por aprobada la redacción final del documento escrito para que prosiga con los trámites correspondientes a la sustentación de la Defensa oral.



Álvaro Gonzalo Xavier Aguinaga Barragán

DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Jhohan Mauricio Rojas Mejia, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.



Jhohan Mauricio Rojas Mejia

DEDICATORIA

A Dios por darme la vitalidad, el espíritu y un propósito mediante el cual materializar todos mis sueños.

A mis padres Lenin y Teresa, quienes me brindaron su apoyo y fe incondicional durante todos mis años de estudio, llenándome de optimismo y tenacidad para cada nuevo proyecto, a mis hermanos Diego, Eimy y Valentina, por ser quienes me llenaban de alegría y me levantaban el ánimo en los momentos de inseguridad, a Armando y Nancy, por siempre brindarme su ayuda y apoyo, mis abuelitos Fernando e Irma quienes me enseñaron el ejemplo de una vida llena de amor, confianza y respeto, a mis tíos y tías los cuales mediante sus consejos me enseñaron a manejar mi vida con gracia y agudeza, a mis primos Alex, David y Kevin por su escucha, consejos y hacer mi juventud tan agradable.

A mis tutores el Doctor Álvaro Aguinaga y la Ingeniera Estefanía Orquera, por compartir sus conocimientos, consejos y brindarme una orientación acertada para crecer y enriquecer mis horizontes. A mis profesores y directivos de la Facultad de Ingeniería Mecánica por formarme como un profesional con ética y compromiso humano.

Un agradecimiento muy especial a mis amigos del colegio, por ayudarme a edificar el verdadero significado de la amistad, la cual trasciende a través del tiempo, también para mis amigos de la facultad por haber estado presente en los momentos más difíciles y también en los más satisfactorios, gracias a su generosidad y trabajo en equipo hemos sido conjuntamente las piezas más importantes para formarnos como futuros profesionales.

Muchas gracias a todos.

Jhohan Mauricio Rojas Mejia.

ÍNDICE DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABLAS	iii
LISTA DE ANEXOS	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
INTRODUCCIÓN.....	7
Pregunta de investigación	8
Objetivo general.....	8
Objetivos específicos.....	8
1. Marco teórico.....	9
1.1. Estado del arte.....	9
1.2. Clasificación de almacenamiento de energía térmica	10
1.2.1. Almacenamiento de calor sensible.....	10
1.2.2. Almacenamiento de calor latente.....	12
1.2.3. Almacenamiento de calor mediante reacciones químicas reversibles.....	14
1.3. Identificación de materiales de cambio de fase (PCMs).....	15
1.3.1. Clasificación de PCMs según tipo de aplicación	15
1.3.2. Propiedades de PCMs para aplicación.....	15
1.3.3. Tipos de PCMs.....	17
2. Metodología.....	21
2.1. Determinación de los materiales de cambio de fase aplicables a viviendas de interés social.....	22
2.2. Selección del material de cambio de fase.....	22
2.3. Determinación de variables y parámetros funcionales. comportamiento y aplicación.....	29
2.3.1. Propiedades y características de los materiales útiles para el experimento.	29
2.3.2. Configuración experimental y procedimiento aplicado al sistema.....	31

2.3.3.	Pérdidas Térmicas del sistema.....	35
2.3.4.	Parámetros de aplicación.....	36
2.4.	Caracterización, modelamiento y optimización los procesos termodinámicos y térmicos de almacenamiento energético en materiales de cambio de fase PCM, en depósitos aislados de agua caliente.	36
2.5.	Modelamiento matemático del proceso de calentamiento del Sistema.	37
2.6.	Modelo matemático del proceso de almacenamiento energético con materiales de cambio de fase en depósitos de agua.....	38
2.7.	Validación experimental del modelo matemático para almacenamiento energético con materiales de cambio de fase en depósitos de agua.....	42
3.	Resultados y discusión.	43
3.1.	Análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo matemático para almacenamiento energético con materiales de cambio de fase en depósitos de agua.	43
3.1.1.	Análisis de sensibilidad de sistema con PCM en estado líquido (inicial).....	45
3.1.2.	Análisis de sensibilidad de sistema con PCM durante cambio de fase (intermedio).	48
3.1.3.	Análisis de sensibilidad de sistema con PCM en estado sólido (final).....	52
3.2.	Evaluación de resistencia térmica, coeficiente U, la eficiencia térmica, para diferentes configuraciones, de los parámetros caracterizados.	56
3.3.	Generación de una base de datos que almacene la información de las propiedades y resultados obtenidos.....	60
4.	Conclusiones y recomendaciones.	60
4.1.	Conclusiones.....	60
4.2.	Recomendaciones	62
	Referencias bibliográficas.	63
	ANEXOS.....	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Diagrama de calentamiento del agua.	11
Figura 1.2 - Diagrama de cambio de fase (sólido-líquido) (Estados del agua).	13
Figura 2.1 - Metodología.....	22
Figura 2.2 - Cera de parafina de uso comercial.....	28
Figura 2.3 - Cera de parafina.....	29
Figura 2.4 - Olla de acero inoxidable.....	30
Figura 2.5 - Multímetro con termocupla.	30
Figura 2.6 - Configuración experimental del sistema.....	31
Figura 2.7 - Configuración de mezcla agua + PCM (parafina).....	32
Figura 2.8 – Procedimiento experimental.	32
Figura 2.9 - Configuración experimental 1:1 con 1kg de agua y 1 kg de PCM.	34
Figura 2.10 - Configuración experimental 1:1/2 con 1kg de agua y 0.5 kg de PCM.	34
Figura 2.11 - Configuración experimental 1:1/4 con 1kg de agua y 0.25 kg de PCM.	34
Figura 2.12 - Configuración experimental 1:1/8 con 1kg de agua y 0.125 kg de PCM.	35
Figura 2.13 - Configuración experimental 1:0 con 1kg de agua y 0 kg de PCM...	35
Figura 2.14 . Esquema para modelamiento.....	37
Figura 2.15 - Cantidad de calor almacenado en un PCM al variar la temperatura.	38
Figura 2.16 - Modelamiento matemático del sistema de almacenamiento con PCM	39
Figura 2.17 - Esquema de modelamiento de un sistema de almacenamiento para un ciclo.....	40
Figura 2.18 - Función de planta.....	41
Figura 2.19 - Calor almacenado en el sistema a lo largo de procesos cíclicos de calentamiento y enfriamiento.	42
Figura 3.1 - Curvas de enfriamiento (experimental).....	44
Figura 3.2 - Velocidad de enfriamiento del sistema	44
Figura 3.3 - Curva de enfriamiento general (etapa inicial).....	45
Figura 3.4 - Curva de enfriamiento 1:1 (etapa inicial).....	46

Figura 3.5 - Curva de enfriamiento 1:1/2 (etapa inicial)	46
Figura 3.6 - Curva de enfriamiento 1:1/4 (etapa inicial)	47
Figura 3.7 - Curva de enfriamiento 1:1/8 (etapa inicial)	47
Figura 3.8 - Curva de enfriamiento 1 lt de agua (etapa inicial)	48
Figura 3.9 - Curva de enfriamiento general (etapa Intermedia)	49
Figura 3.10 - Curva de enfriamiento 1:1 (etapa intermedia)	49
Figura 3.11 - Curva de enfriamiento 1:1/2 (etapa intermedia).....	50
Figura 3.12 - Curva de enfriamiento 1:1/4 (etapa intermedia).....	51
Figura 3.13 - Curva de enfriamiento 1:1/8 (etapa intermedia).....	51
Figura 3.14 - Curva de enfriamiento 1 lt de agua (etapa intermedia).....	52
Figura 3.15 - Curva de enfriamiento general (etapa final).....	53
Figura 3.16 - Curva de enfriamiento 1:1 (etapa final)	53
Figura 3.17 - Curva de enfriamiento 1:1/2 (etapa final).....	54
Figura 3.18 - Curva de enfriamiento 1:1/4 (etapa final).....	55
Figura 3.19 - Curva de enfriamiento 1:1/8 (etapa final).....	55
Figura 3.20 - Curva de enfriamiento 1 lt de agua (etapa final).....	56
Figura 3.21 - Variación de la resistencia térmica.....	57
Figura 3.22 - Variación del coeficiente global de transferencia de calor	58
Figura 3.23 - Balance de energía para cada configuración para un tiempo de 100 minutos	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 - Clasificación de almacenamiento de energía térmica.	10
Tabla 1.2 - Materiales en estado sólido y líquido para almacenamiento de calor sensible.	12
Tabla 1.3 - Propiedades de PCMs.	16
Tabla 1.4 - Clasificación de PCMs.	17
Tabla 1.5 – Propiedades termofísicas PCMs orgánicos.	18
Tabla 1.6 - Variación de propiedades termofísicas de la parafina durante la evaluación en ciclos térmicos.	19
Tabla 1.7 – Propiedades termofísicas PCMs inorgánicos.	20
Tabla 1.8 – Propiedades termofísicas PCMs eutécticos.	21
Tabla 2.1 - Revisión de aplicaciones solares con almacenamiento térmico en LAC.	23
Tabla 2.2 - Clasificación de PCMs aptos para la aplicación.	25
Tabla 2.3 - Ventajas de diferentes tipos de PCMs.....	25
Tabla 2.4 - Desventajas de diferentes tipos de PCMs	26
Tabla 2.5 - Propiedades termofísicas de cera de parafina.....	28
Tabla 2.6 - Propiedades termofísicas del agua	31
Tabla 3.1 - Base de datos final.	60

LISTA DE ANEXOS

Anexo I - Bucle FOR Matlab R 2020A.....	68
--	-----------

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo analizar y experimentar con materiales de cambio de fase (Phase-Change Material, PCMs) en depósitos aislados de agua, para mejorar la eficiencia térmica en procesos de calentamiento y enfriamiento de agua sanitaria en viviendas de interés social en Ecuador.

Mediante un enfoque práctico y el estudio de procesos teóricos y experimentales se dan a conocer las ventajas y desventajas que presenta la implementación de los PCMs en el manejo de la energía térmica. De manera práctica, el procedimiento se realiza dentro de un sistema de almacenamiento de agua en condiciones de uso promedio de agua de calentamiento solar para una familia de 4 personas.

Las etapas son las siguientes:

Identificación y elección del PCMs idóneo para aplicación en procesos de calentamiento de agua.

Caracterizar, modelar y optimizar los procesos termodinámicos y térmicos de almacenamiento energético en PCMs, en depósitos aislados de agua caliente.

Evaluar de forma teórica y experimental la eficiencia térmica, para diferentes configuraciones de parámetros y generar una base de datos que almacene la información de las propiedades y resultados obtenidos.

Comparación de los resultados obtenidos a partir de los análisis teóricos y experimentales.

Palabras clave: PCMs, calentamiento de agua, almacenamiento energético, eficiencia térmica, modelamiento matemático, simulación, experimentación.

ABSTRACT

The present work aims to analyze and experiment with Phase-Change Materials (PCMs) in isolated water tanks, to improve thermal efficiency in heating and cooling processes of sanitary water in low-income housing in Ecuador.

Through a practical approach and the study of theoretical and experimental processes, the advantages and disadvantages of the implementation of PCM in the management of thermal energy are revealed. In a practical way, the procedure is carried out within a water storage system under conditions of average use of solar heating water for a family of 4 people.

The stages are as follows:

Identification and choice of the suitable PCMs for application in water heating processes.

Characterize, model and optimize thermodynamic and thermal energy storage processes in PCMs, in isolated hot water tanks.

Evaluate the thermal efficiency in a theoretical and experimental way, for different parameter configurations and generate a database that stores the information on the properties and results obtained.

Comparison of the results obtained from the theoretical and experimental analyzes.

Keywords: PCMs, water heating, energy storage, thermal efficiency, mathematical modeling, simulation, experimentation.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE MATERIALES DE CAMBIO DE FASE (PCMs) USADOS PARA EL INCREMENTO DE EFICIENCIA TÉRMICA EN EL CALENTAMIENTO DE AGUA EN COLECTORES SOLARES.

INTRODUCCIÓN

El efecto negativo del cambio climático es cada vez más evidente en el planeta (Buonocore, Vanoli, Carotenuto, & Ulgiati, 2015) por lo que es imprescindible reducir la cantidad de gases generados a partir del consumo de combustibles fósiles, como es el carbón, el gas y el petróleo (Leclerc, Hauschild, Wood, & Laurent, 2020), en tanto que es más factible generar un consumo energético basado en el uso de la energía renovable (Li, Bian, Liu, Zhang, & Yang, 2015), como es la energía hidroeléctrica, eólica, solar, geotérmica y de marea.

Actualmente se presenta un continuo desarrollo y marketing de las aplicaciones de la energía solar (Menegaki, 2012) (Priyadharshini & Selladurai, 2016), siendo el calentamiento solar de agua uno de los sistemas que ocupa el 80% del mercado de energía solar térmica global y se mantiene en constante crecimiento (Wang, Yang, Qiu, Zhang, & Zhao, 2015), debido a los altos niveles de radiación que se presenta en el país (Ordóñez, Vaca-Revelo, & Lopez-Villada, 2019) resulta conveniente la mejora de las aplicaciones de energía solar para realizar una transición hacia energías más limpias e innovadoras (Cevallos-Sierra & Ramos-Martin, 2018).

Para realizar un mejor aprovechamiento de energía solar es conveniente realizar almacenamiento térmico en materiales de cambio de fase (PCMs) que permiten acumular y disipar cantidades considerables de energía mediante el calor latente, mismo que se aprovecha cuando en PCM se somete a ciclos de fusión y solidificación, estos han sido incorporados en aplicaciones solares y estructurales con el fin de poder almacenar cantidades de energía por periodos de tiempo considerables logrando un manejo más óptimo de la energía (Mazman et al., 2009).

En base a los resultados del proyecto se analiza y experimenta mejoras sobre de los beneficios de la energía solar para el calentamiento de agua de uso doméstico, aumentando la disponibilidad de éste servicio aplicando almacenamiento energético para mejorar la eficiencia del proceso de calentamiento de agua mediante el uso de materiales de cambio de fase (PCMs), como resultado de la interacción energética entre el agua y los PCMs se pretende mantener la temperatura del agua caliente después de la puesta de sol (Veremachi, Cuamba, Zia, Lovseth, & Nydal, 2016).

En el proyecto se analizó y experimentó con PCMs en depósitos aislados de agua caliente y mediante análisis de sensibilidad determinar el almacenamiento energético logrado en el sistema y se estudiaron las ventajas y desventajas de esta implementación sobre el rendimiento del colector solar, y se identificaron las ventajas de su uso en el proceso de calentamiento de agua.

Este estudio se plantea con el interés de ser aplicable a viviendas de interés social debido a la vinculación con el proyecto de Investigación: Caracterización y optimización del uso de vectores energéticos, en colectores solares para viviendas de interés social PIJ 17-09 de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.

Pregunta de investigación

¿Cómo mejorar la eficiencia térmica en los procesos de calentamiento y enfriamiento de agua en colectores solares al implementar PCMs?

Objetivo general

- Analizar y experimentar con PCMs que serán utilizados para mejorar la eficiencia del proceso de calentamiento de agua sanitaria para viviendas de interés social.

Objetivos específicos

- Seleccionar una tipología de PCMs que presenten aplicación en procesos de calentamiento de agua.
- Caracterizar, modelar y optimizar los procesos termodinámicos y térmicos de almacenamiento energético en PCMs en depósitos aislados de agua caliente.
- Evaluar de forma teórica y experimental la eficiencia térmica, para diferentes configuraciones de parámetros y generar una base de datos que almacene la información de las propiedades y resultados obtenidos.

1. Marco teórico.

Para lograr una comprensión de los sistemas de almacenamiento térmico es necesario identificar cómo se han trabajado estos avances, en que campos se ha aplicado, y lograr una clasificación adecuada basada en características y propiedades.

1.1. Estado del arte.

Para extender el desarrollo tecnológico sostenible de las ciudades ha sido vital el cambio hacia sistemas de generación de energía renovable a través de métodos más amigables con el medio ambiente (Olabi, 2017), como la aplicación de centrales solares y parques eólicos terrestres y marinos (Blaabjerg & Ma, 2017).

El aprovechamiento de energía solar se ha convertido en una de las alternativas más estudiadas alrededor del mundo (Ge et al., 2018), mediante métodos de conversión de energía como fotovoltaica (generación de electricidad) (Armaroli & Balzani, 2016) y térmica (generación de calor) (Jamar, Majid, Azmi, Norhafana, & Razak, 2016). Sin embargo, la eficiencia de estos sistemas no es lo suficiente puesto que sufre altas pérdidas térmicas durante la noche (Ge et al., 2018), con lo cual puede ser mejorada mediante la búsqueda de soluciones tales como: la mejora de la conversión de energía solar, considerando también la implementación de métodos de almacenamiento energético (Dreos et al., 2017).

El almacenamiento efectivo de energía térmica es fundamental para contrarrestar la falta de correspondencia entre el suministro de calor solar y la demanda de calor en el uso de sistemas solares térmicos (Mazman et al., 2009). Estas mejoras se pueden trabajar mediante la implementación de materiales que permitan una acumulación de energía a través propiedades como: almacenamiento de calor sensible, almacenamiento de calor latente y almacenamiento químico de calor (Pereira da Cunha & Eames, 2016).

La tecnología de almacenamiento de calor sensible ha logrado un gran desarrollo gracias a su bajo costo de aplicación, pero presenta complicaciones debido a su baja capacidad de almacenamiento la cual depende de la densidad, volumen, variación de temperatura y calor específico del material de almacenamiento, lo que conlleva a disponer de un espacio grande para su aplicación (Alva, Liu, Huang, & Fang, 2017).

El almacenamiento de calor latente se presenta como una mejor alternativa, puesto que suministra una capacidad muy superior de almacenamiento al realizar el cambio de fase en ciertas sustancias, sin embargo, se ve limitado por los bajos niveles de conductividad

térmica, niveles que pueden ser contrarrestados con diseños óptimos para incrementar la transferencia de calor (Alva et al., 2017).

La mayor capacidad de almacenamiento se da en el almacenamiento químico, el cual es producido por medio de reacciones químicas en productos químicos especiales, donde se rompen y forman enlaces químicos liberando y absorbiendo gran cantidad de calor (Yan, Wang, Li, Wang, & Fred, 2015), sin embargo, presenta complicaciones como estabilidad química, necesita reacciones químicas específicas, conduciendo a una complicada aplicación a nivel industrial (Tian & Zhao, 2013).

1.2. Clasificación de almacenamiento de energía térmica

El almacenamiento de energía térmica en materiales se presenta de tres formas diferentes resumidos en la Tabla 1.1 - Clasificación de almacenamiento de energía térmica.:

- Almacenamiento de calor sensible (sólido y líquido).
- Almacenamiento de calor latente.
- Almacenamiento de calor químico a través de reacciones químicas reversibles (Raam Dheep & Sreekumar, 2014).

Tabla 1.1 - Clasificación de almacenamiento de energía térmica.

Almacenamiento de calor sensible	Almacenamiento de calor latente	Almacenamiento de calor por reacción química
Sólido	Sólido – Líquido	Reacciones termoquímicas
Líquido	Líquido - Gas	Almacenamiento de bombas de calor químicas
		Transporte de energía termoquímica de tuberías

Fuente: (Raam Dheep & Sreekumar, 2014)

(Elaboración propia)

1.2.1. Almacenamiento de calor sensible.

En éste método la energía térmica es almacenada y disipada del material mediante ciclos de calentamiento y enfriamiento, por ejemplo, al calentar una masa de agua desde temperatura ambiente hasta 50 °C, ésta acumula una cantidad de calor proporcional a la variación de temperatura, pero si se deja reposar el agua hasta temperatura ambiente, la cantidad de calor desprendida será la misma que la que se almacenó anteriormente

(Eslami & Bahrami, 2017), estos cambios de temperatura durante el calentamiento son apreciables en la Figura 1.1 - Diagrama de calentamiento del agua.:



Figura 1.1 - Diagrama de calentamiento del agua.

Fuente: (Propia)

Conforme la temperatura del material aumenta, éste va absorbiendo energía que es almacenada basándose en la capacidad del calor específico del material (C_p) la cual presenta diferentes valores tanto para estado sólido y líquido. La cantidad de calor almacenada o disipada es calculada de acuerdo a la Ecuación 1 (Raam Dheep & Sreekumar, 2014). La cantidad de calor almacenada es proporcional a la densidad, el volumen, el calor específico y la variación de temperatura (Alva et al., 2017).

Para cuantificar la cantidad de calor empleada en cambios de temperatura en materiales sólidos o líquidos se lo hace mediante la ecuación 1:

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m C_p dT = m C_p (T_f - T_i) \quad (1)$$

Ecuación 1. Ecuación de almacenamiento de calor sensible.

Fuente: (Raam Dheep & Sreekumar, 2014).

Donde:

- Q = Calor sensible almacenado en un intervalo de temperatura.
- m = Masa de material.
- C_p = Calor específico.

- T_i = Temperatura inicial del material.
- T_f = Temperatura final del material.

Se han realizado investigaciones (Rao, Niyas, & Muthukumar, 2018) y experimentación de almacenamiento de calor sensible en procesos de calentamiento de agua con diferentes materiales como: ladrillo rojo, arena, roca de cuarcita, piedras, piezas de concreto, esferas de vidrio, caucho y grava, funcionando como almacenadores de energía solar.

Al experimentar con arena y aceite se ha obtenido mejoras de productividad del sistema durante la noche, y disminución en la productividad durante el día conforme aumenta la cantidad de almacenamiento y de agua, en cuanto a factores ambientales se tiene una mayor productividad conforme la humedad relativa disminuye (Deshmukh & Thombre, 2017).

Entre algunos materiales sólidos y líquidos que permiten el almacenamiento de calor sensible se clasifican en base a su temperatura de uso y el calor específico de acuerdo con la Tabla 1.2 - Materiales en estado sólido y líquido para almacenamiento de calor sensible.

Tabla 1.2 - Materiales en estado sólido y líquido para almacenamiento de calor sensible.

Tipo	Material	Temperatura de uso (°C)	Cp (J/kg K)
Sólido	Ladrillo	20	840
	Roca	20	879
	Concreto	20	880
Líquido	Agua	0-100	4190
	Aceite de motor	>160	1880
	Etanol	>78	240
	Propanol	>97	2500
	Butanol	>118	2400
	Octano	>126	2400

Fuente: (A. Sharma, Tyagi, Chen, & Buddhi, 2009)

(Elaboración: Propia)

1.2.2. Almacenamiento de calor latente.

Es la técnica más atractiva de almacenamiento de energía térmica puesto que se almacena y disipa calor en un punto constante o cercano al punto de fusión del material,

conocido como la temperatura de transición del PCMs (Agyenim, Hewitt, Eames, & Smyth, 2010).

El calor latente se almacena y disipa en los procesos de transición entre los estados líquido y sólido se puede ver representado en el Figura 1.2 - Diagrama de cambio de fase (sólido-líquido) (Estados del agua).

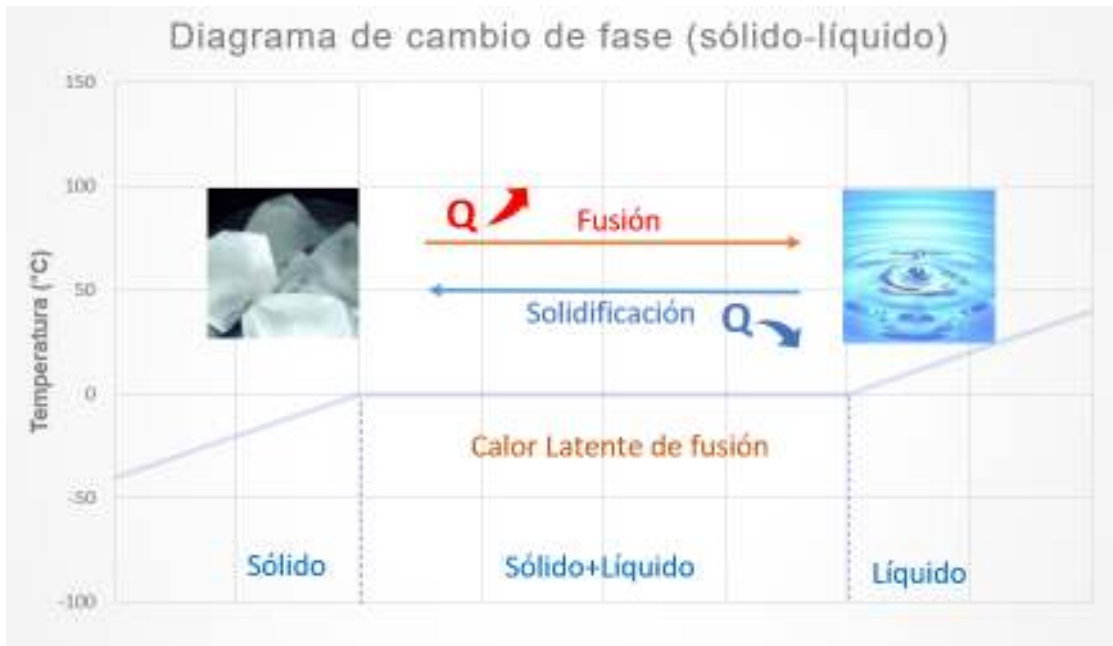


Figura 1.2 - Diagrama de cambio de fase (sólido-líquido) (Estados del agua).

Fuente: (Propia)

El almacenamiento de calor latente depende de la entalpía de cambio de fase para almacenar una determinada cantidad de calor en cierto rango de temperatura, proporcionando una gran capacidad de almacenamiento dependiendo del punto de fusión del material, de esta forma provee disponibilidad para ser integrada colectores solares térmicos para optimizar procesos térmicos entre ciclos de almacenamiento de calor (Pereira da Cunha & Eames, 2016).

Mediante un estudio se ha expuesto que al realizar el almacenamiento de calor latente en PCMs, en comparación con el almacenamiento de calor sensible con otros materiales, se consigue significativas reducciones en el volumen de material que será implementado en el sistema (Agyenim et al., 2010).

El almacenamiento de calor latente durante la fusión para un material de cambio de fase (PCM) está dado por la ecuación 2:

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} mC_{ps}dT + m\Delta h_f + \int_{T_m}^{T_f} mC_{pl}dT \quad (2)$$

Ecuación 2 - Almacenamiento de calor latente durante la fusión

Fuente: (A. Sharma et al., 2009)

Donde:

- Q = Calor almacenado en un intervalo de temperatura.
- m = Masa de material.
- C_{ps} = Calor específico estado sólido.
- C_{pl} = Calor específico estado líquido.
- Δh_f = Entalpía de cambio de fase durante la fusión.
- T_i = Temperatura inicial del material.
- T_m = Temperatura de fusión (cambio de fase).
- T_f = Temperatura final del material.

1.2.3. Almacenamiento de calor mediante reacciones químicas reversibles.

El sistema de almacenamiento de calor mediante reacciones químicas depende de la energía absorbida y liberada al romper y reformar enlaces moleculares durante una reacción química, la cantidad de energía almacenada se basa en la cantidad de materiales involucrados en la reacción (Veerakumar & Sreekumar, 2016).

Es el mecanismo de almacenamiento de energía térmica más llamativo puesto que proporciona una alta densidad de energía, proporcionando más ventajas que el almacenamiento mediante calor latente y calor sensible (Raam Dheep & Sreekumar, 2014). La densidad de energía almacenada mediante reacciones químicas se encuentra alrededor de 500 KW h/m³, mientras que el almacenamiento en materiales para calor sensible y calor latente son 50 y 100 kW h/m³ respectivamente (Alva et al., 2017).

Existen 3 métodos de almacenamiento de calor mediante reacciones químicas:

- Reacciones termoquímicas.
- Almacenamiento de bombas de calor químicas.
- Transporte de energía termoquímica de tuberías.

La tecnología de almacenamiento mediante reacciones químicas es compleja y aún se encuentra en etapa de laboratorio, donde se estudian características químicas como reversibilidad, tasa de reacción, propiedades cinéticas y condiciones de operación,

mientras que las tecnologías de almacenamiento mediante calor sensible y calor latente son más simples y ya se encuentran en etapa industrial (Alva et al., 2017).

1.3. Identificación de materiales de cambio de fase (PCMs)

Para lograr una acertada identificación de los materiales de cambio de fase es necesario realizar una clasificación de los PCMs teniendo en cuenta su aplicación, así también conocer las propiedades más relevantes, y los tipos de PCMs según su composición.

1.3.1. Clasificación de PCMs según tipo de aplicación

Para determinar el potencial de uso de PCMs es importante reconocer los parámetros de aplicación, tanto las propiedades físicas, el comportamiento del PCM durante el cambio de fase, el almacenamiento de calor latente, la conductividad térmica y el punto de fusión, además también se debe reconocer el valor económico que importa cada PCM a nivel industrial para un aprovechamiento masivo (Pereira da Cunha & Eames, 2016).

En base a la aplicación a realizar, los PCMs se deben seleccionar considerando la temperatura de fusión, para materiales con punto de fusión menor a 15 °C son usados para almacenamiento en aplicaciones de aire acondicionado, los que poseen un punto de fusión mayor a 90 °C se usan para refrigeración por absorción, mientras que los materiales que se encuentran en el rango de 15 a 90 °C son aplicados para calentamiento de agua con energía solar y para nivelación de carga térmica, a causa de esto son la categoría de materiales más estudiados (Farid, Khudhair, Razack, & Al-Hallaj, 2004).

1.3.2. Propiedades de PCMs para aplicación.

Para la elección de un material para almacenamiento de calor latente en aplicaciones de almacenamiento de energía térmica se deben tener en cuenta diferentes características y propiedades que permitan modular el rendimiento y comportamiento del material de cambio de fase (PCM), dependiendo del campo de aplicación, se debe evaluar propiedades termo físicas, cinéticas, químicas y otras propiedades externas para mejorar el aplicación (Ibrahim, Al-Sulaiman, Rahman, Yilbas, & Sahin, 2017)(Veerakumar & Sreekumar, 2016)(Alva et al., 2017)(Chandel & Agarwal, 2017) resumidas en la Tabla 1.3 - Propiedades de PCMs.

Tabla 1.3 - Propiedades de PCMs.

Propiedades Térmicas	Propiedades Químicas	Propiedades físicas	Propiedades cinéticas	Otros
Calor latente de fusión Conductividad térmica Punto de fusión Calor específico	Estabilidad química Estabilidad térmica No tóxico No corrosivo Inflamabilidad	Presión de vapor Volumen de carga Densidad	Superenfriamiento Fase de segregación	Costo Disponibilidad

Fuente: (Ibrahim, Al-Sulaiman, Rahman, Yilbas, & Sahin, 2017) (Veerakumar & Sreekumar, 2016) (Alva et al., 2017) (Chandel & Agarwal, 2017)

(Elaboración propia)

Propiedades Térmicas:

Calor latente de fusión: con un calor latente de fusión muy alto se consigue un mayor almacenamiento energético por unidad de masa de PCM dentro del sistema.

Conductividad térmica: con una alta conductividad térmica se logra aumentar la tasa de carga y descarga térmica del PCM.

Punto de fusión: debe ser cercano o estar dentro del rango operacional de temperatura donde se requiere lograr un almacenamiento de energía.

Calor específico: mediante un alto calor específico del PCM, tanto para estado líquido como estado sólido, se logra conseguir mejoras en el almacenamiento energético por unidad de masa de PCM dentro del sistema.

Propiedades Químicas:

Estabilidad química: con una alta estabilidad química se prolonga la vida del sistema.

Estabilidad térmica: las propiedades del material deben mantenerse estables después de varios ciclos de solidificación y fusión, sin degradarse, proporcionando amplios rangos de temperatura de operación y así disponer de una alta capacidad de almacenamiento.

No tóxico: provee seguridad para las personas que lo manipulan y el medio ambiente.

No corrosivo: la corrosividad en el material de cambio de fase disminuye drásticamente la vida de los componentes y del sistema en general.

Inflamabilidad: no deben ser inflamables o explosivos.

Propiedades físicas:

Presión de vapor: debe poseer bajos niveles de presión de vapor, a medida que la temperatura aumenta la presión es mayor haciendo necesario la aplicación de un costoso aislamiento.

Volumen de carga: el volumen del PCM debe ser lo menor posible, para disminuir el tamaño del contenedor.

Densidad: mediante una densidad alta se consigue mejoras cuando el volumen del PCM es reducido.

Propiedades cinéticas:

Super enfriamiento: se reconoce este fenómeno cuando el material se congela por debajo de su punto de solidificación, por lo que se requiere que el PCM debe solidificarse lo más cerca posible a la temperatura de solidificación.

Fase de segregación: poseer un bajo coeficiente de expansión térmica para evitar problemas como la segregación de fase.

Otros:

Costo: el costo operacional y de aplicación disminuye conforme baja el precio del PCM.

Disponibilidad: de fácil accesibilidad en el mercado.

1.3.3. Tipos de PCMs.

Los PCMs según su naturaleza se pueden catalogar en tres clases como se observa en la Tabla 1.4 - Clasificación de PCMs.

Tabla 1.4 - Clasificación de PCMs.

Orgánicos	Inorgánicos	Eutécticos
Parafina	Metales	Orgánico – orgánico
Sin parafina	Hidratos de sal	Orgánico – inorgánico
		Inorgánico – inorgánico

Fuente: (Pereira da Cunha & Eames, 2016)

(Elaboración propia)

1.3.3.1. PCMs orgánicos.

Los PCMs orgánicos presentan gran potencial de aplicación, debido a su bajo costo, estabilidad y una alta entalpía de cambio de fase, sin embargo, la presencia de carbono en la estructura de los PCMs orgánicos provoca baja conductividad térmica, entre 0.1 y 0.7 W/m K, por tanto, que requieren tomar consideraciones en los mecanismos de transferencia de calor hacia el medio circundante, entre los más destacables se encuentran: ácidos grasos, alcanos, amidas, urea y alcoholes dulces (Pereira da Cunha & Eames, 2016) observadas en la Tabla 1.5 – Propiedades termofísicas PCMs orgánicos.

Tabla 1.5 – Propiedades termofísicas PCMs orgánicos.

Compuesto	Pf (°C)	Δh (kJ/kg)	Cps (kJ/kg K)	Cpl (kJ/kg K)	ρ (kg/m ³)
Ácido fórmico	8	277	1.00	1.17	1227
Ácido acético	17	192	1.33	2.04	1214
Ácido láurico	44	212	2.02	2.15	1007
Ácido esteárico	54	157	1.76	2.27	940
Ácido palmítico	61	222	1.69	2.20	989
Cera de parafina	0-90	150-250	3.00	2.00	880-950
Acetamida	82	260	2.00	3.00	1160
Ácido oxálico	105	356	1.62	2.73	1900
Urea	134	250	1.80	2.11	1320
Ácido adípico	152	275	1.87	2.72	1360

Fuente: (Pereira da Cunha & Eames, 2016)

(Elaboración propia)

El uso de los ácidos grasos ha tomado la atención últimamente debido a su bajo costo y puntos de fusión desde 5 a 71°C, temperatura conveniente para el almacenamiento de energía solar, con calor latente de fusión que van desde 45 a 210 kJ/kg, sin embargo, su uso no ha sido muy difundido a causa de poseer olor bastante fuerte que limita su aplicación (Kenisarin & Mahkamov, 2007).

Entre los PCMs orgánicos se tiene:

Parafinas.

Comercialmente las parafinas han sido muy atractivas en las aplicaciones de almacenamiento de energía solar, almacenando cantidades de calor latente de aproximadamente 200 kJ/kg en varios rangos de temperatura, comercialmente se encuentra cera de parafina con puntos de fusión alrededor de los 55°C, este material ha sido implementado en un gran número de investigaciones puesto que estos materiales son fáciles de producir en grandes cantidades y son aplicables a varios sistemas, sin embargo su baja conductividad térmica ha sido una limitación en la aplicación, por lo

que para mejorar su implementación se ha hecho uso de tubos con aletas, estructuras de matriz metálica, virutas de aluminio y rellenos metálicos (Farid et al., 2004).

Según estudios las ceras de parafina comerciales proporcionan temperaturas de fusión en el rango de 50-56 °C, al ser sometidas a múltiples ciclos de fusión y solidificación sufren disminuciones en sus propiedades térmicas, donde se verifica una disminución en el punto de fusión y el calor latente (R. K. Sharma, Ganesan, & Tyagi, 2016) de acuerdo a la Tabla 1.6 - Variación de propiedades termofísicas de la parafina durante la evaluación en ciclos térmicos.

Tabla 1.6 - Variación de propiedades termofísicas de la parafina durante la evaluación en ciclos térmicos.

Numero de ciclos	Temperatura de fusión (°C)	Calor latente (kJ/kg)
0	52.9	133.66
100	52.18	122.49
200	49.63	146.8
1000	49.95	125.06
1500	50.33	114.66

Fuente: (R. K. Sharma et al., 2016).

(Elaboración: Propia)

No parafinas

Ácidos grasos: Se encuentran compuestos a base de ácidos carboxílicos con cadenas de hidrocarburos, se derivan de los glicéridos y poseen números pares de átomos (Chandel & Agarwal, 2017). El interés en estos materiales ha aumentado puesto que posee considerables propiedades termo físicas y puntos de fusión entre 50 y 70°C, brindando posibilidades de aplicación para baja y media temperatura (R. K. Sharma et al., 2016). Sin embargo, presentan problemas al ser aplicados a causa de inflamabilidad, corrosividad y el costo que es aproximadamente tres veces más que las ceras de parafina (Chandel & Agarwal, 2017).

PCMs a base de aceite vegetal: tienen gran potencial para ciertas aplicaciones, son aceites de grado alimenticio y seguros para ingerir, presentan un amplio rango de temperaturas en comparación con sales inorgánicas, su calor latente va desde 150 kJ/kg a 220 kJ/kg, y punto de fusión en los rangos de 90 a 150°C, sin embargo, estos compuestos tienen punto de inflamación más bajos y propagación de llama más larga que las ceras de parafina (Chandel & Agarwal, 2017).

1.3.3.2. PCMs inorgánicos.

Entre los mas utilizados se observa en la Tabla 1.7 – Propiedades termofísicas PCMs inorgánicos.

Tabla 1.7 – Propiedades termofísicas PCMs inorgánicos.

Compuesto	Pf (°C)	Δh (kJ/kg)	Cps (kJ/kg K)	Cpl (kJ/kg K)	ρ (kg/m ³)
Agua	0	333	3.30	4.18	920
Cloruro de calcio hexahidratado	30	125	1.42	2.20	1710
Sulfato de sodio decahidratado	32	180	1.93	2.80	1485
Tiosulfato de sodio pentahidratado	46	210	1.46	2.39	1666
Acetato de sodio trihidratado	58	266	1.68	2.37	1450
Hidróxido de bario octahidratado	78	280	1.34	2.44	2180
Nitrato de magnesio hexahidratado	89	140	2.5	3.10	1640
Ácido oxálico dihidratado	105	264	2.11	2.89	1653
Cloruro de magnesio hexahidratado	117	150	2.00	2.40	1570

Fuente: (Pereira da Cunha & Eames, 2016)

(Elaboración propia)

Sales hidratadas

Presentan un gran enfriamiento durante la cristalización, la cantidad de calor almacenado depende de la entalpía de cambio de fase la cual es función de la fuerza entre las moléculas de agua y la sal. Estos compuestos presentan inconvenientes de corrosión para uso en aplicaciones de almacenamiento energético que emplee metales, tales como acero aluminio cobre entre otros.

Al llevar la sal hidratada a temperaturas elevadas se puede afectar la estabilidad térmica de la fase provocando que el agua liberada se evapore, lo cual se puede controlar mediante métodos de encapsulación. Presenta un inicio de solidificación menor a la temperatura de fusión (10 a 20 °C) (Pereira da Cunha & Eames, 2016)

Metálicos

Los Materiales de cambio de fase metálicos tienen campo de aplicación en sistemas donde se requieran altas tasas de transferencia de calor y el aumento del peso del sistema no se considere un problema. La alta densidad de volumen y alta conductividad térmica refleja notables ventajas comparado a otros PCMs, sin embargo, estos metales presentan inconvenientes en cuanto a su peso, por lo que son mejores candidatos en aplicaciones de enfriamiento de sistemas electrónicos (Gonzalez-Nino et al., 2018).

La selección de estos materiales se produce entre metales de bajo punto de fusión, alto punto de fusión y alta conductividad térmica, entre los que se tiene materiales puros y aleaciones eutécticas entre: Galio, bismuto, plomo, antimonio (A. Sharma et al., 2009).

1.3.3.3. PCMs eutécticos.

Se presentan en una mezcla de varios materiales: orgánico-orgánico, orgánico-inorgánico, inorgánico-inorgánico, con el objetivo de producir una mezcla específica de propiedades que permitan: una alta capacidad de almacenamiento y una temperatura de fusión según la aplicación (Shahbaz et al., 2016), diferentes compuestos se observan en la Tabla 1.8 – Propiedades termofísicas PCMs eutécticos.

Tabla 1.8 – Propiedades termofísicas PCMs eutécticos.

Compuesto	Pf (°C)	Δh (kJ/kg)	Cps (kJ/kg K)	Cpl (kJ/kg K)	ρ (kg/m ³)
NaNO ₃ –NaOH	250	160	1190	1860	2241
KNO ₃ –NaNO ₃ –NaNO ₂	142	110	1170	1730	2006
CaCl ₂ ·(H ₂ O) ₆ MgCl ₂ ·(H ₂ O) ₆	25	127	1620	2270	1661
Urea CH ₃ COONa·(H ₂ O) ₃	30	200	1750	2210	1370
Mg(NO ₃) ₂ ·(H ₂ O) ₆ NH ₄ NO ₃	52	125	2130	2670	1672
Urea– acetamida	53	224	1920	2660	1216
Ácido esteárico- ácido palmítico	53	182	1720	2230	971
Mg(NO ₃) ₂ ·(H ₂ O) ₆ –MgCl ₂ ·(H ₂ O) ₆	59	132	2290	2810	1610
Ácido esteárico–acetamida	65	213	1800	2400	972
LiNO ₃ MgNO ₃ ·(H ₂ O) ₆	72	180	2380	2900	1713
Urea–LiNO ₃	76	218	1770	2020	1438
Urea–NaNO ₃	83	187	1600	2030	1502
Urea–NH ₄ Cl	102	214	1770	2090	1348
LiBr–LiNO ₃	228	279	1340	1380	2603

Fuente: (Pereira da Cunha & Eames, 2016)

(Elaboración propia)

La variedad de PCMs eutécticos es indefinida puesto que son sintetizables a partir de la estructura generada debe permitir una solidificación y fusión sin segregaciones evitando alteraciones en los componentes (Jaguemont, Omar, Van den Bossche, & Mierlo, 2018).

2. Metodología

Basados en los avances observados en el estado de arte y la caracterización realizada sobre los PCMs es necesario determinar las condiciones de trabajo requeridas para el material de cambio de fase, posteriormente es necesario seleccionar el material más apropiado para la aplicación, consecutivamente se procede a caracterizar los procesos termodinámicos y térmicos presentes, de esta forma se consigue plantear las condiciones adecuadas para realizar el modelamiento matemático y la validación correspondiente, este proceso se observa en Figura 2.1 - Metodología.

Metodología

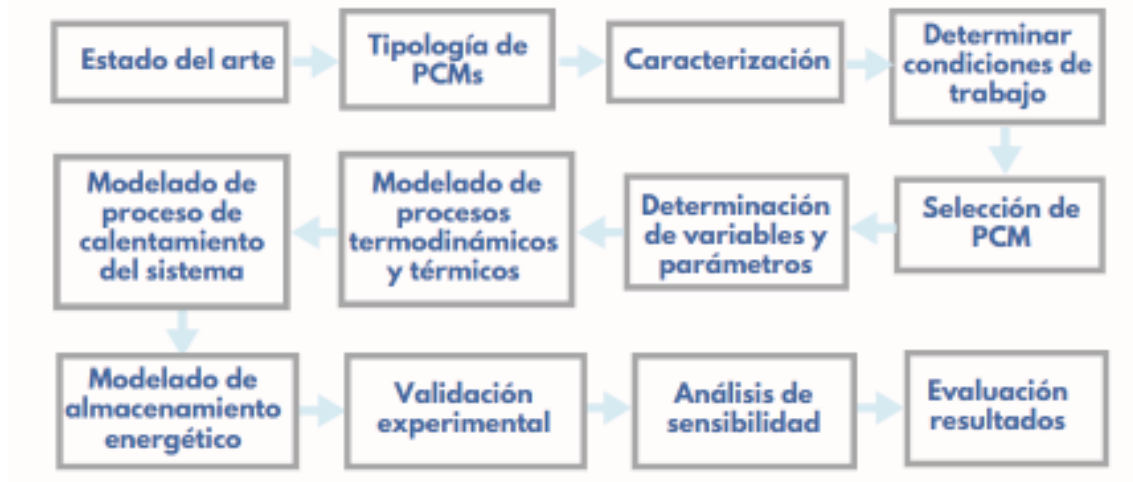


Figura 2.1 - Metodología

Fuente: (Propia)

2.1. Determinación de los materiales de cambio de fase aplicables a viviendas de interés social.

Para determinar el material de cambio de fase, es necesario conocer las condiciones bajo las cuales trabajará el mismo, por tanto es necesario proceder de acuerdo a la Norma Ecuatoriana de Construcción (NEC - 11, 2011), en base a esta norma se conoce que la demanda de agua correspondiente a una vivienda de 4 usuarios, asume un consumo diario de agua caliente a una temperatura de 55°C (entre 45 y 60°C), y un consumo máximo de 180 litros/día, lo que es equivalente a 45 litros/día para cada usuario (NEC - 11, 2011).

Teniendo en cuenta estos lineamientos se hace necesaria la búsqueda y selección de un material de cambio de fase, que presente correspondencia en las propiedades termofísicas, químicas, cinéticas, siendo un material que presente un costo y disponibilidad favorable, para procesos de calentamiento solar de agua.

2.2. Selección del material de cambio de fase.

En la Tabla 2.1 - Revisión de aplicaciones solares con almacenamiento térmico en LAC se presentan algunos estudios de investigación a modo de revisión, donde se observa el estado actual de la energía solar y los PCM para diferentes aplicaciones utilizadas en

el calentamiento de agua, aplicaciones de calefacción y refrigeración y almacenamiento de energía en edificios

El análisis se realizó teniendo en cuenta el impacto y el estado de avance que ha tenido la energía solar para aplicaciones de calefacción en los últimos 5 años. Éste estudio considera la evaluación en el Sur Global del mundo en países en desarrollo de América Latina y el Caribe (LAC), donde las principales dificultades de las aplicaciones de energía solar son la viabilidad económica de los proyectos y la falta de evaluación sobre la aplicación de la energía solar como energía sostenible.

Tabla 2.1 - Revisión de aplicaciones solares con almacenamiento térmico en LAC.

Año	Título	PCM	Aplicación
2015 (Carmona, Caicedo, Gómez Vega, & Bula, 2015)	Modelo reducido para un análisis térmico de un colector solar de placa plana con almacenamiento de energía térmica utilizando material de cambio de fase (PCM)	Ceras de parafina Ceras de parafina (60 ° C)	Calentamiento solar de agua con tecnología PCM
2017 (Gautam, Chamoli, Kumar, & Singh, 2017)	Una revisión sobre las mejoras técnicas, la viabilidad económica y el escenario mundial del sistema solar de calentamiento de agua.	Ceras de parafina	Sistema de calentamiento de agua solar (escenario mundial)
2017 (Guerrero-Lemus & Shephard, 2017)	Energía solar térmica para calefacción, refrigeración y energía.	Sales inorgánicas, parafinas, módulos de arena de panel PCM	Colectores solares Cocinas solares Canales parabólicos (África, LAC)
2018 (Nienborg et al., 2018)	Evaluación del ciclo de vida de los materiales y componentes de almacenamiento de energía térmica	Ceras de parafina hidratos de sal	Colectores solares con almacenamiento térmico. Aplicación de refrigeración y calefacción.
2018	Evaluación del ciclo de vida de materiales innovadores para el	Ceras de parafina hidratos de sal	Almacenamiento de energía

(Horn et al., 2018)	almacenamiento de energía térmica en edificios		térmica en edificios
2018 (Du, Calautit, Wang, Wu, & Liu, 2018)	Una revisión de las aplicaciones de los materiales de cambio de fase en refrigeración, calefacción y generación de energía en diferentes rangos de temperatura.	Sales inorgánicas, ceras de parafina	Calentamiento solar de agua con PCM Todavía solar Generación eléctrica
2018 (Lamnatou, Motte, Notton, Chemisana, & Cristofari, 2018)	Sistema solar térmico integrado en el edificio con / sin material de cambio de fase: Evaluación del ciclo de vida basado en ReCiPe, USEtox y Huella ecológica	Ácido mirístico) y lana de roca	Sistema termosolar
2019 (Baddadi, Bouadila, & Guizani, 2019)	Uso beneficioso de dos lechos empaquetados de almacenamiento de energía latente para el calentamiento de un invernadero hidropónico	Cloruro de calcio hexahidrato	invernadero hidropónico con PCM
2020 (Ananno, Masud, Dabnichki, & Ahmed, 2020)	Diseño y análisis numérico de un secador colector solar de placa plana geotérmica híbrida PCM para países en desarrollo	Cera parafina	secador colector solar sistema de secado de alimentos
2020 (Aguinaga, Orquera, Avila, & Hidalgo, 2020)	Caracterización de vectores de energía, en calentadores solares de agua con PCM para viviendas de interés social	Ceras de parafina	Calentamiento solar de agua con PCM
2020 (Orquera, Aguinaga, Avila, & Hidalgo, 2020)	Evaluar el uso de Secador Solar con Reflectores Solares Fotónicos y PCM en Productos Agrícolas en la Región Andina	Ceras de parafina	Secador solar para productos alimenticios

Fuente: (incluida en cada segmento).

(Elaboración: Propia)

Para la selección entre los tipos de materiales aptos para la aplicación como PCM se consideran las siguientes clasificaciones:

Tabla 2.2 - Clasificación de PCMs aptos para la aplicación.

Clasificación	Nombre del PCM
Orgánicos	Acido láurico Ácido esteárico Ácido palmítico Cera de parafina
Inorgánicos (hidratos de sal)	Pentahidrato tiosulfato de sodio Trihidrato acetato de sodio
Compuestos eutécticos	Urea- acetamida Acido esteárico-palmítico

Fuente: (J. Zhao, Yuan, Haghghat, Lu, & Feng, 2019).

(Elaboración: Propia)

Tabla 2.3 - Ventajas de diferentes tipos de PCMs

Clasificación	Ventajas del PCM
Orgánicos	Disponibles en amplios rangos de temperatura. Estable bajo cierto número de ciclos de uso. Estabilidad térmica, física y química. Compatibilidad con diferentes tipos de contenedores. Naturaleza no reactiva. Ambientalmente seguros. No corrosivos.
Inorgánicos (hidratos de sal)	Alta capacidad de almacenamiento térmico. Buena conductividad térmica. Bajo costo. Baja presión de vapor. Buena disponibilidad.
Compuestos eutécticos	Alta densidad de almacenamiento volumétrico en comparación con PCMs orgánicos.

Fuente: (Chandel & Agarwal, 2017).

(Elaboración: Propia)

Tabla 2.4 - Desventajas de diferentes tipos de PCMs

Clasificación	Desventajas del PCM
Orgánicos	Cambios volumétricos considerables durante el cambio de fase. No compatible con contenedores plásticos. Baja conductividad térmica. Costoso en forma pura. Baja entalpía de cambio de fase. Inflamables.
Inorgánicos (hidratos de sal)	Alto superenfriamiento y subenfriamiento. Muestra fase de segregación. Incompatible con contenedores metálicos.
Compuestos eutécticos	Costoso.

Fuente: (Chandel & Agarwal, 2017).

(Elaboración: Propia)

Según la investigación realizada para aplicaciones solares considerando el empleo de PCMs en países en vías de desarrollo en los últimos 5 años, se demuestra que se ha utilizado ceras de parafina, sales inorgánicas y ácidos como PCM, para calentamiento de agua, secado de alimentos, generación de energía y aplicaciones de construcción. A lo largo de la revisión (Carmona et al., 2015) (Gautam et al., 2017) (Guerrero-Lemus & Shephard, 2017) (Nienborg et al., 2018) (Horn et al., 2018) (Du et al., 2018) (Lamnatou et al., 2018) (Baddadi et al., 2019) (Ananno et al., 2020) (Aguinaga et al., 2020) (Orquera et al., 2020) se observa un formidable uso de la cera de parafina para diferentes pruebas, tanto numéricas como experimentales.

La diversidad que brindan las ceras de parafina en cuanto a su punto de fusión permite el desempeño y comparación de múltiples pruebas. de PCM, al ser un material accesible permite su experimentación en diferentes escenarios de trabajo.

Los principales criterios para la selección del material de cambio de fase se aplican a partir de las propiedades y parámetros que se evidencian a continuación:

- Poseer un punto de fusión que se encuentre entre 50 y 60°C:
- Alto calor latente de fusión para un mayor almacenamiento energético.
- Alta conductividad térmica para logra aumentar la tasa de carga y descarga térmica del PCM.
- Punto de fusión dentro del rango operacional de temperatura donde se requiere lograr un almacenamiento de energía.

- Alto calor específico del PCM, tanto para estado líquido como estado sólido. (Agyenim et al., 2010)
- Alta estabilidad química se prolonga la vida del sistema.
- Estabilidad térmica después de varios ciclos de solidificación y fusión, sin degradarse.
- No tóxico.
- No corrosivo.
- Inflamabilidad: no deben ser inflamables o explosivos.

Para la selección del material de cambio de fase se analizó las aplicaciones que se han realizado a lo largo de Latinoamérica (Carmona et al., 2015)(Gautam et al., 2017) (Guerrero-Lemus & Shephard, 2017) (Aguinaga et al., 2020), al mismo tiempo se tuvo en cuenta el contexto global de investigación en cuanto a aplicaciones solares mostradas en la Tabla 2.1 - Revisión de aplicaciones solares con almacenamiento térmico en LAC., posteriormente fue necesario considerar otros factores como: costo del material y la disponibilidad del mismo dentro del país.

A partir de la evaluación de la información anterior se logra determinar que la opción más acertada es trabajar con cera de parafina Figura 2.2 - Cera de parafina de uso comercial. Este PCM se presenta como el material más accesible dentro del mercado tiene una alta capacidad almacenamiento de calor latente el cual trabaja en rangos de temperatura requeridos para la aplicación, la cera de parafina es de bajo costo y biodegradable al ser un material orgánico (Akgün, Aydin, & Kaygusuz, 2007).

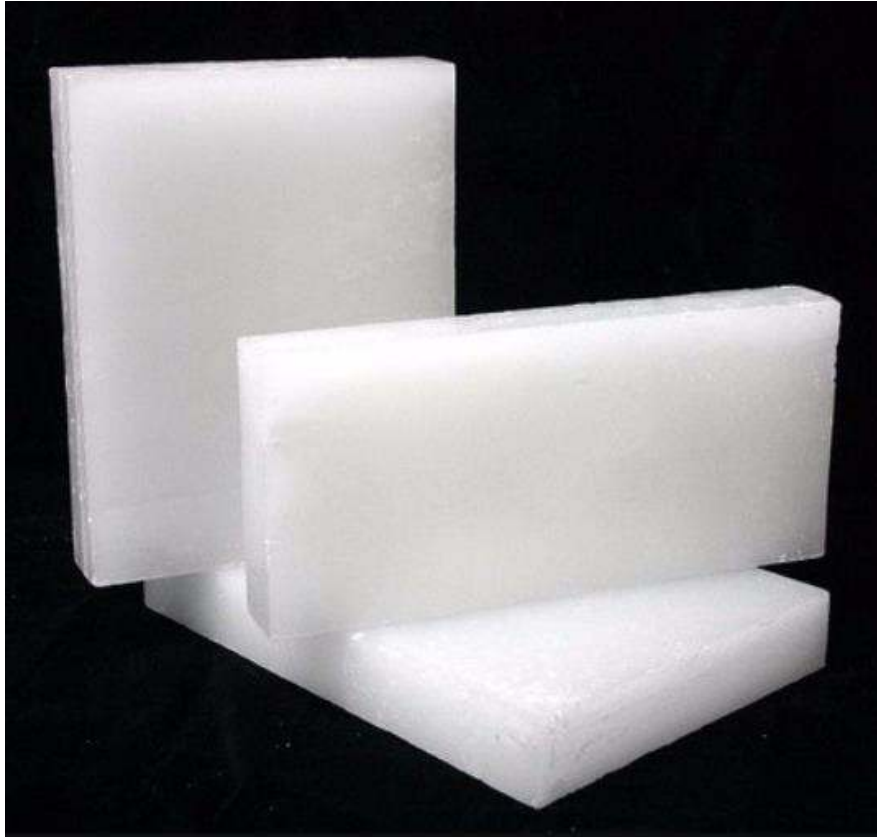


Figura 2.2 - Cera de parafina de uso comercial.

Fuente: (Propia)

La cera de parafina obtenida para la experimentación es de producción nacional, conseguida comercialmente en una fábrica de velas de cera parafina.

Tabla 2.5 - Propiedades termofísicas de cera de parafina

Propiedad	Símbolo	Valor
Punto de Fusión (°C)	Pf	56
Densidad (kg/m ³)	ρ	785
Calor latente (kJ/kg)	Δh	200
Calor específico sólido (kJ/kg °C)	Cps	2.565
Calor específico líquido (kJ/kg °C)	Cpl	2.439
Conductividad térmica (W/kg K)	λ	0.22

Fuente: (Mahfuz, Anisur, Kibria, Saidur, & Metselaar, 2014).

(Elaboración: Propia)

2.3. Determinación de variables y parámetros funcionales. comportamiento y aplicación.

Para la realización del experimento es necesario el conocimiento de las propiedades de los materiales a emplearse, su forma y sus dimensiones, así como conocer el tipo de comportamiento que presentan para poder lograr un mejor entendimiento del fenómeno por analizar.

2.3.1. Propiedades y características de los materiales útiles para el experimento.

La experimentación se llevó a cabo mediante el uso de los siguientes materiales:

- 2 kg de cera de parafina procedente de tienda de velas Figura 2.3 - Cera de parafina.
- 3 litros de agua mineral a 17°C.
- Recipiente de acero inoxidable de 3 litros de capacidad y 2 mm de espesor Figura 2.4 - Olla de acero inoxidable.
- Multímetro marca UNI-T UT33C+ Figura 2.5 - Multímetro con termocupla..
- Franela.
- Estufa de gas (propano), rango de temperatura 150- 280°C, rango de potencia 1- 3.8 kW.



Figura 2.3 - Cera de parafina.

Fuente: (Propia)



Figura 2.4 - Olla de acero inoxidable.

Fuente: (Propia)



Figura 2.5 - Multímetro con termocupla.

Fuente: (Propia)

Las propiedades de los materiales a utilizar se refieren tanto las propiedades del agua y las propiedades del material de cambio de fase (cera de parafina), estas son propiedades termofísicas de la parafina y el agua que se pueden evidenciar en la Tabla 2.5 - Propiedades termofísicas de cera de parafina - Propiedades termofísicas de cera de parafina y la Tabla 2.6 - Propiedades termofísicas del agua.

Tabla 2.6 - Propiedades termofísicas del agua

Propiedad	Símbolo	Valor
Punto de Fusión (°C)	Pf	0
Densidad (kg/m ³)	ρ	1000
Calor específico líquido (kJ/kg °C)	Cp	4.186

Fuente: (Incropera & DeWitt, 1999)

(Elaboración: Propia)

2.3.2. Configuración experimental y procedimiento aplicado al sistema.

En la realización del experimento se tuvo como dificultad de no poder hacer uso de instalaciones y equipos de investigación avanzado debido a la crisis sanitaria atravesada a nivel mundial. Para esta aplicación se hizo un énfasis en el comportamiento del proceso de enfriamiento del sistema observado en la Figura 2.6 - Configuración experimental del sistema, y de forma esquemática en la Figura 2.7 - Configuración de mezcla agua + PCM (parafina).

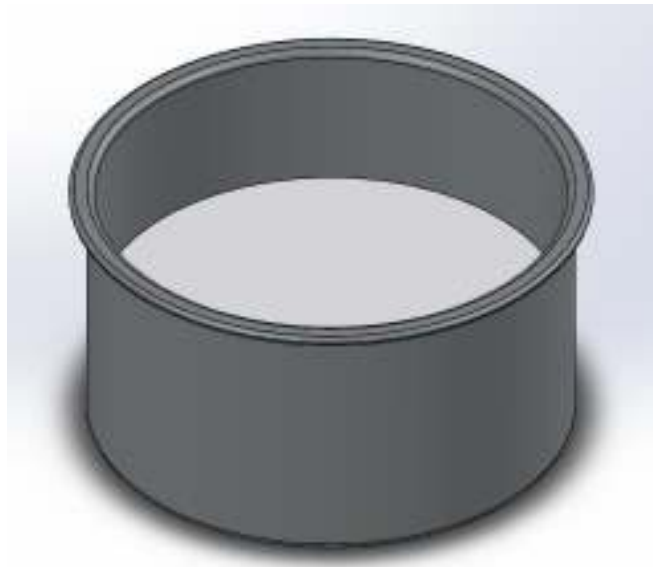


Figura 2.6 - Configuración experimental del sistema

Fuente: (S. D. Sharma & Sagara, 2005).



Figura 2.7 - Configuración de mezcla agua + PCM (parafina)

Fuente: (S. D. Sharma & Sagara, 2005).

El procedimiento Figura 2.8 – Procedimiento experimental., inicia con calentamiento del sistema se produce a través de depósitos de agua y PCM en el interior del recipiente metálico, el cual al estar en contacto con la llama aumenta su temperatura mediante radiación emitida a través de la llama de gas que permite el rápido calentamiento del sistema hasta una temperatura cercana a la temperatura de ebullición del agua, en éste momento de detiene la entrada de calor y se deja al sistema en reposo (S. D. Sharma & Sagara, 2005).

Procedimiento



Este procedimiento se emplea para los 5 casos de estudio o configuraciones experimentales

Figura 2.8 – Procedimiento experimental.

Fuente: (Propia)

El enfriamiento del sistema se empieza a contabilizar cuando la temperatura del agua y del PCM se encuentra en 80 °C, desde este momento se mide la temperatura del agua

con el uso de la termocupla y así mediante intervalos de 2 minutos hasta que la temperatura presente valores cercanos a los 40 °C (D. Zhao & Tan, 2014).

Para objetivos del estudio se recolecta datos de temperatura del agua, posteriormente a la evaluación de los datos en diferentes configuraciones de trabajo se determina parámetros y variables que permitan la aplicación y evaluación del experimento en condiciones que representen el comportamiento en la ciudad de Quito.

En la experimentación se realiza variaciones entre las proporciones de agua y PCM logrando establecer consideran 5 casos de estudio mediante los cuales se logre evidenciar como cambia el comportamiento térmico del sistema, para la validación experimental del modelo se realiza el siguiente procedimiento:

- Calentamiento hasta sobrepasar la temperatura de 80 °C, antes de que comience el proceso de ebullición.
- Lograr equilibrio térmico entre el agua y el PCM a temperatura superior a 80 °C.
- Dejar en sistema en enfriamiento mediante convección natural.
- Encender el multímetro y ubicar la termocupla a la altura media del agua.
- Iniciar la toma de datos cuando la temperatura del agua es 80 °C.
- Recolectar datos en intervalos de 2 minutos hasta un tiempo de 100 minutos.
- Repetir el procedimiento para los 5 casos de estudio.

El primer ensayo se realiza con una proporción de 1 a 1 de acuerdo con la Figura 2.9 - Configuración experimental 1:1 con 1kg de agua y 1 kg de PCM.

El segundo ensayo se realiza con una proporción de 1 a 1/2 de acuerdo con la Figura 2.10 - Configuración experimental 1:1/2 con 1kg de agua y 0.5 kg de PCM.

El tercer ensayo se realiza con una proporción de 1 a 1/4 de acuerdo con la Figura 2.11 - Configuración experimental 1:1/4 con 1kg de agua y 0.25 kg de PCM.

El cuarto ensayo se realiza con una proporción de 1 a 1/8 de acuerdo con la Figura 2.12 - Configuración experimental 1:1/8 con 1kg de agua y 0.125 kg de PCM.

El quinto ensayo se realiza solamente con agua de acuerdo con la Figura 2.13 - Configuración experimental 1:0 con 1kg de agua y 0 kg de PCM.

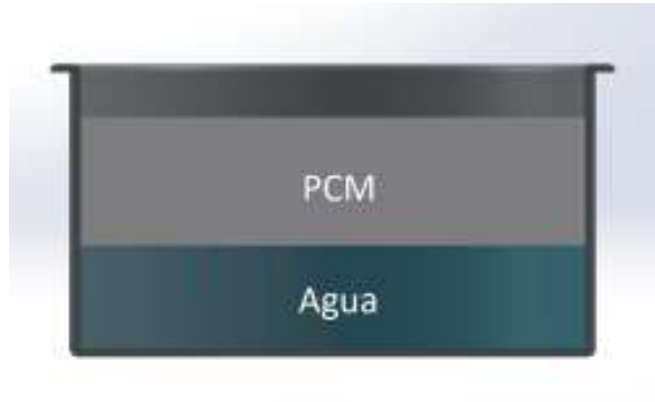


Figura 2.9 - Configuración experimental 1:1 con 1kg de agua y 1 kg de PCM.

Fuente: (Propia)



Figura 2.10 - Configuración experimental 1:1/2 con 1kg de agua y 0.5 kg de PCM.

Fuente: (Propia)



Figura 2.11 - Configuración experimental 1:1/4 con 1kg de agua y 0.25 kg de PCM.

Fuente: (Propia)



Figura 2.12 - Configuración experimental 1:1/8 con 1kg de agua y 0.125 kg de PCM.

Fuente: (Propia)



Figura 2.13 - Configuración experimental 1:0 con 1kg de agua y 0 kg de PCM.

Fuente: (Propia)

2.3.3. Pérdidas Térmicas del sistema.

Tanto los materiales utilizados en el sistema como la configuración planteada para cada ensayo influyen en la cantidad de calor que pierde el sistema a lo largo del tiempo determinado para cada evaluación. La temperatura del agua y la solidificación del PCM dependen de los métodos de transferencia de calor que se produzca sobre el sistema, para este caso cabe notarse que el sistema pierde calor por convección y conducción de acuerdo a la Ecuación 3.

$$Q_{p\acute{e}rdidas} = UA(T_s - T_{H2O}) \quad (3)$$

Ecuación 3 - Calor perdido en el sistema

Fuente: (Incropera & DeWitt, 1999).

Donde:

- $Q_{p\acute{e}rdidas}$ = Calor perdido.
- U = Coeficiente de transferencia de calor.

- A = Área superficial.
- T_s = Temperatura superficial.
- T_{H_2O} = Temperatura del agua.

La temperatura que se mantiene en el interior del tanque se encuentra en función de las cantidades empleadas de agua y PCM, la naturaleza del material contenedor, así como, la temperatura ambiente y el coeficiente de convección del aire (Incropera & DeWitt, 1999).

2.3.4. Parámetros de aplicación.

Para realizar el modelamiento se considera el experimento como un estudio unidimensional donde se examina la variación de temperatura, existe la presencia de convección natural con una temperatura ambiente de 17°C, las propiedades de agua y del PCM se mantienen constantes para el experimento.

2.4. Caracterización, modelamiento y optimización los procesos termodinámicos y térmicos de almacenamiento energético en materiales de cambio de fase PCM, en depósitos aislados de agua caliente.

Actualmente ha tomado gran importancia el diseño de sistemas de almacenamiento energéticos eficientes, al realizar el proceso de recolección de energía térmica a través del uso de colectores solares, esta necesita ser almacenada de forma eficiente para un posterior uso. Y en base a esto se debe considerar factores como materiales de diseño, discusiones de modelo de diseño y mejora de transferencia de calor (Tian & Zhao, 2013). Por tanto, se realizará experimentación en un recipiente de acero inoxidable con tapa de vidrio, el cual va a contener el fluido de calentamiento (agua) y el material de cambio de fase (cera de parafina).

Se considera la realización de un modelamiento matemático en MATLAB R2020A, considerando variaciones en cuanto a la cantidad de agua y de PCM (parafina) seleccionada para la experimentación.

Para la validación experimental del modelo se conserva las variables y constantes aplicadas al modelo matemático y se realizaron pruebas en diferentes condiciones, tales como: variación en la proporción del PCM con respecto al agua durante procesos de calentamiento y enfriamiento.

A partir de estos análisis se pretende poder evaluar los siguientes cambios cualitativos y cuantitativos en el comportamiento del sistema: tiempo de enfriamiento del PCM y

parafina para cada condición de trabajo, cambio en la velocidad de enfriamiento en cada caso, variación en el coeficiente global de transferencia de calor, variación en la resistencia térmica con respecto al área, comparación cualitativa de comportamiento de PCM para cada condición de trabajo, cantidad de calor intercambiado entre el PCM y el fluido de trabajo.

El modelamiento del sistema se consideró de acuerdo con el esquema mostrado en la Figura 2.14. Esquema para modelamiento.

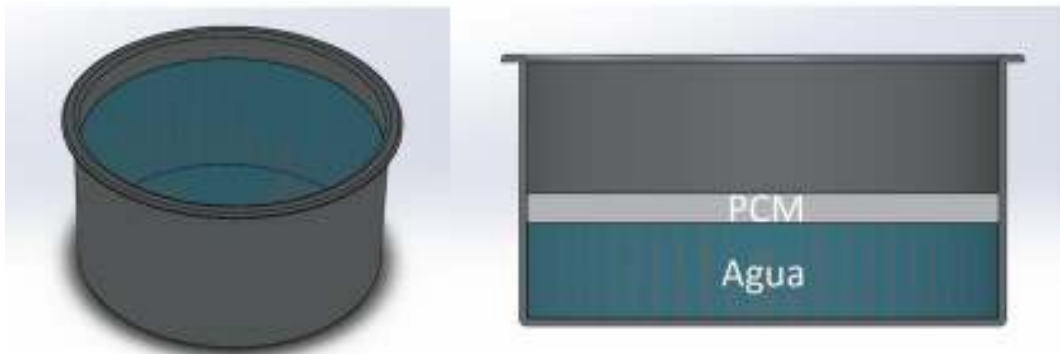


Figura 2.14. Esquema para modelamiento.

Fuente: (A. Sharma et al., 2009)

2.5. Modelamiento matemático del proceso de calentamiento del Sistema.

Para realizar el modelamiento matemático se consideró la evaluación de los calores latentes y las temperaturas de cambio de fase de fusión y congelación, realizando un análisis de la velocidad de cambio de temperatura dentro del recipiente, para evaluar la conductividad térmica junto al calor necesario para el calentamiento presentado en la ecuación 4.

$$Q_{gen} - Q_{out} = (m_w * Cp_w + ro * m_w * Cp_p) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

Ecuación 4 - Balance de energía para cambio de temperatura en un recipiente de agua.

Fuente: (Incropera & DeWitt, 1999).

Donde:

- Q_{gen} = Energía térmica entregada al agua [W].
- Q_{out} = Pérdidas térmicas del sistema [W].

- m_w = Masa de agua [W].
- Cp_w = Calor específico del agua [J/Kg K].
- r_o = Fracción entre la cantidad de parafina y la cantidad de agua.
- Cp_p = Calor específico de la parafina [J/Kg K].
- $\frac{dT}{dt}$ = Variación de temperatura del agua en función del tiempo.

2.6. Modelo matemático del proceso de almacenamiento energético con materiales de cambio de fase en depósitos de agua.

La función del PCM es almacenar la energía solar cuando la temperatura en el tanque es mayor a la temperatura del PCM (modo día) y liberar el calor reservado cuando la temperatura en el tanque es menor a la temperatura del PCM (modo noche).

El calor acumulado de un PCM a través del cambio de fase al aumentar la temperatura se puede observar en la Figura 2.15 - Cantidad de calor almacenado en un PCM al variar la temperatura. La capacidad de almacenamiento de calor del PCM se puede calcular numéricamente utilizando la ecuación 6 donde la temperatura aumenta conforme se agrega calor al sistema, almacenando calor sensible en estado sólido, calor latente y calor sensible en estado líquido.

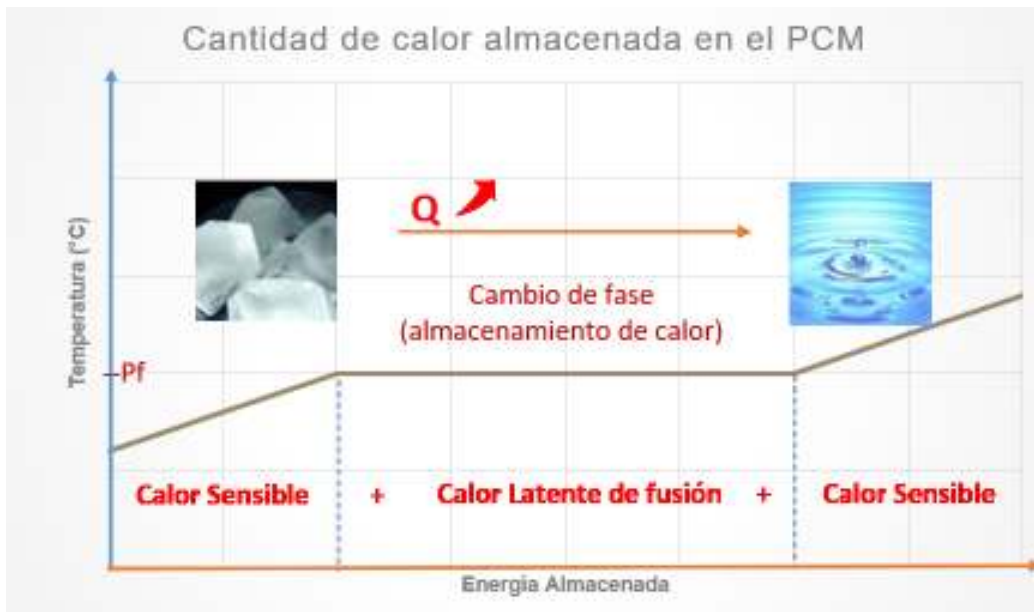


Figura 2.15 - Cantidad de calor almacenado en un PCM al variar la temperatura.

Fuente: (Majumdar & Saha, 2019).

$$Q_{PCM} = Q_{sensible,solido} + \Delta h + Q_{sensible,liquido} \quad (5)$$

Ecuación 5 - Cantidad de calor almacenado en un PCM al variar la temperatura

Fuente: (Majumdar & Saha, 2019).

$$Q_{PCM} = m_{PCM} [C_{ps}(58 - T_1) + \Delta h + C_{pl}(T_2 - 58)] \quad (6)$$

Ecuación 6 - Cantidad de calor almacenado para parafina PT 58.

Para la generación del modelo matemático se debe considerar diferentes que fenómenos hacia el exterior e interior del sistema, es necesario seleccionar las condiciones de borde para limitar físicamente el espacio donde ocurren estos fenómenos, en la Figura 2.16 - Modelamiento matemático del sistema de almacenamiento con PCM se puede observar una interpretación del sistema:

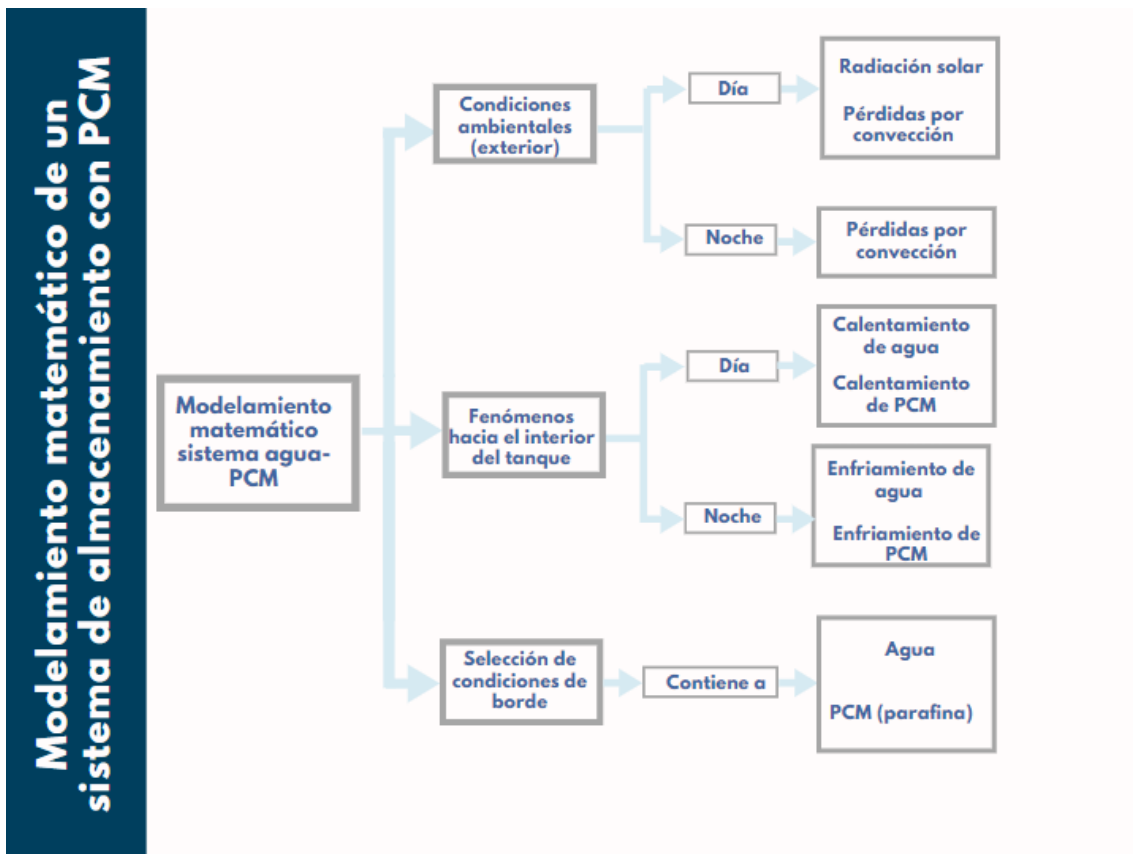


Figura 2.16 - Modelamiento matemático del sistema de almacenamiento con PCM

Fuente: (Propia)

Estos fenómenos presentan comportamientos particulares dependiendo del estado en que se encuentre el PCM, por tanto, necesita ser estudiado en diferentes escenarios tanto para el día como para la noche.

Para el proceso de modelamiento matemático mediante MATLAB es necesario la identificación de los procesos que se manifiestan dentro del sistema, partiendo de la consideración de que un ciclo de funcionamiento contempla procesos de calentamiento y enfriamiento del PCM, en la Figura 2.17 - Esquema de modelamiento de un sistema de almacenamiento para un ciclo se observa una subdivisión de pasos a realizarse para reproducir el fenómeno mencionado:

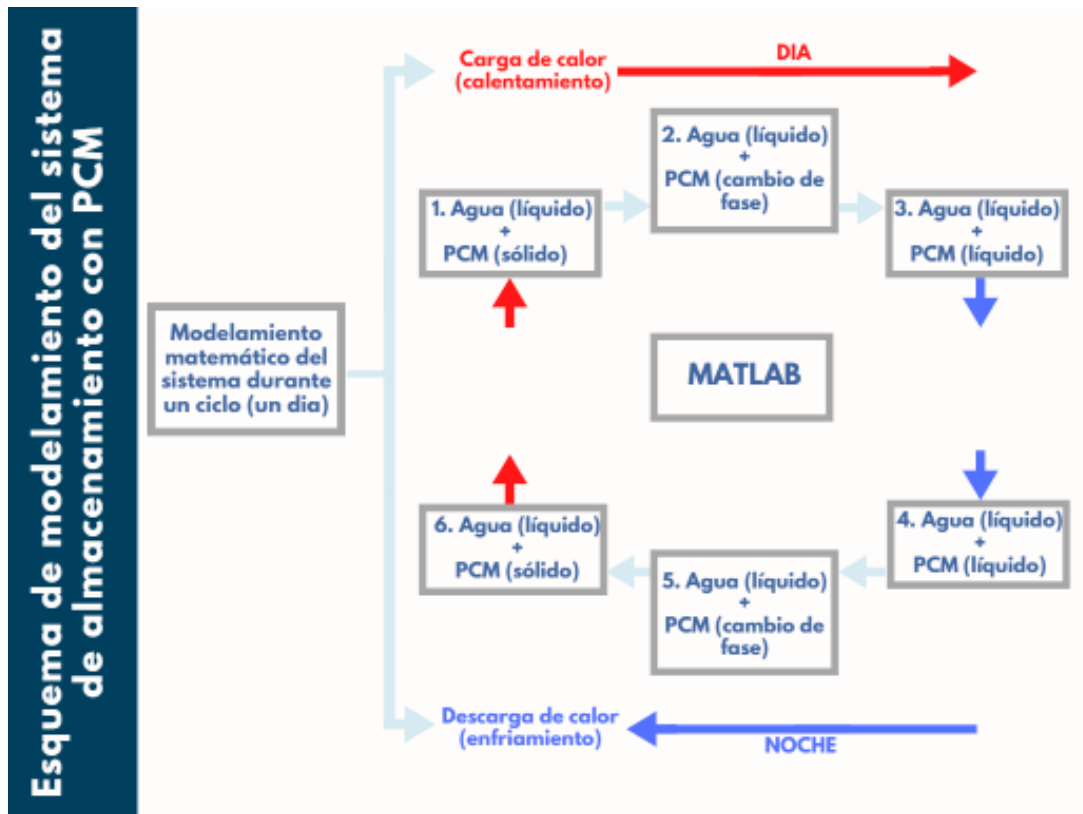


Figura 2.17 - Esquema de modelamiento de un sistema de almacenamiento para un ciclo.

Fuente: (Propia)

Para el proceso de enfriamiento de agua (modo noche) se consideran 3 escenarios: primero, enfriamiento de agua con PCM en estado sólido, segundo, enfriamiento de agua con PCM en cambio de fase y finalmente, el enfriamiento de agua con PCM en estado líquido.

Para los procesos de estado sólido y líquido se hace uso de la función de transferencia de Matlab para evaluar el comportamiento del sistema y su temperatura en función del tiempo.

El modelamiento matemático del sistema se plantea a partir de un balance de energías dado por la ecuación 7.

Balance de energías

$$Q_{gen} + Q_{in} - Q_{out} = (m_w * Cp_w + ro * m_w * Cp_p) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7)$$

Ecuación 7. Balance de energías.

Fuente: (Incropera & DeWitt, 1999).

$$Q_{gen} - \frac{T - T_{inf}}{R_{eq}} = (m_w * Cp_w + ro * m_w * Cp_p) \frac{\partial T}{\partial t}$$

Aplicación de función de planta se tiene como señal de entrada el calor ingresado y como señal de salida o respuesta del sistema en incremento de la temperatura de acuerdo con la Figura 2.18 - Función de planta. Para expresar la función de planta como función de transferencia se lo realiza mediante la ecuación 8, mediante el desarrollo del balance de energías y la función de transferencia se puede determinar la ecuación 9 donde se expresa la relación de las variables que modelan el comportamiento del sistema.

La evaluación de la función de transferencia se la realiza mediante la función Impulse de MATLAB, donde es necesario introducir la cantidad de calor requerida para elevar la temperatura de la masa de agua y PCM hasta los 80 °C para luego encontrarse sometida a enfriamiento, proceso en el que se observa el cambio de temperatura del sistema en función del tiempo.



Figura 2.18 - Función de planta.

Fuente: (Propia)

$$G(s) = \frac{\text{Salida}}{\text{Entrada}}$$

$$G(s) = \frac{T(s)}{Q_{gen}(s)} \quad (8)$$

Ecuación 8 - Función de transferencia.

Fuente: (Propia)

$$Q_{gen}(s) - \frac{T(s)}{R_{eq}} = (m_w * Cp_w + ro * m_w * Cp_p) * T(s) * s$$

$$Q_{gen}(s) = T(s) * \left[(m_w * Cp_w + ro * m_w * Cp_p) * s + \frac{1}{R_{eq}} \right]$$

$$\frac{T(s)}{Q_{gen}(s)} = \frac{1}{(m_w * Cp_w + r_o * m_w * Cp_p) * s + \frac{1}{R_{eq}}}$$

$$G(s) = \frac{1}{(m_w * Cp_w + r_o * m_w * Cp_p) * s + \frac{1}{R_{eq}}} \quad (9)$$

Ecuación 9 - Ecuación final para la función de transferencia.

Fuente: (Propia)

2.7. Validación experimental del modelo matemático para almacenamiento energético con materiales de cambio de fase en depósitos de agua.

Para la validación experimental del modelo matemático se procedió a realizar el análisis de acuerdo con el esquema planteado en la Figura 2.19 - Calor almacenado en el sistema a lo largo de procesos cíclicos de calentamiento y enfriamiento.

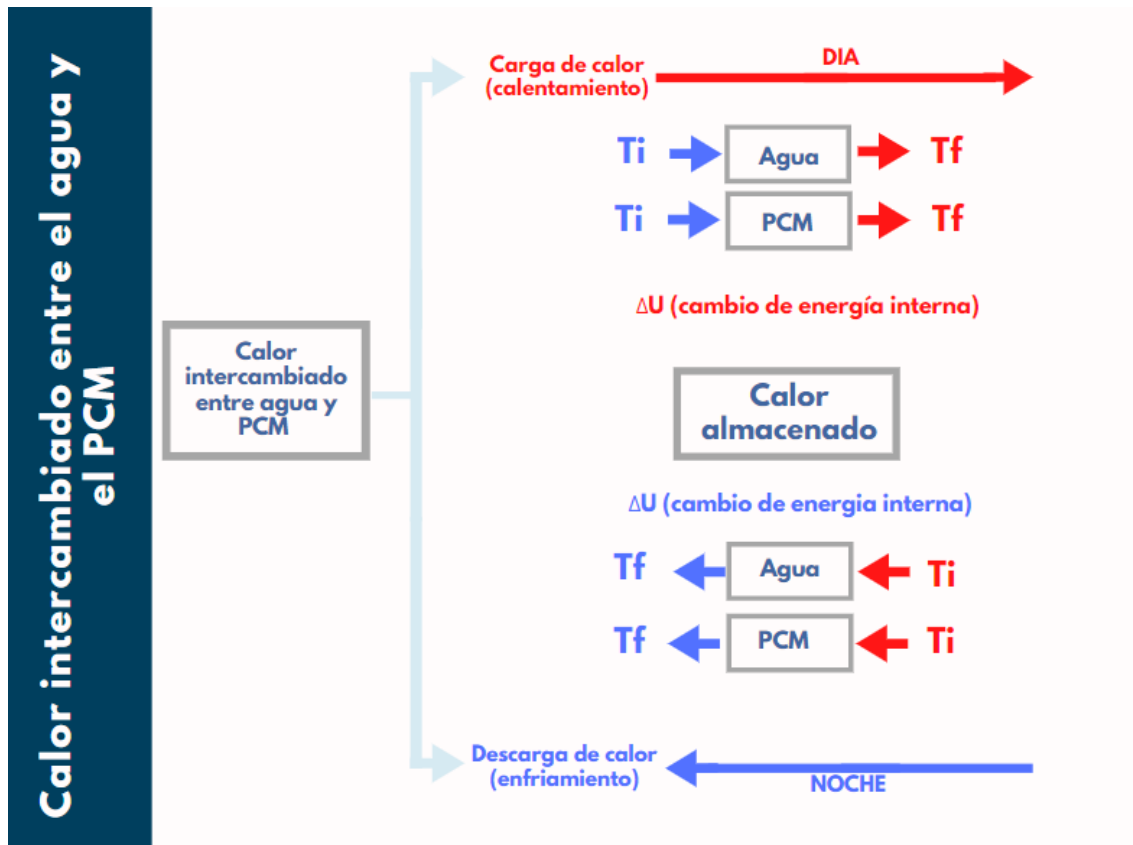


Figura 2.19 - Calor almacenado en el sistema a lo largo de procesos cíclicos de calentamiento y enfriamiento.

Fuente: (Propia)

3. Resultados y discusión.

A partir de la experimentación llevada a cabo con una repetibilidad de 3 veces para cada ensayo a analizar, se recolectó los datos de temperatura que describen el proceso de enfriamiento del sistema (agua y PCM), para todos los ensayos se trabajó con una escala de tiempo de 100 minutos.

3.1. Análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo matemático para almacenamiento energético con materiales de cambio de fase en depósitos de agua.

Una vez almacenado los datos experimentales se procedió a la construcción de curvas de enfriamiento que describen el comportamiento térmico del sistema, como se observa en la Figura 3.1 - Curvas de enfriamiento (experimental). A partir de los datos obtenidos se realizó las respectivas simulaciones que permitan conocer las variables necesarias para realizar los análisis de sensibilidad.

Mediante de los datos de temperaturas obtenidas en la Figura 3.1 - Curvas de enfriamiento (experimental), se crea un bucle mediante el uso de la función FOR de Matlab Anexo I - Bucle FOR Matlab R 2020A, con el objetivo de cuantificar el cambio de temperatura por minuto, al realizar éste procedimiento se obtuvo la Figura 3.2 - Velocidad de enfriamiento del sistema donde se puede apreciar la variación de temperatura en °C/min expresado mediante una señal digital.

Mediante de los datos de temperaturas obtenidas en la Figura 3.1 - Curvas de enfriamiento (experimental), se realiza un análisis de sensibilidad sobre el enfriamiento del sistema clasificado en 3 secciones:

- PCM en estado líquido (inicial).
- PCM durante cambio de fase (intermedio).
- PCM en estado sólido (final).

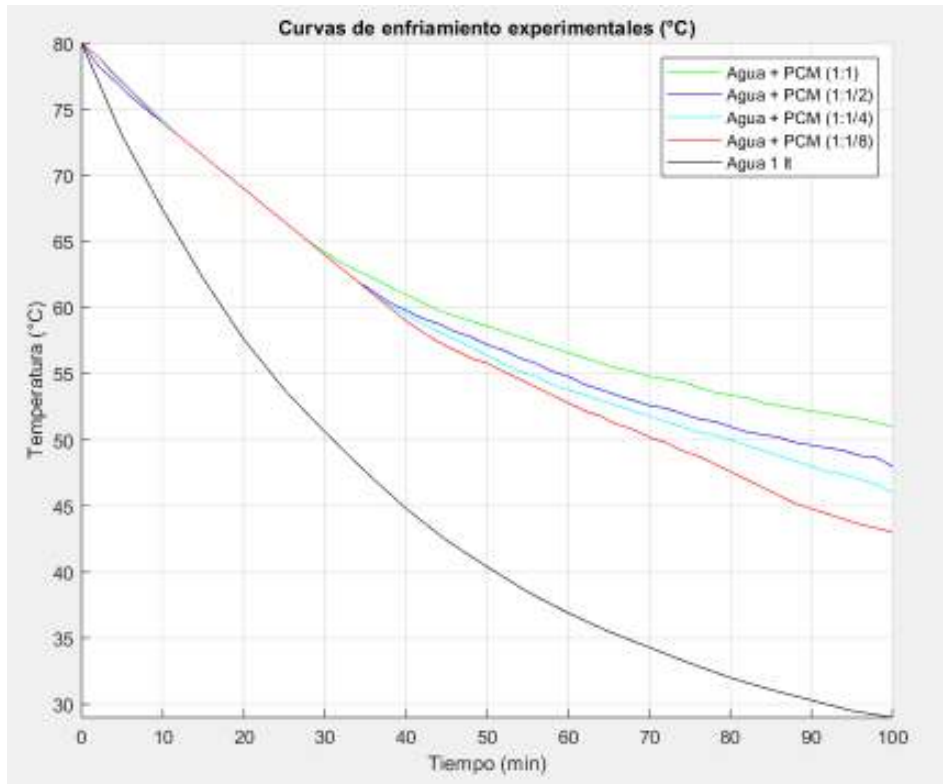


Figura 3.1 - Curvas de enfriamiento (experimental)

Fuente: (MathWorks 2020)

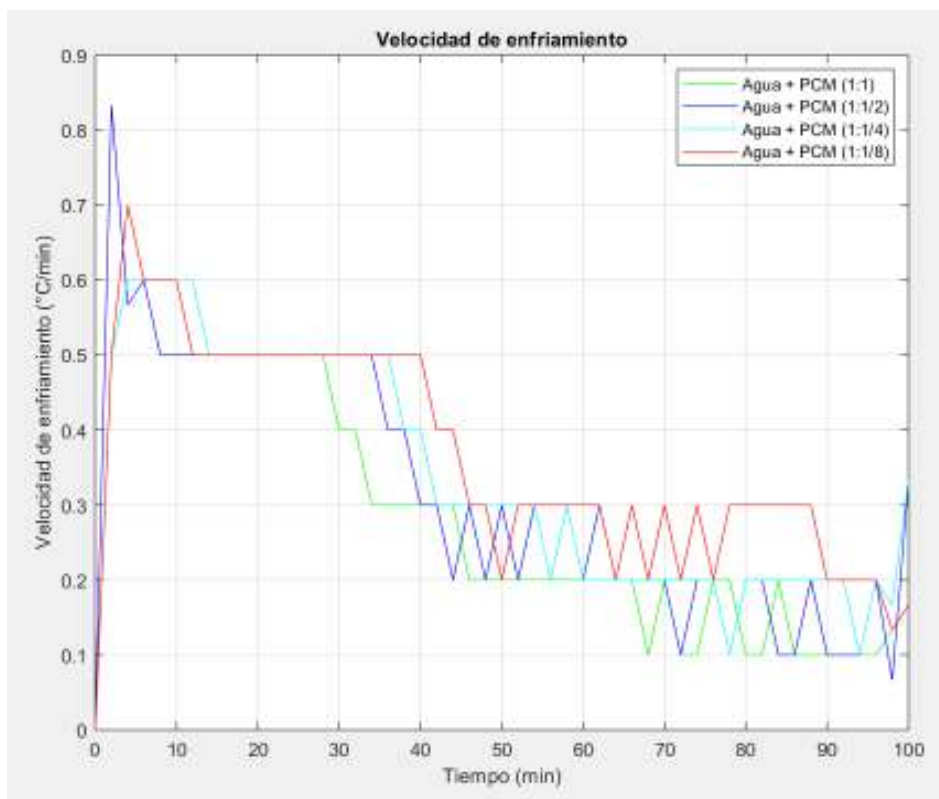


Figura 3.2 - Velocidad de enfriamiento del sistema

Fuente: (MathWorks 2020)

Mediante el uso de función de transferencia y la función impulse de Matlab se construye la dinámica de las gráficas del sistema térmico que se asemeje a los valores encontrados experimentalmente y de esta forma lograr obtener los parámetros bajo los cuales se produce el experimento en cada caso.

3.1.1. Análisis de sensibilidad de sistema con PCM en estado líquido (inicial).

La construcción de las curvas para la etapa inicial se realizó mediante la creación de modelos de función de transferencia en Matlab las cuales tendrían aproximación con el comportamiento observado en los datos experimentales.

En la Figura 3.3 - Curva de enfriamiento general (etapa inicial) se observa el acercamiento de las gráficas modeladas matemáticamente al comportamiento experimental aplicada a las 5 configuraciones de trabajo.

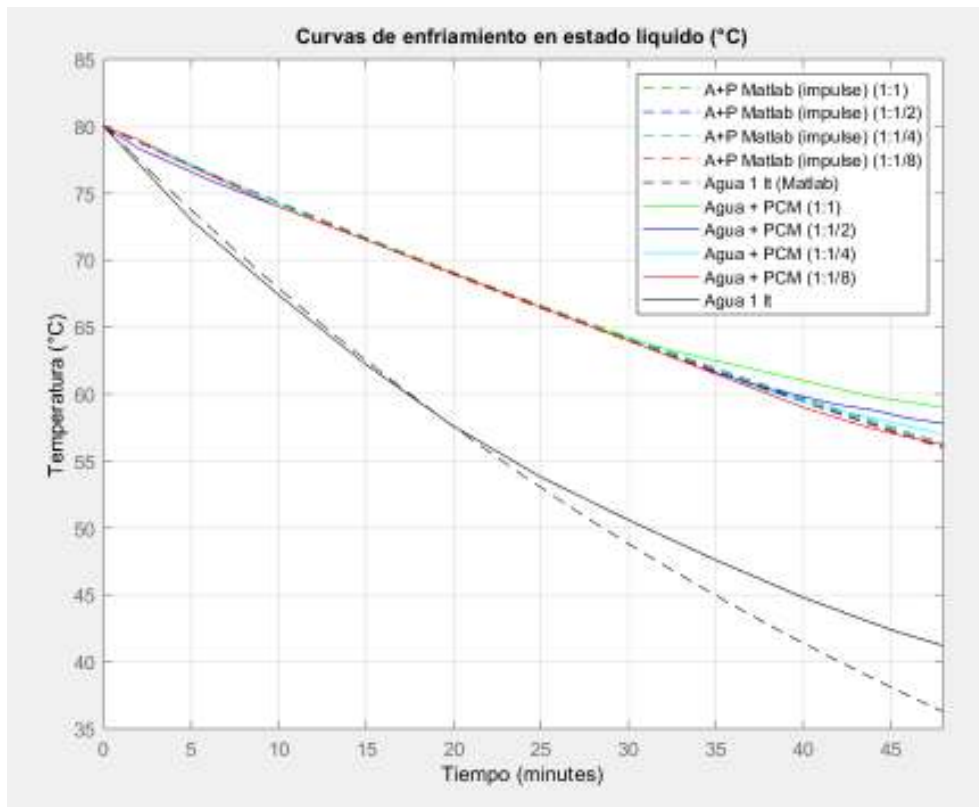


Figura 3.3 - Curva de enfriamiento general (etapa inicial)

Fuente: (MathWorks 2020)

Al analizar los valores que rigen el comportamiento del modelo matemático de la Figura 3.4 - Curva de enfriamiento 1:1 (etapa inicial) para las cantidades de 1 kg de agua y 1 kg de PCM, se requirió una potencia de 147 W, se obtuvo una resistencia térmica de 1.24 °C/W, un coeficiente global de transferencia de calor de 7.8750 W/m²°C.

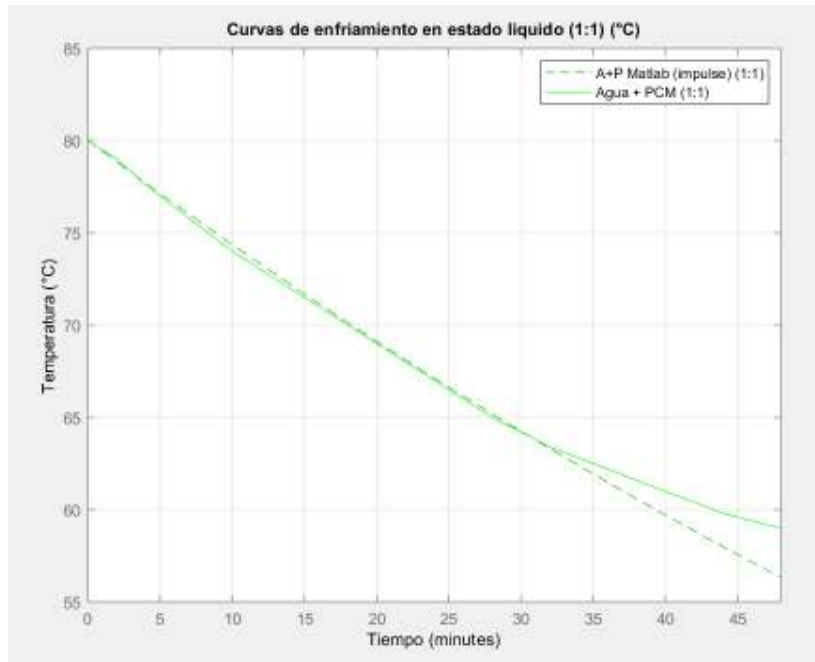


Figura 3.4 - Curva de enfriamiento 1:1 (etapa inicial)

Fuente: (MathWorks 2020)

Al analizar los valores que rigen el comportamiento del modelo matemático de la Figura 3.5 - Curva de enfriamiento 1:1/2 (etapa inicial) para las cantidades de 1 kg de agua y 0.5 kg de PCM, se requirió una potencia de 120 W, se obtuvo una resistencia térmica de 1.5 °C/W, un coeficiente global de transferencia de calor de 7.4996 W/m²°C.

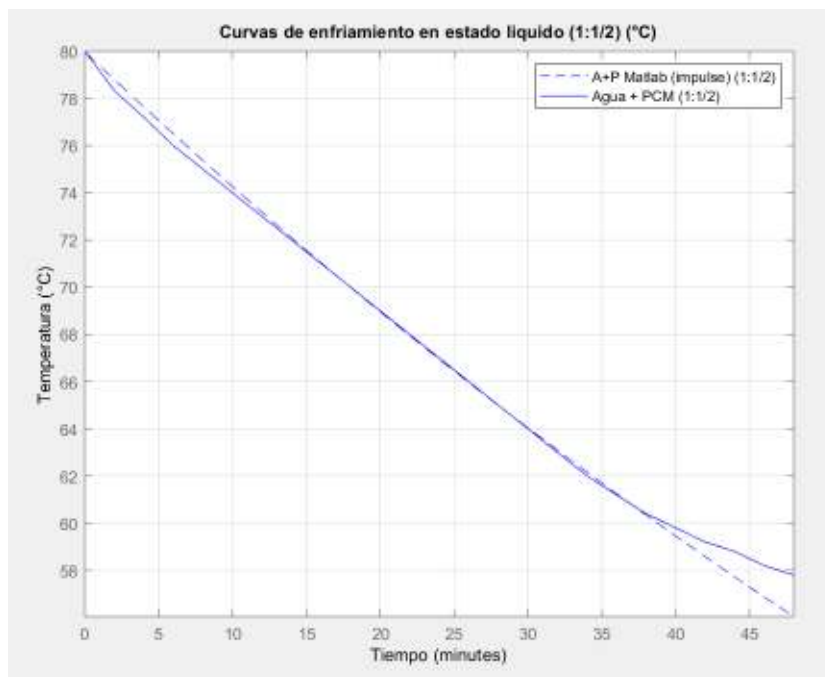


Figura 3.5 - Curva de enfriamiento 1:1/2 (etapa inicial)

Fuente: (MathWorks 2020)

Al analizar los valores que rigen el comportamiento del modelo matemático de la Figura 3.6 - Curva de enfriamiento 1:1/4 (etapa inicial) para las cantidades de 1 kg de agua y 0.25 kg de PCM, se requirió una potencia de 106.4 W, se obtuvo una resistencia térmica de 1.7 °C/W, un coeficiente global de transferencia de calor de 7.1629 W/m²°C.

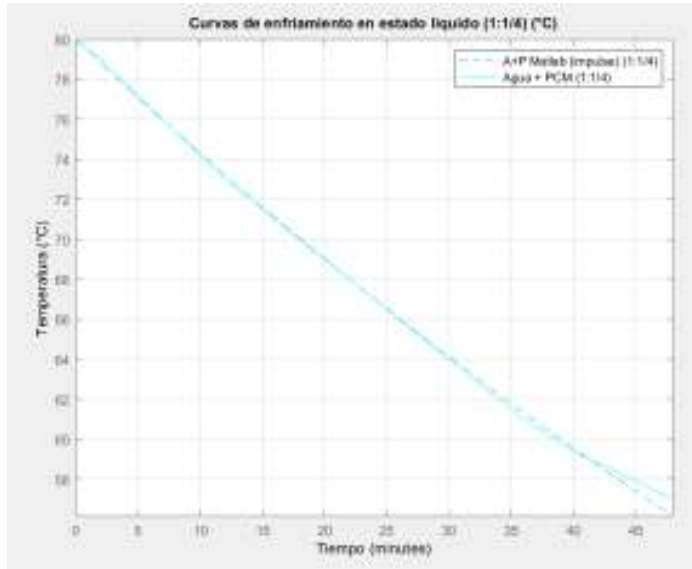


Figura 3.6 - Curva de enfriamiento 1:1/4 (etapa inicial)

Fuente: (MathWorks 2020)

Al analizar los valores que rigen el comportamiento del modelo matemático de la Figura 3.7 - Curva de enfriamiento 1:1/8 (etapa inicial) para las cantidades de 1 kg de agua y 0.125 kg de PCM, se requirió una potencia de 99.6 W, se obtuvo una resistencia térmica de 1.8 °C/W, un coeficiente global de transferencia de calor de 7.0545 W/m²°C.

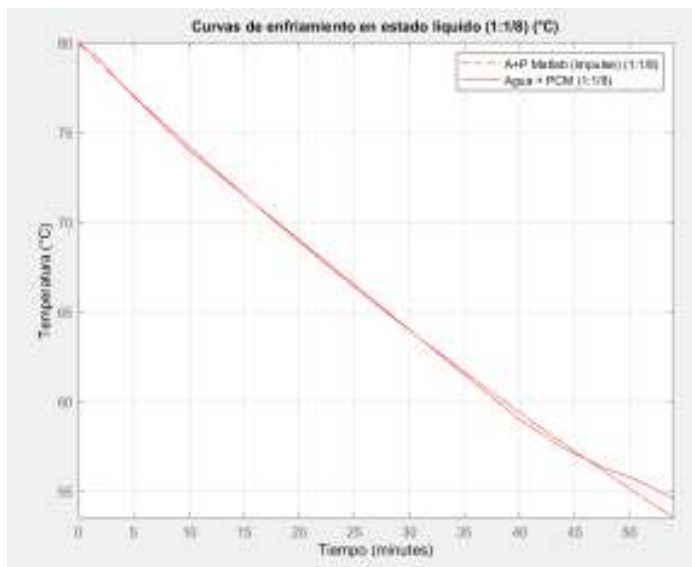


Figura 3.7 - Curva de enfriamiento 1:1/8 (etapa inicial)

Fuente: (MathWorks 2020)

Al analizar los valores que rigen el comportamiento del modelo matemático de la Figura 3.8 - Curva de enfriamiento 1 lt de agua (etapa inicial) para la cantidad de 1 kg de agua, se requirió una potencia de 93 W, se obtuvo una resistencia térmica de 0.86 °C/W, un coeficiente global de transferencia de calor de 15.4255 W/m²°C.

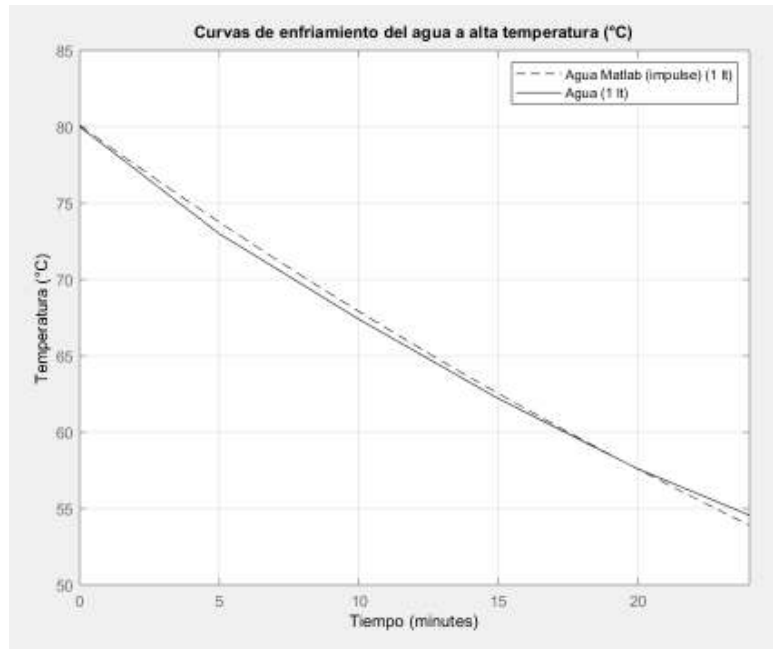


Figura 3.8 - Curva de enfriamiento 1 lt de agua (etapa inicial)

Fuente: (MathWorks 2020)

3.1.2. Análisis de sensibilidad de sistema con PCM durante cambio de fase (intermedio).

La construcción de las curvas para la etapa intermedia se realizó mediante la creación de modelos de función de transferencia en Matlab las cuales tendrían aproximación con el comportamiento observado en los datos experimentales.

En la Figura 3.9 - Curva de enfriamiento general (etapa Intermedia) se observa el acercamiento de las gráficas modeladas matemáticamente al comportamiento experimental aplicada a las 5 configuraciones de trabajo.

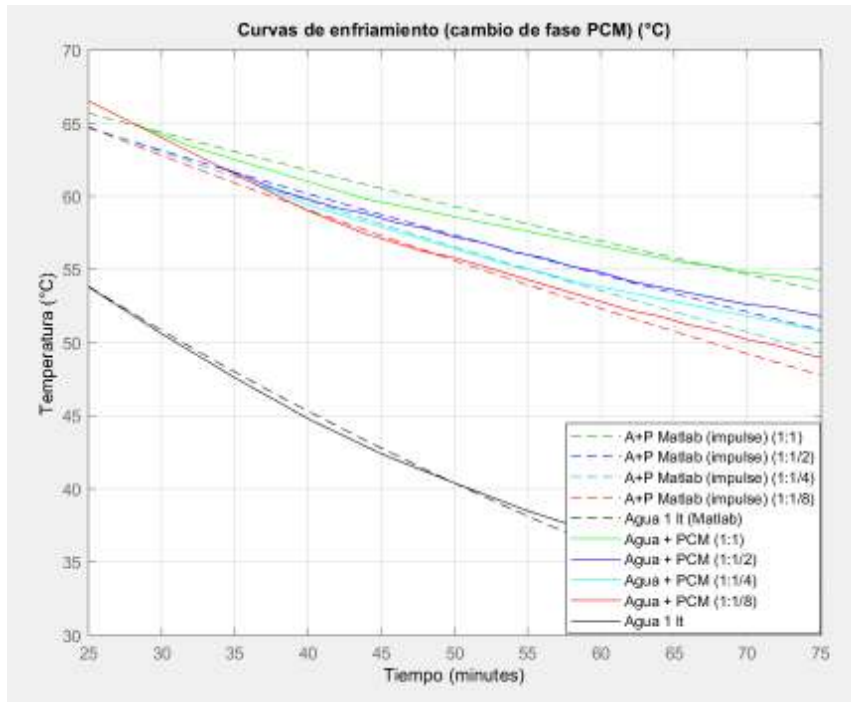


Figura 3.9 - Curva de enfriamiento general (etapa Intermedia)

Fuente: (MathWorks 2020)

Al analizar los valores que rigen el comportamiento del modelo matemático de la Figura 3.10 - Curva de enfriamiento 1:1 (etapa intermedia) para las cantidades de 1 kg de agua y 1 kg de PCM, se obtuvo una resistencia térmica de $2.2 \text{ }^\circ\text{C/W}$, un coeficiente global de transferencia de calor de $4.4387 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$.

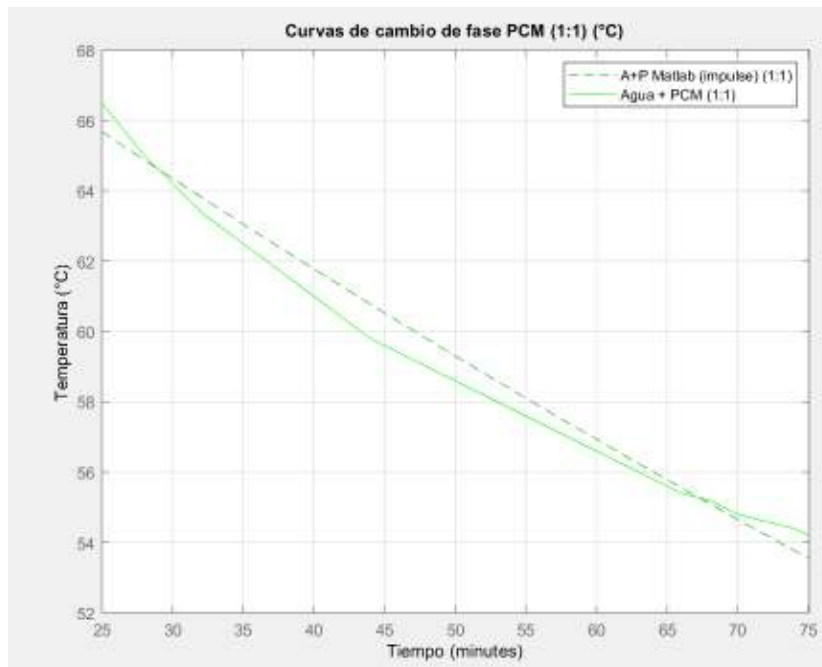


Figura 3.10 - Curva de enfriamiento 1:1 (etapa intermedia)

Fuente: (MathWorks 2020)

Al analizar los valores que rigen el comportamiento del modelo matemático de la Figura 3.11 - Curva de enfriamiento 1:1/2 (etapa intermedia) para las cantidades de 1 kg de agua y 0.5 kg de PCM, se obtuvo una resistencia térmica de 2.3 °C/W, un coeficiente global de transferencia de calor de 4.8910 W/m²°C.

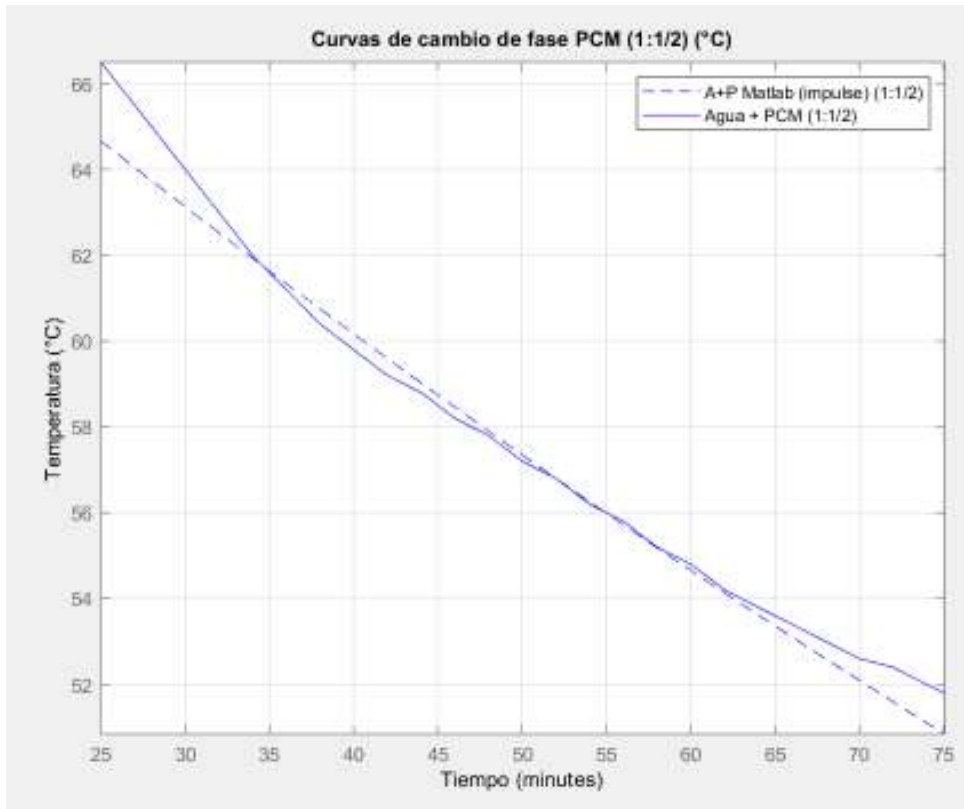


Figura 3.11 - Curva de enfriamiento 1:1/2 (etapa intermedia)

Fuente: (MathWorks 2020)

Al analizar los valores que rigen el comportamiento del modelo matemático de la Figura 3.12 - Curva de enfriamiento 1:1/4 (etapa intermedia) para las cantidades de 1 kg de agua y 0.25 kg de PCM, se obtuvo una resistencia térmica de 2.3 °C/W, un coeficiente global de transferencia de calor de 5.2943 W/m²°C.

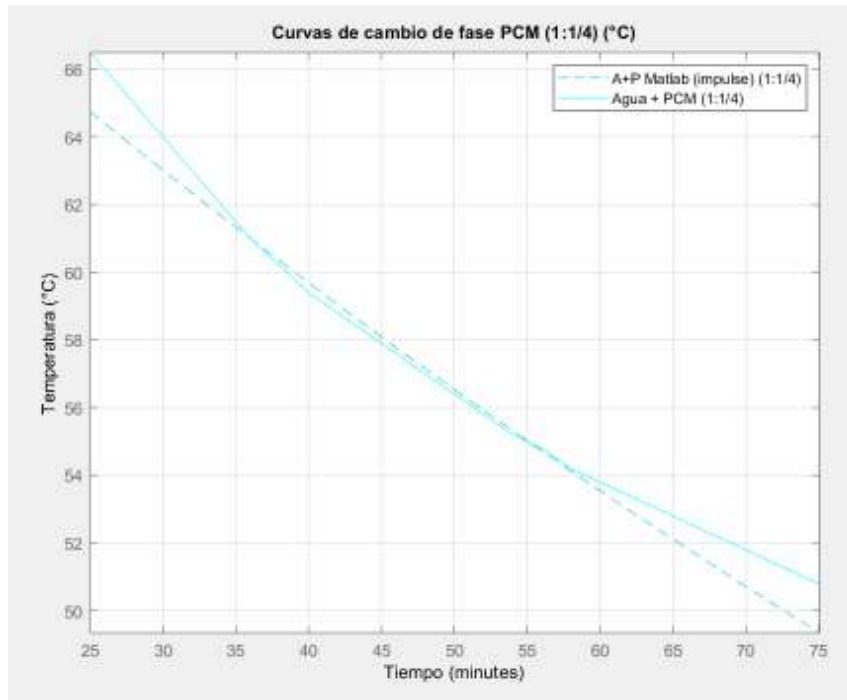


Figura 3.12 - Curva de enfriamiento 1:1/4 (etapa intermedia)

Fuente: (MathWorks 2020)

Al analizar los valores que rigen el comportamiento del modelo matemático de la Figura 3.13 - Curva de enfriamiento 1:1/8 (etapa intermedia) para las cantidades de 1 kg de agua y 0.125 kg de PCM, se obtuvo una resistencia térmica de 2.2 °C/W, un coeficiente global de transferencia de calor de 5.7719 W/m²°C.

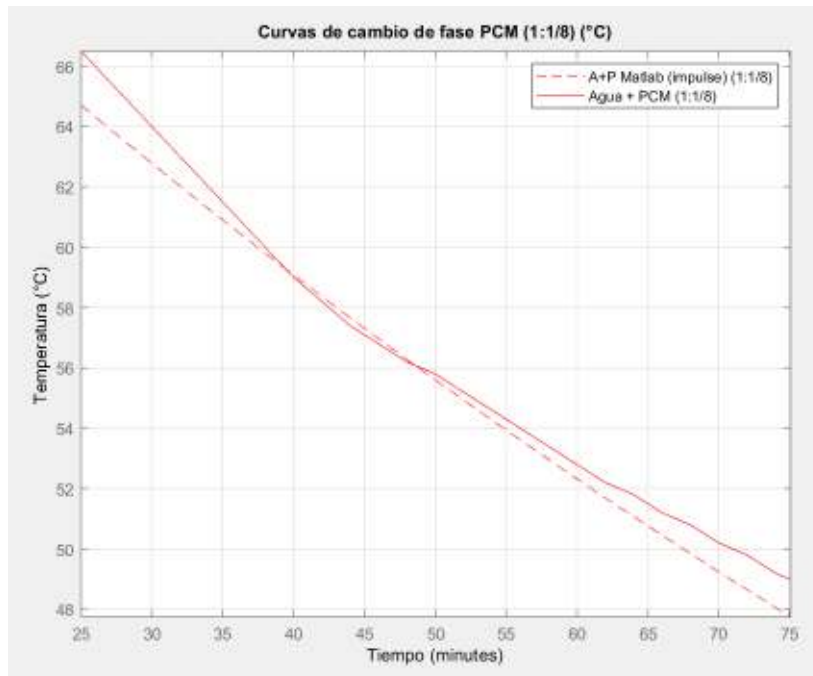


Figura 3.13 - Curva de enfriamiento 1:1/8 (etapa intermedia)

Fuente: (MathWorks 2020)

Al analizar los valores que rigen el comportamiento del modelo matemático de la Figura 3.14 - Curva de enfriamiento 1 lt de agua (etapa intermedia) para la cantidad de 1 kg de agua, se obtuvo una resistencia térmica de 1.25 °C/W, un coeficiente global de transferencia de calor de 10.6128 W/m²°C.

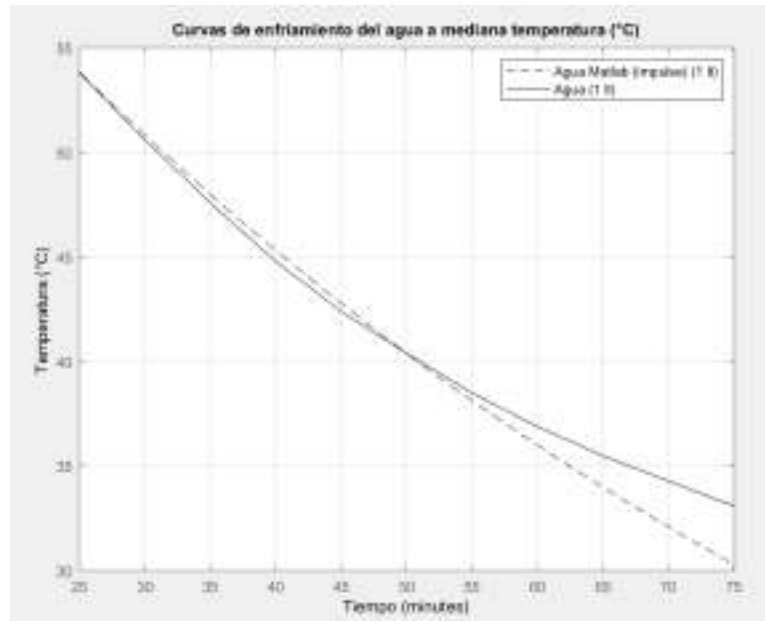


Figura 3.14 - Curva de enfriamiento 1 lt de agua (etapa intermedia)

Fuente: (MathWorks 2020)

3.1.3. Análisis de sensibilidad de sistema con PCM en estado sólido (final).

La construcción de las curvas para la etapa final se realizó mediante la creación de modelos de función de transferencia en Matlab las cuales tendrían aproximación con el comportamiento observado en los datos experimentales.

En la Figura 3.15 - Curva de enfriamiento general (etapa final) se observa el acercamiento de las gráficas modeladas matemáticamente al comportamiento experimental aplicada a las 5 configuraciones de trabajo.

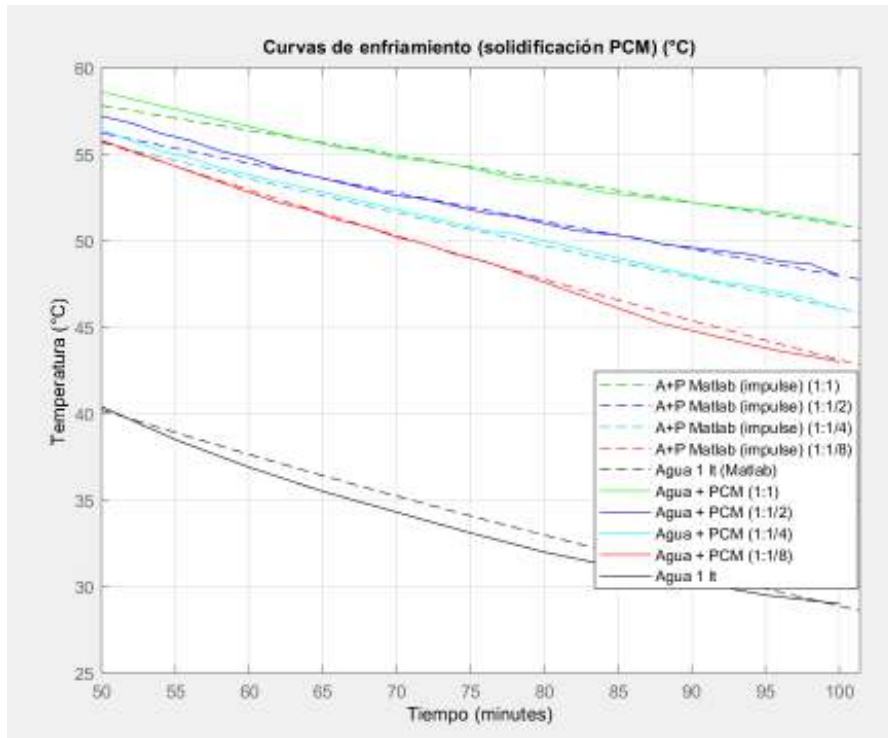


Figura 3.15 - Curva de enfriamiento general (etapa final)

Fuente: (MathWorks 2020)

Al analizar los valores que rigen el comportamiento del modelo matemático de la Figura 3.16 - Curva de enfriamiento 1:1 (etapa final) para las cantidades de 1 kg de agua y 1 kg de PCM, se obtuvo una resistencia térmica de $3.5 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$, un coeficiente global de transferencia de calor de $2.79 \text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

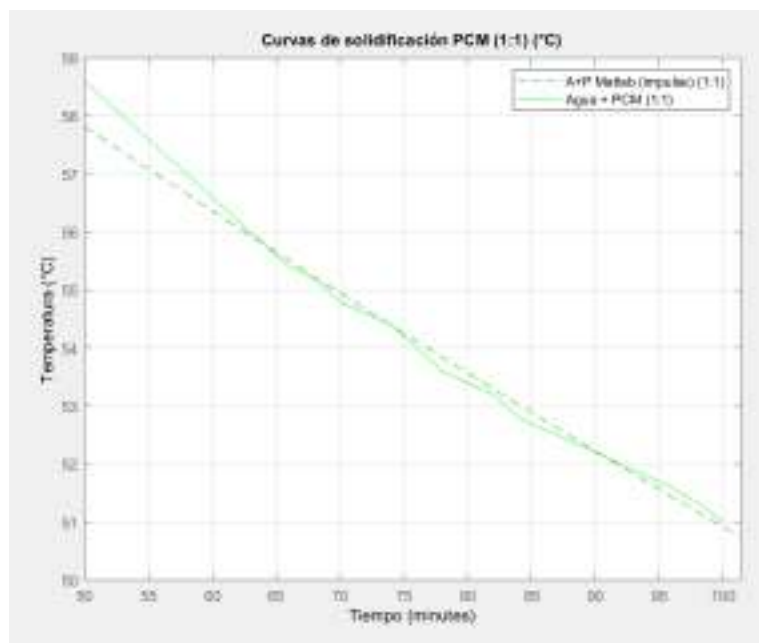


Figura 3.16 - Curva de enfriamiento 1:1 (etapa final)

Fuente: (MathWorks 2020)

Al analizar los valores que rigen el comportamiento del modelo matemático de la Figura 3.17 - Curva de enfriamiento 1:1/2 (etapa final) para las cantidades de 1 kg de agua y 0.5 kg de PCM, se obtuvo una resistencia térmica de 3.46 °C/W, un coeficiente global de transferencia de calor de 3.2513W/m²°C.

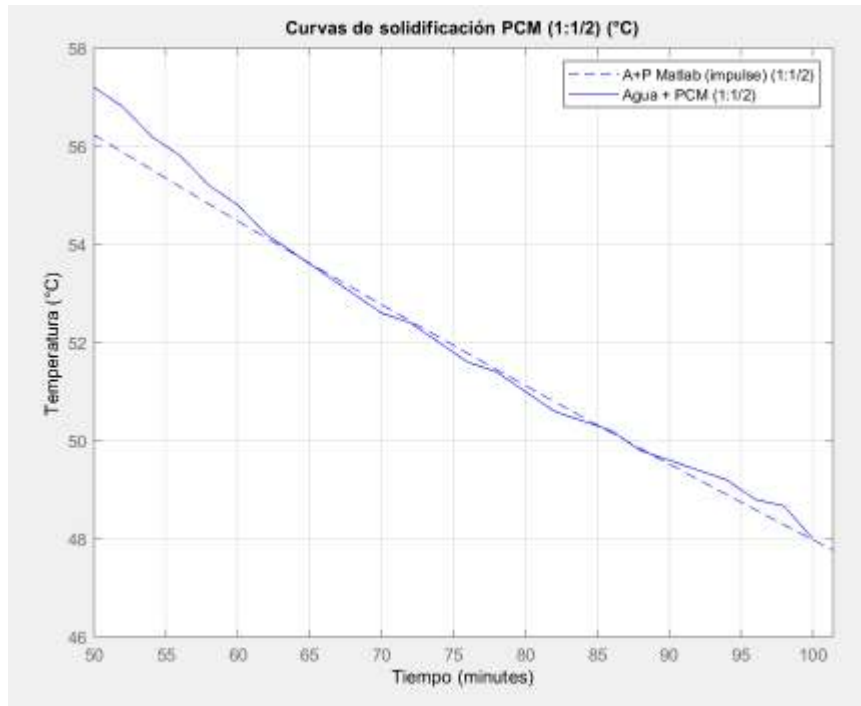


Figura 3.17 - Curva de enfriamiento 1:1/2 (etapa final)

Fuente: (MathWorks 2020)

Al analizar los valores que rigen el comportamiento del modelo matemático de la Figura 3.18 - Curva de enfriamiento 1:1/4 (etapa final) para las cantidades de 1 kg de agua y 0.25 kg de PCM, se obtuvo una resistencia térmica de 3.3 °C/W, un coeficiente global de transferencia de calor de 3.69 W/m²°C.

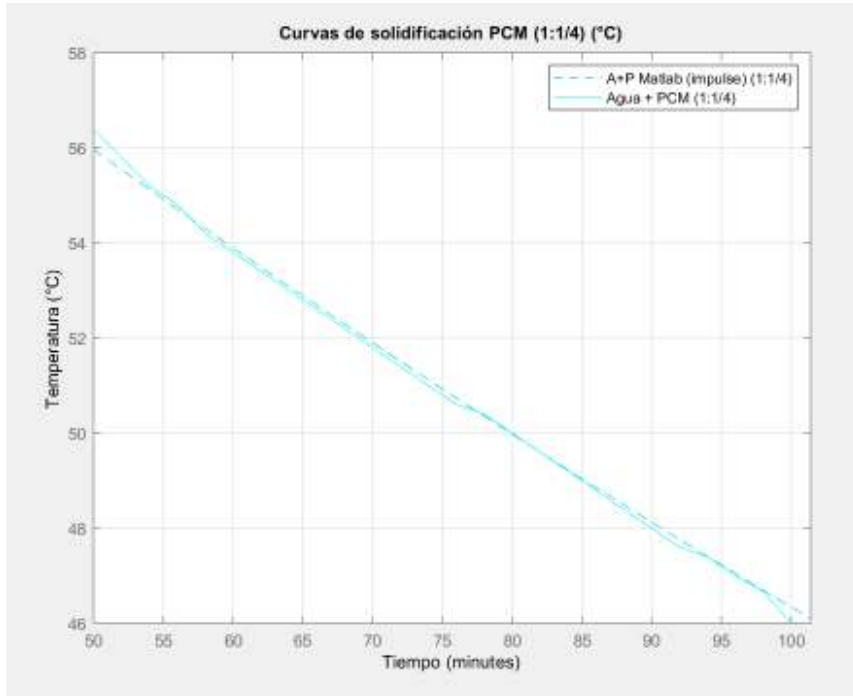


Figura 3.18 - Curva de enfriamiento 1:1/4 (etapa final)

Fuente: (MathWorks 2020)

Al analizar los valores que rigen el comportamiento del modelo matemático de la Figura 3.19 - Curva de enfriamiento 1:1/8 (etapa final) para las cantidades de 1 kg de agua y 0.125 kg de PCM, se obtuvo una resistencia térmica de 2.6 °C/W, un coeficiente global de transferencia de calor de 4.8839 W/m²°C.

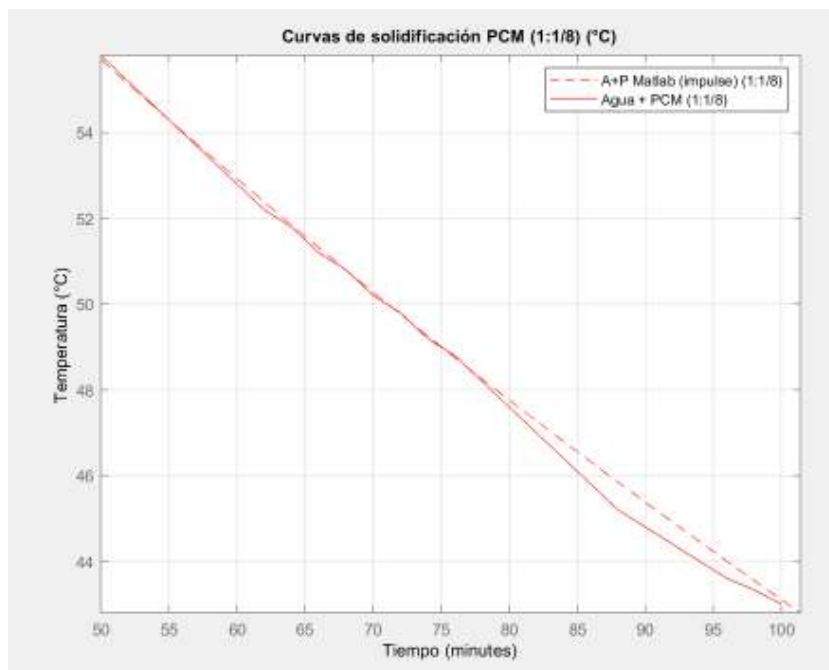


Figura 3.19 - Curva de enfriamiento 1:1/8 (etapa final)

Fuente: (MathWorks 2020)

Al analizar los valores que rigen el comportamiento del modelo matemático de la Figura 3.20 - Curva de enfriamiento 1 lt de agua (etapa final) para las cantidades de 1 kg de agua, se obtuvo una resistencia térmica de 2.17 °C/W, un coeficiente global de transferencia de calor de 6.1133 W/m²°C.

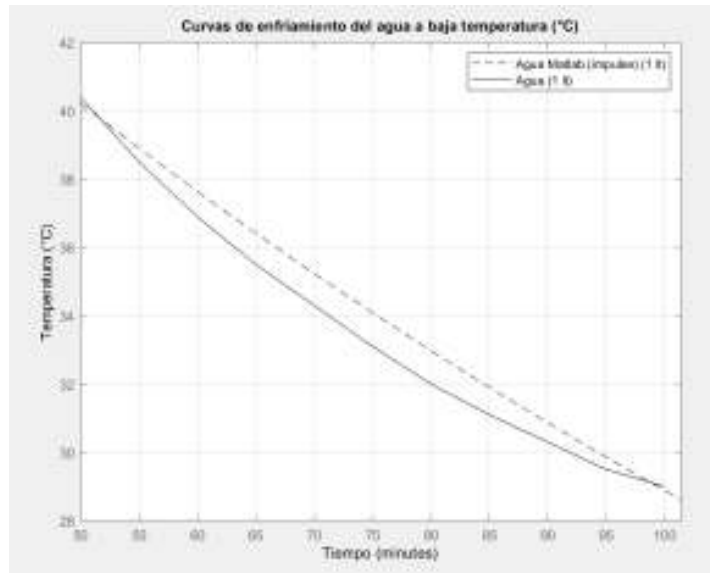


Figura 3.20 - Curva de enfriamiento 1 lt de agua (etapa final)

Fuente: (MathWorks 2020)

3.2. Evaluación de resistencia térmica, coeficiente U, la eficiencia térmica, para diferentes configuraciones, de los parámetros caracterizados.

Para poder cuantificar la tasa de energía que se transfiere al medio ambiente es necesario determinar los valores que adquiere la resistencia térmica Figura 3.21 - Variación de la resistencia térmica equivalente a lo largo del tiempo para cada configuración, esta se obtiene al realizar el ajuste de la simulación hacia los valores experimentales.

El cálculo del coeficiente global de transferencia de calor Figura 3.22 - Variación del coeficiente global de transferencia de calor (Incropera & DeWitt, 1999), se lo realizó a partir del valor de la resistencia térmica y la relación que esta posee con el área de intercambio térmico de acuerdo a la Ecuación 10.

$$U = \frac{1}{R_{eq} * A} \quad (10)$$

Ecuación 10 - Coeficiente global de transferencia de calor

Fuente: (Incropera & DeWitt, 1999).

Donde:

- U = Coeficiente global de transferencia de calor $W/m^2 \text{ } ^\circ C$.
- R_{eq} = Resistencia equivalente del sistema $^\circ C/W$.
- A = Area de intercambio térmico m^2 .

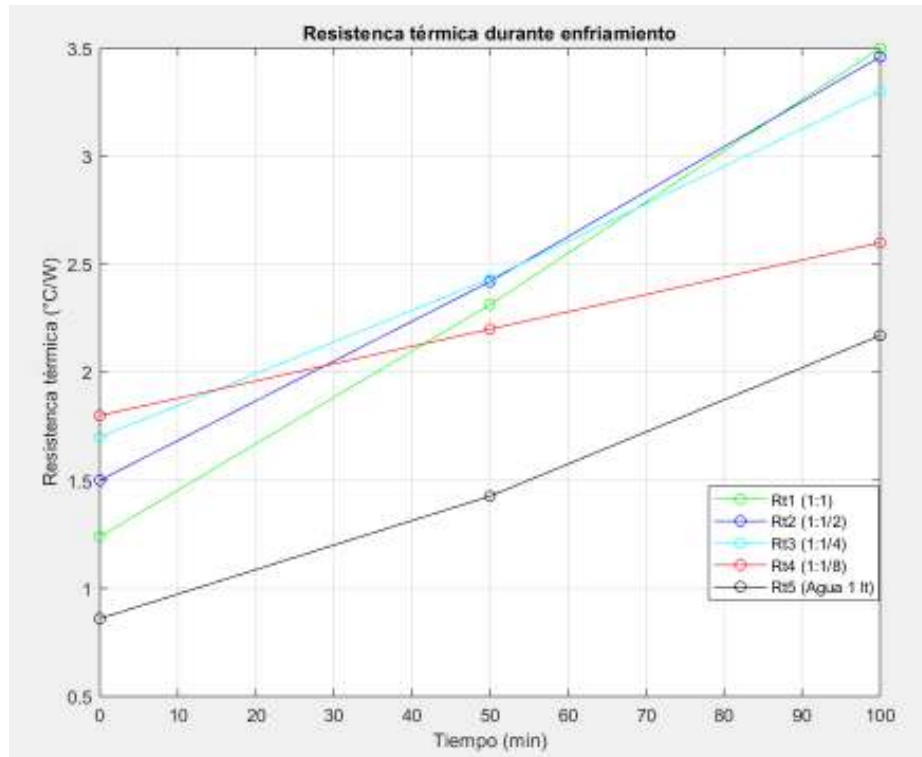


Figura 3.21 - Variación de la resistencia térmica

Fuente: (MathWorks 2020)

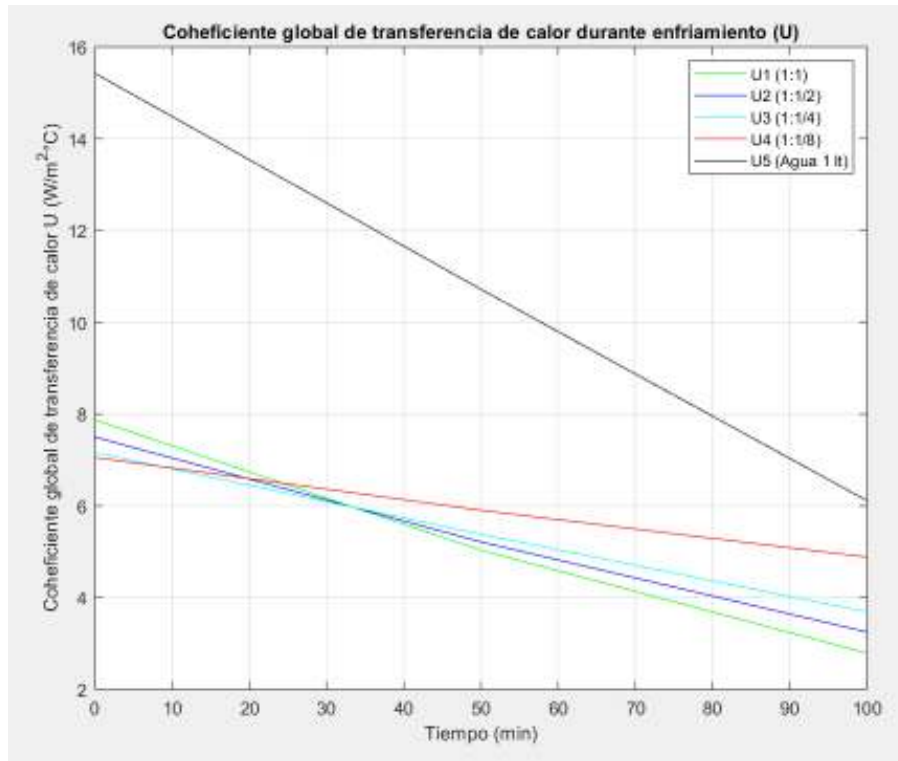


Figura 3.22 - Variación del coeficiente global de transferencia de calor

Fuente: (MathWorks 2020)

En base a las temperaturas obtenidas experimentalmente, las propiedades y parámetros utilizados para la experimentación se elaboró la Figura 3.23 - Balance de energía para cada configuración para un tiempo de 100 minutos, donde se plantea el balance de energía producido a lo largo de 100 minutos para las configuraciones de trabajo planteadas anteriormente.

En la primera columna se observa la cantidad de calor requerida para llevar a cada sistema al punto de inicio, en la segunda columna se tiene la cantidad de calor perdido al en ambiente y en la tercera columna señala la cantidad de calor que posee el agua después de 100 minutos para cada caso.

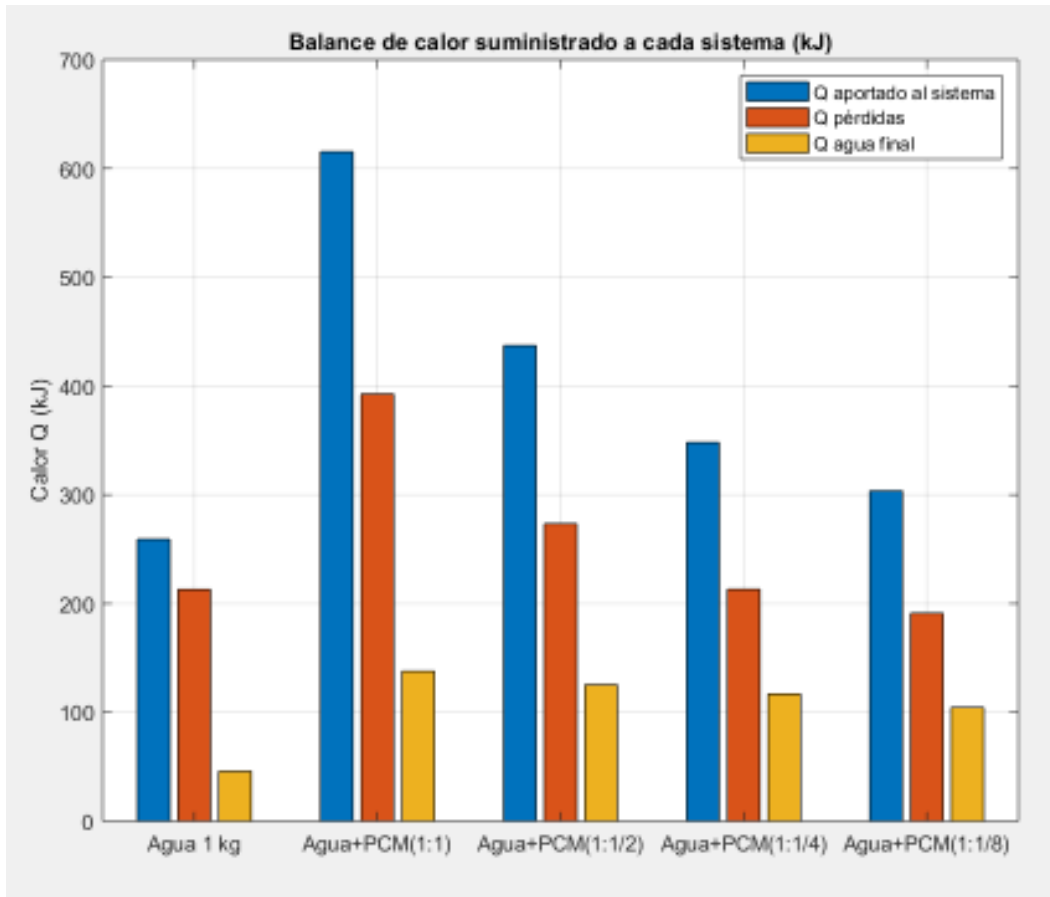


Figura 3.23 - Balance de energía para cada configuración para un tiempo de 100 minutos

Fuente: (MathWorks 2020)

Al analizar los resultados obtenidos en la Figura 3.23 - Balance de energía para cada configuración para un tiempo de 100 minutos, se tiene que la relación de agua y PCM presenta un buen comportamiento cuando la proporción es de 1:1/4, la cantidad de calor almacenada en el agua se conserva cuando la masa del PCM es la cuarta parte de la masa del agua, en este punto el calor suministrado al sistema es aproximadamente el doble del calor almacenado en el agua.

Cuando se aumenta la relación de agua y PCM a la proporción de 1:1 el calor suministrado al sistema es aproximadamente el cinco veces el calor almacenado en el agua, lo cual indica que esta relación no es beneficiosa porque no se logra un buen aprovechamiento de la energía. Cuando se elimina la cantidad de PCM y solamente se trabaja con 1 kg de agua se observa que el calor suministrado al sistema es aproximadamente el cuatro veces el calor almacenado en el agua, lo cual indica que esta relación no es beneficiosa porque se pierde energía fácilmente a lo largo del enfriamiento.

3.3. Generación de una base de datos que almacene la información de las propiedades y resultados obtenidos.

A partir de los ensayos realizados y la determinación de parámetros de funcionamiento se logró recopilar los valores de las variables utilizadas en cada ensayo y así también se recolectó los resultados en la Tabla 3.1 - Base de datos final.

Tabla 3.1 - Base de datos final.

Propiedades	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5
Relación Agua: PCM	1:1 (kg)	1:1/2 (kg)	1:1/4 (kg)	1:1/8 (kg)	1:0 (kg)
Ti (°C)	80	80	80	80	80
Tf (°C)	51	48	46	43	29
P (W)	147	120	106.4	99.6	93
Rt1 (°C/W)	1.24	1.5	1.7	1.8	0.86
Rt2 (°C/W)	2.2	2.3	2.3	2.2	1.25
Rt3 (°C/W)	3.5	3.46	3.3	2.6	2.17
U1 (W/m ² °C)	7.8750	7.4996	7.1629	7.0545	15.4255
U2 (W/m ² °C)	4.4387	4.8910	5.2943	5.7719	10.6128
U3 (W/m ² °C)	2.7900	3.2513	3.6900	4.8839	6.1133
A (cm ²)	1024.06	888.94	821.23	787.52	753.81
V (cm ³)	2250	1625	1312.5	1156.25	1000
Qin (kJ)	615.31	437.23	348.2	303.68	259.16
Qp (kJ)	392.72	273.36	213.2	191.16	342.76
Qf (kJ)	137.94	125.4	117.04	104.5	45.98
n (%)	22.41	28.68	33.61	34.41	17.74

Fuente: (MathWorks 2020)

(Elaboración: Propia)

4. Conclusiones y recomendaciones.

4.1. Conclusiones

En el presente trabajo se estudió las diferentes tipologías de PCMs aplicados a sistemas de almacenamiento térmico en aplicaciones solares, conociendo las diferentes categorías de aplicación, ventajas y desventajas, para finalmente lograr la selección del material más apropiado para procesos de calentamiento de agua con almacenamiento térmico, seleccionando la parafina como el material de trabajo, se consideró el más apropiado al poseer buena relación en características y

propiedades como: punto de fusión, capacidad de almacenamiento, disponibilidad, costo, observadas en la Tabla 2.5 - Propiedades termofísicas de cera de parafina alcanzando el objetivo propuesto.

Se realizó un análisis comparativo entre los avances en investigación realizados a nivel global y en América latina sobre sistemas de almacenamiento térmico en aplicaciones solares, se pudo evidenciar que para América latina se hace uso de ceras de parafina, sales inorgánicas y ácidos como PCMs, siendo aplicados en procesos de calentamiento de agua, secado de alimentos, generación de energía y aplicaciones de construcción.

Se estructuró un protocolo de pruebas donde se realizó 5 ensayos de enfriamiento del sistema compuesto por agua y PCM el cual se calienta hasta 80 °C, punto en el cual empieza la medición de temperatura del agua durante un tiempo de 100 minutos, con base en la experimentación llevada a cabo se encontró que conforme mayor es el porcentaje de parafina en relación con la cantidad de agua, la temperatura del agua presenta un enfriamiento más lento.

El enfriamiento del sistema los para las diferentes configuraciones presenta el mismo comportamiento térmico hasta la temperatura de 62°C, en este punto se empieza a generar la solidificación superficial del PCM lo cual hace que se genere una barrera que ralentiza el proceso de enfriamiento para los sistemas que presentan mayor cantidad de PCM, produciéndose una solidificación contralada del PCM desde la superficie que está en contacto con el ambiente hasta la frontera con el agua.

Se determinó mediante un análisis de datos que la velocidad de enfriamiento es mayor cuando el sistema presenta altas temperaturas y el PCM se encuentra en estado líquido presentando velocidades de enfriamiento de hasta 0.8 °C/min, cuando el sistema se encuentra a bajos valores de temperatura y la parafina está en estado sólido las velocidades de enfriamiento varían entre 0.1 °C/min y 0.2 °C/min.

Mediante el modelamiento matemático y simulación se caracterizó los procesos termodinámicos y térmicos de almacenamiento energético llevados a cabo en los diferentes ensayos, logrando de esta manera obtener valores de resistencia térmica y a partir de estos valores

determinar el coeficiente global de transferencia de calor, el cual presenta un comportamiento óptimo cuando la masa de parafina se encuentra entre la octava y la cuarta parte de la masa de agua, puesto que en este punto se produce un equilibrio entre la energía suministrada al sistema, la transferencia de calor al ambiente y la proporción de parafina requerida. A través de la evaluación de los resultados se logró constatar la variación de parámetros fundamentales como la resistencia térmica y el coeficiente global de transferencia de calor verificando su comportamiento a lo largo del tiempo, generando constancia de las propiedades y resultados obtenidos mediante una base de datos.

4.2. Recomendaciones

Basado en la investigación realizada y la determinación de parámetros de aplicación se puede continuar la generación de nuevas ideas para calentamiento de agua sanitaria en viviendas de interés social.

Mediante los estudios y experimentos realizados sobre el uso de parafina se ha recolectado información útil para proyectos de secado solar de alimentos con almacenamiento térmico en la Facultad de Ingeniería Mecánica en la Escuela Politécnica Nacional.

Para posteriores experimentaciones es de gran interés realizar el calentamiento del sistema agua y PCM a baja velocidad, al aumentar el calor lentamente se puede apreciar cuantitativamente la influencia del sistema al aumentar la temperatura.

Mediante las variables calculadas a partir de la experimentación se puede continuar con la ejecución de simulaciones aplicadas en investigación de almacenamiento térmico con parafina, tanto para procesos de energía solar u otras aplicaciones.

Realizar ensayos de almacenamiento térmico con parafina en colectores solares de agua, realizar análisis de sensibilidad y así determinar parámetros de aplicación que rigen el comportamiento de los mismos al usar un material de cambio de fase.

Referencias bibliográficas.

- (1) Aguinaga, A., Orquera, E., Avila, C., & Hidalgo, V. (2020). Characterization of Energy Vectors, in *Solar Water Heaters with PCMs for Social Interest Housing. Proceedings of the 6th World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering*, 1–8. <https://doi.org/10.11159/icmie20.101>
- (2) Agyenim, F., Hewitt, N., Eames, P., & Smyth, M. (2010). A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 615–628. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.015>
- (3) Akgün, M., Aydin, O., & Kaygusuz, K. (2007). Experimental study on melting/solidification characteristics of a paraffin as PCM. *Energy Conversion and Management*, 48(2), 669–678. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.05.014>
- (4) Alva, G., Liu, L., Huang, X., & Fang, G. (2017). Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(October 2016), 693–706. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.021>
- (5) Ananno, A. A., Masud, M. H., Dabnichki, P., & Ahmed, A. (2020). Design and numerical analysis of a hybrid geothermal PCM flat plate solar collector dryer for developing countries. *Solar Energy*, 196(September 2019), 270–286. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.069>
- (6) Armaroli, N., & Balzani, V. (2016). Solar Electricity and Solar Fuels: Status and Perspectives in the Context of the Energy Transition. *Chemistry - A European Journal*, 22(1), 32–57. <https://doi.org/10.1002/chem.201503580>
- (7) Baddadi, S., Bouadila, S., & Guizani, A. A. (2019). Beneficial use of two packed beds of latent storage energy for the heating of a hydroponic greenhouse. *Energy Procedia*, 162, 156–163. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.04.017>
- (8) Blaabjerg, F., & Ma, K. (2017). Wind Energy Systems. *Proceedings of the IEEE*, 105(11), 2116–2131. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2695485>
- (9) Buonocore, E., Vanoli, L., Carotenuto, A., & Ulgiati, S. (2015). Integrating life cycle assessment and emergy synthesis for the evaluation of a dry steam geothermal power plant in Italy. *Energy*, 86, 476–487. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.04.048>
- (10) 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)*. 1–12. <https://doi.org/10.1115/imece2015-51865>
- (11) Cevallos-Sierra, J., & Ramos-Martin, J. (2018). Spatial assessment of the potential of renewable energy: The case of Ecuador. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(August 2017), 1154–1165. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.015>
- (12) Chandel, S. S., & Agarwal, T. (2017). Review of current state of research on energy storage, toxicity, health hazards and commercialization of phase changing materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 581–596. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.070>
- (13) Deshmukh, H. S., & Thombre, S. B. (2017). Solar distillation with single basin solar still using sensible heat storage materials. *Desalination*, 410, 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.01.030>
- (14) Dreos, A., Börjesson, K., Wang, Z., Roffey, A., Norwood, Z., Kushnir, D., & Moth-Poulsen, K. (2017). Exploring the potential of a hybrid device combining solar water heating and molecular solar thermal energy storage. *Energy and Environmental Science*, 10(3), 728–734. <https://doi.org/10.1039/c6ee01952h>
- (15) Du, K., Calautit, J., Wang, Z., Wu, Y., & Liu, H. (2018). A review of the applications of phase change materials in cooling, heating and power

- generation in different temperature ranges. *Applied Energy*, 220(February), 242–273. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.005>
- (16) Eslami, M., & Bahrami, M. A. (2017). Sensible and latent thermal energy storage with constructal fins. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(28), 17681–17691. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.097>
- (17) Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K., & Al-Hallaj, S. (2004). A review on phase change energy storage: Materials and applications. *Energy Conversion and Management*, 45(9–10), 1597–1615. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.09.015>
- (18) Gautam, A., Chamoli, S., Kumar, A., & Singh, S. (2017). A review on technical improvements, economic feasibility and world scenario of solar water heating system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(September 2016), 541–562. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.104>
- (19) Ge, T. S., Wang, R. Z., Xu, Z. Y., Pan, Q. W., Du, S., Chen, X. M., ... Chen, J. F. (2018). Solar heating and cooling: Present and future development. *Renewable Energy*, 126, 1126–1140. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.081>
- (20) Gonzalez-Nino, D., Boteler, L. M., Ibitayo, D., Jankowski, N. R., Urciuoli, D., Kierzewski, I. M., & Quintero, P. O. (2018). Experimental evaluation of metallic phase change materials for thermal transient mitigation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 116, 512–519. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.039>
- (21) Guerrero-Lemus, R., & Shephard, L. E. (2017). Solar thermal energy for heating, cooling and power. In *Lecture Notes in Energy* (Vol. 38). https://doi.org/10.1007/978-3-319-52311-8_7
- (22) Horn, R., Burr, M., Fröhlich, D., Gschwander, S., Held, M., Lindner, J. P., ... Schossig, P. (2018). Life Cycle Assessment of Innovative Materials for Thermal Energy Storage in Buildings. *Procedia CIRP*, 69, 206–211. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.095>
- (23) Ibrahim, N. I., Al-Sulaiman, F. A., Rahman, S., Yilbas, B. S., & Sahin, A. Z. (2017). Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage applications: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74(October 2015), 26–50. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.169>
- (24) Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1999). INCROPERA_ - _Transferencia_de_calor.pdf. *Fundamentos de Transferencia de Calor*, pp. 2–8.
- (25) Jaguemont, J., Omar, N., Van den Bossche, P., & Mierlo, J. (2018). Phase-change materials (PCM) for automotive applications: A review. *Applied Thermal Engineering*, 132, 308–320. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.097>
- (26) Jamar, A., Majid, Z. A. A., Azmi, W. H., Norhafana, M., & Razak, A. A. (2016). A review of water heating system for solar energy applications. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 76, 178–187. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.028>
- (27) Kenisarin, M., & Mahkamov, K. (2007). Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(9), 1913–1965. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.005>
- (28) Lamnatou, C., Motte, F., Notton, G., Chemisana, D., & Cristofari, C. (2018). Building-integrated solar thermal system with/without phase change material: Life cycle assessment based on ReCiPe, USEtox and Ecological footprint. *Journal of Cleaner Production*, 193, 672–683. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.032>
- (29) Leclerc, A., Hauschild, M. Z., Wood, R., & Laurent, A. (2020). Building national emission inventories for the energy sector: Implications for life cycle

- assessment and nations environmental footprinting. *Science of the Total Environment*, 708, 135119. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135119>
- (30) Li, K., Bian, H., Liu, C., Zhang, D., & Yang, Y. (2015). Comparison of geothermal with solar and wind power generation systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1464–1474. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.049>
- (31) Majumdar, R., & Saha, S. K. (2019). Effect of varying extent of PCM capsule filling on thermal stratification performance of a storage tank. *Energy*, 178, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.101>
- (32) Mazman, M., Cabeza, L. F., Mehling, H., Nogues, M., Evliya, H., & Paksoy, H. Ö. (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>
- (33) Menegaki, A. N. (2012). A social marketing mix for renewable energy in Europe based on consumer stated preference surveys. *Renewable Energy*, 39(1), 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.08.042>
- (34) NEC - 11. (2011). Capítulo 14 - Energías Renovables. *Norma Ecuatoriana De Construcción, Nec - 11*, 110.
- (35) Nienborg, B., Gschwander, S., Munz, G., Fröhlich, D., Helling, T., Horn, R., ... Schossig, P. (2018). Life cycle assessment of thermal energy storage materials and components. *Energy Procedia*, 155, 111–120. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.063>
- (36) Olabi, A. G. (2017). Renewable energy and energy storage systems. *Energy*, 136, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.054>
- (37) Ordonez, F., Vaca-Revelo, D., & Lopez-Villada, J. (2019). Assessment of the Solar Resource in Andean Regions by Comparison between Satellite Estimation and Ground Measurements: Study Case of Ecuador. *Journal of Sustainable Development*, 12(4), 62. <https://doi.org/10.5539/jsd.v12n4p62>
- (38) Orquera, E., Aguinaga, A., Avila, C., & Hidalgo, V. (2020). Assess the use of Solar Dryer with Photonic Solar Reflectors and PCMs in Farming Products in the Andean Region. *Proceedings of the 6th World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering*, 1–7. <https://doi.org/10.11159/icmie20.102>
- (39) Pereira da Cunha, J., & Eames, P. (2016). Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials - A review. *Applied Energy*, 177, 227–238. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.097>
- (40) Priyadharshini, J., & Selladurai, M. (2016). Green Marketing: Solar Energy Opportunities and Challenges in India. *International Journal of Research & Business Innovation (IJRBI)*, 4(1), 81–86.
- (41) Raam Dheep, G., & Sreekumar, A. (2014). Influence of nanomaterials on properties of latent heat solar thermal energy storage materials - A review. *Energy Conversion and Management*, 83, 133–148. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.058>
- (42) Rao, C. R. C., Niyas, H., & Muthukumar, P. (2018). Performance tests on lab-scale sensible heat storage prototypes. *Applied Thermal Engineering*, 129, 953–967. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.085>
- (43) Shahbaz, K., Alnashef, I. M., Lin, R. J. T., Hashim, M. A., Mjalli, F. S., & Farid, M. M. (2016). A novel calcium chloride hexahydrate-based deep eutectic solvent as a phase change materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 155, 147–154. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.06.004>
- (44) 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>

- (45) Sharma, R. K., Ganesan, P., & Tyagi, V. V. (2016). Long-term thermal and chemical reliability study of different organic phase change materials for thermal energy storage applications. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 124(3), 1357–1366. <https://doi.org/10.1007/s10973-016-5281-5>
- (46) Sharma, S. D., & Sagara, K. (2005). Latent Heat Storage Materials and Systems: A Review. *International Journal of Green Energy*, 2(1), 1–56. <https://doi.org/10.1081/ge-200051299>
- (47) Tian, Y., & Zhao, C. Y. (2013). A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied Energy*, 104, 538–553. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.051>
- (48) Veerakumar, C., & Sreekumar, A. (2016). Phase change material based cold thermal energy storage: Materials, techniques and applications - A review. *International Journal of Refrigeration*, 67(2016), 271–289. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.12.005>
- (49) Veremachi, A., Cuamba, B. C., Zia, A., Lovseth, J., & Nydal, O. J. (2016). PCM Heat Storage Charged with a Double-Reflector Solar System. *Journal of Solar Energy*, 2016, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2016/9075349>
- (50) Wang, Z., Yang, W., Qiu, F., Zhang, X., & Zhao, X. (2015). Solar water heating : From theory , application , marketing and research. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 68–84. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.026>
- (51) Yan, T., Wang, R. Z., Li, T. X., Wang, L. W., & Fred, I. T. (2015). A review of promising candidate reactions for chemical heat storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 13–31. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.015>
- (52) Zhao, D., & Tan, G. (2014). Experimental evaluation of a prototype thermoelectric system integrated with PCM (phase change material) for space cooling. *Energy*, 68, 658–666. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.01.090>
- (53) Zhao, J., Yuan, Y., Haghghat, F., Lu, J., & Feng, G. (2019). Investigation of energy performance and operational schemes of a Tibet-focused PCM-integrated solar heating system employing a dynamic energy simulation model. *Energy*, 141–154. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.125>

ANEXOS

Anexo I - Bucle FOR Matlab R 2020A

for

for loop to repeat specified number of times

Syntax

```
for index = values
    statements
end
```

Description

`for index = values, statements, end` executes a group of statements in a loop for a specified number of times. *values* has one of the following forms:

- *initVal:endVal* — Increment the *index* variable from *initVal* to *endVal* by 1, and repeat execution of *statements* until *index* is greater than *endVal*.
- *initVal:step:endVal* — Increment *index* by the value *step* on each iteration, or decrements *index* when *step* is negative.
- *valArray* — Create a column vector, *index*, from subsequent columns of array *valArray* on each iteration. For example, on the first iteration, *index* = *valArray*(:,1). The loop executes a maximum of *n* times, where *n* is the number of columns of *valArray*, given by `numel(valArray(1,:))`. The input *valArray* can be of any MATLAB data type, including a character vector, cell array, or struct.

Examples

Assign Matrix Values

Create a Hilbert matrix of order 10.

```
s = 10;
H = zeros(s);
for c = 1:s
    for r = 1:s
        H(r,c) = 1/(r+c-1);
    end
end
```

Decrement Values

Step by increments of -0.2, and display the values.

```
for v = 1.0:-0.2:0.0
    disp(v)
end
```

```
1
0.8000
0.6000
0.4000
0.2000
0
```

Execute Statements for Specified Values

```
for v = [1 5 8 17]
    disp(v)
end
```

```
1
5
8
17
```

Repeat Statements for Each Matrix Column

```
for I = eye(4,3)
    disp('Current unit vector:')
    disp(I)
end
```

Current unit vector:

```
1
0
0
0
```

Current unit vector:

```
0
1
0
0
```

Current unit vector:

```
0
0
1
0
```

Tips

- To programmatically exit the loop, use a `break` statement. To skip the rest of the instructions in the loop and begin the next iteration, use a `continue` statement.
- Avoid assigning a value to the `index` variable within the loop statements. The `for` statement overrides any changes made to `index` within the loop.
- To iterate over the values of a single column vector, first transpose it to create a row vector.

Extended Capabilities

C/C++ Code Generation

Generate C and C++ code using MATLAB® Coder™.

Usage notes and limitations:

- Suppose that the loop end value is equal to or close to the maximum or minimum value for the loop index data type. In the generated code, the last increment or decrement of the loop index might cause the index variable to overflow. The index overflow might result in an infinite loop. See “Loop Index Overflow” (MATLAB Coder).

HDL Code Generation

Generate Verilog and VHDL code for FPGA and ASIC designs using HDL Coder™.

- Do not use `for` loops without static bounds.
- Do not use the `&` and `|` operators within conditions of a `for` statement. Instead, use the `&&` and `||` operators.
- HDL Coder™ does not support nonscalar expressions in the conditions of `for` statements. Instead, use the `all` or `any` functions to collapse logical vectors into scalars.

See Also

`break` | `colon` | `continue` | `end` | `if` | `parfor` | `return` | `switch`

Introduced before R2006a

Fuente: (MathWorks 2020)