

SIMULACIÓN NÚMÉRICA DE LA FUSIÓN Y LA SOLIDIFICACIÓN DE PARAFINA
CONFINADA EN UN BANCO DE TUBOS HORIZONTALES PARA SU USO EN
ALMACENAMIENTO TÉRMICO

JHOZER IVÁN CÉSPEDES MARÍN

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA
BUCARAMANGA

2021

SIMULACIÓN NÚMÉRICA DE LA FUSIÓN Y LA SOLIDIFICACIÓN DE PARAFINA
CONFINADA EN UN BANCO DE TUBOS HORIZONTALES PARA SU USO EN
ALMACENAMIENTO TÉRMICO

JHOZER IVÁN CÉSPEDES MARÍN

Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Mecánico

Directora:

PhD Sandra Patricia Cuervo Andrade

Asesora:

PhD Sonia Lucía Rincón Prat

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA
BUCARAMANGA

2021

CONTENIDO

1. INTRODUCCION	6
2. ANTECEDENTES	7
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
4. JUSTIFICACION	12
5. OBJETIVOS	14
5.1. OBJETIVO GENERAL	14
5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
6. ALCANCE	15
7. MARCO TEORICO.....	16
7.1. ALMACENAMIENTO DE ENERGIA TERMICA	16
7.2. CALOR SENSIBLE	17
7.3. CALOR LATENTE	19
7.4. MATERIALES DE CAMBIO DE FASE.....	21
7.5. SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA TERMICA POR CALOR LATENTE	23
7.6. SELECCIÓN DEL MATERIAL DE CAMBIO DE FASE	27
7.7. PROPIEDADES TERMOFISICAS DE LA PARAFINA	28
7.8. DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.....	31
7.9. ECUACIONES DE GOBIERNO.....	33
8. DISEÑO METODOLOGICO	37
9. RESULTADOS	68
10. CONCLUSIONES.....	83
11. BIBLIOGRAFIA	84
12. ANEXOS	89

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: SIMULACIÓN NÚMÉRICA DE LA FUSIÓN Y LA SOLIDIFICACIÓN DE PARAFINA CONFINADA EN UN BANCO DE TUBOS HORIZONTALES PARA SU USO EN ALMACENAMIENTO TÉRMICO

AUTOR(ES): Jhozer Ivan Cespedes Marin

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR(A): Sandra Patricia Cuervo Andrade

RESUMEN

El presente documento contiene una descripción de la teoría y el procedimiento que se usó para simular, por medio de dinámica computacional de fluidos (ANSYS FLUENT), el comportamiento de la cera de parafina comercial como material de cambio de fase para su uso en un secador solar de túnel tipo Hohenheim a través de un banco de tubos horizontales. Se tomó en cuenta la variación de la energía térmica disponible de un día normal y se supusieron aumentos de hasta un 20%, 40% y 60% en dicha energía con el fin de ampliar los posibles resultados que se pudieran llegar a tener si se usan mecanismos de concentración solar. También se simularon diferentes parafinas con puntos de fusión de 35 °C, 44 °C, 47 °C, 50 °C, 54 °C, 60 °C, 62 °C y 64 °C en configuraciones como único o múltiple material con el fin de aprovechar mejor las mejoras supuestas antes mencionadas.

PALABRAS CLAVE:

Transferencia de calor, PCM, Banco de tubos, CFD, LHTES

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: NUMERICAL SIMULATION OF THE FUSION AND SOLIDIFICATION OF CONFINED PARAFFIN IN A HORIZONTAL PIPE BANK FOR USE IN THERMAL STORAGE

AUTOR(ES): Jhozer Ivan Cespedes Marin

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR(A): Sandra Patricia Cuervo Andrade

RESUMEN

This document contains a description of the theory and procedure used to simulate, through computational fluid dynamics (ANSYS FLUENT), the behavior of commercial paraffin wax as phase-shifting material for use in a Hohenheim-type tunnel solar dryer through a horizontal tube bank. The variation in available thermal energy of a normal day was taken into account and increases of up to 20%, 40% and 60% in that energy were assumed in order to expand the possible results that could be had if solar concentration mechanisms were used. Different paraffins with melting points of 35 °C, 44 °C, 47°C, 50 °C, 54 °C, 60 °C, 62 °C and 64 °C were also simulated in configurations such as single or multiple material in order to better take advantage of the alleged improvements mentioned above.

PALABRAS CLAVE:

Heat Transfer, PCM, Bank of tubes, CFD, LHTES

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

1. INTRODUCCION

El rápido desarrollo de la industria y la sociedad humana en los últimos años ha incrementado considerablemente la demanda de energía. El uso de sistemas impulsados por combustibles fósiles para suministrar energía ha aumentado la tasa de emisión de gases de efecto invernadero y en consecuencia se ha visto un aumento de la contaminación.

Los recursos de las energías renovables desempeñan un papel alternativo eficaz de cara al uso del combustible convencional, pues generalmente son abundantes, de bajo coste y representan un nivel de impacto menor al medio ambiente. Actualmente la energía solar se considera como un recurso prometedor de energía renovable. Sin embargo, la cantidad de energía disponible suministrada por el sol no supe la cantidad de energía demandada a lo largo del día. Afortunadamente los sistemas de energía solar térmica pueden complementarse con unidades de almacenamiento de energía térmica (TES) para equilibrar eficazmente el desajuste simultáneo entre la energía demandada y la energía suministrada. Estas unidades pueden implementar materiales de cambio de fase (PCM) para acumular una gran cantidad de energía en forma de calor latente. [1]

2. ANTECEDENTES

Los materiales de cambio de fase o PCM han sido objeto de estudio en los últimos años. La capacidad de almacenar grandes cantidades de energía térmica ha sido el atributo más llamativo pues representa un ahorro energético y por consiguiente económico en una gran variedad de aplicaciones. A menudo los estudios de optimización en la implementación de estos materiales pueden llegar a ser costoso, sin embargo, las simulaciones computacionales pueden llegar a predecir los comportamientos térmicos de interés con un margen de error aceptable.

A continuación se muestran algunos de los antecedentes de investigación en torno al tema que se ha venido hablando con el fin de aportar una mejor comprensión en lo que respecta este trabajo:

Liu et al (2017) planteó un modelo numérico de simulación en la transferencia de calor de la parafina $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ como material de cambio de fase en una placa plana y en un banco de tubos paralelo y escalonado de flujo cruzado. El aire se usó como fluido portador de energía (HTF) y el material del tubo que contiene el PCM es aluminio. Cabe destacar que la dirección del flujo de aire es de abajo hacia arriba (opuesto a la gravedad), por lo que la diferencia de densidades del PCM provoca el ascenso del PCM fundido en la misma dirección del flujo de calor. Dentro de los resultados se demostró que el tiempo que tarda en derretirse totalmente la parafina en el sistema de banco de tubos cruzados es un 57% menos que el sistema de placa plana, por lo que se concluye que la transferencia de calor en sistemas de almacenamiento térmico con aire se puede mejorar si se aumenta la superficie de transferencia de calor, además del flujo y turbulencia del fluido [2].

Alhusseny (2020) propuso un modelo numérico similar que describe la transferencia de calor en un banco de tubos escalonados en donde el flujo del fluido portador de energía también es opuesto a la gravedad. Para realizar la simulación

se usó el código comercial CFD Ansys Fluent. Se empleó la aproximación de Boussinesq en los índices de flotabilidad. Para resolver el problema de acoplamiento velocidad-presión se optó por el algoritmo SIMPLE, upwind de segundo orden para el momento y energía y modelo PRESTO para la presión. A diferencia de Liu et al, el agua se usó como HTF y el material del tubo que contiene el PCM es de cobre. La principal característica o mejora de este sistema es la incorporación de espuma metálica de cobre de alta porosidad que aumenta la conductividad térmica del PCM mejorando significativamente los tiempos de carga y descarga del material de cambio de fase. Según las condiciones del sistema propuesto en este estudio, se evidenció que el uso de esta espuma metálica redujo un 56% el tiempo de fusión del PCM en comparación al solo uso de parafina “pura”. En cuanto al tiempo de “descarga” o liberación de la energía térmica acumulada se evidenció que la flotabilidad del PCM juega un papel importante en este proceso, aumentando el tiempo cuando la parafina está completamente solidificada. [1]

Ezra (2016) presentó un modelo para reducir el tiempo de carga y descarga del PCM de forma global, es decir, la finalidad del estudio no se centró en disminuir el tiempo de fusión de la parafina en un solo tubo sino en disminuir el tiempo en el que la parafina contenida en todos los tubos alcance su punto de fusión dependiendo de la temperatura y flujo masico disponible del HTF. Para conseguirlo, se dispusieron de diferentes tipos de parafina a lo largo del banco de tubos (en dirección al flujo del HTF) en donde las primeras columnas contendrán el PCM con la temperatura de fusión más alta e irán disminuyendo a lo largo del sistema. Gracias a este modelo, se puede garantizar que el tiempo de fusión de la parafina de las primeras columnas de tubos es igual o similar a las ultimas. El trabajo se realizó con el programa de cómputo numérico Matlab. [3]

Iten (2018) realizó un estudio de calorimetría diferencial de barrido (DSC) a un material de cambio de fase con el fin de comparar los datos experimentales obtenidos con dos modelos numéricos CFD en ANSYS FLUENT: aplicando el método entalpia-porosidad y el método de capacidad calorífica efectiva. El análisis se llevó a cabo en una unidad de almacenamiento de energía térmica por aire (TES) en forma de placa plana. En ella se demostró que el método entalpia-porosidad mostraba un error de 5.7% cuando el PCM se comporta de forma endotérmica y 4.9% de forma exotérmica en comparación a los datos experimentales, mientras que el método de capacidad calorífica efectiva obtuvo un error en su comportamiento endotérmico y exotérmico de 2.6% y 1.4% respectivamente. La principal razón de este sesgo aritmético radica en el comportamiento de “regla de palanca” que posee intrínsecamente el método de entalpia-porosidad en donde se asume que el comportamiento entalpia-temperatura es lineal dando un comportamiento más erróneo específicamente al final del calentamiento sensible e inicio del proceso de cambio de fase. Es por ello por lo que el método de capacidad calorífica efectiva denota un comportamiento más “real” del PCM. [4]

En el capítulo 12.2 del libro “Avances en sistemas de almacenamiento térmico” **Ziskind (2015)** presenta los siguientes fenómenos físicos inherentes más importantes que deben ser tomados a consideración al momento de simular la fusión y solidificación en materiales de cambio de fase:

- La interfaz móvil sólido-líquido refleja la cantidad y ubicación del material que ya ha sido fundido o solidificado en un intervalo de tiempo, por lo que define la cantidad de calor almacenado o liberado durante toda la simulación. Dada la importancia de esta característica durante todo el proceso, su predicción debe ser la más precisa posible.
- El efecto de la flotabilidad en el material fundido a causa de la expansión volumétrica cuando se pasa de estado sólido a líquido genera el fenómeno conocido como convección natural. El flujo resultante de esta convección

puede llegar a variar el frente de fusión y por consiguiente la velocidad de este. Sin embargo, la convección natural que depende en gran medida de las dimensiones de su confinamiento puede ser despreciables en superficies porosas.

- El cambio de volumen en la transición de fases a causa del diferencial de temperatura presente durante el sistema no representa un nivel de impacto considerable en la transferencia de calor y el cambio de fase, aun cuando se sabe que el PCM orgánico puede alcanzar un cambio volumétrico cercano al 10%; en intercambiadores de calor basados en PCM se puede suprimir esta característica.
- El cambio de fase en un rango de temperaturas extendido tiene en cuenta la impureza del PCM en donde el cambio de fase no es realmente isotérmico sino que se presenta en un intervalo del orden de 10°C e incluso más.
- La histéresis de entalpia tiene en cuenta la posible variabilidad de los fenómenos termo físicos a una temperatura fija y/o predefinida. [5]

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El secado es una de las operaciones más importantes en el procesamiento de alimentos, la transferencia simultánea de calor y masa presentes en esta operación reduce la humedad del producto, aumentando su vida útil [6].

Existen varias técnicas de secado, siendo el secador solar la más popular en la región tropical gracias a la gran disponibilidad de energía solar presente durante todo el año, además de su fácil diseño y construcción junto con una buena rentabilidad [7]. Sin embargo, la no disponibilidad de energía solar durante la noche y la fluctuación que presenta esta durante el día han sido objeto de estudio durante muchos años. Una de las soluciones más prometedoras para garantizar el secado sin una fuente de energía durante un tiempo limitado es la implementación de un sistema de almacenamiento de energía térmica de calor latente o LHTES por sus siglas en inglés (Latent Heat Thermal Energy Storage) con materiales de cambio de fase PCM [8].

La Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga en asociación a la Universidad Nacional de Colombia implementaron un LHTES en un secador solar tipo Hohenheim [9]. Aunque estudios experimentales previos demostraron resultados prometedores, el funcionamiento de este no fue el esperado bajo condiciones atmosféricas reales. Por lo que este proyecto buscará las posibles razones por las cuales el LHTES presente en el secador solar tipo Hohenheim ubicado en la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga no cumplió con los estándares en los cuales fue diseñado, además, se harán algunas sugerencias con base al análisis realizado en este proyecto y métodos expuestos en la literatura con el fin de mejorar el rendimiento de este.

4. JUSTIFICACIÓN

Cerca del 15% de la población mundial sufre de desnutrición, mientras que por otro lado, las mayores pérdidas de alimentos suceden durante la producción, postcosecha y la corta vida útil del producto. Es por ello por lo que los países en vías de desarrollo afrontan un gran desafío al tener que reducir estos desperdicios en donde el secado solar ha sido una de las medidas actuales para la conservación del material alimentario [10]. Por fortuna, la mayoría de estos países están ubicados en zonas en las que la insolación es considerablemente más alta que la cifra promedio mundial que oscila entre 1600 a 2200 kWh/m²/año [11].

Dado que el secado es el proceso que más requiere energía dentro de la cadena de valor de los productos agrícolas [9], el uso de secadores solares implica un ahorro energético y por consiguiente un ahorro económico. La implementación de un sistema de almacenamiento de energía térmica de calor latente supone una mejora considerable en el tiempo de secado continuo de un secador solar, por lo que el tiempo de exposición del producto será menor además de que las temperaturas dentro de la cámara de secado serán relativamente constantes, mejorando la calidad final del producto.

Una de las ventajas de usar la dinámica de fluidos computacional CFD para observar y predecir el comportamiento térmico de estos sistemas radica en el hecho de la posibilidad de conocer cualquier propiedad termo física en cualquier parte del dominio del sistema, sin limitarse a la disponibilidad de instrumentos que puedan medir dichas propiedades (RTD, termocuplas, termómetros, piranómetros, etc). Aunque se han hecho varios estudios del comportamiento térmico de LHTES de forma experimental y numérica mediante CFD [12], la mayoría de estos trabajan bajo una misma temperatura del fluido portador de energía HTF. Para simular un

comportamiento más “real”, este trabajo tendrá en cuenta las diferentes temperaturas presentes a lo largo de un día.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Modelar numéricamente la transferencia de calor en parafina confinada como material de cambio de fase a través del uso de la dinámica de fluidos computacional (CFD) para predecir su comportamiento térmico en el tiempo.

5.2 Objetivos específicos

- Desarrollar un modelo numérico que represente el fenómeno físico de la transferencia de calor durante el cambio de fase de la parafina mediante el planteamiento y solución de las ecuaciones diferenciales de masa, energía y cantidad de movimiento. **Indicador:** *Simulación que describe el comportamiento térmico de la parafina.* **Resultado:** *Modelo numérico.*
- Validar los resultados obtenidos de la simulación comparándolo con datos experimentales disponibles en la literatura. **Indicador:** *Simulación bajo las mismas condiciones experimentales.* **Resultado:** *Determinar el error entre la simulación y datos experimentales.*
- Analizar el comportamiento de la parafina en aplicaciones como medio de almacenamiento térmico (intercambiador de calor) con ayuda de métodos numéricos. **Indicador:** *Simulación del banco de tubos.* **Resultado:** *Curvas de comportamiento.*

6. ALCANCE

Dado que ya existen datos experimentales sobre el comportamiento térmico de la parafina bajo un nivel de ambiente controlado y atmosférico real, se hará uso de la dinámica de fluidos computacional para analizar más detalladamente el comportamiento de la parafina bajo las mismas condiciones en las que fue sometido experimentalmente, así como para predecir su comportamiento con otras condiciones. Para ello se describen las siguientes limitaciones del sistema que dependen en gran medida del nivel computacional necesario para desarrollar la simulación y de las condiciones inherentes de los modelos CFD a utilizar:

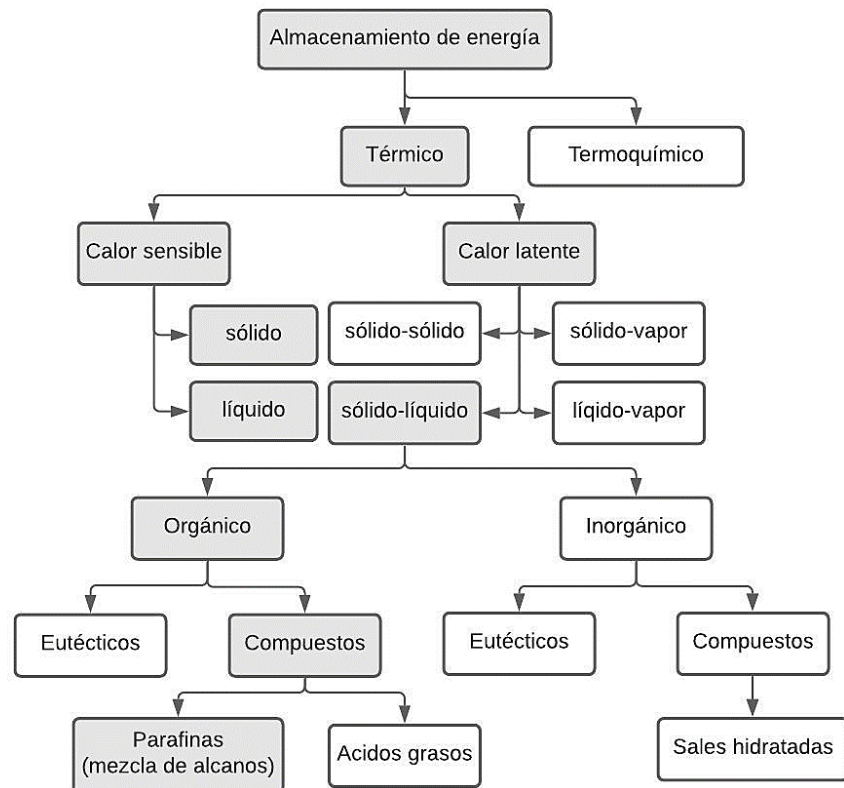
- Como el flujo del HTF es totalmente perpendicular a la dirección de posición de los tubos que contienen el PCM y todo el sistema presenta simetría a lo largo de una dimensión, se modelara un sistema de dominio 2D, ya que su coste computacional es significativamente menor y la variación de las propiedades más relevantes en la dirección que no se modela son despreciables.
- El flujo de los fluidos presentes en el modelo se encuentra es régimen laminar al poseer un número de Reynolds bajo. Al no usar un modelo adicional que describa las posibles turbulencias en el sistema, la carga computacional será menor.
- A pesar de que las pruebas físicas se realizaron teniendo en cuenta la expansión volumétrica del PCM llenando el 90% de la capacidad máxima del tubo de este material, esta no será tomada en cuenta porque la variabilidad de resultados no se verá afectada significativamente [5].
- El aire que actúa como fluido portador de energía o HTF se considera un fluido incompresible al no presentar un diferencial de temperatura alto y estar por debajo de la velocidad Mach 0.3 [13].

7. MARCO TEORICO

7.1 ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TERMICA

El almacenamiento de energía térmica, también denominada TES por sus siglas en inglés (Thermal Energy Storage), es un método de acumulación de energía que aprovecha un diferencial de temperatura existente en un sistema para almacenar principalmente calor sensible y/o calor latente dependiendo del medio receptor. Algunos autores también involucran en este proceso el almacenamiento termoquímico. [14]

Figura 1.1 Clasificación en almacenamiento de energía térmica



Fuente: Abhat, 1983.

La figura 1.1 muestra la clasificación general de un sistema de almacenamiento térmico en donde los recuadros sombreados denotan los fenómenos físicos y procesos de énfasis en este trabajo.

Por lo general, el almacenamiento de energía térmica se asocia a usos exclusivos de calefacción y refrigeración, sin embargo, un sistema TES se puede implementar en diferentes aplicaciones y una gran variedad de sectores, que pueden resumirse en seis grandes secciones:

- **Calefacción y refrigeración:** Refrigeración por absorción y adsorción, enfriamiento y calentamiento de agua, refrigeración y calefacción de residencias, producción en frío.
- **Industria**
- **Energía solar:** Refrigeración solar, plantas de energía solar, almacenamiento de energía solar.
- **Desalinización**
- **Transporte:** Refrigeración y calefacción en cabina, recuperación de calor de escape, protección de electrónica y batería.
- **Protección térmica:** Dispositivos electrónicos, centro de datos, electrónica de aeronaves, alimentos.
- **Recuperación de calor residual industrial [14]**

7.2 CALOR SENSIBLE

El uso del calor sensible como medio para almacenar energía térmica resulta ser el más fácil y simple. Este consiste en aplicarle a un medio (sólido o líquido) un gradiente de temperatura en donde dependiendo del flujo de calor se puede acumular energía o en su defecto liberarla. El agua es el material más usado para acumular la energía térmica por este método ya que la

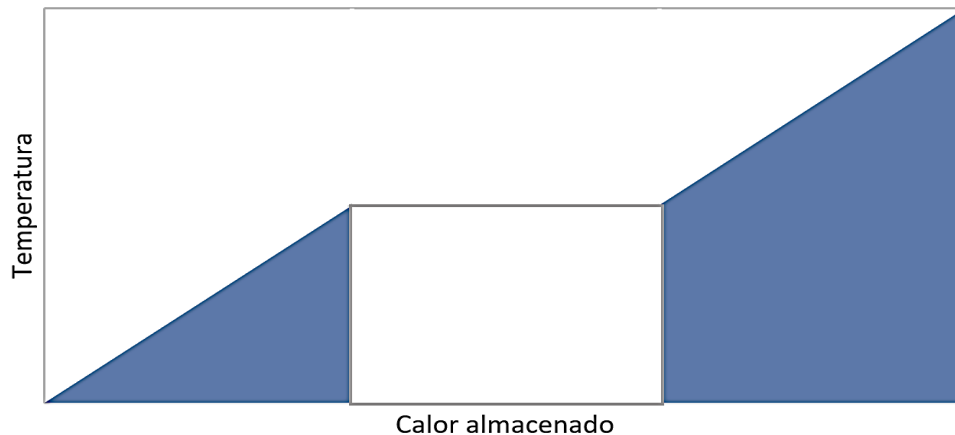
cantidad de energía necesaria para aumentar la temperatura de este material es muy alta, por lo que a pesar de que se requerirá de una mayor fuente de calor para calentarla, proveerá por mucho más tiempo el calor almacenado, sin mencionar que se podrá utilizar en una gran variedad de aplicaciones por su bajo coste y un punto de fusión relativamente alto. Existen también otros materiales ampliamente utilizados basados en cerámicas comunes y piedras naturales como la arcilla y el mármol, por lo que su uso implica un aprovechamiento de los materiales de desecho de varios procesos industriales [15].

El calor sensible que entra o sale de un cuerpo viene denotado por la siguiente ecuación:

$$Q = m C_p (T_2 - T_1) \quad (1)$$

De esta ecuación es importante resaltar la relación inherente del calor específico c_p con el calor sensible, pues esta propiedad termofísica determina la cantidad de energía necesaria que hay que suministrarle a 1 kg de cualquier material para aumentar su temperatura en 1°C (Sistema internacional). El comportamiento térmico de un material con una cantidad de masa específica se muestra en la región sombreada de la figura 1.2

Figura 1.2 Comportamiento térmico del calor sensible



Fuente: *Elaboración propia.*

De la figura 1.2 y en base a la ecuación 1 se puede concluir que el calor específico representa la pendiente de una recta, por lo que se puede inferir que entre un mismo material pero con diferentes c_p bajo las mismas condiciones, el material con un C_p más bajo llegará a la temperatura final (T_2 , ecuación 1) más rápido que el material con un c_p más alto.

Dentro de las principales ventajas de utilizar el almacenamiento térmico por calor sensible están el uso de materiales de bajo costo y baja peligrosidad, son sistemas relativamente simples, son más confiables y fáciles de manipular. En las principales desventajas se presentan una baja densidad energética, se requieren grandes volúmenes de material, costo elevado del sistema que contiene el material, auto descargas y pérdidas de calor. [16]

7.3 CALOR LATENTE

El almacenamiento térmico por calor latente almacena o libera energía cuando el material en cuestión aprovecha la entalpia presente en un cambio de fase físico. A estos materiales se les llama PCM o materiales de cambio de fase por sus siglas en inglés (Phase Change Materials). Los PCM cambian su estado físico cuando se les suministra la suficiente energía y recuperan su estado original cuando se libera dicha energía. Generalmente el cambio de fase en estos materiales es: sólido-sólido, sólido-líquido, líquido-gas, sólido-gas y viceversa. Los PCM de fase sólido-gas y líquido-gas presentan la ventaja de tener una gran cantidad de calor latente disponible en sus cambios de fase, pero los altos puntos de fusión y el aumento volumétrico excesivo generan problemas en aplicaciones térmicas de la vida real, sobre todo si se usan en recipientes cerrados ya que en estos sistemas la presión interna puede elevarse peligrosamente. Por otro lado, los PCM de fase sólido-sólido presentan un cambio volumétrico casi despreciable, sin

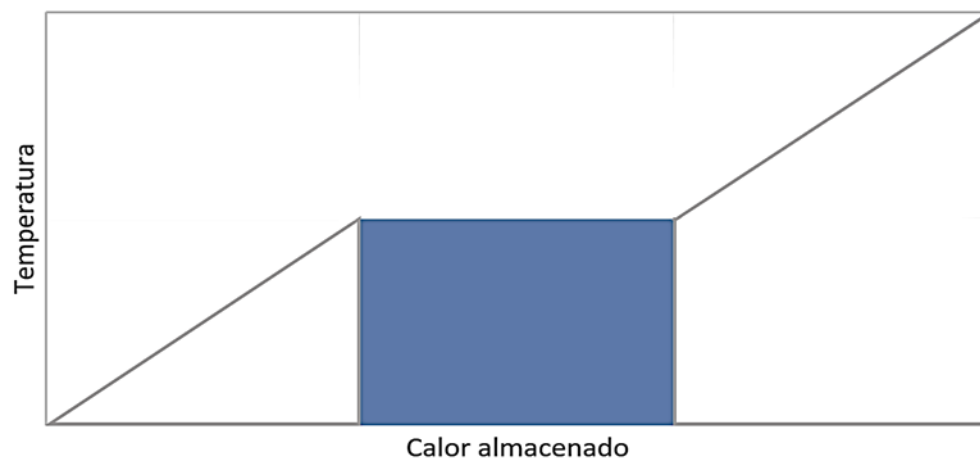
embargo, el calor latente disponible en esta fase es significativamente bajo, limitando su aplicación como almacenamiento térmico. Afortunadamente los PCM de fase solido-líquido poseen cambios volumétricos relativamente bajos (sobre todo si se compara con la expansión volumétrica de los gases) y un calor latente de fusión alto en comparación a la fase sólido-sólido, por lo que el uso de este tipo de PCM es común [14] [17].

El calor latente que entra o sale de un cuerpo viene denotado por la siguiente ecuación:

$$Q = m L_f \quad (2)$$

A diferencia de la ecuación de calor sensible que depende de un diferencial de temperatura, el proceso de calor latente se presenta bajo una misma temperatura denominada punto de fusión. El almacenamiento térmico por calor latente se realiza en un proceso isotérmico (figura 1.3). La energía por calor latente (L_f) y el punto de fusión son propiedades termofísicas del material y determinan el tiempo de cambio de fase.

Figura 1.3 Comportamiento térmico del calor latente



Fuente: *Elaboración propia.*

La región sombreada de la figura 1.3 muestra el calor latente de fusión de forma isotérmica, al estado físico del PCM sólido-líquido en este proceso se le suele conocer como mushy zone o zona blanda.

Dentro de las principales ventajas de utilizar el almacenamiento térmico por calor latente se encuentra una mayor densidad de energía almacenada en comparación al calor sensible y la capacidad de entregar energía a una misma temperatura. Las desventajas de estos materiales son la poca estabilidad térmica, la corrosión, la degradación de las propiedades térmicas por los ciclos de uso y en algunos casos el costo de estos materiales puede ser elevado [16].

7.4 MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Como ya se ha mencionado, los materiales de cambio de fase o PCM son materiales con un amplio recorrido en su uso como medio de almacenamiento térmico TES [18]. Por lo general, los diversos autores clasifican a los PCM en dos categorías: PCM orgánicos e inorgánicos. Una de las propiedades más importantes a la hora de decantarse por alguno de estos dos tipos es la capacidad de almacenamiento térmico, normalmente los PCM inorgánicos tienen la más alta capacidad [19], sin embargo se deben tener en cuenta otros factores de los cuales se hablará más adelante.

Dado que los PCM inorgánicos no son tema de énfasis de este proyecto no se profundizará en este tema, sin embargo, de manera resumida se puede decir que son materiales que se clasifican en metales, sales e hidratos de sales. La principal ventaja de estos es que poseen la entalpia de cambio de fase más alta, permitiéndoles almacenar grandes cantidades de energía pero la presencia de corrosión, la baja estabilidad térmica y la segregación/separación de fases son las desventajas más importantes.

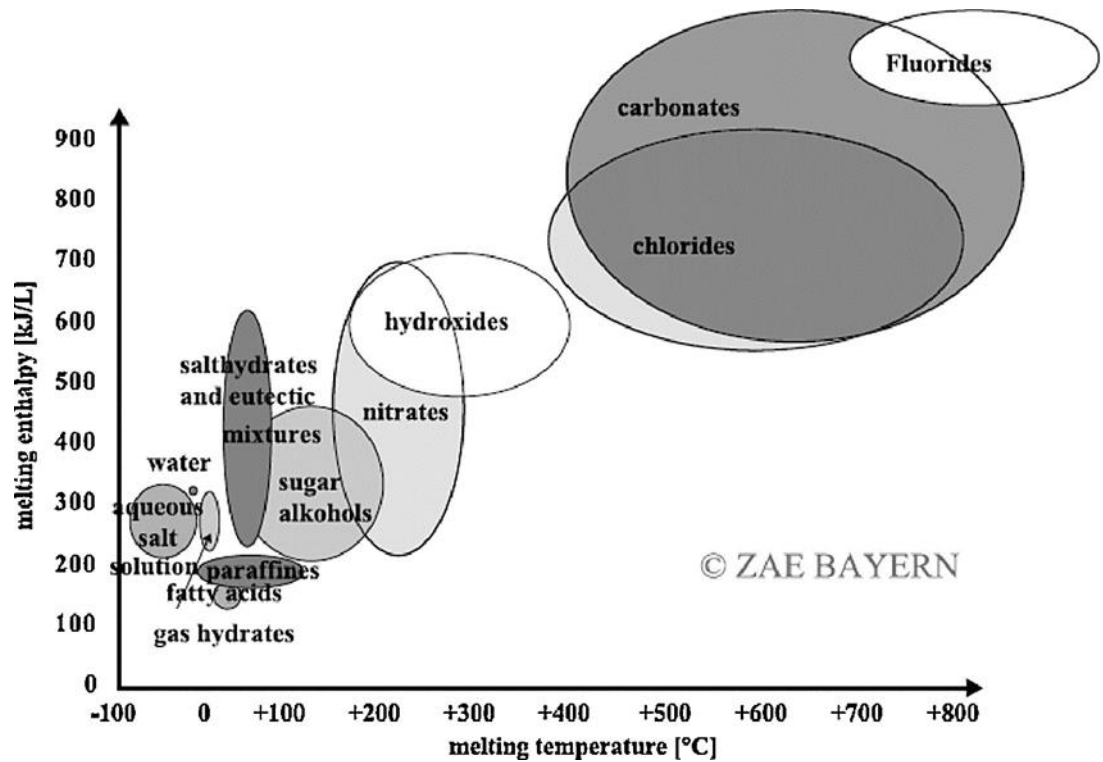
Por otro lado, los PCM orgánicos se caracterizan por tener una buena estabilidad térmica y química, son reciclables, no corrosivos y además no presentan subenfriamiento. Las desventajas de estos materiales son su posible inflamabilidad, la entalpía de cambio de fase es el más bajo de los demás tipos de PCM y poseen una conductividad térmica baja. Los materiales más utilizados de este tipo son la parafina y los ácidos grasos [20].

La parafina es un subproducto del petróleo en el que dependiendo del número de carbonos presentes en su composición química se presenta en diferentes estados físicos; siendo gas cuando posee de 1 – 4 átomos de carbono a temperatura ambiente, líquido de 5 – 17 carbonos y sólido cuando posee más de 17. Por lo general, se considera una “cera de parafina” cuando posee entre 20 y 40 átomos de carbono. [20]

Los ácidos grasos son a menudo conocidos como PCM renovables ya que provienen de origen animal y vegetal en el cual mediante un proceso de hidrólisis se obtienen la mezcla de ácidos grasos. Las características más relevantes de estos PCM son la estabilidad química y térmica, baja corrosión y nula toxicidad, además de que se pueden mezclar con otros ácidos grasos para modificar su punto de fusión [20][21][22].

En 1997, Mehling y Cabeza realizaron una gráfica (figura 1.4) que muestra el rango operativo de temperatura de fusión en diferentes materiales usados como PCM en comparación a su entalpía de fusión, en esta gráfica se puede apreciar que existen materiales para una gran cantidad de aplicaciones específicas para su uso en almacenamiento térmico [23].

Figura 1.4 Materiales usados como PCM en relación con la temperatura y entalpia de fusión [24]

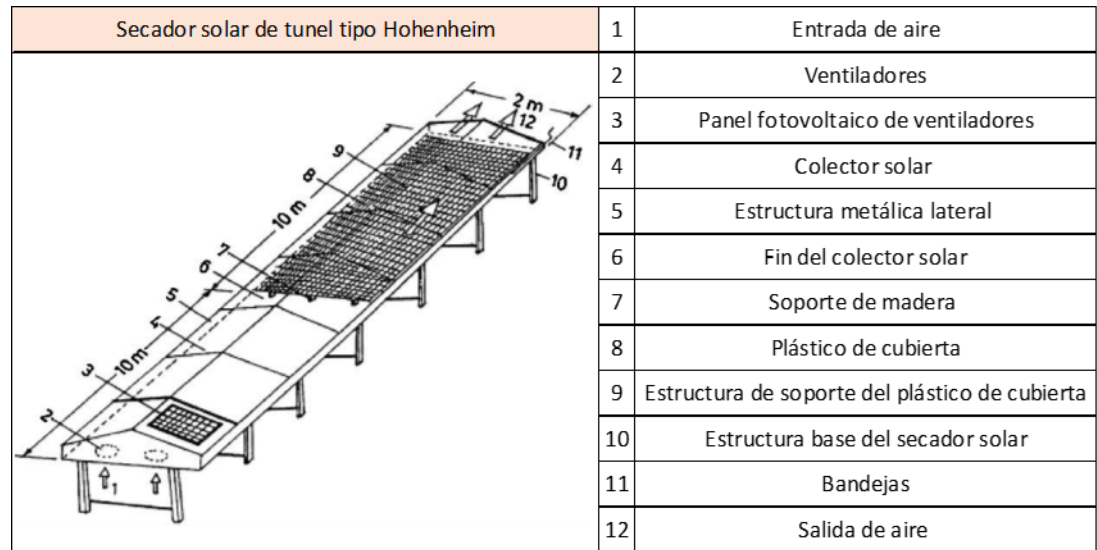


Fuente: S. M. Hasnain, "Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques."

7.5 SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA POR CALOR LATENTE

Es importante tener en cuenta que el sistema de almacenamiento de energía térmica por calor latente o LHTES tiene como propósito general suministrarle energía térmica extra a un secador solar tipo Hohenheim para su uso en la deshidratación de cultivo. Este tipo de secador solar desarrollado por el Instituto Agrícola de la Universidad de Hohenheim Stuttgart – Alemania se caracterizan por ser secadores tipo túnel de convección forzada [24][6][6][25]. En la figura 1.5 se muestra su diseño y las partes más relevantes.

Figura 1.5 Esquema secador solar tipo Hohenheim

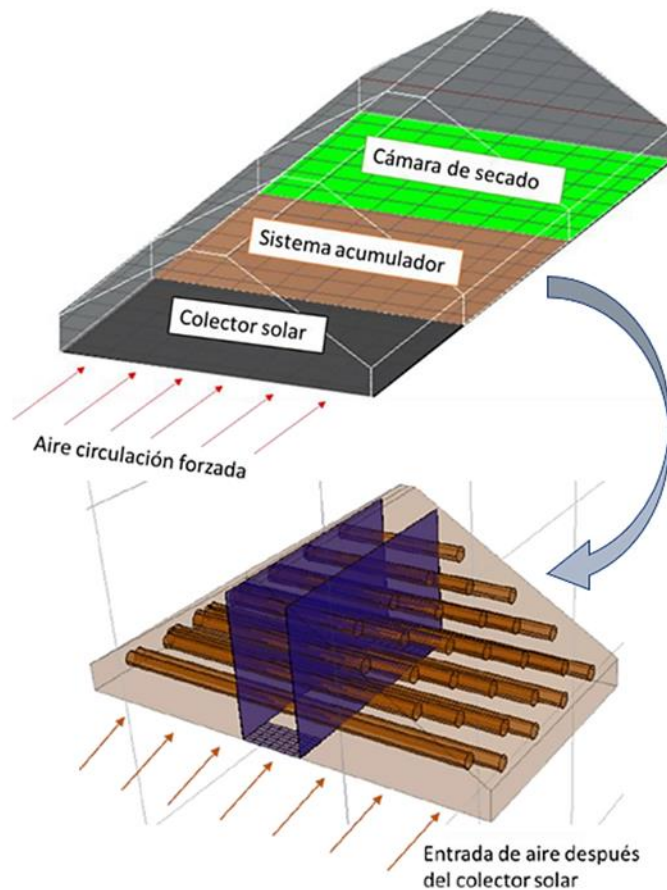


Fuente: A. Sharma. "Solar-energy drying systems: A review."

El colector solar de este tipo de secadores es fundamental al presentar un sistema híbrido de captación de calor, pues la energía térmica de la radiación solar se obtiene de forma indirecta en esta sección mientras que otra parte del calor total se recibe por la radiación directa que recibe el cultivo en la sección de plástico de cubierta.

El LHTES se acopló a este secador específicamente entre el colector solar y la cámara de secado que contiene el cultivo a tratar, como se muestra en la figura 1.6. Este sistema de almacenamiento térmico aprovecha principalmente el calor indirecto del colector solar, sin embargo, al estar también expuesto a la radiación directa recibe una extra de energía; esta última solo es aprovechada por aquellas partes del banco de tubos que están expuestas a la misma, por lo que dicha energía no será tomada en cuenta en este proyecto al no ser una fuente de energía significativa.

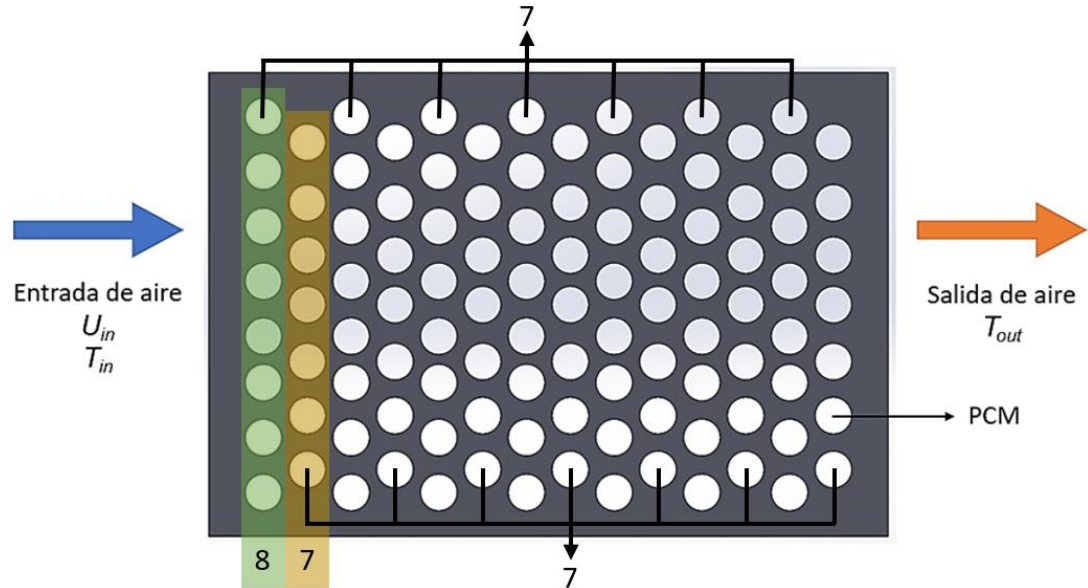
Figura 1.6 Acoplamiento del LHTES al secador solar tipo Hohenheim [9]



Fuente: M. Ochoa, "Implementación de un sistema de acumulación de energía con materiales de cambio de fase (PCM) en un secador solar tipo Hohenheim"

Este LHTES consta de un banco de tubos horizontales escalonados y de flujo cruzado (ver figura 1.6) donde el PCM está embebido y confinado dentro de dichos tubos. Se uso aire como fluido portador de energía y parafina como material de cambio de fase orgánico. El sistema de almacenamiento térmico planteado por **M. Ochoa (2017)** cuenta con un total de 105 tubos distribuidos en secciones de 8 y 7 columnas consecutivas con 7 filas para cada una de estas (ver figura 1.7). Los tubos están hechos de cobre con un diámetro externo 41.3 mm [9].

Figura 1.7 Esquema general del LHTES



Fuente: Elaboración propia.

Las dimensiones geométricas de la configuración del banco de tubos escalonado del LHTES se muestran en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Dimensiones del banco de tubos escalonados

Esquema: Banco de tubos escalonados	Parametros	Valor
	S_T [mm]	83
	A_1 [mm ²]	83
	A_T [mm ²]	41,3
	S_L [mm]	83
	S_D [mm]	92,3
	A_D [mm ²]	51

Fuente: M. Ochoa, "Implementación de un sistema de acumulación de energía con materiales de cambio de fase (PCM) en un secador solar tipo Hohenheim"

7.6 SELECCIÓN DEL MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

A la hora de seleccionar un material de cambio de fase, la aplicación específica en la cual será utilizado será la principal razón para decantarse por uno de estos materiales, sin embargo, algunas características por lo general son deseadas en la mayoría de las aplicaciones:

- **Características químicas:** Una buena estabilidad química, así como una baja descomposición son deseados para mantener las propiedades termoquímicas iniciales durante un largo periodo de tiempo, sin importar el número de ciclos de uso. El PCM no debe ser tóxico y no debe representar un peligro de incendio o explosión, esto garantizará un ambiente laboral seguro.
- **Características cinéticas:** Por lo general, se busca un material con un subenfriamiento pequeño o inexistente para que tanto la temperatura de fusión y solidificación sea la misma, esto evitara posibles problemas de pérdidas de calor.
- **Características físicas:** Una alta densidad en estado sólido y líquido asegurará minimizar el volumen ocupado mientras que una presión de vapor y una expansión volumétrica baja no requerirán de sistemas mecánicos complejos.
- **Características térmicas:** Para mejorar la transferencia de calor del PCM se necesitará una alta conductividad térmica tanto en estado sólido como líquido. Para obtener un gran almacenamiento térmico es preciso escoger materiales con altos valores de calor latente en unidades de volumen pequeños [14].

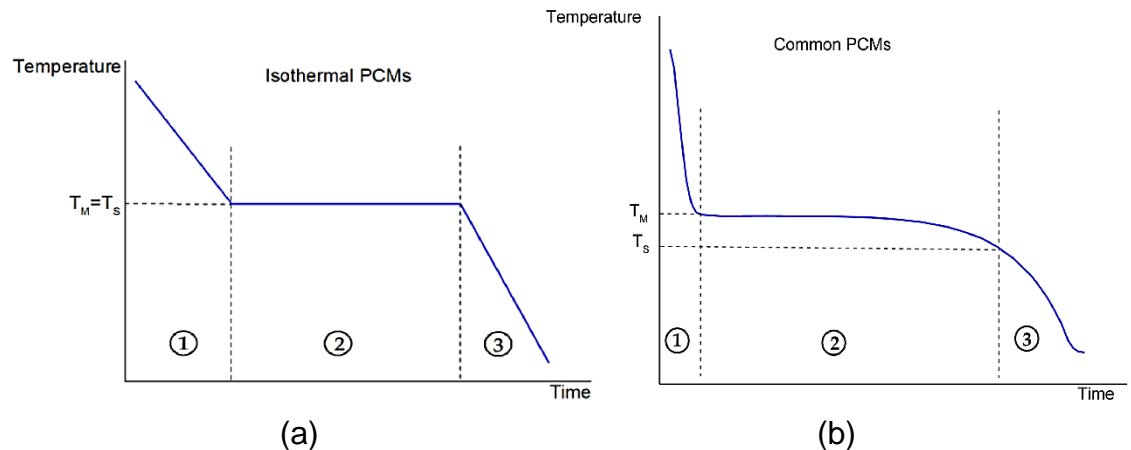
Para la aplicación específica de este proyecto en el secado de cultivos, las principales características que se tomaron en cuenta al escoger la parafina como material de cambio de fase son:

- No tóxico y No inflamable
- Fácil disponibilidad
- Precio accesible [9]

7.7 PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE LA PARAFINA

Como ya se había mencionado anteriormente, el almacenamiento térmico en un material de cambio de fase supone un comportamiento isotérmico en la transición de la fase sólida y líquida; sin embargo, este comportamiento teórico e ideal solo puede ser alcanzado por materiales completamente puros. Un comportamiento más “real” de un PCM se muestra en la figura 1.8.

Figura 1.8 Comportamiento del almacenamiento térmico ideal (a) y real (b) en un PCM [26]



Fuente: E. Omaraa “Mathematical modelling of heat transmission in the temperature history apparatus by using inverse method to evaluate the latent heat of high temperature PCMs”

Como se muestra en la gráfica la figura 1.8 (b), el almacenamiento de calor latente de la mayoría de los PCM ocurre en un rango de temperaturas denominados T_M (temperatura fusión) y T_S (temperatura solidificación). Cuando se alcanzan estas temperaturas el PCM se encuentra

completamente líquida o en su defecto sólida. Estas temperaturas son tomadas en cuenta en el modelo numérico por la ecuación 6.

Es importante destacar que tanto la amplitud del rango de temperaturas en la transición de fases sólido-líquido y la magnitud del calor latente de fusión del PCM dependen en gran medida de la calidad del material y de los elementos adicionales que posea.

En cuanto a las propiedades físicas de la parafina utilizada en las pruebas experimentales se tiene el certificado de análisis expedido por el fabricante (ver tabla 1.2) el cual describe a la parafina semirrefinada de uso comercial.

Tabla 1.2 Certificado de análisis de cera de parafina semirrefinada

Test Items	Unit	Test Results
Melting Point	58 - 60°C	59
Oil Content	2.0 max.	0.7
Color (Saybolt)	+18 min.	+30
Needle Penetration (25)	23 max.	19
Light Stability	7 max.	4
Odor	2 max.	1

Fuente: Sorab Enterprise PTE LTDA.

Gracias al trabajo “Evaluación de parafina comercial como material de cambio de fase para almacenamiento de energía” [27] se evidenció que en las parafinas comerciales, la magnitud del calor latente de fusión es considerablemente menor que los materiales comúnmente utilizados para su uso en almacenamiento térmico. En específico, la cantidad de calor latente de la cera de parafina comúnmente se dice que viene en un orden de 170 – 240 kJ/kg [21], sin embargo, los estudios de la cera de parafina comercial demostraron que pueden tener un calor latente de fusión tan bajo en un orden

de 58.4 kJ/kg a 31.55 kJ/kg a una presión de 74.64 kPa y 96.63 kPa respectivamente [27].

Teniendo presente lo ya mencionado, se muestra en la tabla 1.3 las propiedades físicas tanto de la parafina como el aire usadas en este proyecto para el modelo numérico; en donde todas las propiedades, a excepción del calor latente, se encuentran dentro de los rangos usuales descritos en diferentes artículos.

Tabla 1.3 Propiedades físicas del aire y la parafina utilizadas

Propiedad	Aire	Parafina	Unidad	Ref. Parafina
Densidad (sólido)	1.225	893	kg/m ³	[28]
Densidad (líquido)	1.225	782	kg/m ³	[28]
Calor específico (sólido)	1006.43	2100	J/kg × K	[28]
Calor específico (líquido)	1006.43	2490	J/kg × K	[28]
Calor latente	0	31550	J/kg	[27]
Fusión (T _{líquido})	-273.15	60	°C	[28]
Solidificación (T _{sólido})	-273.15	46	°C	[28]
Conductividad térmica	0.0242	0.21	W/m × k	[28]
Viscosidad	1.7894e-05	4.84e-03	kg/m × s	[33]

Fuente: Bases de datos, ANSYS Fluent.

7.8 DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

La dinámica de fluidos computacional o CFD por sus siglas en inglés (Computational Fluid Dynamics) es una de las ramas de la mecánica de fluidos que predice el flujo, transferencia de calor y masa, reacciones químicas y demás fenómenos físicos afines en un fluido. Para predecir estos fenómenos, el CFD hace uso de la solución de las ecuaciones gobernantes de conservación de la masa, cantidad de movimiento, la energía y especies; sin embargo, si el problema que se está analizando posee un nivel de complejidad mayor (turbulencia, flujos multifásicos, combustión, etc.) se requerirá de otras ecuaciones que representen dichos fenómenos físicos adicionales.

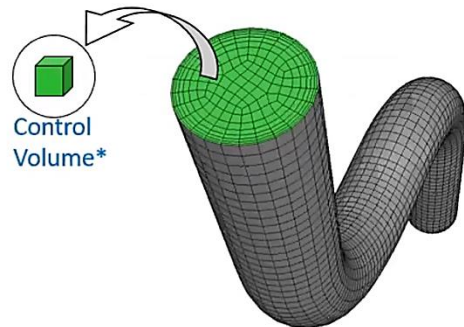
La ecuación general de conservación (transporte) puede escribirse en su forma integral sobre un elemento de volumen, así:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV}_{\text{Acumulación}} + \underbrace{\oint_A \rho \phi V \cdot dA}_{\text{Convección}} = \underbrace{\oint_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot dA}_{\text{Difusión}} + \underbrace{\int_V S_\phi dV}_{\text{Generación}} \quad (3)$$

Figura 1.9 (a) Configuración de la ecuación general de gobierno según ϕ
 (b) Discretización espacial en volúmenes de control finitos [29]

<u>Equation</u>	ϕ
Continuity	1
X momentum	u
Y momentum	v
Z momentum	w
Energy	h

(a)



(b)

Fuente: ANSYS. "Module 01: Overview of the CFD process."

En la ecuación 3, el símbolo genérico ϕ representa el valor que adopta esta ecuación según las ecuaciones gobierno específicas expuestas en la figura 1.9 (a). Cabe aclarar que el nombre de las ecuaciones mostradas en la figura representa las ecuaciones de gobierno básicas expuestas anteriormente:

- **Ecuación de continuidad** = conservación de masa.
- **Ecuación de momento** = conservación del movimiento (segunda ley de Newton). Esta ecuación se subdivide en otras ecuaciones dependiendo de los ejes de referencia que posea el dominio del problema, siendo 3 ecuaciones lineales (x,y,z) si mi dominio es tridimensional o 2 (x,y) si es bidimensional.
- **Ecuación de energía** = conservación de la energía.

Es importante resaltar que la forma de las ecuaciones de continuidad, masa y energía presentan un término temporal que dependen de la variable tiempo denominado “*acumulación*”, también poseen 2 términos que describen el transporte por *convección* y *difusión* del fluido y un término extra denominado “*generación*” el cual representa un término fuente que puede presentarse en un volumen de control (ver ecuación 3).

Ya que estas ecuaciones diferenciales (en algunos casos) presentan características de no linealidad, se hace imposible que la resolución de estas sea de forma analítica, por lo que el CFD hace uso de métodos numéricos en los cuales las ecuaciones diferenciales parciales se discretizan en un sistema de ecuaciones algebraicas al dividir el dominio del problema en pequeños volúmenes de control (figura 1.9 (b)), en donde la resolución numérica de estos últimos representa el campo de solución [29].

7.9 ECUACIONES DE GOBIERNO

ANSYS Fluent es el código comercial CFD utilizado en este trabajo. Una de las ventajas de utilizar este software respecto a otras soluciones es la implementación de la técnica entalpia-porosidad de V.R. Voller and C. Prakash [30] que modela el proceso de fusión/solidificación. Esta técnica asocia en cada celda del dominio una “fracción líquida” que se calcula por cada iteración haciendo uso de un balance de entalpia; para ello, la zona blanda o mushy zone (transición entre la fase física sólido-líquido) describe la fracción líquida mediante algún valor comprendido entre 0 y 1. Esta zona blanda se modela como un medio “pseudo” poroso en el cual dicha porosidad aumenta de 0 a 1 a medida que el material se funde y por el contrario disminuye de 1 a 0 a medida que se solidifica. Cuando el material se ha solidificado completamente en alguna celda, las velocidades caen a cero ya que la porosidad también adopta dicho valor. [31]

La ecuación de energía del modelo fusión/solidificación se describe usando un balance de entalpías al sumar el calor sensible, h y el calor latente ΔH :

$$H = h + \Delta H \quad (4)$$

Donde el calor sensible se define como:

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (5)$$

h_{ref} = Entalpia de referencia

T_{ref} = Temperatura de referencia

C_p = Calor específico a presión constante

La fracción líquida del medio poroso se define como:

$$\begin{aligned}\beta &= 0 \text{ si } T < T_{\text{solido}} \\ \beta &= 1 \text{ si } T > T_{\text{liquido}}\end{aligned}\quad (6)$$

$$\beta = \frac{T - T_{\text{solido}}}{T_{\text{liquido}} - T_{\text{solido}}} \text{ si } T_{\text{solido}} < T < T_{\text{liquido}}$$

El calor latente del material L se define en términos de la fracción líquida, en donde el contenido de calor puede variar entre cero (para un sólido) y L (para un líquido).

$$\Delta H = \beta L \quad (7)$$

La **ecuación de energía** que finalmente se utiliza en la **fusión/solidificación** se define como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (8)$$

H = Entalpia (ver ecuación 4)

ρ = Densidad

\vec{v} = Velocidad del fluido

S = Termino fuente

Por otro lado, el hundimiento del impulso debido a la porosidad reducida en la zona blanda cuando el material se solidifica (porosidad igual a cero) se representa bajo la siguiente **ecuación de momento** escrita al mismo modelo de **fusión/solidificación**:

$$S = \frac{(1-\beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} A_{mush} (\vec{v} - \vec{v}_p) \quad (9)$$

β = Fracción de volumen líquido

ε = número pequeño (0.001) para evitar la división por cero

A_{mush} = zona blanda contante que mide la amplitud de amortiguamiento

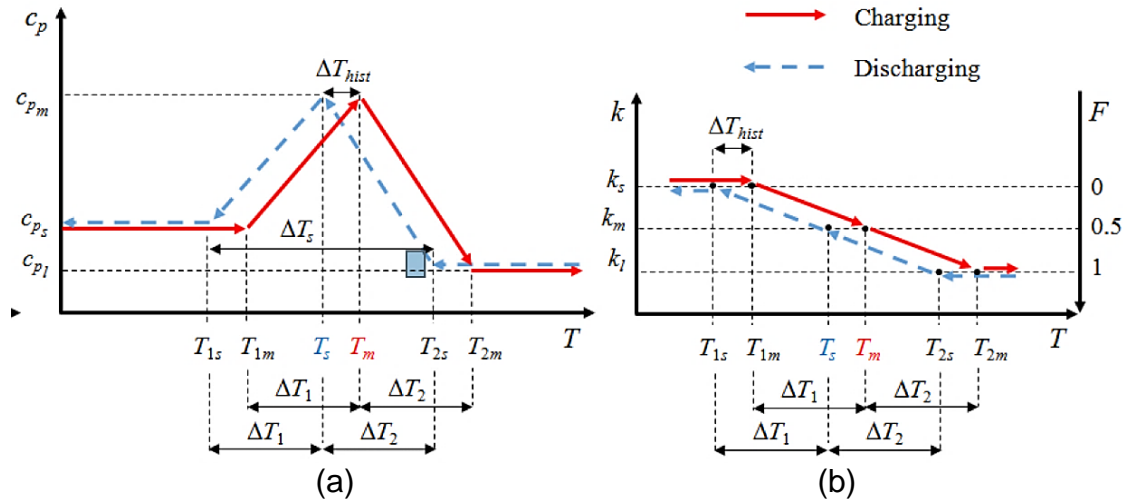
\vec{v}_p = velocidad del sólido por extracción de material

Existe otro método utilizado para modelar el calor latente en la transición de fases físicas de un material denominado “capacidad calorífica efectiva”, la ventaja de emplear este método en CFD respecto al método de fusión/solidificación radica en la baja cantidad de cómputo necesaria para resolverse ya que no será necesario activar algún otro modelo extra. Este método solo puede ser aplicado en dominios de PCM relativamente pequeños ya que la influencia del hundimiento del material que se solidifica más la convección natural debido a la variación de densidades no representa un impacto significativo en sus resultados.

El método consiste en aproximar el calor específico del material a un calor específico efectivo (C_{eff}) que reúne tanto el calor específico del calor sensible (C_p) en la fase sólida y líquida del material como el calor latente de fusión (L) [32]. Ver figura 2.1 (a). Por otra parte, la conductividad térmica utiliza un valor contante en la fase sólida y líquida, y un valor lineal variable que depende de la diferencia entre la conductividad térmica del material en estado sólido y líquido, como se muestra en la figura 2.1 (b).

Este proyecto utiliza tanto la técnica de *fusión/solidificación* como el método de *capacidad calorífica efectiva*, los resultados del modelo que represente una mayor precisión será el escogido para próximas simulaciones.

Figura 2.1 Calor específico (a) y conductividad (b) en el método de capacidad efectiva [32]



Fuente: N. Soares. "Effective heat capacity method to simulate heat diffusion problems with phase change."

Para definir el método de **calor específico efectivo** de forma triangular se usa la siguiente ecuación con relación a la figura 2.1 (a):

$$C_p(T) = \begin{cases} C_{p_s} & T \leq T_{1m} \\ C_{p_s} + \frac{C_{p_m} - C_{p_s}}{T_m - T_{1m}} (T - T_{1m}) & T_{1m} \leq T \leq T_m \\ C_{p_m} + \frac{C_{p_l} - C_{p_m}}{T_{2m} - T_m} (T - T_m) & T_m \leq T \leq T_{2m} \\ C_{p_l} & T \geq T_{2m} \end{cases} \quad (10)$$

Donde C_{p_s} y C_{p_l} son el calor específico del material en la fase sólida y líquida respectivamente, T_{1m} es la temperatura con la que el PCM comienza a derretirse y T_{2m} es la temperatura en la que el PCM se encuentra completamente derretido, C_{p_m} es el valor más grande del calor específico efectivo a una temperatura supuesta T_m dentro del rango de temperaturas T_{1m} y T_{2m} .

8. DISEÑO METODOLÓGICO

En el diagrama de flujo de la figura 2.2 se muestra de forma general la metodología a seguir para desarrollar un modelo numérico computacional usando específicamente el software de simulación ANSYS. Se presentan 4 etapas que abarcan los pasos necesarios para la correcta elaboración de la simulación.

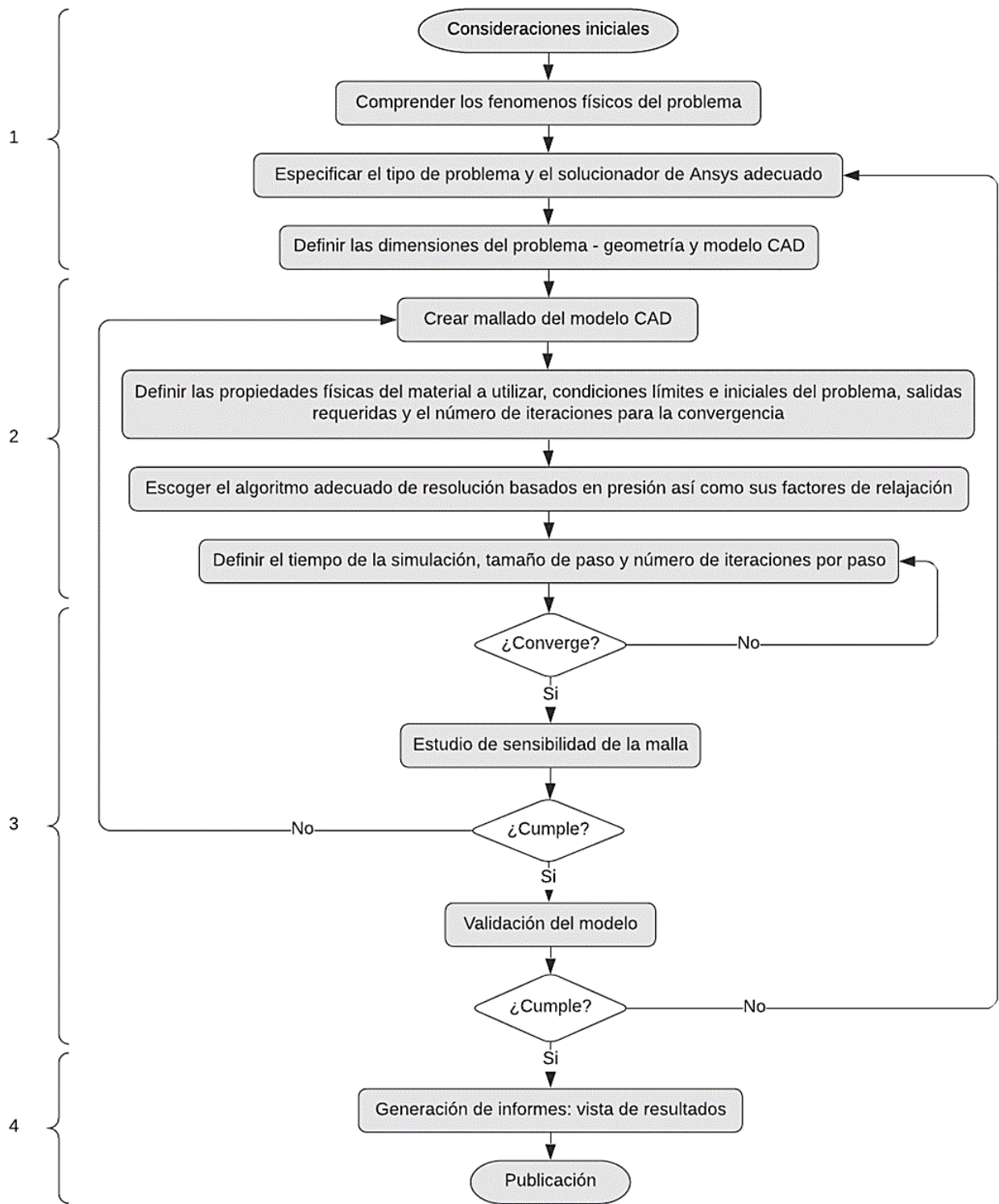
La etapa 1 o Inicio, describe las consideraciones que se deben tener en cuenta antes de poder desarrollar cualquier simulación, como conocer a profundidad el fenómeno físico que presenta el problema, si este es posible de simularse y si se cuenta con las capacidades computacionales para realizarlo.

La etapa 2 o Pre-procesamiento, abarca todas las actividades necesarias que se deben realizar antes de proceder con la solución del problema, en otras palabras, se recrea el problema físico de tal forma que el software pueda “leerlo”. En esta etapa se debe buscar los medios por los cuales se puede demostrar lo que se quiere lograr, estos medios reflejarán la correcta selección de los modelos físicos (multifase, energía, radiación, fusión y solidificación, etc.), el tipo de simulación a realizar: transitorio o estacionario y las salidas requeridas que mostrará la solución una vez que esta haya finalizado. También se deberá especificar qué tipo de método de solución es más conveniente en el esquema de acoplamiento de velocidad-presión (SIMPLE, SIMPLEC, PISO, COUPLED) al igual que su discretización espacial. Por último se debe precisar las iteraciones necesarias para la convergencia dependiendo de los modelos físicos ya seleccionados (continuidad, energía, velocidad, etc.). Si la simulación es transitoria, se deberá definir el tiempo que se desea simular: tamaño de paso y el número de tamaños de pasos, así como el número de iteraciones por cada paso.

La etapa 3 o Estudios, corresponde a una serie de análisis realizados al tamaño de paso escogido (si es una simulación transitoria), calidad de la malla y una validación de los datos obtenidos en la simulación en comparación a datos de pruebas experimentales. Cada uno de estos estudios y/o análisis tienen como objetivo garantizar la precisión y confiabilidad de la simulación. El estudio de la calidad de la malla y el tamaño de paso de tiempo se logra realizando varias simulaciones bajo las mismas condiciones de contorno pero cambiando el número de nodos y el tamaño de paso respectivamente; si las variaciones en los resultados entre un determinado número de nodos y un tamaño de paso es despreciable, se escogerá el número de nodos y tamaño de paso más grande para garantizar un recurso computacional menor.

La etapa 4 o Post-procesamiento incluye la forma visual en la que se requiere presentar los resultados o salidas requeridas que previamente habían sido escogidas en la etapa 2, estas incluyen: contornos de geometría 2D, contornos de planos en 3D, renderizado volumétrico, graficas, videos, etc.

Figura 2.2 Diagrama de flujo metodológico



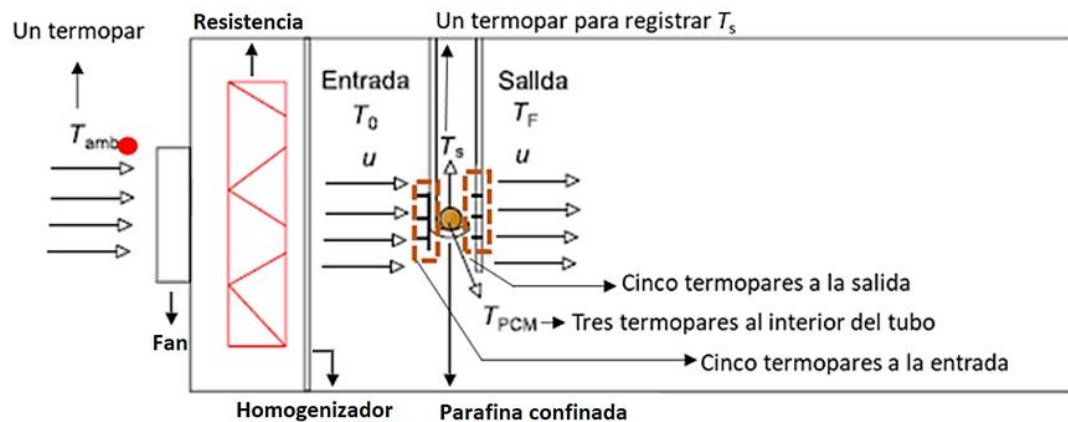
Fuente: Elaboración propia.

El problema por analizar de este proyecto resulta de la transferencia de calor existente entre el aire como fluido portador de energía y parafina confinada dentro de un banco de tubos como material receptor; a este tipo de simulación en CFD se le suele llamar *transferencia de calor conjugado* o CHT por sus siglas en inglés (Conjugate Heat Transfer) ya que tienen en cuenta la transferencia de calor existente entre diferentes dominios de fluido y/o sólidos al estar acopladas entre sí.

Para realizar una correcta simulación se han creado dos diferentes modelos CHT denominados *validación* y *banco de tubos*. El modelo *validación* busca simular un estudio experimental para determinar su precisión y error al comparar los datos obtenidos por cada uno de estos. El modelo de *banco de tubos*, respaldada por el modelo de validación, busca predecir el comportamiento térmico bajo otras condiciones.

El esquema general del estudio experimental se muestra en la figura 2.3 en donde un ventilador ingresa aire al recinto cerrado a temperatura ambiente y velocidad constante, después, una resistencia eléctrica calienta el aire a una temperatura predefinida para que posteriormente un homogeneizador de rejilla estabilice el flujo del aire.

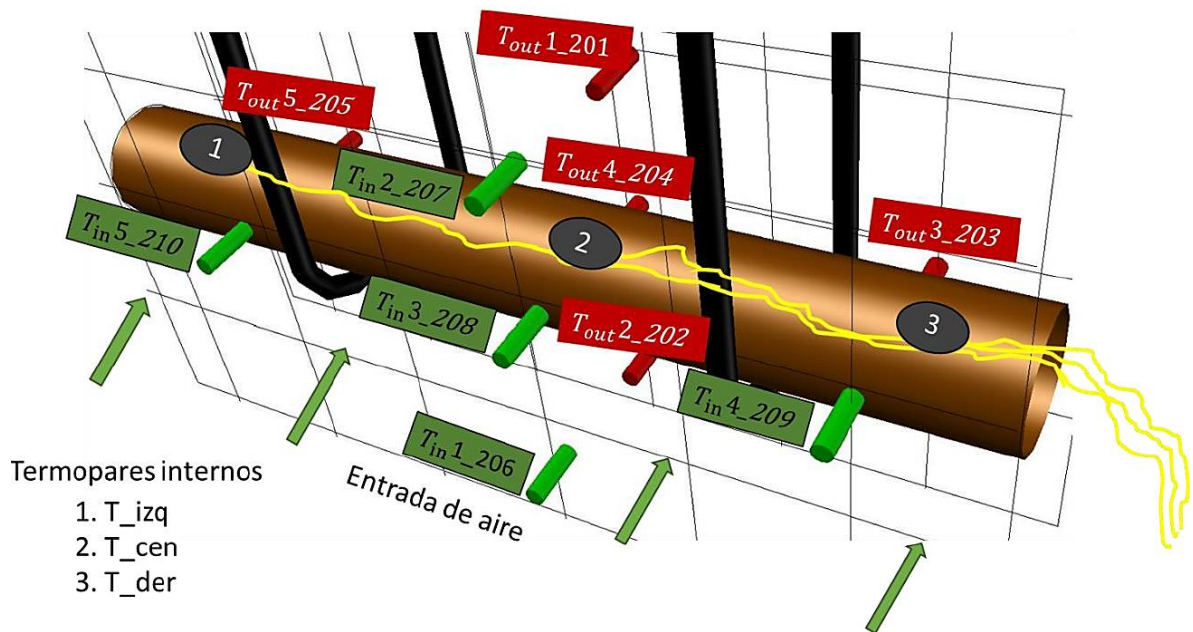
Figura 2.3 Esquema general del estudio experimental [9]



Fuente: M. Ochoa, "Implementación de un sistema de acumulación de energía con materiales de cambio de fase (PCM) en un secador solar tipo Hohenheim."

La figura 2.3 muestra la posición de los termopares puestos para medir la temperatura ambiente (T_{amb}), temperatura de entrada (T_0), temperatura superficial del tubo (T_s) y Temperatura final (T_f). La figura 2.4 muestra los 3 termopares ubicados al interior del tubo que contiene al PCM denominados T_{izq} , T_{cen} y T_{der} .

Figura 2.4 Termopares internos del estudio experimental [9]

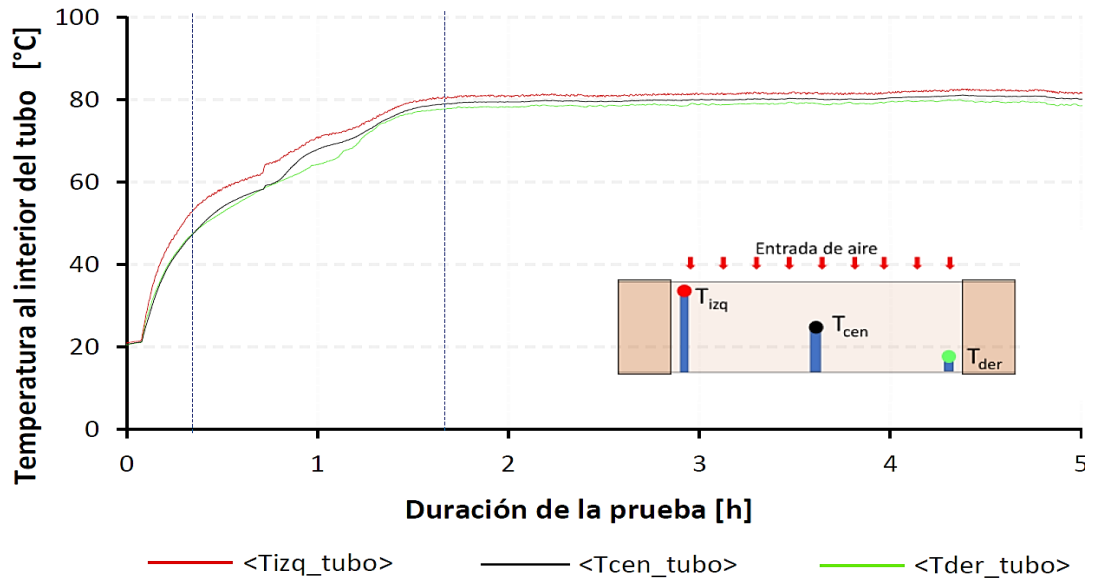


Fuente: M. Ochoa, "Implementación de un sistema de acumulación de energía con materiales de cambio de fase (PCM) en un secador solar tipo Hohenheim."

Es importante resaltar que la velocidad y temperatura de entrada son los parámetros necesarios que definen las condiciones de frontera del modelo validación y los datos obtenidos por los termopares internos son los resultados a comparar para hallar la precisión y error del modelo numérico.

La figura 2.5 muestra las temperaturas internas registradas por los termopares a lo largo del tiempo a una velocidad y temperatura de entrada de 0.14 m/s y 80°C respectivamente. El diámetro nominal del tubo de cobre tipo L que contiene a la parafina confinada es de 1 pulgada.

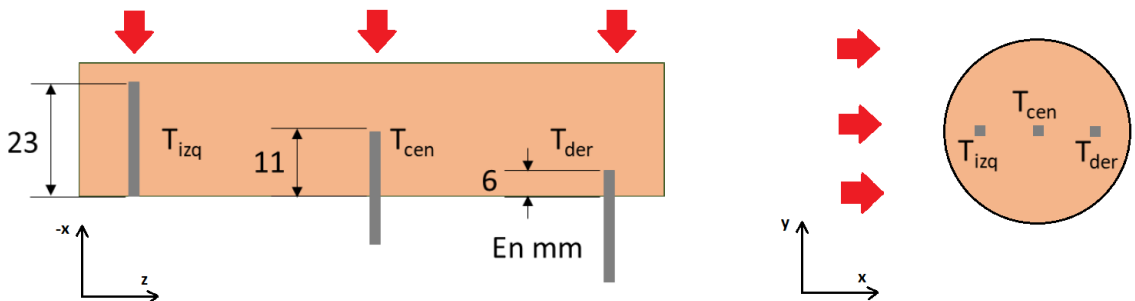
Figura 2.5 Resultados experimentales de la temperatura interna del PCM [9]



Fuente: M. Ochoa, "Implementación de un sistema de acumulación de energía con materiales de cambio de fase (PCM) en un secador solar tipo Hohenheim."

La ubicación de los termopares internos se muestra en la figura 2.6. Como se puede evidenciar en esta imagen, el flujo de aire representado por las flechas rojas (dirección en el eje x) es completamente perpendicular a la dirección del cilindro (dirección en z), como el cilindro posee un único diámetro las variaciones del comportamiento térmico a lo largo del mismo no son significantes, por lo que la simulación puede simplificarse para realizarse bajo un modelo numérico 2D en el plano (XY).

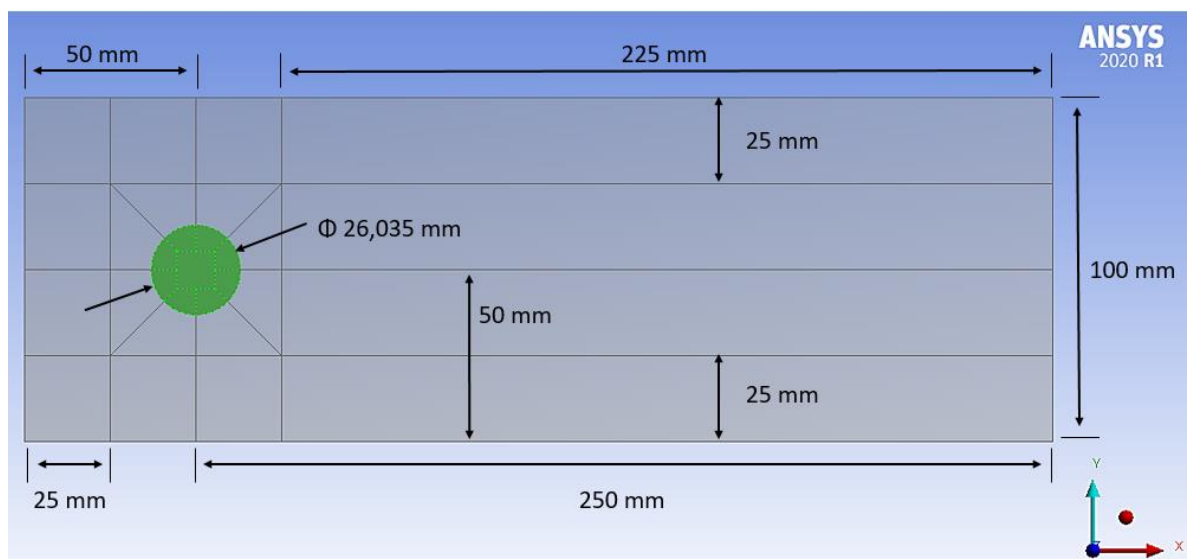
Figura 2.6 Ubicación de los termopares internos



Fuente: M. Ochoa, "Implementación de un sistema de acumulación de energía con materiales de cambio de fase (PCM) en un secador solar tipo Hohenheim."

Gracias al procedimiento y los resultados del estudio experimental, se procede a hacer lo mismo, pero haciendo uso de la dinámica de fluidos computacional CFD. Para ello, se crea la geometría de estudio con las dimensiones mostradas en la figura 2.7 el cual se encuentra realizada a través de planos de espesor cero (2D). Cabe señalar que aunque se esté recreando el estudio experimental mostrado en la figura 2.3, las dimensiones no deben ser necesariamente iguales ya que la zona de interés reside en el PCM; sin embargo, se debe elegir una distancia prudente del dominio del aire después del PCM para evitar problemas de reingreso de flujo y por consiguiente una lentitud en la convergencia.

Figura 2.7 Geometría y dimensiones del modelo validación



Fuente: Elaboración propia.

Las geometrías del modelo validación como el modelo de banco de tubos están realizadas bajo el software CAD Design-Modeler de Ansys Workbench

En la figura 2.7 también se muestra los diferentes dominios denotados por una tonalidad de color distinta, siendo el dominio circular el PCM y el dominio exterior a este, el aire. La resistencia térmica que suponen la presencia de cobre entre el aire

y el PCM será puestas a consideración más adelante, a que no será necesario crear el dominio de este. Esta figura también muestra una serie de divisiones que se realizan con el objetivo de realizar un mallado estructural y por consiguiente una buena calidad de malla. Por otro lado, como el problema supone una transferencia de calor conjugada, es necesario acoplar el dominio del aire y PCM uniendo los dos planos o cuerpos en una sola parte.

Con las dimensiones del problema ya definidas, se procede a discretizar o “mallar” los dominios de control haciendo uso del programa Meshing de Ansys. Como es necesario realizar un estudio de sensibilidad de la malla para determinar la cantidad de elementos y nodos necesarios para obtener los resultados más precisos posibles, se han creado 3 “mallas” distintas. Cada una de esas mallas tiene un numero diferente de elementos y nodos, como se muestra en la tabla 1.4.

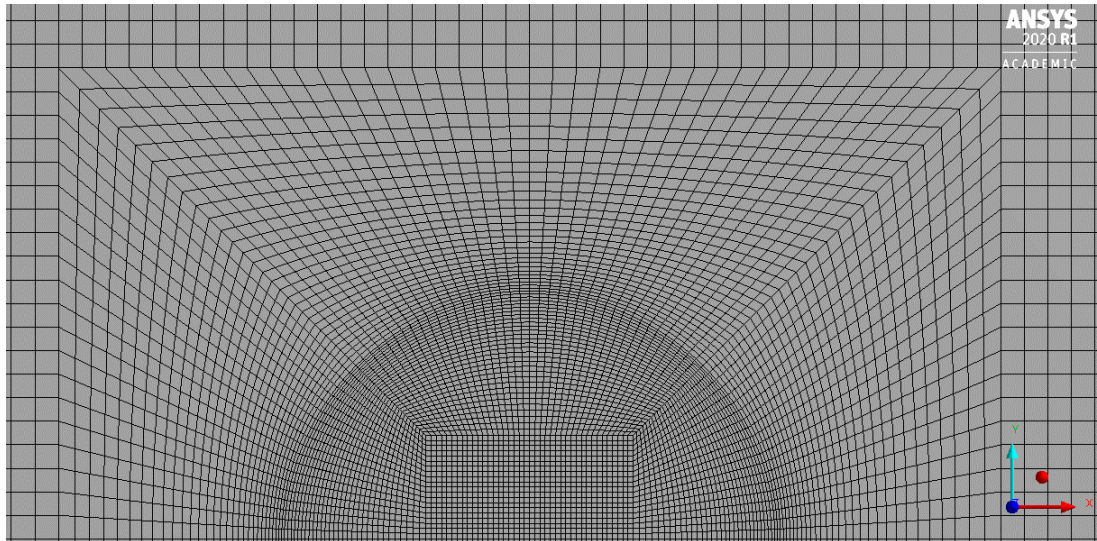
Tabla 1.4 Número de elementos y nodos de las mallas utilizadas para su estudio de sensibilidad

Método	melting/solified			capacidad efectiva		
	1	2	3	1	2	3
Malla						
Nodos	15970	37968	94801	29121	61671	109441
Elementos	15808	37728	94400	28800	61200	108800

Fuente: Elaboración propia.

La forma de los elementos escogido son cuadriláteros (ver figura 2.8) ya que generalmente poseen una mejor estabilidad y requiere de un menor número de iteraciones para alcanzar la convergencia; también se procuró que el tamaño del elemento en las paredes fuera considerablemente pequeño para tener una mejor resolución de los efectos de pared (capa limite).

Figura 2.8 Malla estructurada de elementos cuadriláteros empleado.



Fuente: Elaboración propia

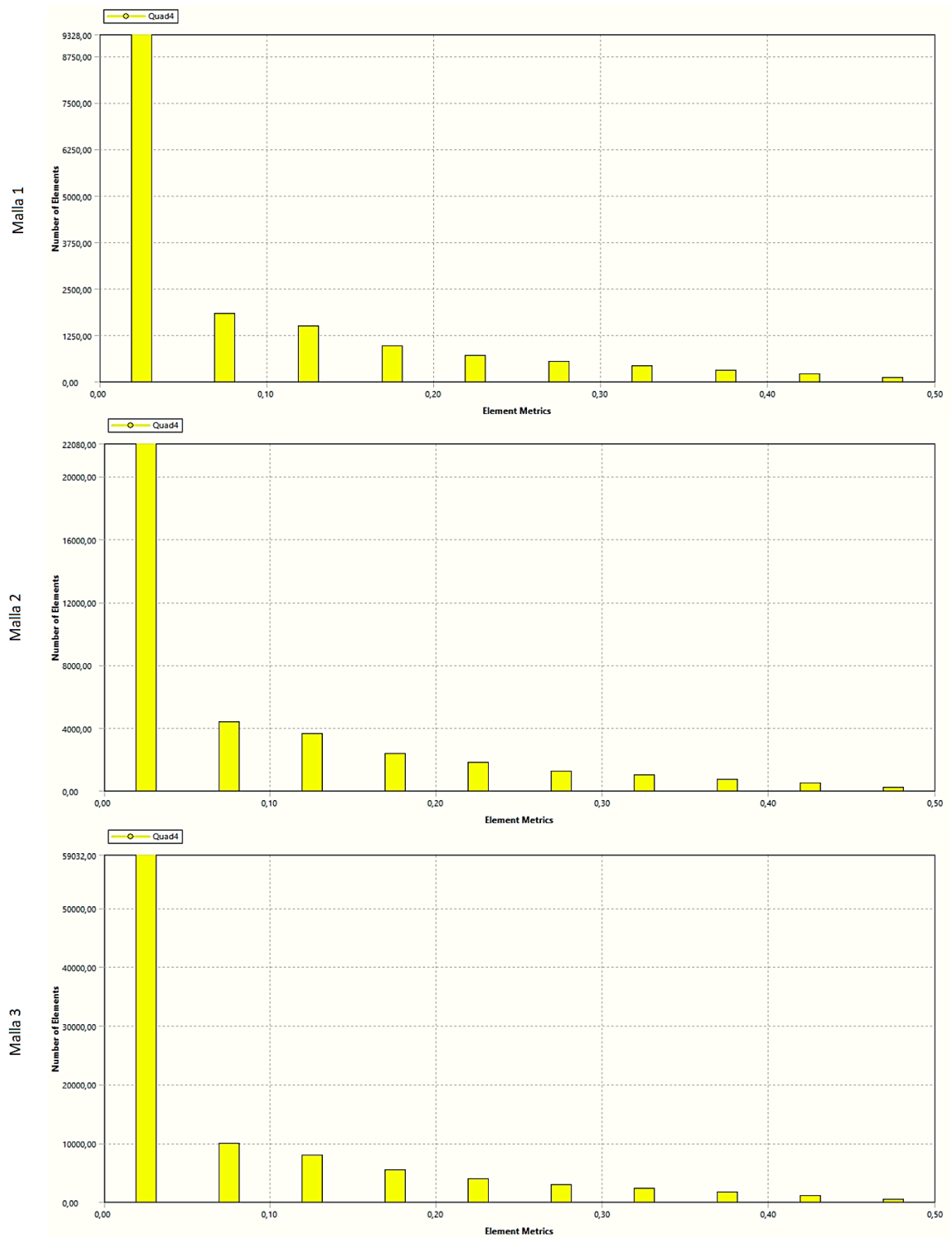
Para verificar la calidad de la malla, Ansys ofrece unas métricas de mallado en donde una de ellas denominada *skewness* u oblicuidad evalúa dicha calidad en un rango de 0 a 1, en donde un valor 0 denota un cuadrado perfecto (90°) y un valor de 1 describe un cuadrado distorsionado ($\pm 90^\circ$), ver figura 2.9. La calidad del elemento de las mallas se muestra en la figura 3.1 y 3.2.

Figura 2.9 Métrica de mallado según la forma de la celda (oblicuidad)



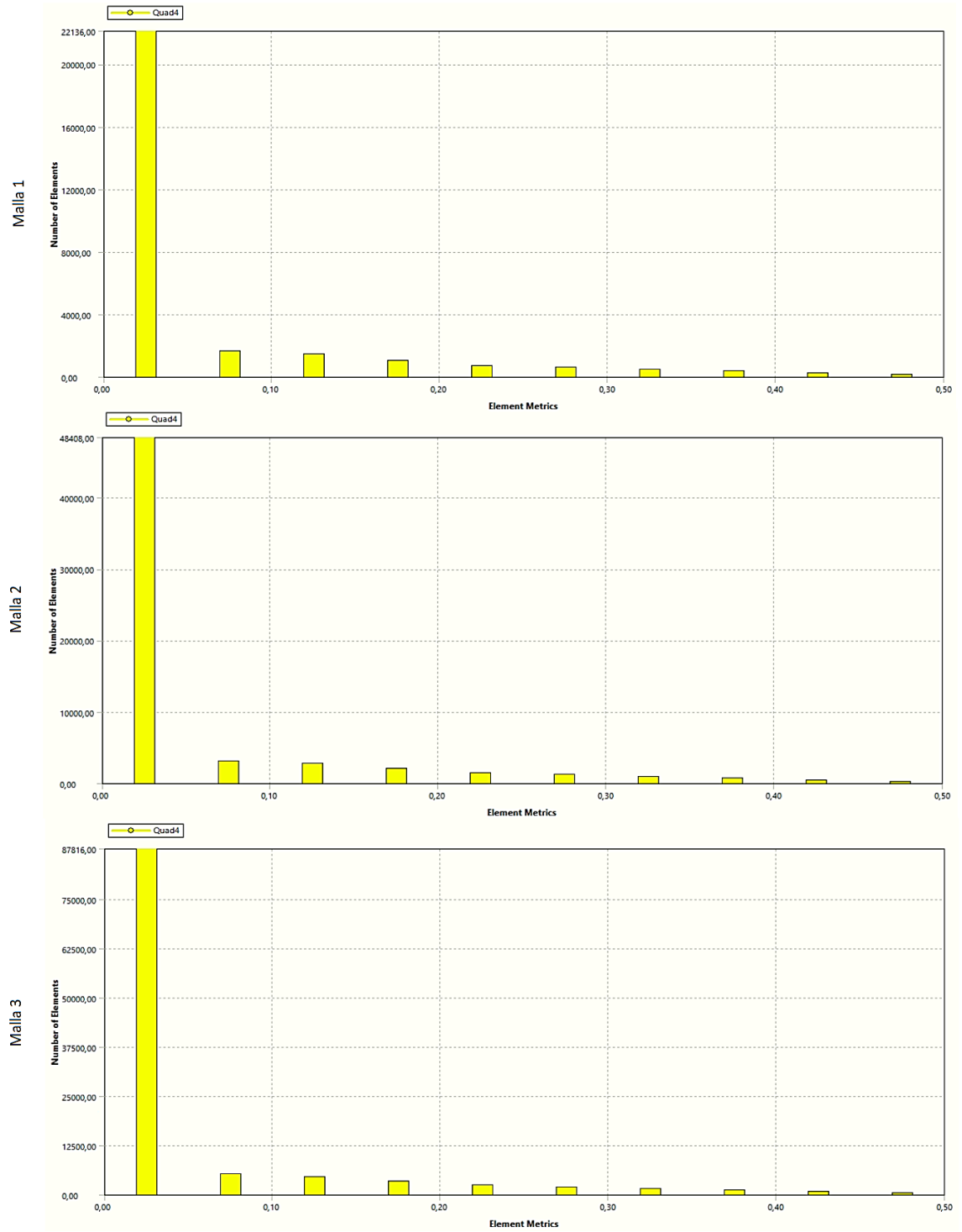
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.1 Oblicuidad de las mallas 1, 2 y 3 método melting/solified



Fuente: Elaboración propia.

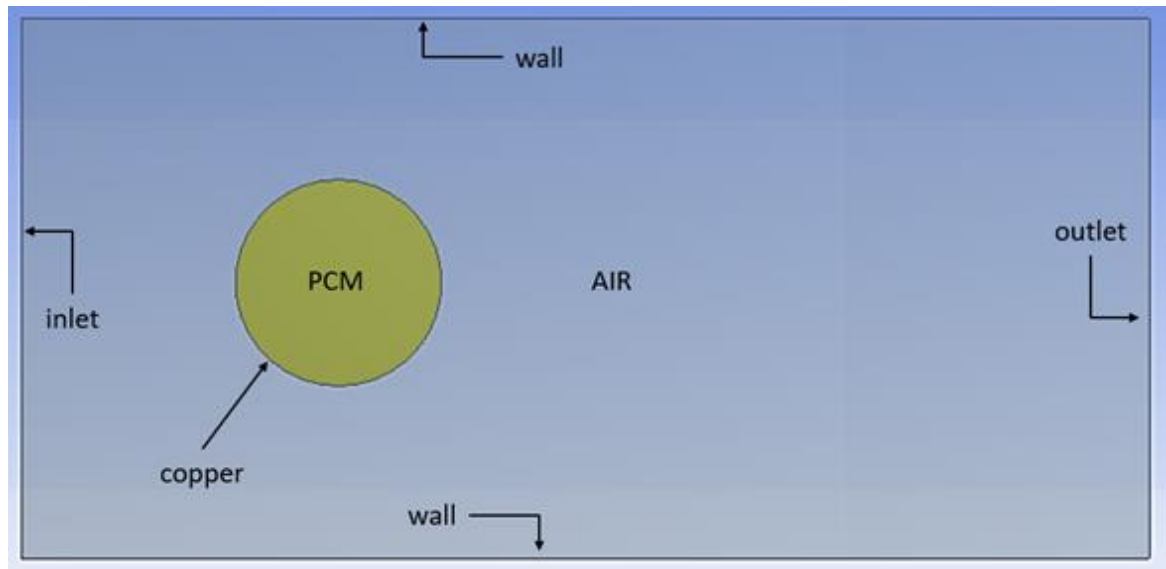
Figura 3.2 Oblicuidad de las mallas 1, 2 y 3 método capacidad efectiva



Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se procede a darle un nombre a todas aquellas aristas y/o planos que componen todo el dominio del problema (ver figura 3.3) con la finalidad de facilitar la identificación de estos para crear las condiciones de frontera que se harán más adelante.

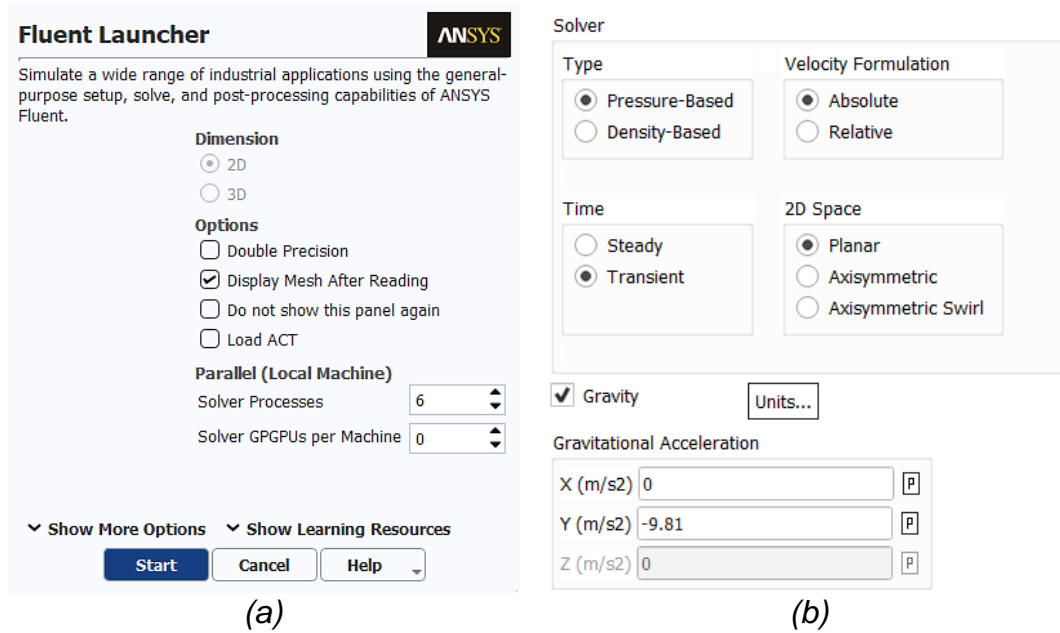
Figura 3.3 Nombre/Ubicación de los dominios de control y condiciones de frontera



Fuente: Elaboración propia.

Antes de asignar las condiciones de frontera y los materiales a los dominios de control, Ansys ofrece la posibilidad de trabajar bajo un proceso en serie o en paralelo, como se muestra en la figura 3.4 (a). Como el tiempo de simulación es un factor importante en este proyecto, se usó la opción “paralelo” el cual consiste en dividir o particionar la malla en la cantidad de procesos que le asignemos con el fin de que cada partición se resuelva simultáneamente. Cabe destacar que el número de procesos o divisiones se ve limitado por la cantidad de núcleos físicos y/o hilos que posea el procesador y la memoria RAM disponible en el computador.

Figura 3.4 Configuración inicial y general, preprocesamiento



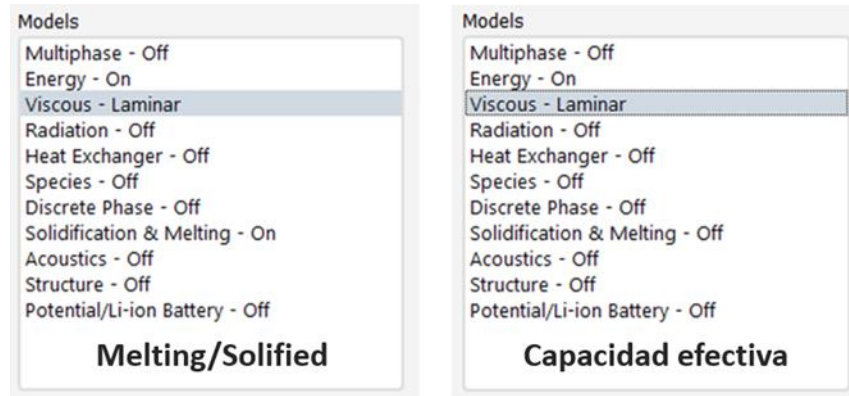
Fuente: Elaboración propia

Para la configuración general (ver figura 3.4 (b)), se seleccionó el tipo de solucionador basado en presión ya que es una de las limitantes a la hora de utilizar el modelo fusión-solidificación, la velocidad es absoluta y el espacio 2D es planar. Como lo que se quiere obtener de la simulación son los datos que varían a lo largo del tiempo y no una solución en estado estable, se escogió un tiempo transitorio.

Si en el modelado del problema un material presenta una variación de densidad significativa que debe ser tomada en cuenta, se deberá habilitar la opción de gravedad. Para el estudio de sensibilidad de la malla, la magnitud, dirección y sentido de la gravedad se muestran en la figura 3.4 (b) (para una mejor comprensión, los ejes coordenados del dominio se muestran en la figura 2.7).

Posteriormente se procede a activar los modelos necesarios para describir los fenómenos físicos del problema, (ver figura 3.5).

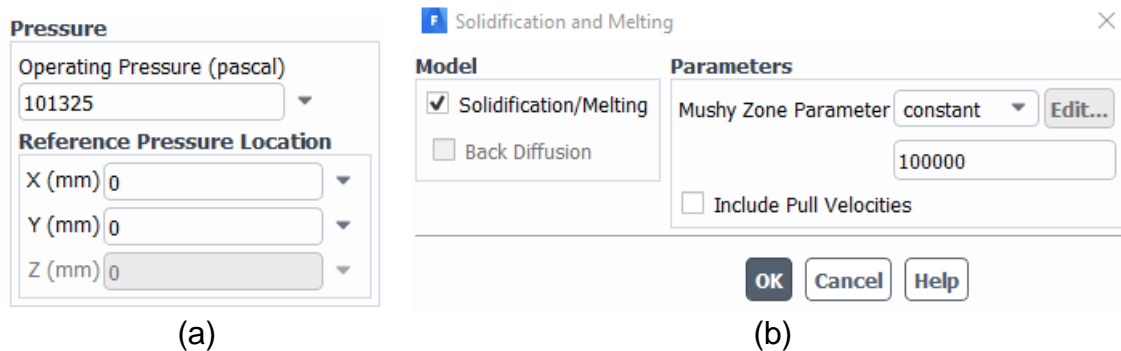
Figura 3.5 Modelos necesarios para el método melting/solified y capacidad efectiva



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se recrean los materiales que se van a usar en la simulación con las propiedades descritas en la tabla 1.3 para asignársele a los diferentes dominios de control (aire y PCM) mostradas en la figura 3.3. Dentro de la configuración de las condiciones de operación, la magnitud de la presión y la localización de la referencia de la misma se muestran en la figura 3.6 (a). Para el método de melting/solified, los parámetros que definen la zona blanda constante que mide la amplitud de amortiguamiento A_{mush} de la ecuación (9) del término fuente S de la ecuación 8 se muestra en la figura 3.6 (b).

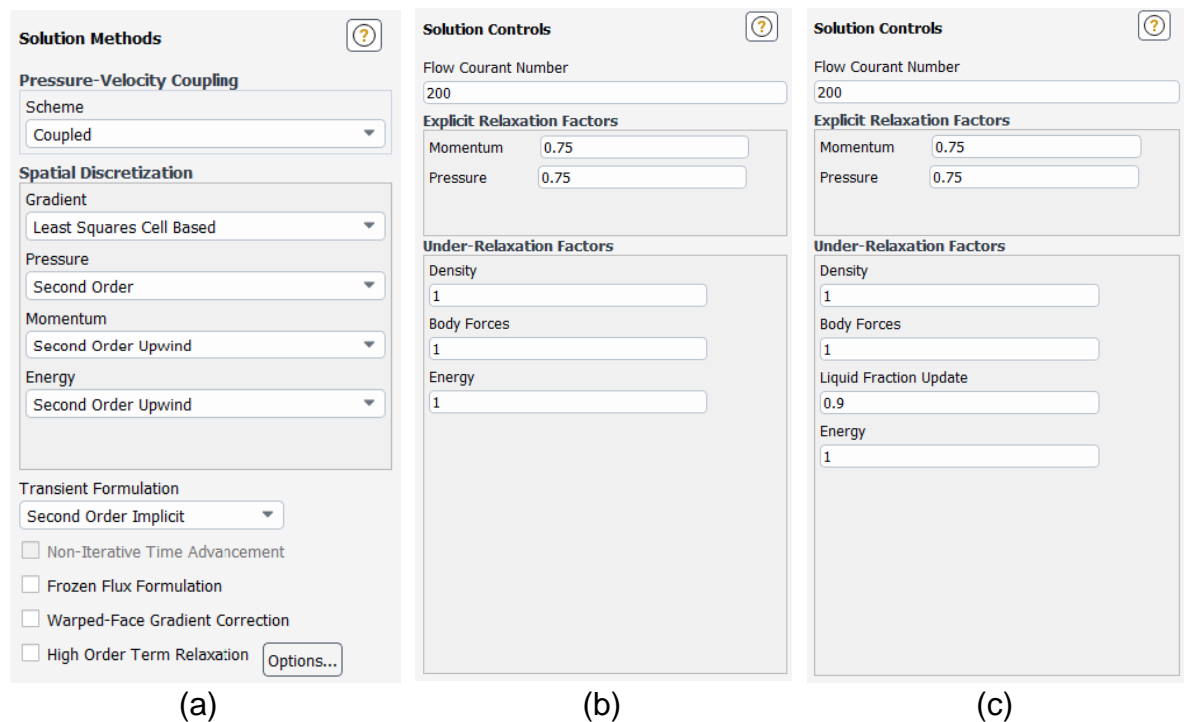
Figura 3.6 Configuración de las condiciones de operación



Fuente: Elaboración propia.

Como el tamaño de simulación es demasiado grande, se optó por el esquema “acoplado” para el acoplamiento de la presión-velocidad ya que permite tamaños de pasos de tiempo relativamente grandes. La discretización espacial que definen los términos para calcular difusión térmica y derivadas de velocidad también se muestran en la figura 3.7 (a). El número de flujo de Courant que se utiliza para estabilizar el comportamiento de convergencia se muestran en la figura 3.7 (b) y (c) para los métodos de melting/solified y capacidad efectiva respectivamente, también se muestra los factores de relajación usados para tener un comportamiento más estable en los residuales y convergencia del problema.

Figura 3.7 Métodos y controles de solución

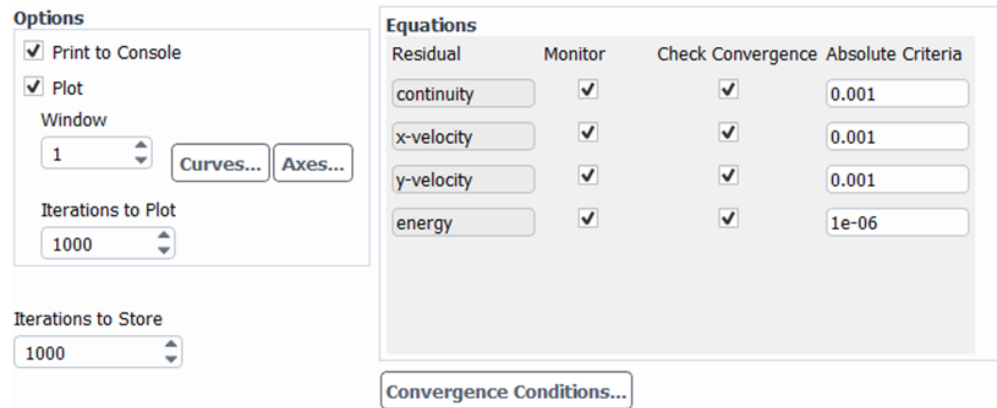


Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros que definen la convergencia del problema se muestran en la figura 3.8. Como el flujo de calor es el aspecto más relevante de la simulación (para una mayor precisión de la misma) se configuró el criterio absoluto de la energía con un

valor significativamente menor que las demás ecuaciones de continuidad y momento.

Figura 3.8 Parámetros de convergencia



Fuente: Elaboración propia.

Es importante resaltar que el criterio absoluto de la energía no debe ser muy grande debido a que es posible que el problema converja antes de tiempo al asumir el comportamiento isotérmico durante la transición de cambio de fase como un estado estable. Las condiciones de frontera utilizados para el modelo de validación que definen el comportamiento de los dominios de control mostrados en la figura 3.3 se muestran en la tabla 1.5.

Tabla 1.5 Condiciones de frontera del modelo validación

Nombre	Tipo	Condición
Inlet	velocity-inlet	Velocidad de entrada= 0,14 m/s
		Temperatura de entrada = 80 °C
Outlet	pressure-outlet	Presión manométrica = 0 Pa
Air	interior	-
PCM	interior	-
Copper	wall	Condición térmica = acoplado
		Nombre del material = cobre
		Grosor de la pared = 1,27 mm
Wall	wall	Flujo de calor = 0 W/m ²

En la inicialización de la solución se escogió el método “inicialización estándar” el cual permite configurar los valores iniciales de la presión, velocidad y temperatura en el primer instante de tiempo (ver figura 3.9).

Figura 3.9 Valores iniciales de la inicialización de la solución

Gauge Pressure (pascal)	0
X Velocity (m/s)	0
Y Velocity (m/s)	0
Temperature (c)	25

Fuente: Elaboración propia.

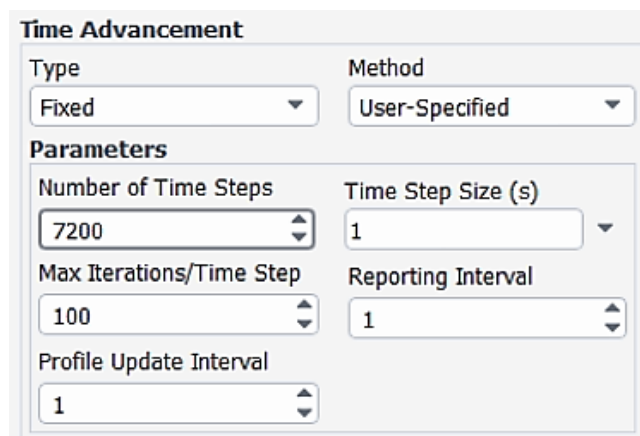
Para tener una mejor comprensión de las condiciones de borde en relación a la inicialización de la solución, lo que se buscó con esta configuración es que en el primer instante de tiempo, tanto el PCM como el aire estuvieran a una temperatura de 25 °C y sin ningún flujo de calor (como el PCM está a temperatura ambiente se encuentra en fase solida), a medida que avanza el tiempo cuando se da inicio a la solución, el aire entra a una velocidad de 0,14 m/s y una temperatura de 80 °C por lo que calentará el PCM hasta una temperatura igual o cercana a la temperatura del aire. Como el PCM pasa del estado sólido al líquido, se dice que el proceso térmico del PCM sufrió una “carga” al almacenar dicha energía.

Por último se debe configurar el tiempo de avance. Al ser una simulación transitoria es necesario definir el tamaño del paso de tiempo, el número de pasos de tiempo, y el máximo número de iteraciones por cada paso de tiempo (ver figura 4.1).

Como el tiempo simulación del modelo de validación es de 2 horas, se escogió inicialmente un tamaño del paso de tiempo de 1 segundo, esto quiere decir que para

simular las 2 horas se requerirán 7200 pasos de tiempo. Por cada paso de tiempo (1 segundo) las ecuaciones diferenciales deberán alcanzar la convergencia (de acuerdo con el criterio absoluto de los residuales mostrados en la figura 3.8) en un máximo de 100 iteraciones. Cabe aclarar que se configuró un máximo de iteraciones de 100 para cada paso de tiempo porque generalmente al inicio de una simulación se requerirán muchas iteraciones para alcanzar la convergencia, sin embargo, a medida que avanzan los cálculos, lo normal para alcanzar la convergencia se encuentra entre 5 a 10 iteraciones. Si después de un tiempo se observa que no se alcanza la convergencia en dicho intervalo, será más eficiente (computacionalmente hablando) reducir el tamaño del paso de tiempo.

Figura 4.1 Configuración del tiempo de avance

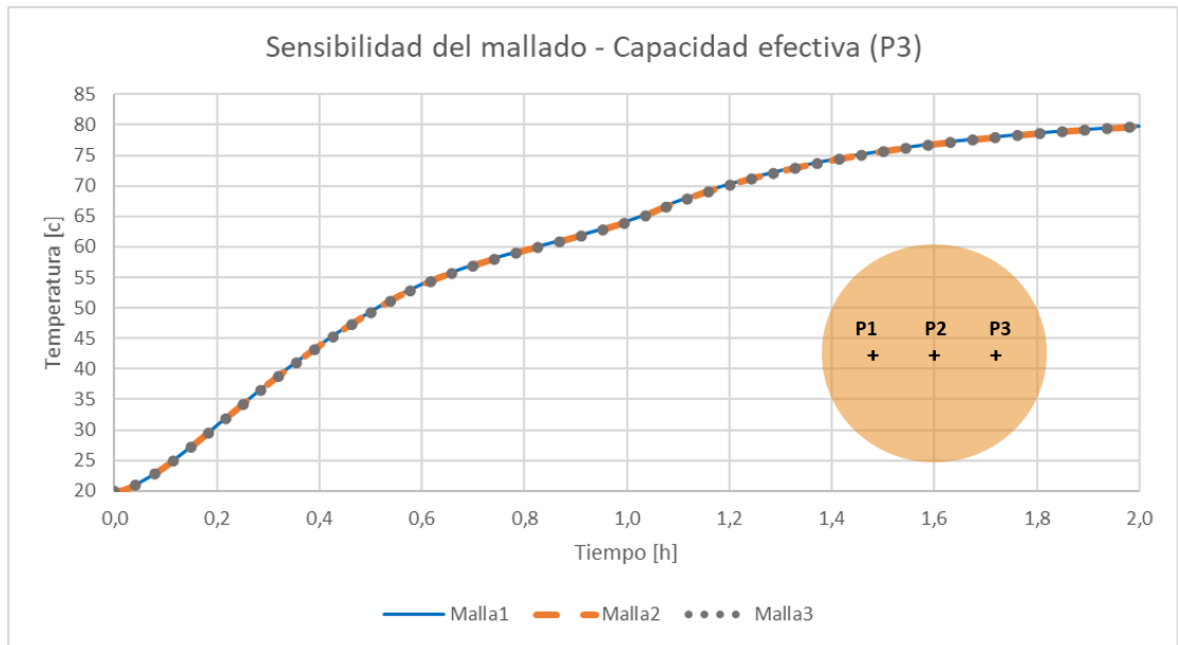


Time Advancement	
Type	Method
Fixed	User-Specified
Parameters	
Number of Time Steps	Time Step Size (s)
7200	1
Max Iterations/Time Step	Reporting Interval
100	1
Profile Update Interval	
1	

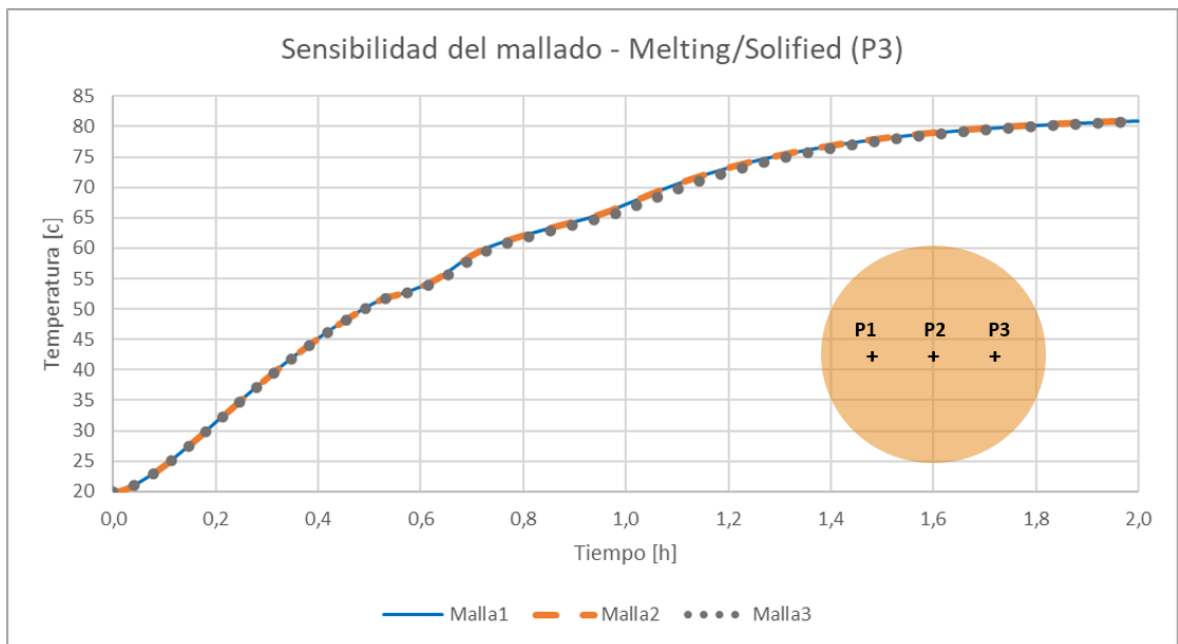
Fuente: Elaboración propia.

Para evaluar el estudio de sensibilidad de malla se compararon los resultados obtenidos de la simulación (usando las diferentes mallas expuestas en la tabla 1.4) a través de una gráfica que muestra la variación que sufrió la temperatura del PCM en un punto específico denominado "P3". Como se muestra en la figura 4.2 (la ubicación de dicho punto corresponde a la misma posición del termopar "T_{der}" mostrado en la figura 2.6).

Figura 4.2 Sensibilidad de malla, método capacidad efectiva y melting/solified



(a)



(b)

Fuente: Elaboración propia.

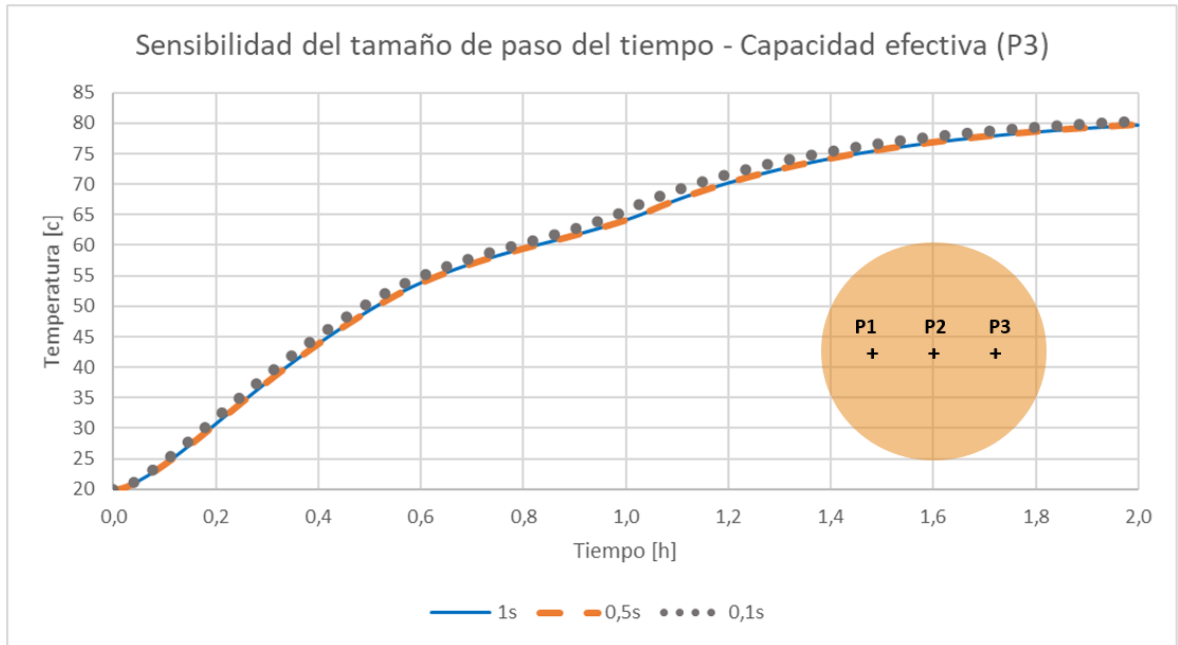
Gracias al estudio realizado se puede inferir que las 3 mallas evaluadas en el método de capacidad efectiva son lo suficientemente buenas como para decantarse por cualquiera de ellas; sin embargo, como la malla 1 posee la cantidad de nodos y elementos más baja, será la mejor opción para realizar futuras simulaciones ya que su coste computacional y por ende el tiempo de cálculo será menor. Para el método de melting/solified se encontró que la cantidad de nodos y elementos presentes en la malla sí representan un impacto directo en los resultados en comparación al método de capacidad efectiva, sin embargo, en líneas generales dicha variación no es lo suficientemente grande como para desechar completamente cualquiera de estas mallas, por lo que escoger alguna de estas dependerá más de la eficiencia computacional que de la variación de los resultados de cada una.

Es importante destacar que en un principio el tamaño de paso a la cual se configuró la simulación en las 6 mallas (3 por cada método) fue de 1 segundo; sin embargo, la malla 1 del método melting/solified no era lo suficientemente fina como para alcanzar la convergencia en el máximo número de iteraciones establecido, por lo que se vio en la obligación de disminuir el tamaño de paso a 0,5 segundos. Por esta razón el tamaño de paso evaluado en las tres mallas del método de capacidad efectiva es de 1 segundo, mientras que para el otro método se optó por un tamaño de paso de 0,5 segundos.

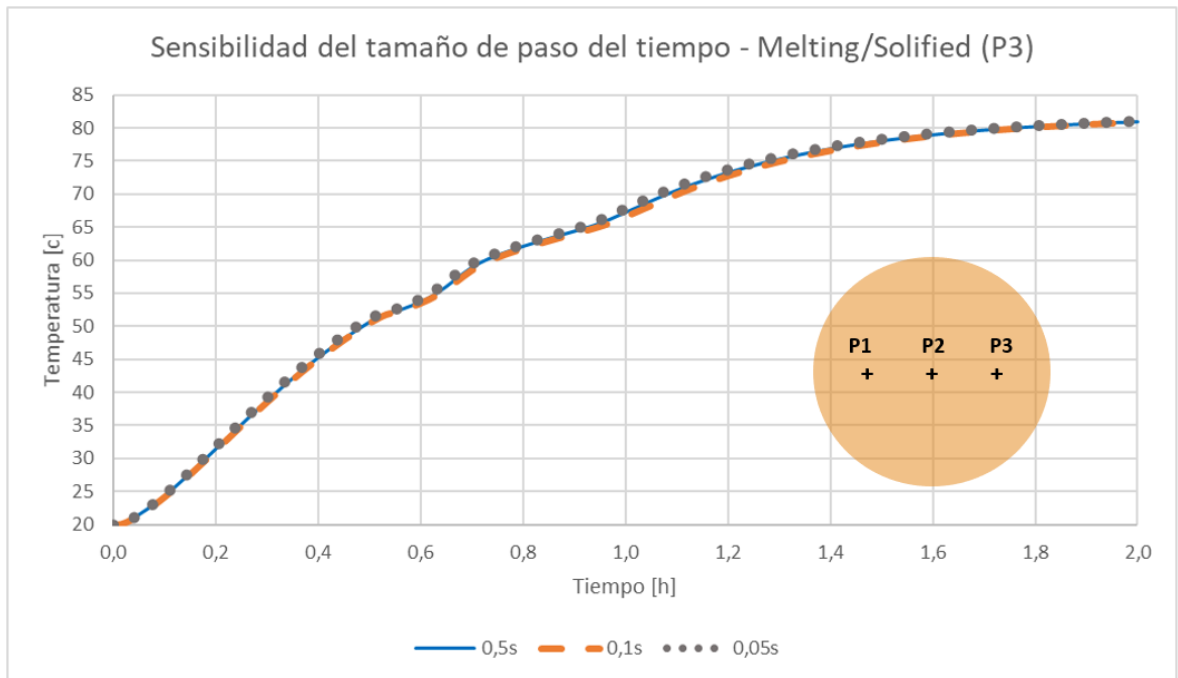
Teniendo presente la importancia del tamaño de paso del tiempo (time-step) en relación con la malla y los resultados, se procede a realizar un estudio del mismo, escogiendo las mallas más eficientes según el estudio previamente realizado. La malla 1 del método de capacidad efectiva resulta ser la mejor opción por su buena precisión y bajos recursos; para el otro método, no se podrá escoger la malla 1 (la de menor coste computacional) puesto que la no convergencia da indicio de que la malla no es lo suficientemente fina, por lo que se escoge la malla 2.

La figura 4.3 muestra la influencia del tamaño de paso del tiempo para las mallas anteriormente mencionadas bajo las mismas condiciones de frontera a las que inicialmente se evaluaron.

Figura 4.3 Sensibilidad time-step, método capacidad efectiva y melting/solified-



(a)

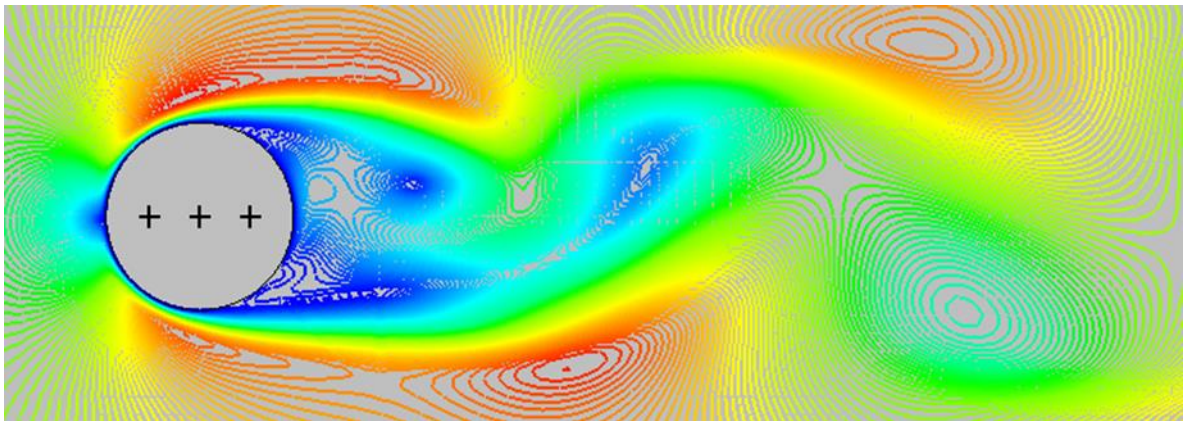


(b)

Fuente: Elaboración propia.

En el estudio se observó que si el tamaño del paso de tiempo era lo suficientemente pequeño (del orden de 0.1 segundos) el flujo del aire presentaba un comportamiento llamado “calle de vórtices laminar de Von Karman” como se muestra en la figura 4.4. Este comportamiento era esperado ya que el número de Reynolds que posee el aire es de 250 y normalmente estos vórtices se presentan en un rango de Reynolds de 40 a 300.

Figura 4.4 Calle de vórtices de Von Karman (Re=250)

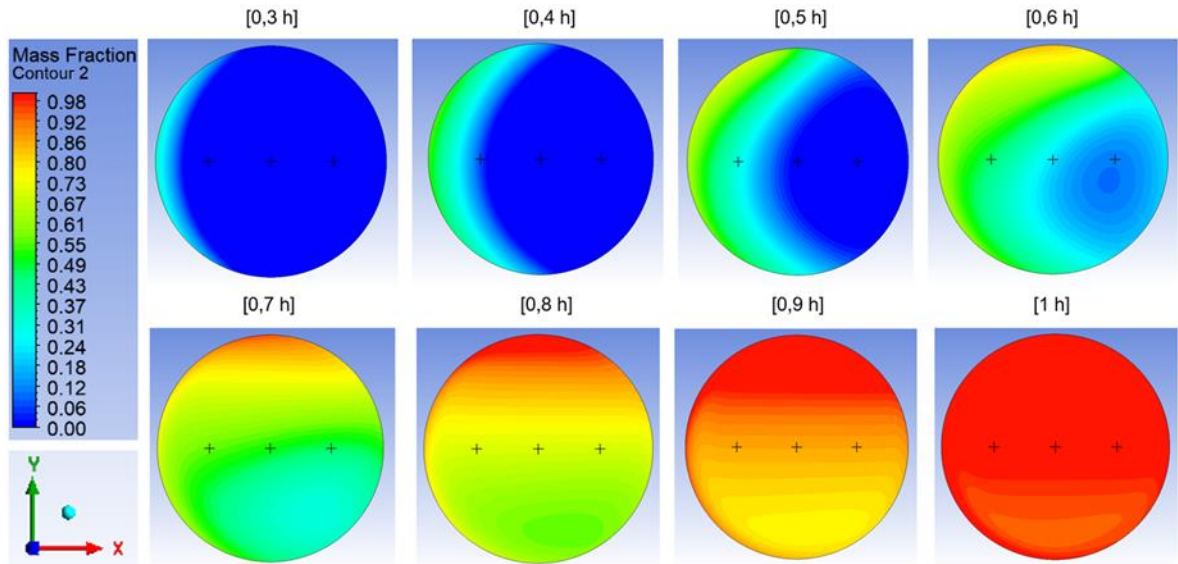


Fuente: Elaboración propia.

A pesar de que el tamaño del paso de tiempo necesario para conseguir la simulación correcta del flujo del aire es pequeño (0.1 s), no se usaran estos valores ya que el tiempo de cálculo para realizar dicha simulación es aproximadamente hasta 10 veces más lento que usar un tamaño de tiempo más grande (1 s) y los resultados cuantitativos de las gráficas de interés no representan una variación significativa independientemente si el flujo del aire es precisamente el esperado.

La transición de cambio de fase del PCM en diferentes instantes del tiempo se muestra en la figura 4.5, es importante aclarar que dicha representación solo es posible realizarse con el método de melting/solified puesto que la inclusión de la ecuación 6 lo permite. Es pertinente recordar que en la escala de la leyenda de la figura, el PCM se encuentra sólido y líquido en los valores 0 y 1 respectivamente.

Figura 4.5 Transición de la fracción másica, método melting/solified



Fuente: Elaboración propia.

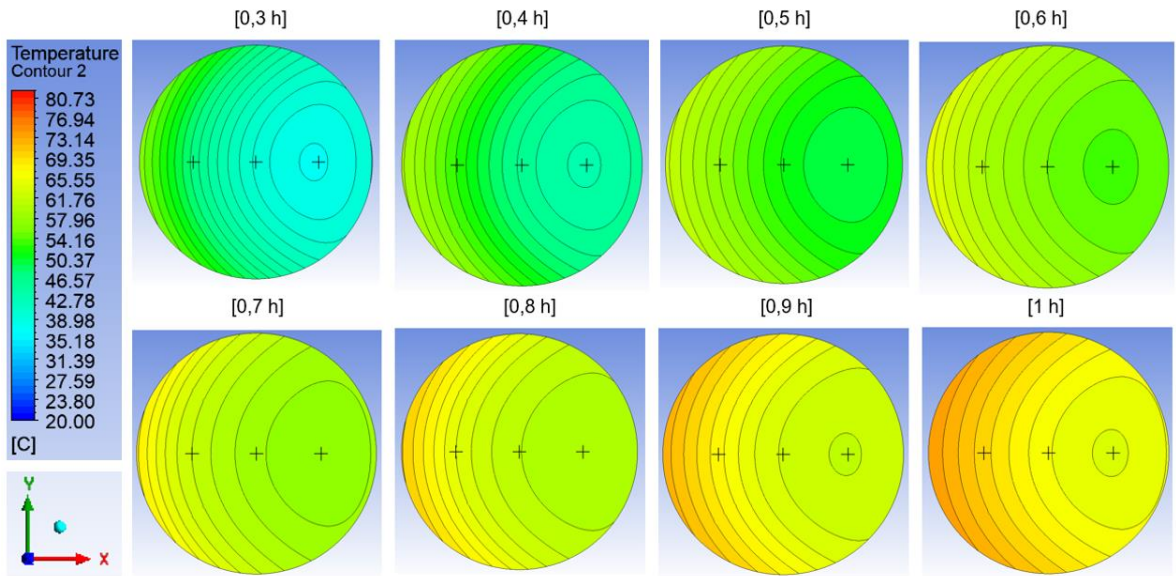
La figura muestra que aproximadamente a las 0,3 h el PCM comienza a ablandarse primero en la zona de “impacto” del fluido portador de energía, conforme avanza el tiempo se puede apreciar que cerca de las 0,5 h la cantidad de PCM derretido tiende a irse hacia arriba (eje $y+$) debido a las fuerzas de flotabilidad a causa de las diferencias de densidades del PCM en estado sólido y líquido, es decir, como el PCM líquido es menos denso tiende a superponerse sobre el PCM sólido.

Por esta razón, a pesar de que gran parte de la energía se transfiere en dirección del flujo del aire (eje $x+$) la acción de la gravedad invierte este sentido, haciendo que la mayor variación de temperatura no se presente a lo largo del eje x (como era en a las 0,3 h) sino en el eje y (como es a las 0,8 h) por lo tanto las curvas de temperatura evaluadas en los 3 puntos (P1, P2, P3) tendrán un instante en el cual a partir de dicho tiempo no habrá diferencia de temperatura en esos puntos (ver figura 4.7 (b))

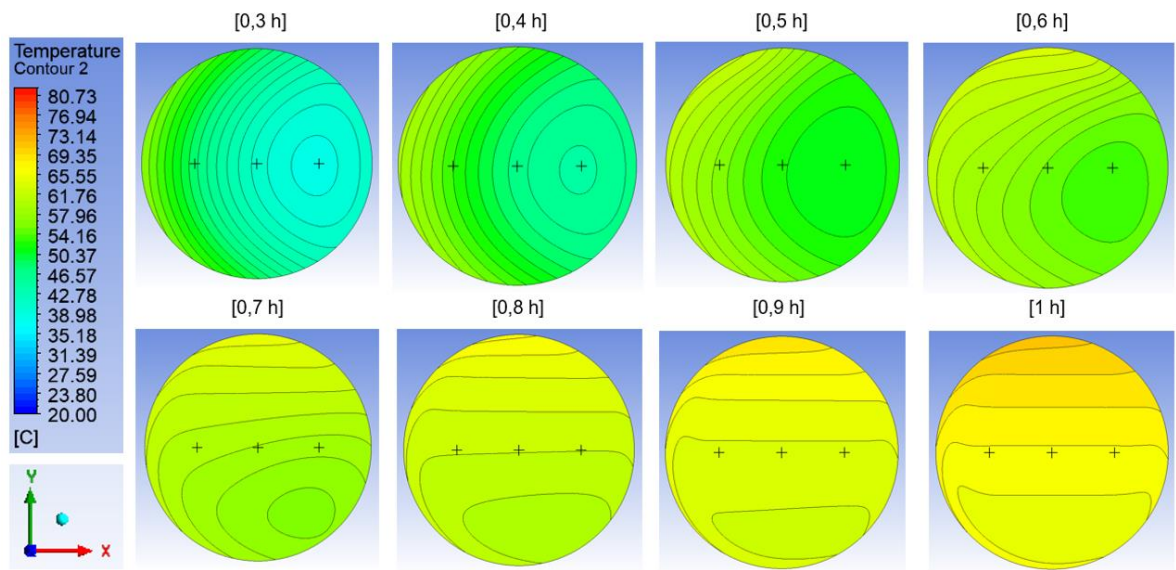
La única forma para poder comparar cualitativamente las diferencias del comportamiento de cambio de fase del PCM entre ambos métodos es mostrando la

transición de temperaturas en los mismos instantes de tiempo mostrados, como se muestra en la figura 4.6.

Figura 4.6 Transición de temperaturas, método capacidad efectiva (a) y melting/solified (b)



(a)



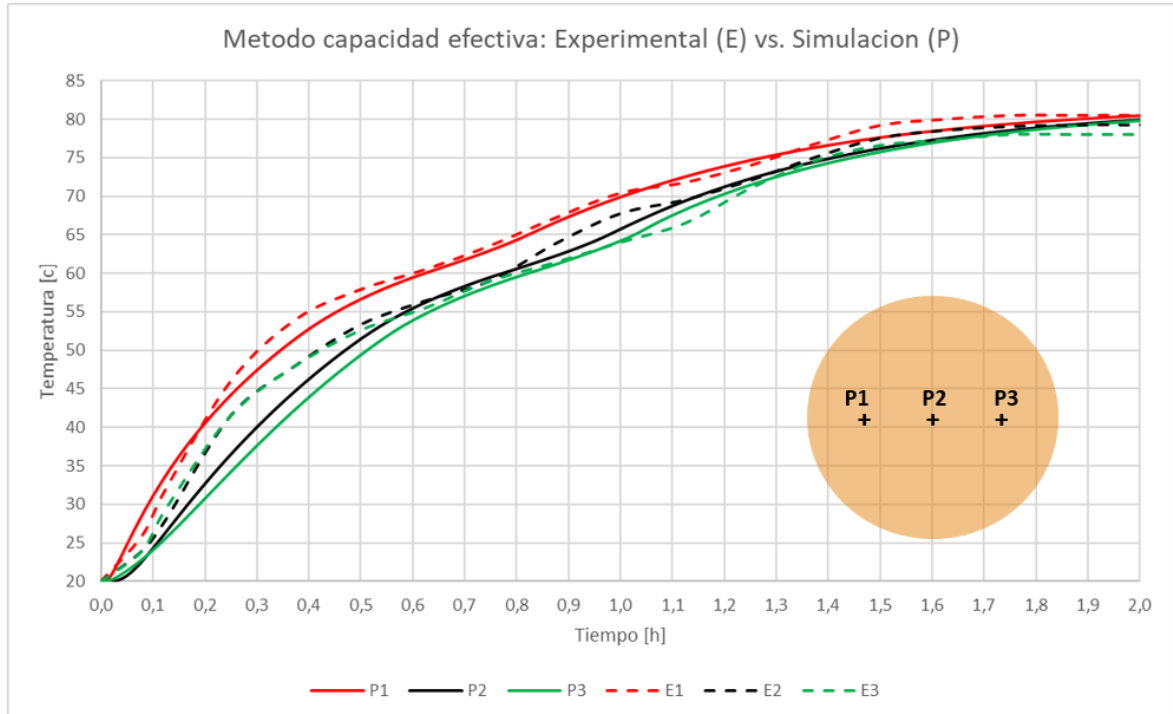
(b)

Fuente: Elaboración propia.

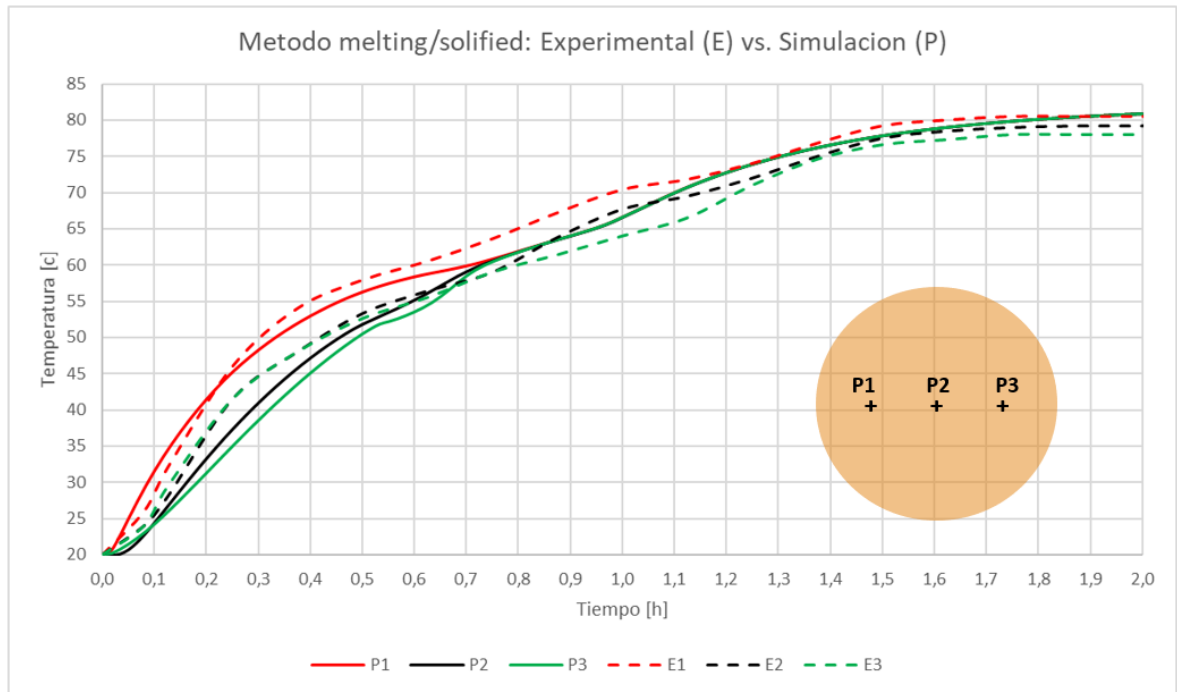
De la anterior figura se puede deducir que en el método de melting/solified la transición de temperaturas depende en gran medida del comportamiento de la fracción másica antes mencionada, es decir, el movimiento del PCM fundido cambia la transición de temperaturas del mismo. Por otro lado, en el método de capacidad efectiva, al simplificar el problema únicamente a la variable de conducción térmica no se ve afectada por la gravedad y por consiguiente la transición de temperaturas adopta una simetría en el eje x; este aspecto es importante para tener en cuenta ya que si se escoge este método para realizar el modelo de banco de tubos se puede simplificar considerablemente el problema, reduciendo el tiempo de cálculo de este.

Para escoger el método por el cual se hará modelo de banco de tubos es necesario comparar los resultados experimentales mostrados en la figura 2.5 con los datos obtenidos de la simulación, como se muestra a continuación:

Figura 4.7 Comportamiento experimental vs simulación



(a)



(b)

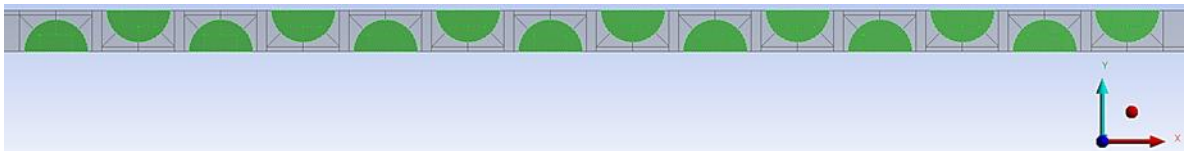
Fuente: Elaboración propia.

Según las gráficas e la figura 4.7, el método de capacidad efectiva tiene una mayor similitud a las curvas de comportamiento del procedimiento experimental ya que el porcentaje de error promedio de este fue de 2.8% en comparación al 3.3% del método melting/solified, por esta razón, y además de que el coste computacional y el tiempo de cálculo es considerablemente menor, se escogió este método para realizar el modelo de banco de tubos.

Para simular el modelo de banco de tubos se creó un nuevo dominio de control que representase dicha aplicación (ver figura 4.8) conforme a las dimensiones del intercambiador de calor de flujo cruzado expuestas en la tabla 1.1 y la distribución del número de filas y columnas mostradas en la figura 1.7. Gracias a que el comportamiento térmico del método de capacidad efectiva presenta simetría a lo largo del eje x, no será necesario recrear completamente la forma circular del PCM, por lo que solo se usó media circunferencia de la misma para reducir a la mitad el número de nodos y/o elementos necesarios para discretizar el dominio de control.

Este proceso solo puede ser posible si se les asignan a las fronteras competentes del dominio de control el comportamiento de “simetría” (ver figura 4.9).

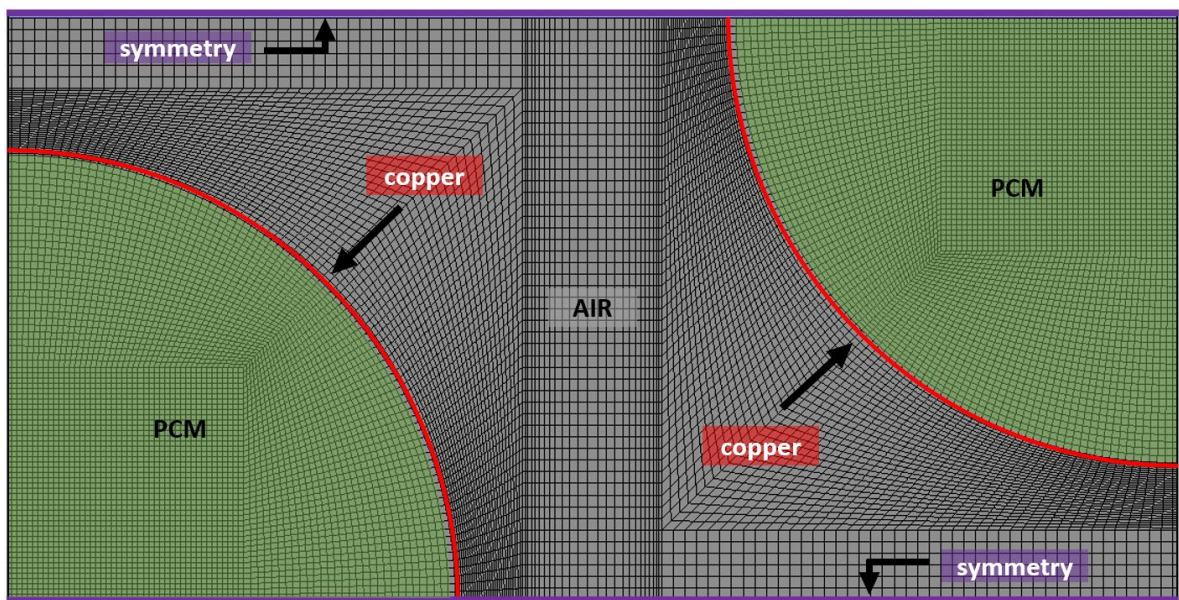
Figura 4.8 Dominio de control, modelo banco de tubos



Fuente: Elaboración propia.

La figura 4.9 también muestra el nombre y la ubicación de las diferentes partes que componen el dominio de control del modelo banco de tubos además del comportamiento general de la malla. El número total de elementos y nodos utilizados en la malla son 255690 y 258738 respectivamente.

Figura 4.9 Nombre/Ubicación de los dominios de control y comportamiento general de la malla estructurada



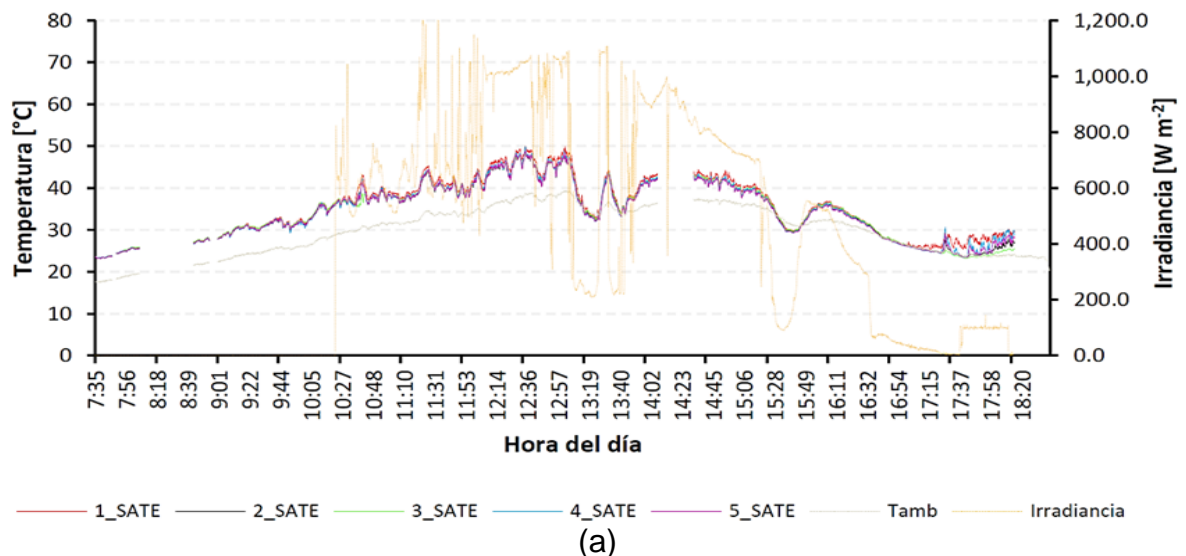
Fuente: Elaboración propia.

Como el resto de la configuración es igual al procedimiento del modelo explicado anteriormente no se hará mención de ello; sin embargo, la única variación presente de este modelo radica en la temperatura de ingreso del aire.

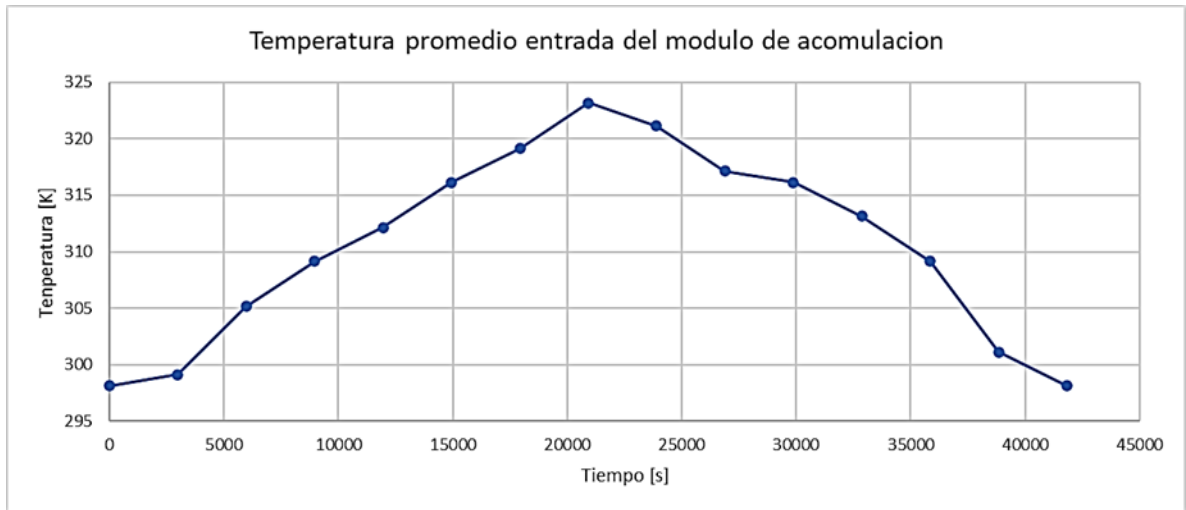
Como se busca simular el comportamiento del banco de tubos a lo largo de un día se debe tener en cuenta las variaciones de temperatura presentes en la entrada del sistema, para ello, se hace uso de la interfaz de usuario de texto o TUI por sus siglas en inglés (Text User Interface).

Gracias a las pruebas experimentales (ver figura 5.1 (a)) se tienen las temperaturas del aire al ingreso del módulo de acumulación (1:2:3:4:5_SATE) desde las 7:35 de la mañana hasta las 6:20 de la tarde. Como la variación de temperatura registrada en los 5 termopares distribuidos en diferentes puntos de la entrada no es considerable, se aproximaron y promediaron todas estas temperaturas en un sola grafica (figura 5.1 (b)).

Figura 5.1 Temperatura de ingreso experimental y promedio a la entrada del módulo de acumulación



Fuente: M. Ochoa, "Implementación de un sistema de acumulación de energía con materiales de cambio de fase (PCM) en un secador solar tipo Hohenheim."

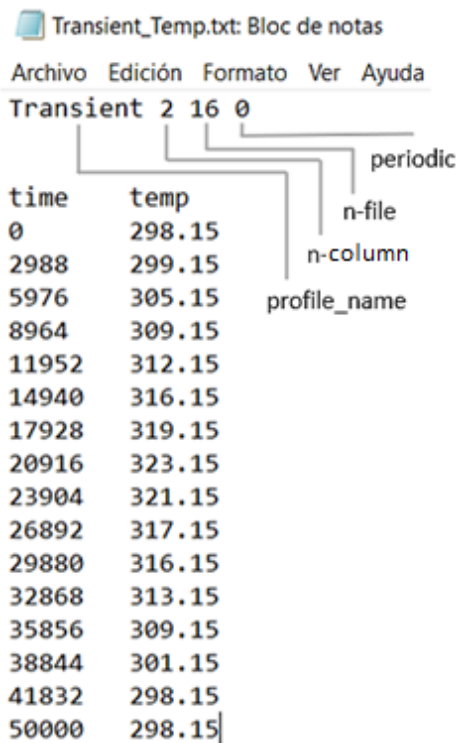


(b)

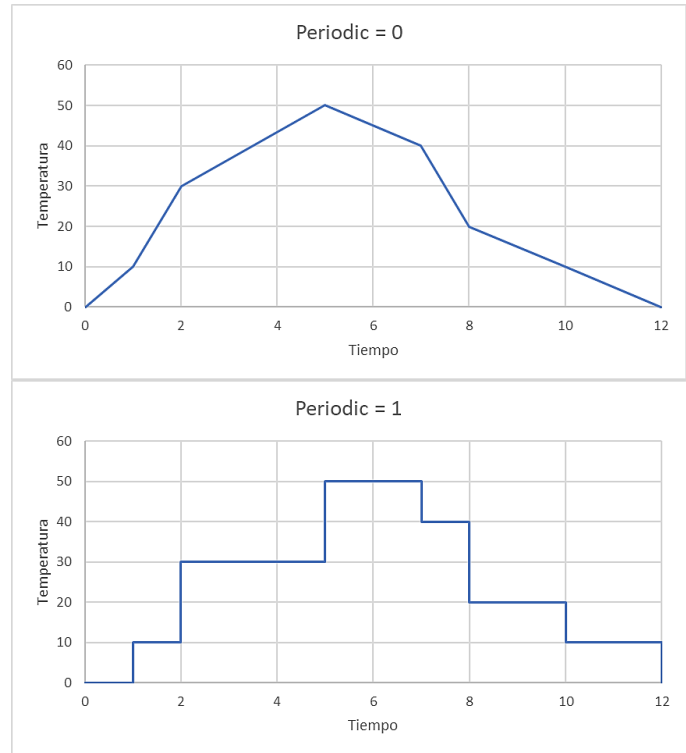
Fuente: Elaboración propia.

La estructura general de la interfaz de usuario de texto se muestra en la figura 5.2 (a) en donde se debe empezar por escribir un nombre de referencia para el archivo, seguido del número de parámetros que se van a declarar (en este caso son 2, tiempo y temperatura) y el número de datos a introducir por cada parámetro (16 datos de tiempo y 16 datos de temperatura) por último se debe poner 0 o 1 dependiendo si el comportamiento deseado de la temperatura a lo largo del tiempo tiene forma lineal o escalonada (ver figura 5.2 (b)), los datos utilizados en el TUI corresponden a la gráfica de la temperatura promedio a la entrada del módulo de acumulación ya antes mencionado. Cabe destacar que ANSYS “lee” por defecto los datos en el sistema internacional, por lo que el tiempo y la temperatura deben estar en segundos y Kelvin, respectivamente.

Figura 5.2 Estructura general y comportamiento del TUI



(a)



(b)

Fuente: Elaboración propia.

El TUI se realizó en un bloc de notas con extensión .txt con la ruta de ubicación `dp0>FFF>Fluent`. Es importante que este archivo se encuentre en dicha ruta de ubicación para que Ansys pueda detectarlo. Para cargar estos datos en el programa, se deberá escribir en la consola el comando `file` seguido del comando `read-transient-table`; a continuación se mostrará la ruta de ubicación que ANSYS lee por defecto y a la cual se le deberá escribir el nombre del archivo con su respectiva extensión. Automáticamente Ansys leerá los datos contenido en el archivo, como se muestra en la figura 5.3 (a).

Por último, al momento de definir las condiciones de contorno térmicas de entrada, aparecerán 2 opciones con el nombre de referencia y parámetro establecidos en el TUI (Transient time/temp), como se muestra en la figura 5.3 (b).

Figura 5.3 Comandos de entrada y opción del perfil TUI

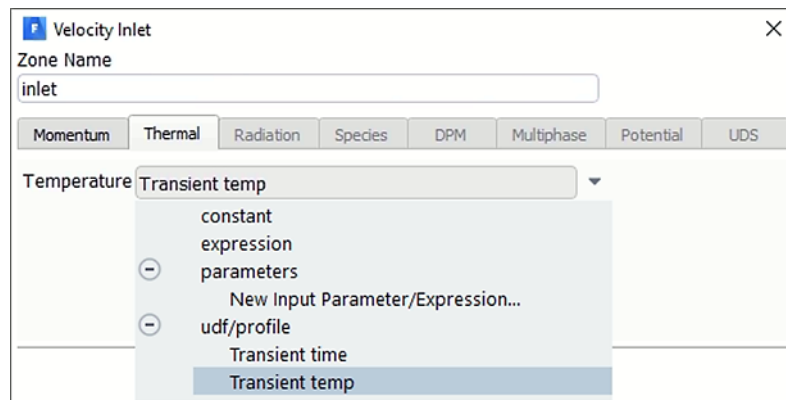
```
file

/file> read-transient-table
transient-table file name ["C:\Users\Administrador\Documents\Ansys trabajos\banco-
tubos-tui - copia\banco-tubos-tui_files\dp0\FFF\Fluent\FFF.set"] Transient_Temp.txt

Reading "Transient_Temp.txt"...

Reading transient profile file...
16 "Transient" transient-profile points time, temp,.
```

(a)

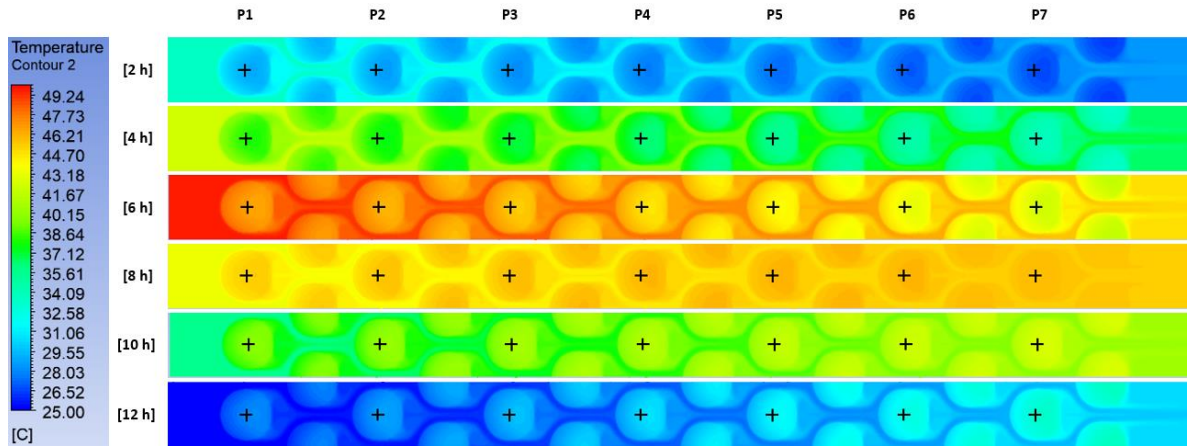


(b)

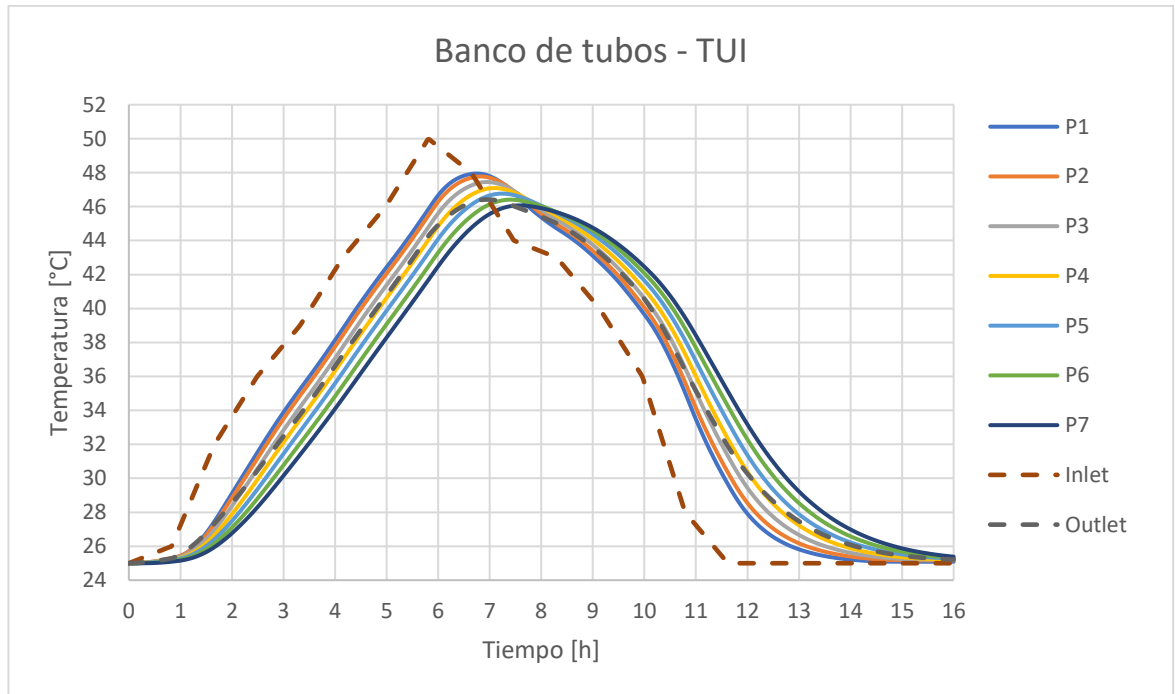
Fuente: Elaboración propia.

9. RESULTADOS

Figura 5.4 Comportamiento térmico del banco de tubos a lo largo del tiempo



(a)



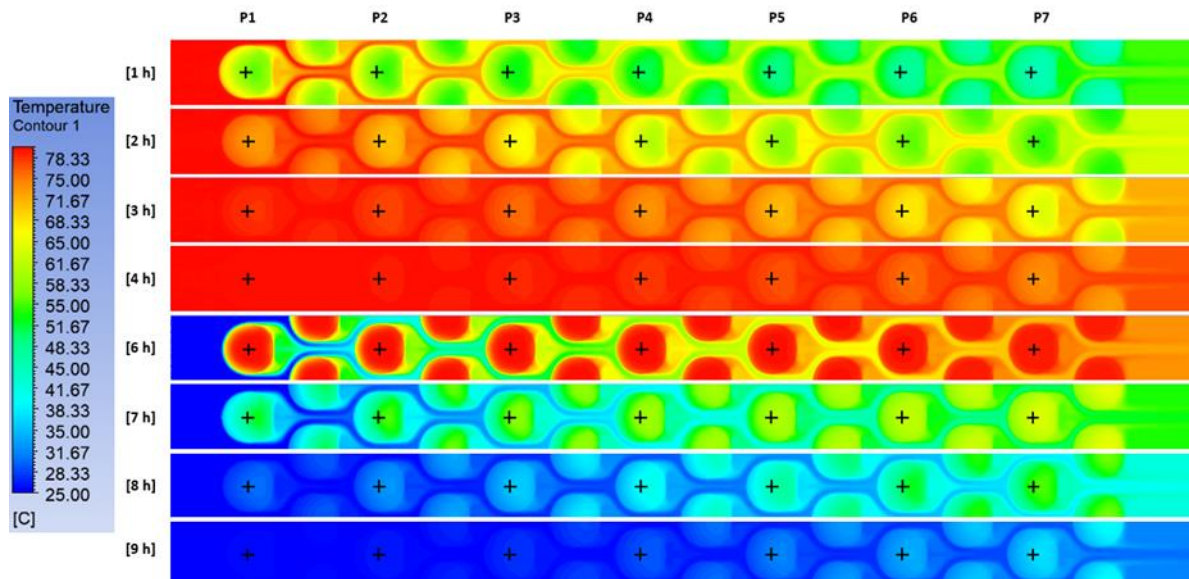
(b)

Fuente: Elaboración propia.

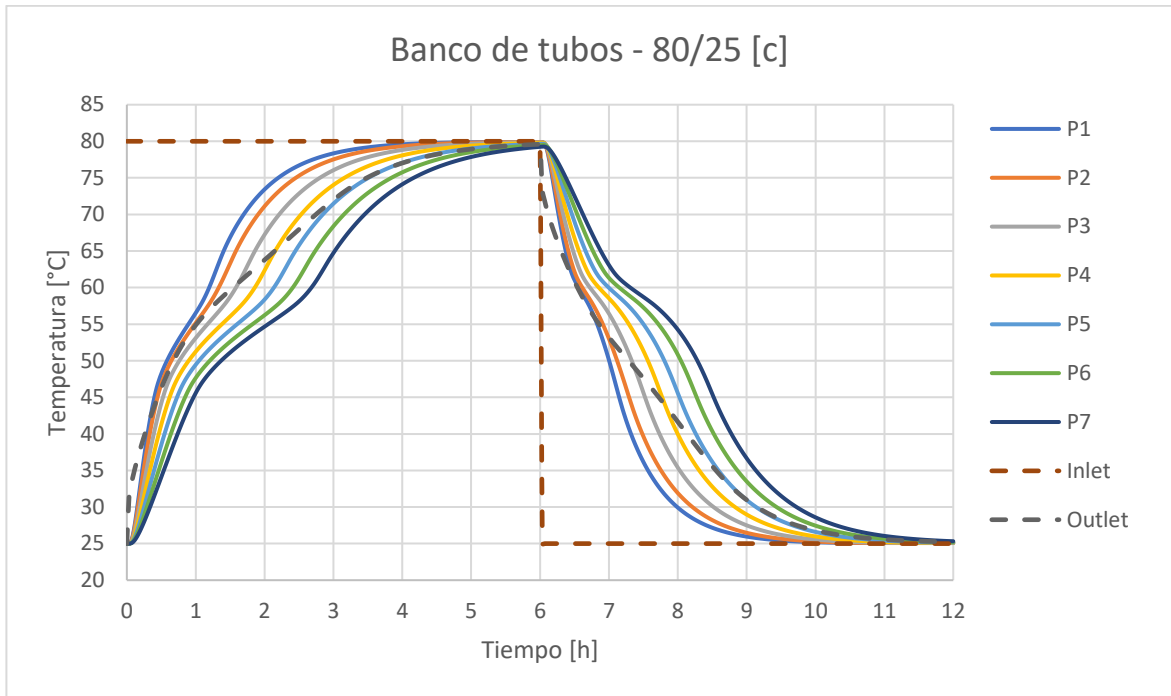
Como era de esperarse y gracias a la figura 5.7 (a) se puede evidenciar que los primeros tubos que contienen la parafina se calentarán o enfriarán más rápido que los siguientes, por lo que la energía térmica disponible irá disminuyendo a lo largo del banco de tubos, haciendo que la temperatura máxima a la entrada pase de 50 °C a 46 °C (aproximadamente) en la salida. Es importante destacar que desde las 0 a las 6 horas el aumento de la temperatura interna del PCM es casi que linealmente, dando indicio de que el material no cambio de fase al aprovechar solo el calor específico del material en estado sólido.

Como la parafina no se fundió completamente con la energía térmica disponible, se realizó una simulación en el cual la temperatura de ingreso no varía a lo largo de un día, sino que se mantuvo constantemente a 80 °C para calentarla y 25 °C para enfriarla (figura 5.8). Con este estudio se buscó evidenciar el tiempo en el cual toda la parafina del banco de tubos se funde, además del tiempo necesario para que la temperatura interna de la misma se establezca a la temperatura de ingreso.

Figura 5.5 Comportamiento térmico del banco de tubos a lo largo del tiempo



(a)

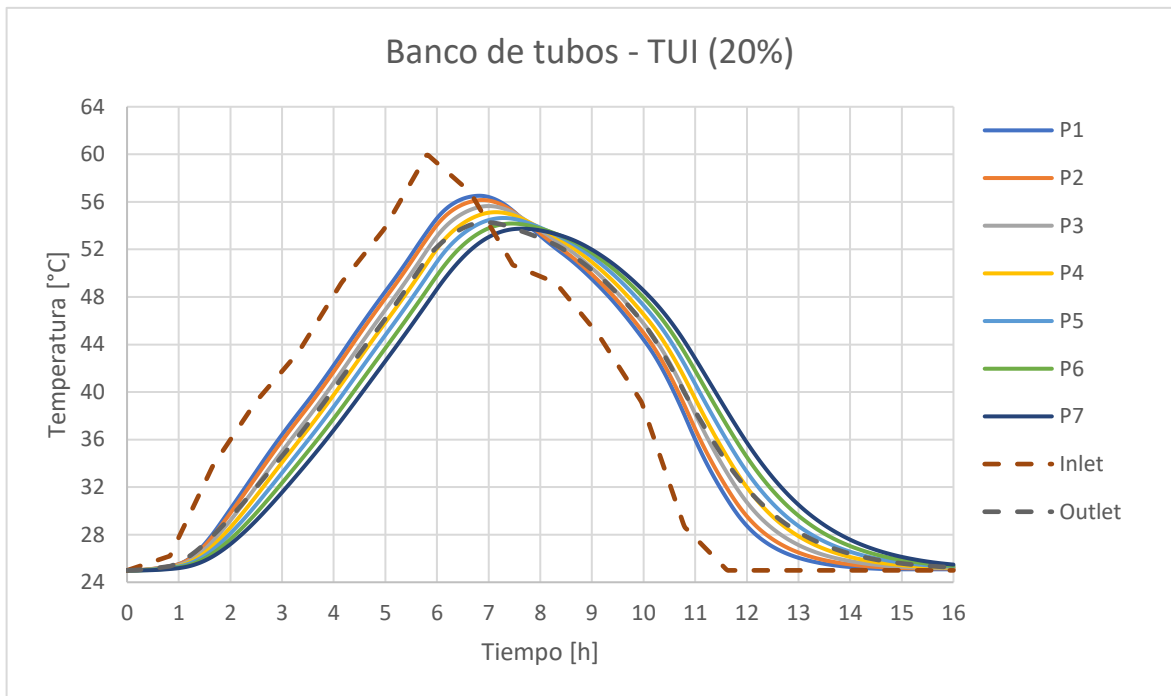


(b)

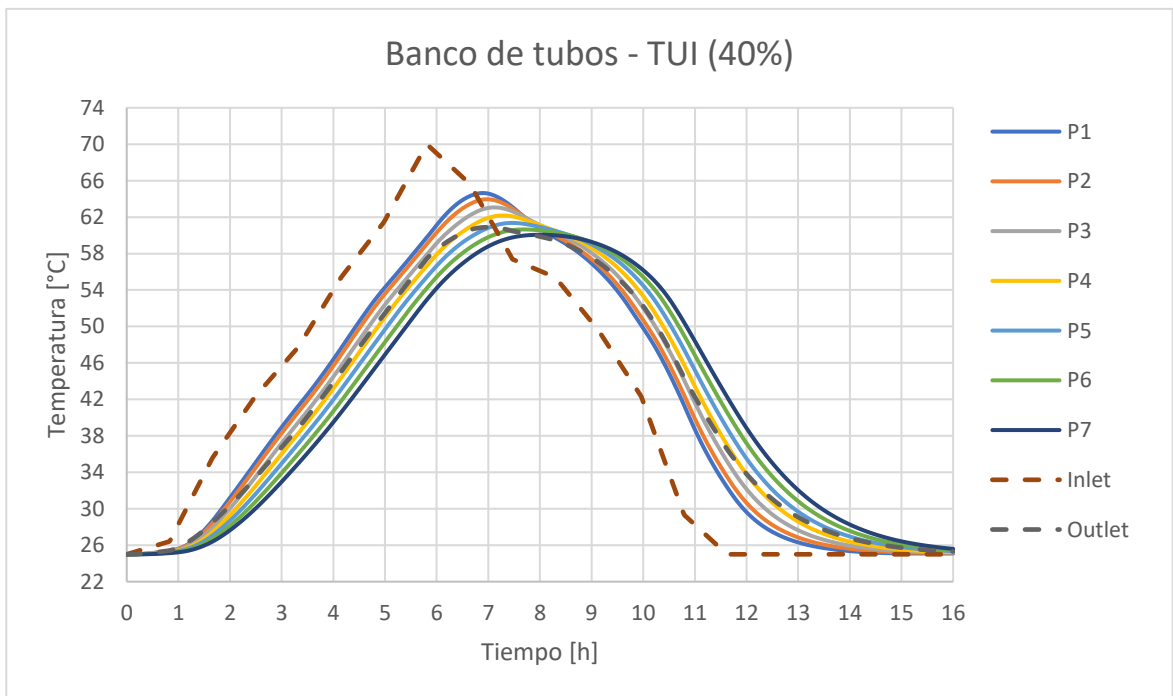
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede evidenciar en la gráfica 5.8, a la parafina le tomó cerca de 6 horas alcanzar la temperatura del aire y aproximadamente 3 horas para fundir todo el PCM, pero el aspecto más importante a tener en cuenta es la poca disponibilidad de calor latente de fusión del material, haciendo que la temperatura de salida del banco de tubos no se mantenga en los valores esperados, por lo que sería recomendable cambiar la parafina por una de mejores propiedades en relación a la cantidad de energía térmica disponible o aumentar la disponibilidad de energía térmica en el día. Para este último, se simuló el comportamiento de la parafina actual aumentando hasta un máximo de 20%, 40% y 60% la temperatura de ingreso a lo largo de un día suponiendo que sea posible aumentar dicha temperatura a través de un concentrador solar o cualquier mecanismo que permita aprovechar más la radiación directa del sol (Ver figura 5.9.)

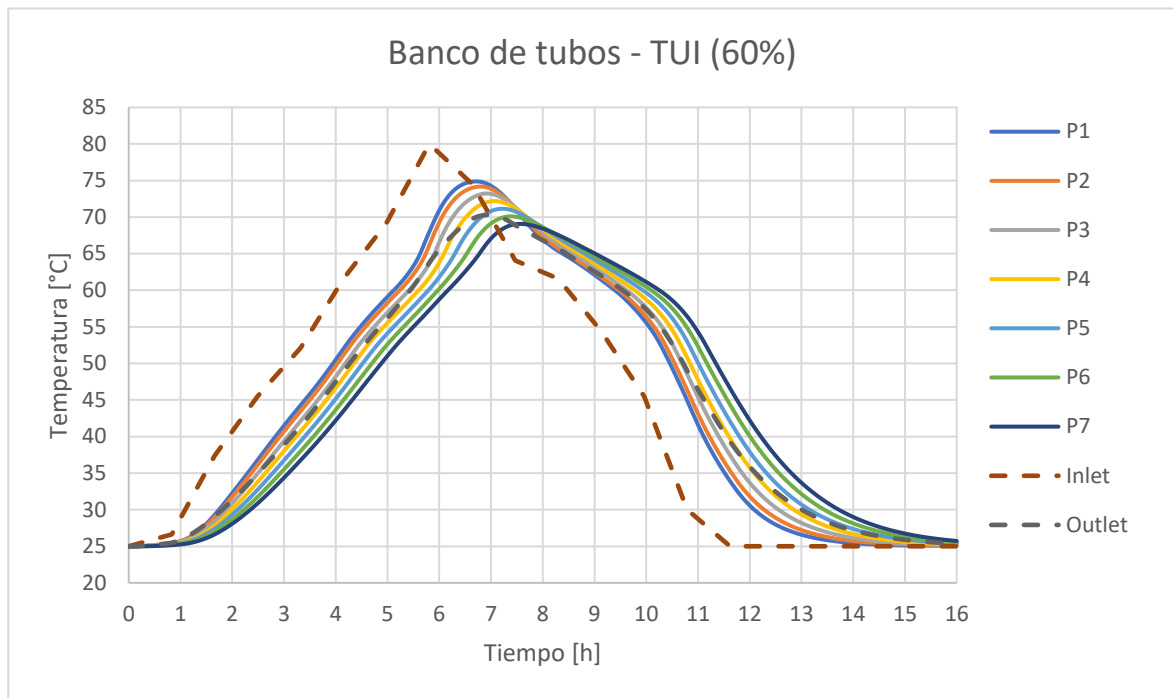
Figura 5.6 Curvas de comportamiento térmico aumentando la temperatura del aire hasta un 20%, 40% y 60%



(a)



(b)



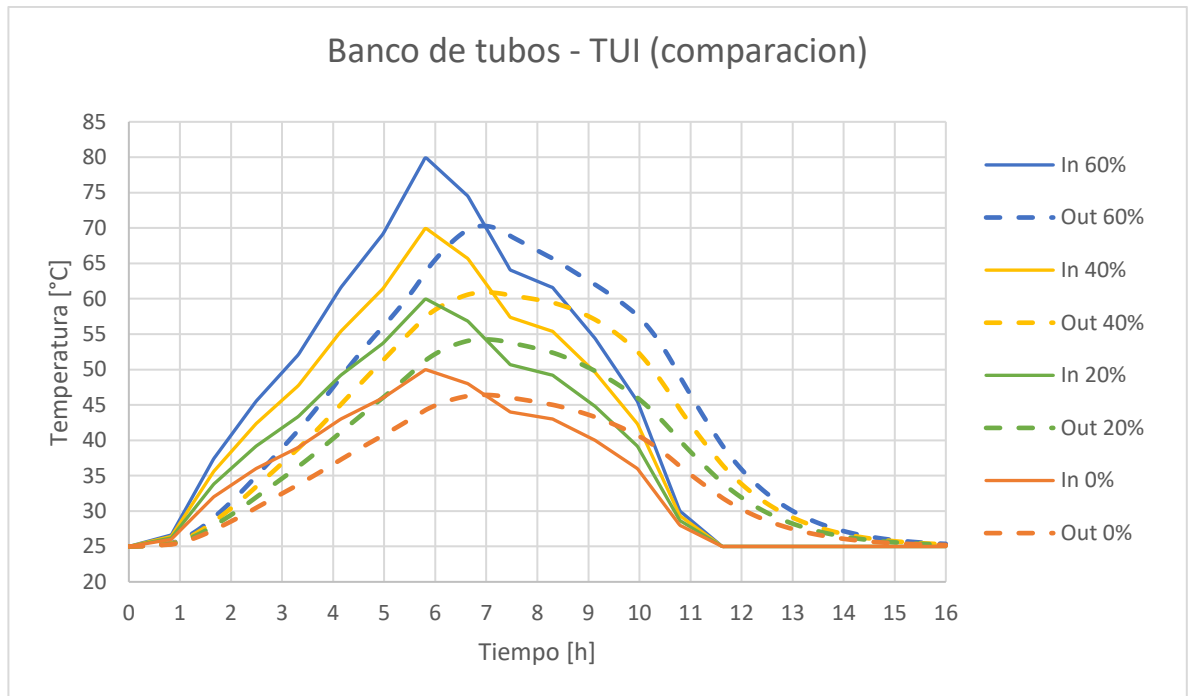
(c)

Fuente: Elaboración propia.

Aunque el incremento de la temperatura del fluido portador de energía fue considerable como para fundir totalmente la parafina a partir del 40% de aumento, el bajo calor latente de la parafina es casi tan despreciable que el calor acumulado se desvanece casi que con la misma tasa del calor específico del material, por lo que esta opción no sería viable para el secado de cultivos.

La grafica 6.1 compara la temperatura de ingreso y salida del banco de tubos bajo las condiciones normales y de mejoras antes mencionadas.

Figura 5.7 Comparación de la temperatura de entrada y salida del banco de tubos



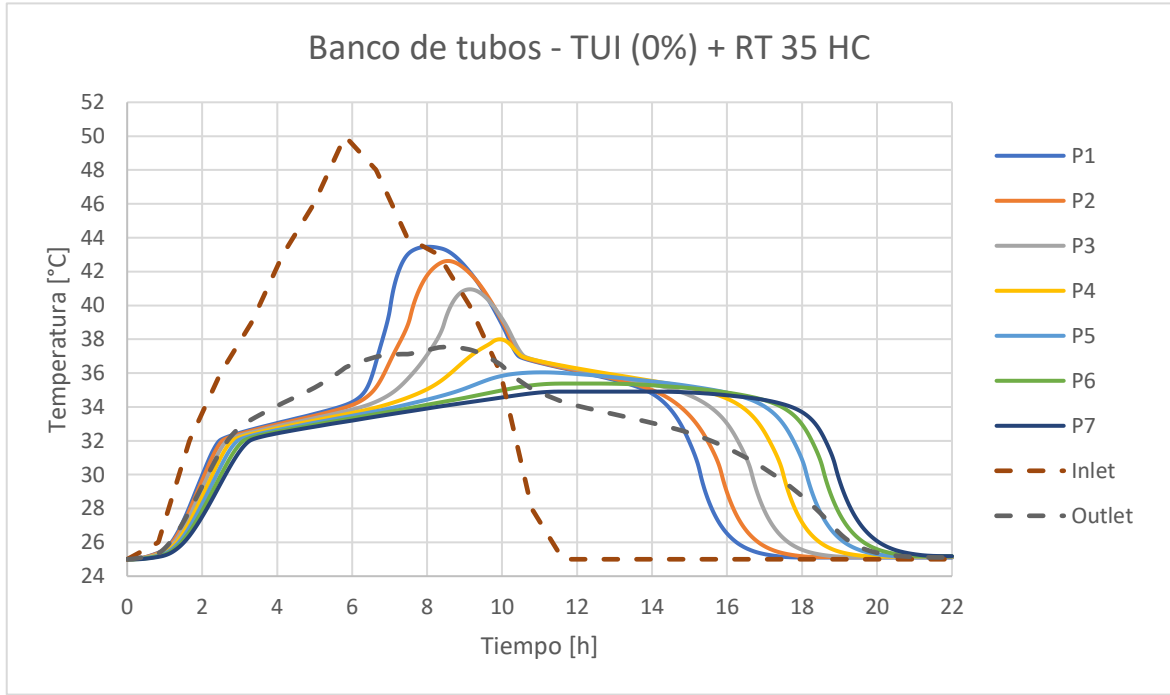
Fuente: Elaboración propia.

Para el cambio de parafina como opción de mejora, se consultó al fabricante alemán **Rubritherm** en el cual se evaluaron algunos de sus productos bajo las condiciones normales de un día y las suposiciones del aumento porcentual de la temperatura de ingreso antes mencionadas.

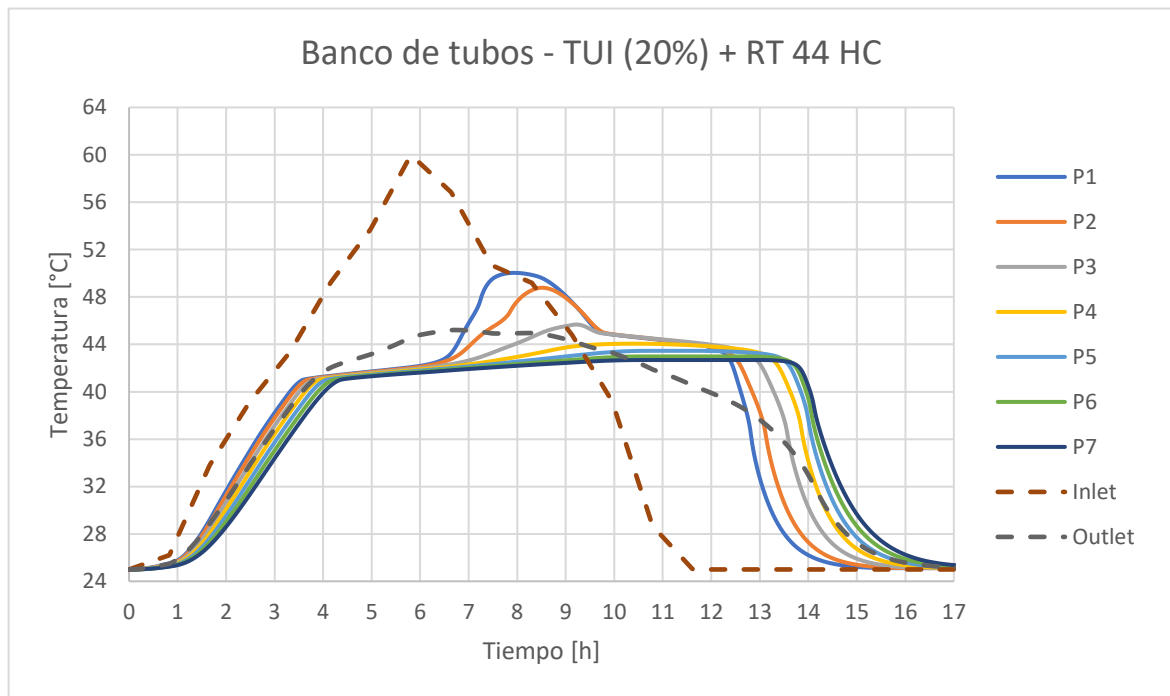
Las curvas de comportamiento térmico de estas simulaciones tienen como objetivo ampliar las opciones que permitirán escoger la parafina adecuada para secar varios tipos de cultivo.

Las fichas técnicas de los materiales del fabricante usados en estas simulaciones se encuentran en la sección de anexos.

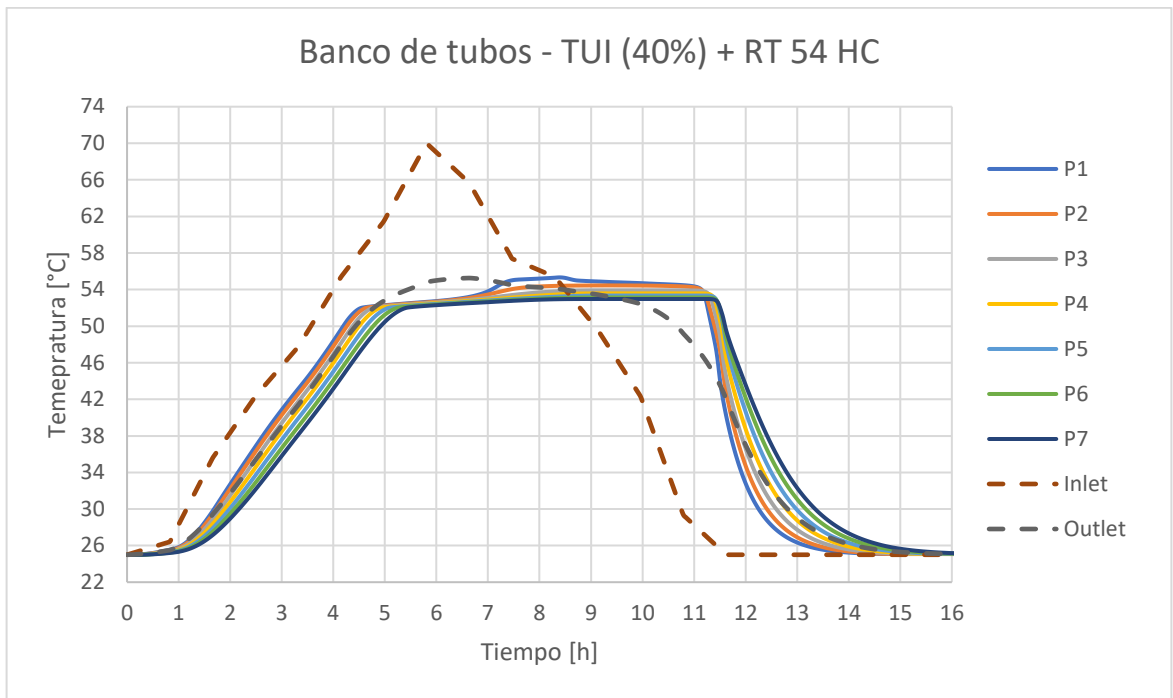
Figura 5.8 Curvas de comportamiento con diferentes parafinas como único material en todo el banco de tubos



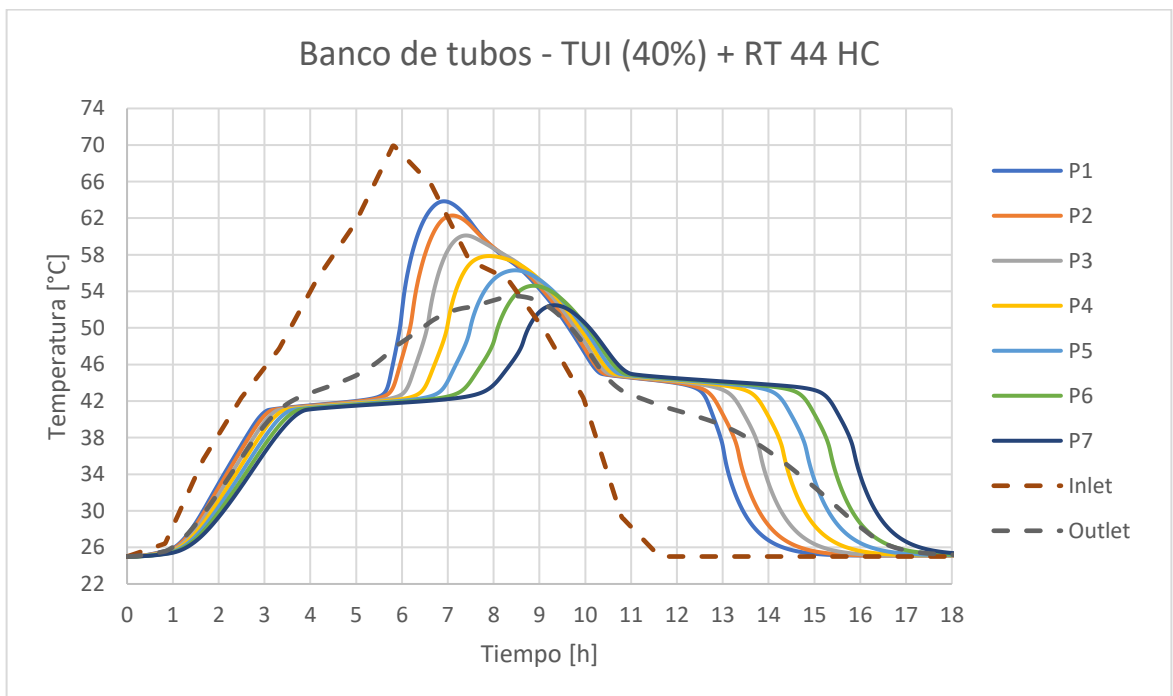
(a)



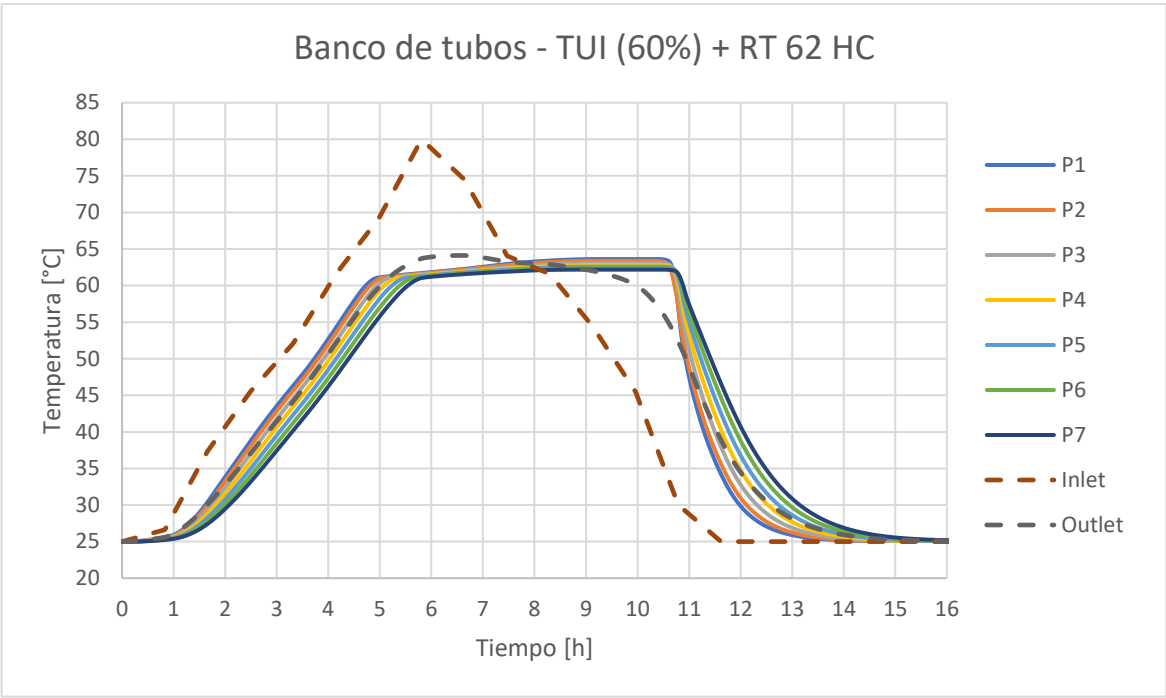
(b)



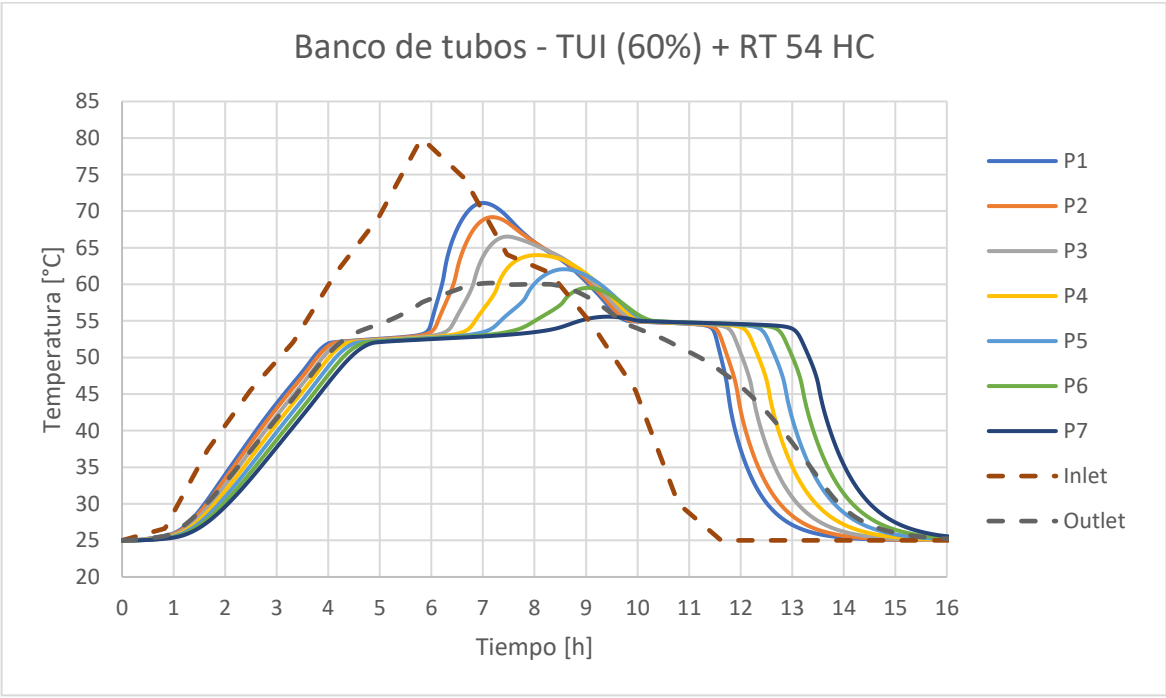
(c)



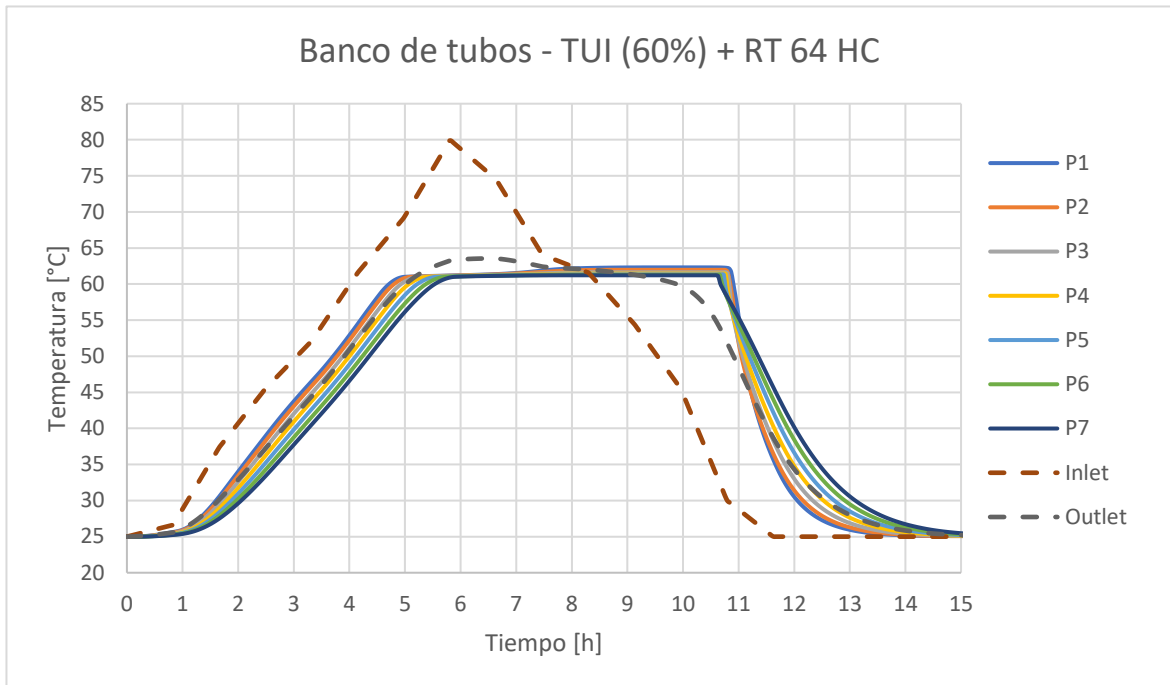
(d)



(e)



(f)



(g)

Fuente: Elaboración propia.

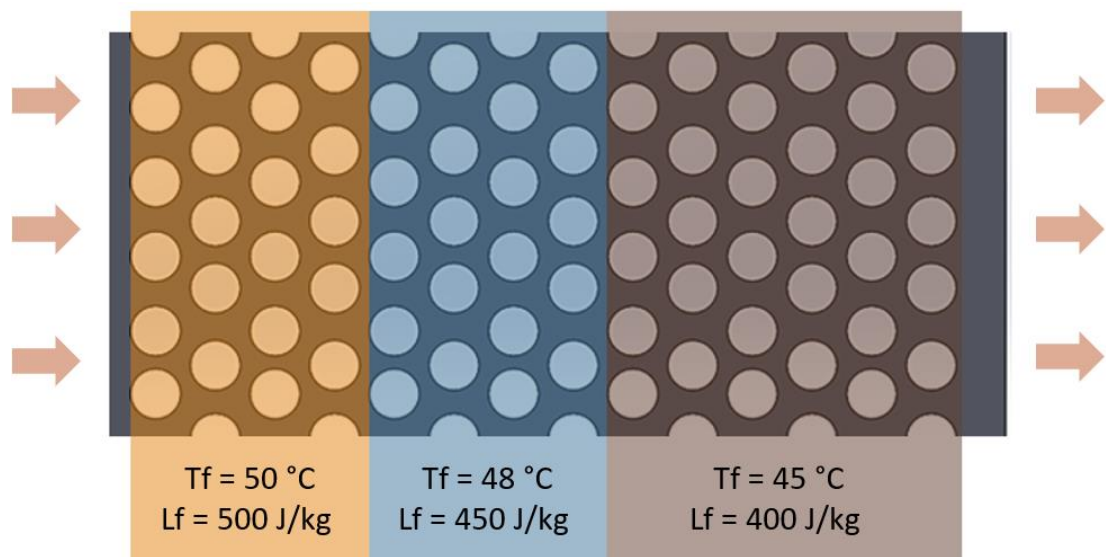
En los resultados de estas simulaciones se evidenció que para poder aprovechar al máximo la energía térmica disponible, no solo se debe tener en cuenta el punto de fusión del PCM y la temperatura máxima de ingreso, también se debe tener en cuenta el tiempo en el cual la temperatura de ingreso está por encima del punto de fusión, es decir, el tiempo en el cual el aire puede transferirle su energía para ser almacenada en forma de calor latente.

Para comprender mejor estas afirmaciones basta con comparar las figuras 5.8 (a) y (b). En ellas se puede evidenciar que la parafina RT 35 HC aprovechó mejor la energía en comparación a su contraparte, RT 44 HC, debido a que el punto P7 (el tubo más lejano del banco de tubos) sobrepasó la temperatura de fusión (T_{liquido}) aproximadamente en la hora 10. A pesar de que el rango de temperaturas entre la temperatura de fusión (35 °C y 44 °C para RT 35 y 44 respectivamente) y la temperatura máxima de ingreso (50 °C y 60 °C para RT 35 y 44 respectivamente) son aproximadamente iguales en ambos estudios (15 °C y 16 °C para RT 35 y 44

respectivamente) el tiempo en el cual este rango está disponible es de aproximadamente 8 horas y 5.8 horas para RT 35 y 44 respectivamente.

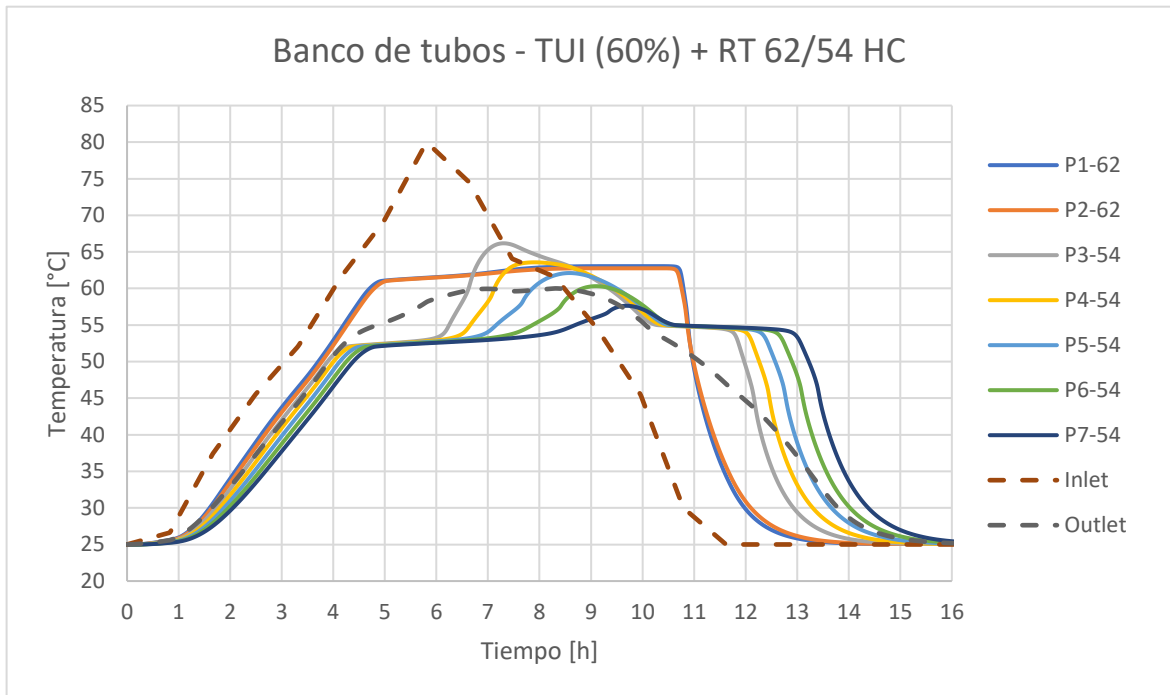
Aunque es preferible que el PCM presente en todos los tubos del acumulador se fundan por completo, lastimosamente estos no lo hacen al mismo tiempo. Los primeros tubos se fundirán primero, por lo que posteriormente llegará un momento en el que estos tubos aprovecharan solo el calor sensible en su fase líquida. Una de las formas para aprovechar únicamente el calor latente de la parafina es empleando múltiples parafinas ubicados de forma escalonada a lo largo del banco de tubos, como se muestra en la figura 5.9. El propósito de esta configuración es ubicar en los tubos que se calentarán más rápido, las parafinas con el calor latente y puntos de fusión más grandes.

Figura 5.9 Banco de tubos con múltiples parafinas en forma escalonada

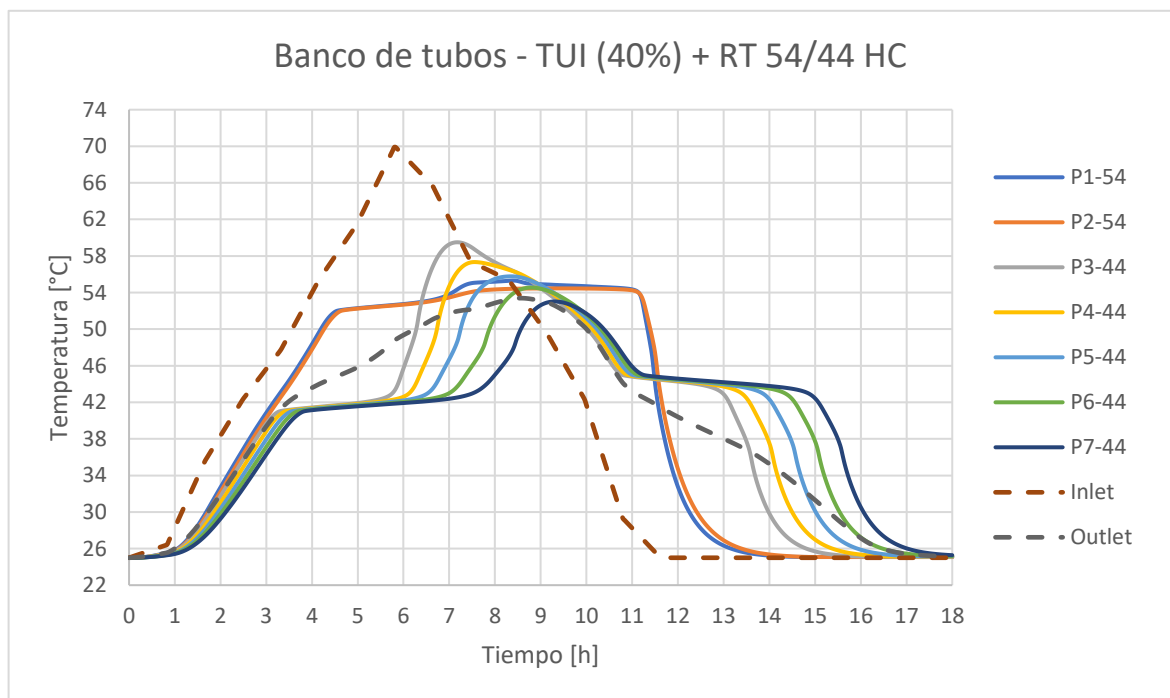


Fuente: Elaboración propia.

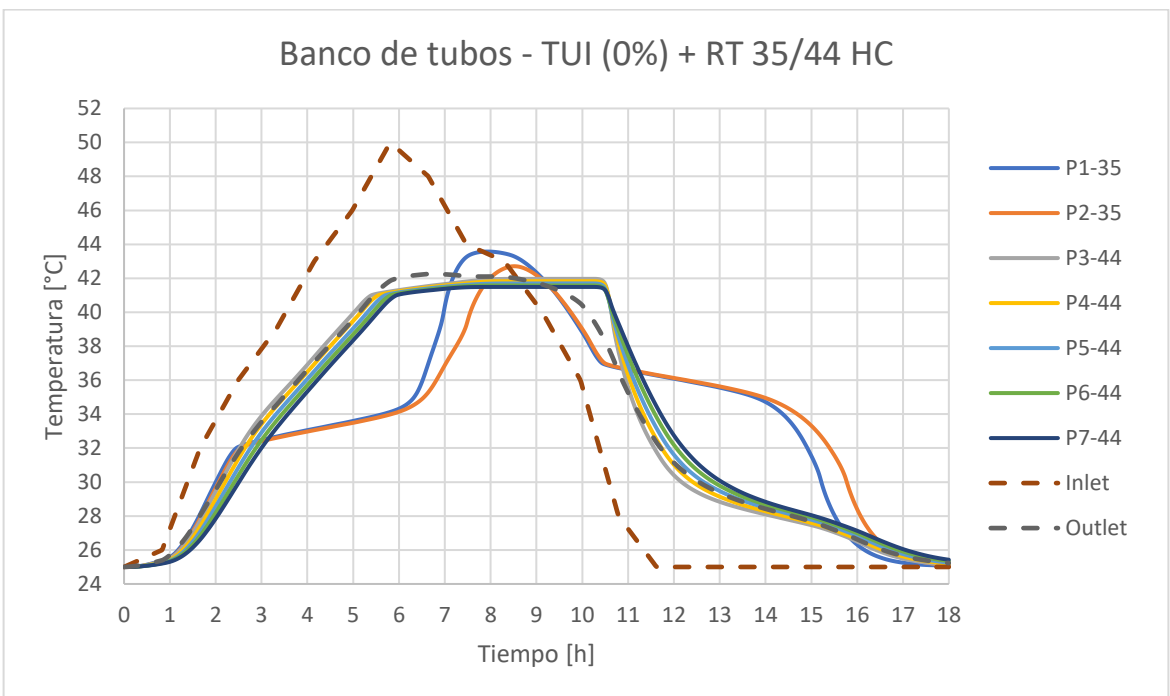
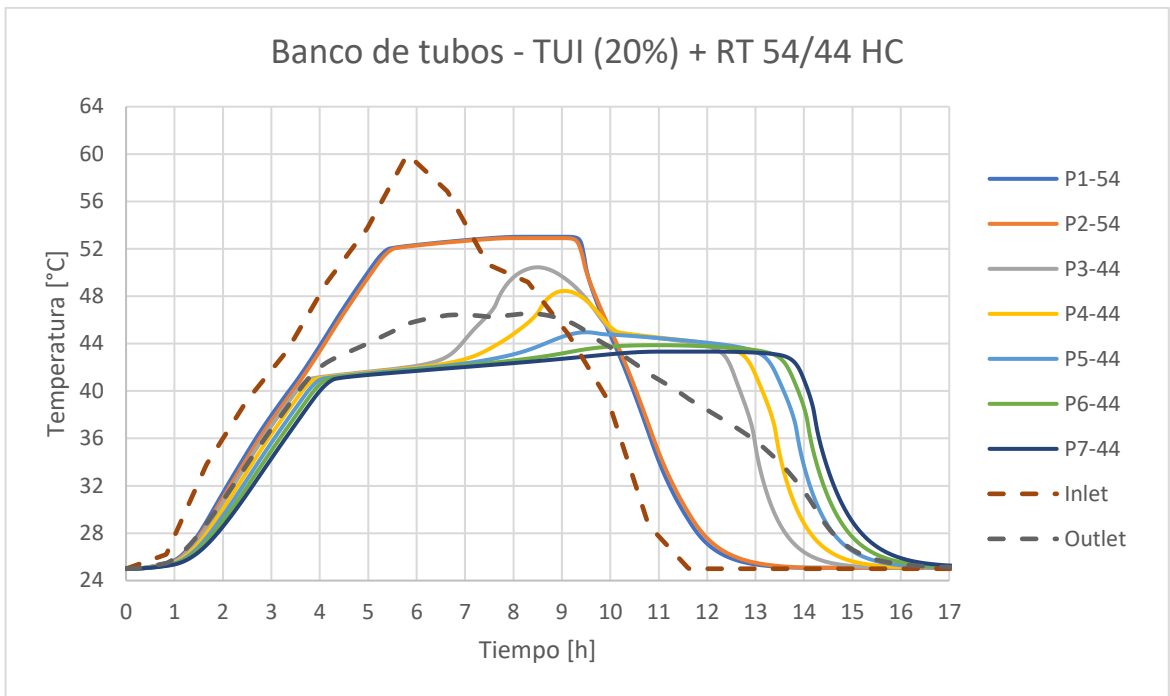
Figura 6.1 Curvas de comportamiento con diferentes parafinas como múltiples materiales en todo el banco de tubos

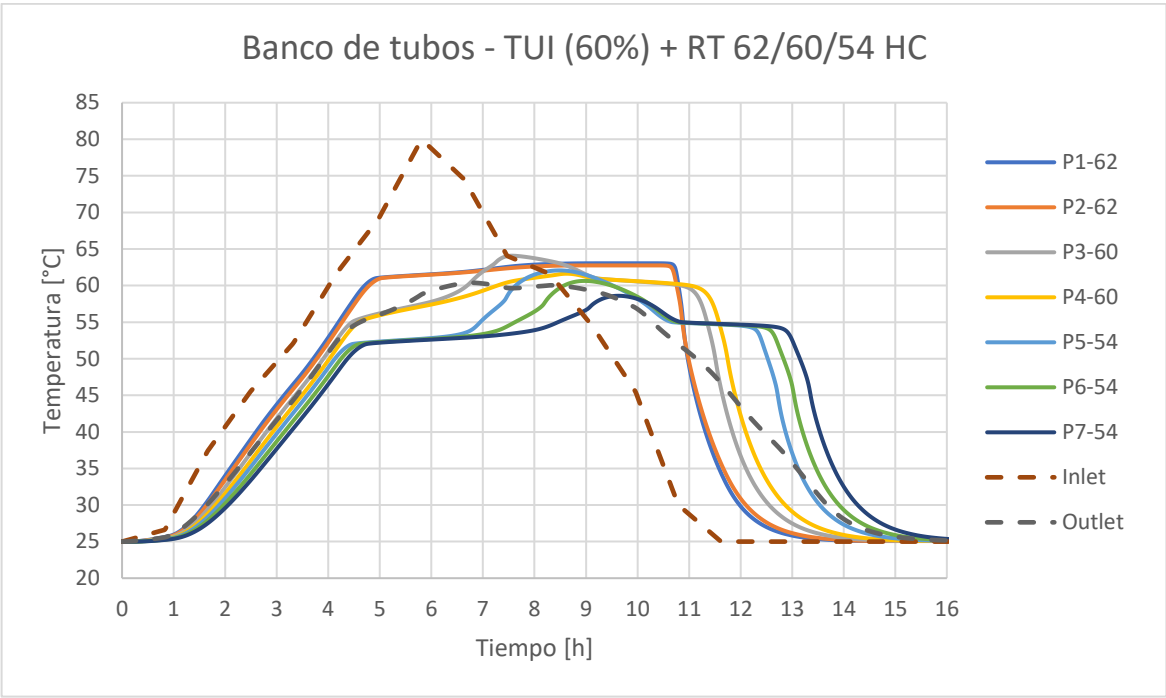


(a)

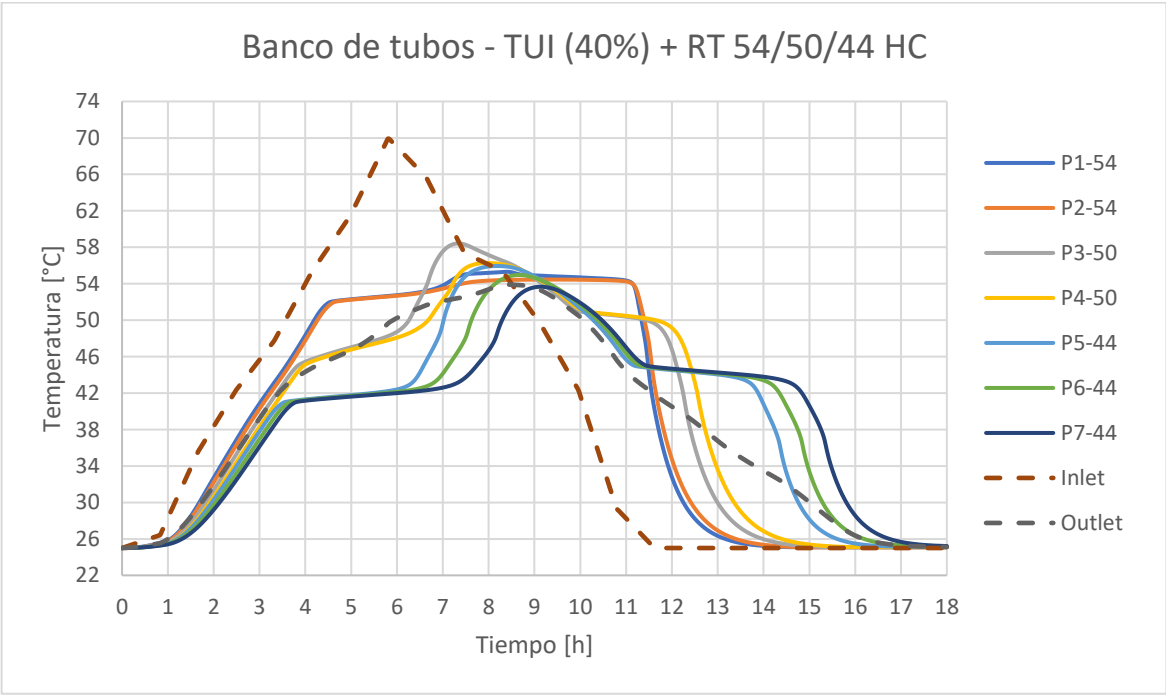


(b)

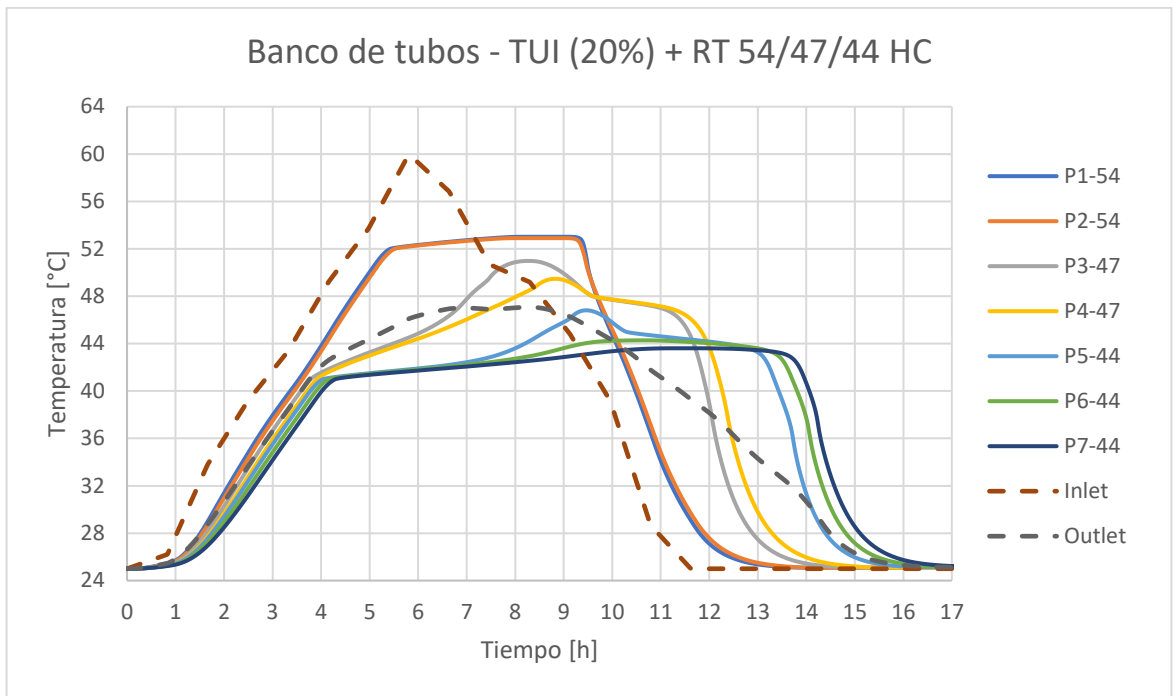




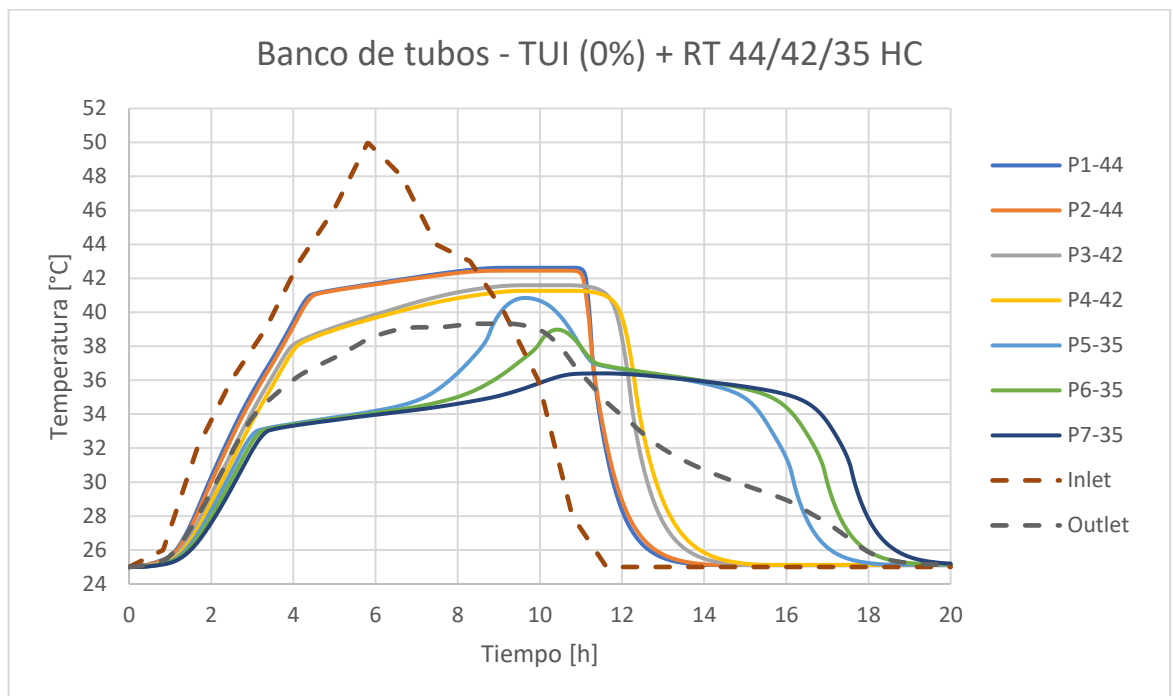
(e)



(f)



(g)



(h)

Fuente: Elaboración propia.

10. CONCLUSIONES

- Como era de esperarse, el PCM del banco de tubos bajo las condiciones actuales del módulo de acumulación y las mismas condiciones atmosféricas solo aprovecha el calor sensible del material, ya que tanto la energía térmica disponible como el tiempo de duración de la misma no es muy grande.
- La simulación del método de capacidad efectiva presentó una mayor precisión en comparación a los datos experimentales, con un porcentaje de error promedio del 2.8%. A pesar de esto, el frente de fusión que supone el uso del método melting/solified es el esperado, pero debido a la falta de información en los cambios de la viscosidad y conductividad respecto al incremento de la temperatura aumentaron su porcentaje de error.
- Es posible que una de las razones por las cuales pueda que las predicciones de las simulaciones realizadas a las diferentes parafinas se vean afectadas en la realidad sea el hecho de que se supuso una temperatura de ingreso de 25 °C en los momentos en los que no hubo radiación solar (noche).
- Usar un solo material para todo el banco de tubos posee la ventaja de mantener por más tiempo una temperatura estable a la salida, sin embargo una vez que la parafina se solidifique, la temperatura a la salida disminuirá relativamente rápido. Por el contrario, el uso de múltiples parafinas no tendrá una temperatura tan uniforme, pero debido a que posee parafinas con puntos de fusión más bajos, suministrarán por un tiempo más prologado la energía térmica acumulada.
- Debido a que la parafina se funde primero en los tubos que están más próximos a la entrada del fluido portador de energía, es recomendable que en las configuraciones de PCM múltiples se ubiquen en primera instancia las parafinas con un alto punto de fusión y calor latente de fusión.

11. BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Alhusseny, N. Al-Zurfi, A. Nasser, A. Al-Fatlawi, and M. Aljanabi, "Impact of using a PCM-metal foam composite on charging/discharging process of bundled-tube LHTES units," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 150, p. 119320, 2020, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119320.
- [2] J. Liu, C. Xu, X. Ju, B. Yang, Y. Ren, and X. Du, "Numerical investigation on the heat transfer enhancement of a latent heat thermal energy storage system with bundled tube structures," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 112, pp. 820–831, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.10.144.
- [3] M. Ezra, Y. Kozak, V. Dubovsky, and G. Ziskind, "Analysis and optimization of melting temperature span for a multiple-PCM latent heat thermal energy storage unit," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 93, pp. 315–329, 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.09.040.
- [4] M. Iten, S. Liu, and A. Shukla, "Experimental validation of an air-PCM storage unit comparing the effective heat capacity and enthalpy methods through CFD simulations," *Energy*, vol. 155, pp. 495–503, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.04.128.
- [5] G. Ziskind, "12 - Modelling of heat transfer in phase change materials (PCMs) for thermal energy storage systems," in *Woodhead Publishing Series in Energy*, L. F. B. T.-A. in T. E. S. S. Cabeza, Ed. Woodhead Publishing, 2015, pp. 307–324.
- [6] J. A. Moses, T. Norton, K. Alagusundaram, and B. K. Tiwari, "Novel Drying Techniques for the Food Industry," *Food Eng. Rev.*, vol. 6, no. 3, pp. 43–55, 2014, doi: 10.1007/s12393-014-9078-7.
- [7] A. A. Ananno, M. H. Masud, P. Dabnichki, and A. Ahmed, "Design and numerical analysis of a hybrid geothermal PCM flat plate solar collector dryer

- for developing countries,” *Sol. Energy*, vol. 196, pp. 270–286, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.069>.
- [8] S. M. Shalaby, M. A. Bek, and A. A. El-Sebaili, “Solar dryers with PCM as energy storage medium: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 33, pp. 110–116, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.073>.
- [9] M. Ochoa, “Implementación de un sistema de acumulación de energía con materiales de cambio de fase (PCM) en un secador solar tipo Hohenheim,” Universidad Nacional de Colombia Facultad, 2017.
- [10] K. Anil, P. Om, K. Ajay, and T. Abhishek, “Experimental Analysis of Greenhouse Dryer in No-Load Conditions,” *J. Environ. Res. Dev. J. Environ. Res. Dev.*, vol. 7, no. 4, pp. 1399–1406, 2013.
- [11] M. Alonso and M. de Santiago, “Solar Energy in Latin America: an Overview.,” vol. 7, no. 5, pp. 33–38, 2019, doi: [10.1016/b978-1-4832-8407-1.50018-0](https://doi.org/10.1016/b978-1-4832-8407-1.50018-0).
- [12] N. I. Ibrahim, F. A. Al-Sulaiman, S. Rahman, B. S. Yilbas, and A. Z. Sahin, “Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage applications: A critical review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 74, pp. 26–50, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.169>.
- [13] R. Panton, “Incompressible Flow,” *Incompressible Flow*, pp. 198–219, Jul. 2013, doi: [doi:10.1002/9781118713075.ch10](https://doi.org/10.1002/9781118713075.ch10).
- [14] J. Gasia, L. Miró, and L. F. Cabeza, “Review on system and materials requirements for high temperature thermal energy storage. Part 1: General requirements,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 75, pp. 1320–1338, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.119>.
- [15] A. de Gracia and L. F. Cabeza, “Phase change materials and thermal energy storage for buildings,” *Energy Build.*, vol. 103, pp. 414–419, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.007>.

- [16] L. Scapino, H. A. Zondag, J. Van Bael, J. Diriken, and C. C. M. Rindt, "Energy density and storage capacity cost comparison of conceptual solid and liquid sorption seasonal heat storage systems for low-temperature space heating," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, pp. 1314–1331, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.101>.
- [17] J. M. Mahdi, S. Lohrasbi, and E. C. Nsofor, "Hybrid heat transfer enhancement for latent-heat thermal energy storage systems: A review," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 137, pp. 630–649, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.111>.
- [18] B. Zalba, J. M. Marín, L. F. Cabeza, and H. Mehling, "Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, no. 3, pp. 251–283, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00192-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8).
- [19] L. F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, and A. I. Fernández, "Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 3, pp. 1675–1695, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.018>.
- [20] J. Giro-Paloma, M. Martínez, L. F. Cabeza, and A. I. Fernández, "Types, methods, techniques, and applications for microencapsulated phase change materials (MPCM): A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 53, pp. 1059–1075, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.040>.
- [21] S. S. Magendran *et al.*, "Synthesis of organic phase change materials (PCM) for energy storage applications: A review," *Nano-Structures & Nano-Objects*, vol. 20, p. 100399, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2019.100399>.
- [22] G. J. Suppes, M. J. Goff, and S. Lopes, "Latent heat characteristics of fatty acid derivatives pursuant phase change material applications," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 58, no. 9, pp. 1751–1763, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(03\)00006-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(03)00006-X).

- [23] H. Mehling and L. F. Cabeza, "Phase change materials and their basic properties," in *Thermal energy storage for sustainable energy consumption: fundamentals, case studies and design*, Kluwer Academic Publishers Group, 2013, pp. 257–278.
- [24] S. M. Hasnain, "Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques," *Energy Convers. Manag.*, vol. 39, no. 11, pp. 1127–1138, 1998, doi: [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(98\)00025-9](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00025-9).
- [25] K. Kaygusuz, "Experimental and theoretical investigation of latent heat storage for water based solar heating systems," *Energy Convers. Manag.*, vol. 36, no. 5, pp. 315–323, 1995, doi: [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(95\)98896-U](https://doi.org/10.1016/0196-8904(95)98896-U).
- [26] E. Omaraa, S. Farah, A. Alemu, W. Saman, F. Bruno, and M. Liu, "Mathematical modelling of heat transmission in the temperature history apparatus by using inverse method to evaluate the latent heat of high temperature PCMs," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 167, p. 120825, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120825>.
- [27] O. Alonso, "EVALUACIÓN DE PARAFINA COMERCIAL COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE PARA ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA.," UNIVERSIDAD LIBRE, 2016.
- [28] N. Ukrainczyk, S. Kurajica, and J. Šipušić, "Thermophysical comparison of five commercial paraffin waxes as latent heat storage materials," *Chem. Biochem. Eng. Q.*, vol. 24, no. 2, pp. 129–137, 2010.
- [29] ANSYS, "Module 01 : Overview of the CFD Process," *Introduction to ANSYS Fluent*. p. 14, 2016.
- [30] V. R. Voller and C. Prakash, "A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 30, no. 8, pp. 1709–1719, 1987, doi:

[https://doi.org/10.1016/0017-9310\(87\)90317-6](https://doi.org/10.1016/0017-9310(87)90317-6).

- [31] ANSYS Fluent Tutorial Guide 18, “ANSYS Fluent Tutorial Guide 18,” *ANSYS Fluent Tutorial Guide 18*, vol. 15317, no. April. pp. 724–746, 2018.
- [32] N. Soares, P. Antunes, and J. J. Costa, “Ef[1] N. Soares, P. Antunes, and J. J. Costa, ‘Effective Heat Capacity Method To Simulate Heat Difusion Problems With Phase Change,’ pp. 8–10, 2017.fective Heat Capacity Method To Simulate Heat Difusion Problems With Phase Change,” pp. 8–10, 2017.

RT35HC

RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

Properties for RT-line:

- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -9 °C and 100 °C available



The most important data:

Melting area

Congealing area

Heat storage capacity ± 7,5%

Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 27°C to 42 °C.

Specific heat capacity

Density solid

at 25°C

Density liquid

at 40°C

Heat conductivity (both phases)

Volume expansion

Flash point

Max. operation temperature

Typical Values

34-36 [°C]

main peak: 35

36-34 [°C]

main peak: 35

240 [kJ/kg]*

67 [Wh/kg]*

2 [kJ/kg·K]

0,88 [kg/l]

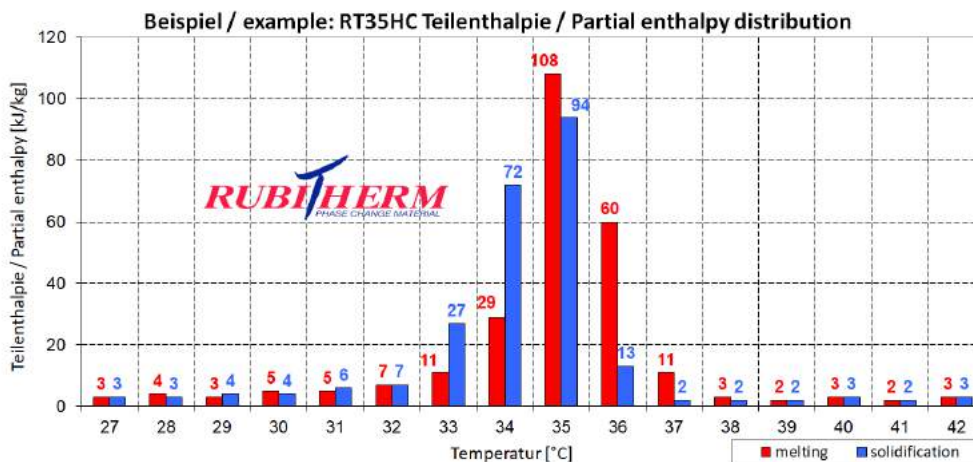
0,77 [kg/l]

0,2 [W/(m·K)]

12 [%]

177 [°C]

70 [°C]



Rubitherm Technologies GmbH
 Imhoffweg 6
 D-12307 Berlin
 phone: +49 (30) 7109622-0
 E-Mail: info@rubitherm.com
 Web: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice.
 Version: 09.10.2020

*Measured with 3-layer-calorimeter.

RT44HC

RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.



Properties for RT-line:

- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -9 °C and 100 °C available

The most important data:

Melting area

Congeeing area

Heat storage capacity ± 7,5%

Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 35°C to 50 °C.

Specific heat capacity

Density solid

at 25°C

Density liquid

at 80°C

Heat conductivity (both phases)

Volume expansion

Flash point

Max. operation temperature

Typical Values

41-44 [°C]

main peak: 43

44-40 [°C]

main peak: 43

250 [kJ/kg]*

70 [Wh/kg]*

2 [kJ/kg·K]

0,8 [kg/l]

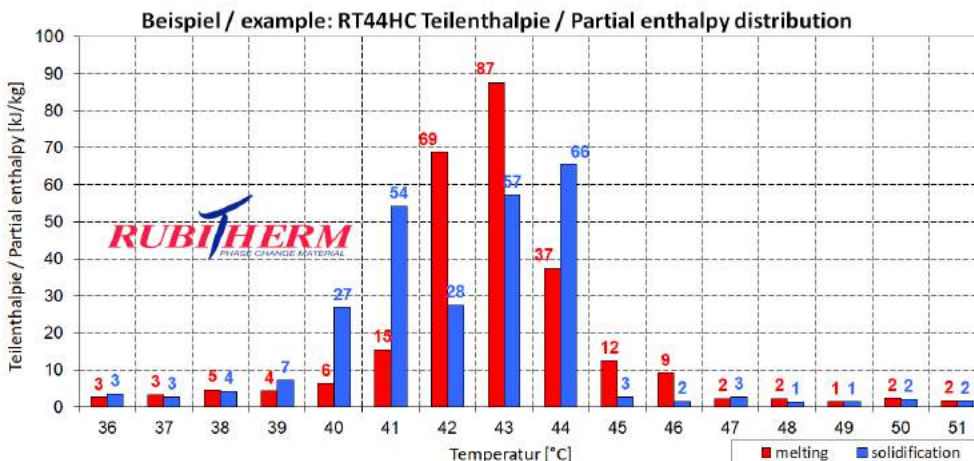
0,7 [kg/l]

0,2 [W/(m·K)]

12,5 [%]

>180 [°C]

70 [°C]



Rubitherm Technologies GmbH
 Imhoffweg 6
 D-12307 Berlin
 phone: +49 (30) 7109622-0
 E-Mail: info@rubitherm.com
 Web: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice.
 Version: 09.10.2020

*Measured with 3-layer-calorimeter.

RT47

RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.



Properties for RT-line:

- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -9 °C and 100 °C available

The most important data:

Melting area

Congealing area

Heat storage capacity ± 7,5%

Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 39°C to 54°C.

Specific heat capacity

Density solid

at 15°C

Density liquid

at 80°C

Heat conductivity (both phases)

Volume expansion

Flash point

Max. operation temperature

Typical Values

41-48 [°C]

main peak: 46

48-41 [°C]

main peak: 47

160 [kJ/kg]*

46 [Wh/kg]*

2 [kJ/kg·K]

0,88 [kg/l]

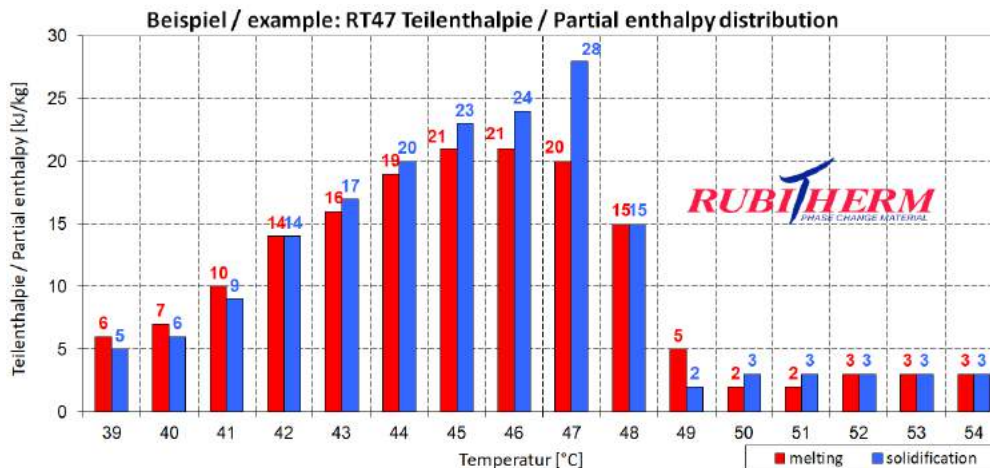
0,77 [kg/l]

0,2 [W/(m·K)]

12 [%]

>180 [°C]

65 [°C]



Rubitherm Technologies GmbH
 Imhoffweg 6
 D-12307 Berlin
 phone: +49 (30) 7109622-0
 E-Mail: info@rubitherm.com
 Web: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice.
 Version: 09.10.2020

*Measured with 3-layer-calorimeter.

RT50

RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.



Properties for RT-line:

- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -9 °C and 100 °C available

The most important data:

Melting area

Congeeing area

Heat storage capacity ± 7,5%

Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 43°C to 58°C.

Specific heat capacity

Density solid
at 15°C

Density liquid
at 80°C

Heat conductivity (both phases)

Volume expansion

Flash point

Max. operation temperature

Typical Values

45-51 [°C]

main peak: 49

51-46 [°C]

main peak: 50

160 [kJ/kg]*

46 [Wh/kg]*

2 [kJ/kg·K]

0,88 [kg/l]

0,76 [kg/l]

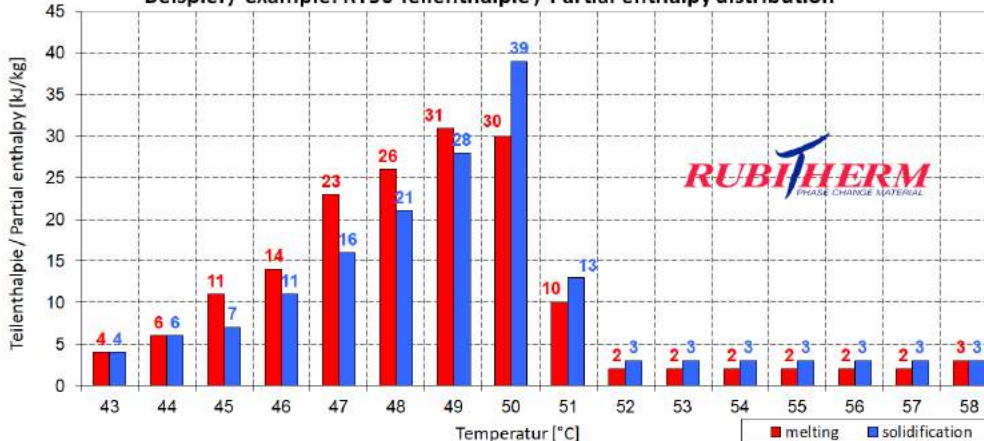
0,2 [W/(m·K)]

12,5 [%]

>200 [°C]

70 [°C]

Beispiel / example: RT50 Teilenthalpie / Partial enthalpy distribution



Rubitherm Technologies GmbH
Imhoffweg 6
D-12307 Berlin
phone: +49 (30) 7109622-0
E-Mail: info@rubitherm.com
Web: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice.
Version: 09.10.2020

*Measured with 3-layer-calorimeter.

RT54HC



A new generation of ecological heat storage materials utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low operating temperature differences are applicable.

We look forward to discussing your particular questions, needs and interests with you.

Properties RT-line:

- stable performance throughout the phase change cycles
- high thermal storage capacity
- limited supercooling
- non toxic
- melting temperature range between -9 °C and 100 °C available

The most important data:

Melting area

Typical Values
53-54 [°C]

main peak: 54

Congealing area

54-53 [°C]

main peak: 54

Heat storage capacity ± 7,5%

Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 46°C to 61°C.

200 [kJ/kg]*

56 [Wh/kg]*

Specific heat capacity

2 [kJ/kg·K]

Density solid

at 25°C

0,85 [kg/l]

Density liquid

at 60°C

0,8 [kg/l]

Heat conductivity

0,2 [W/(m·K)]

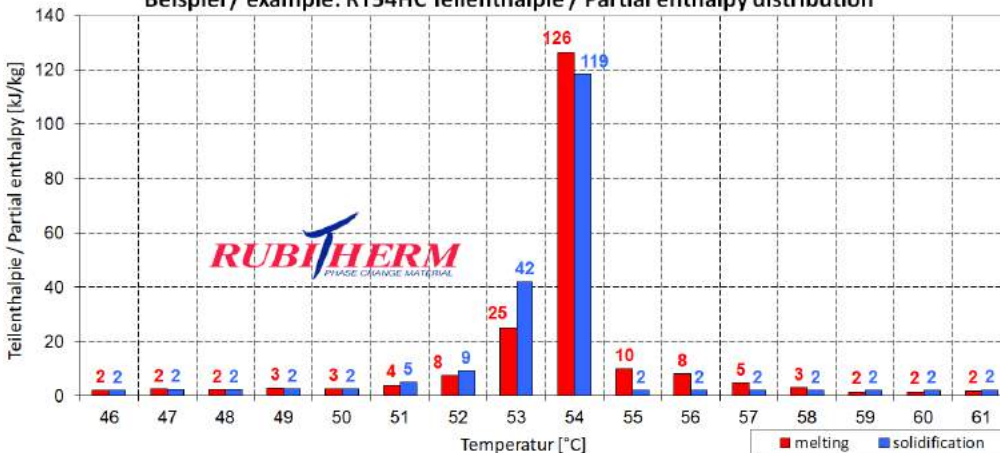
max. operation temperatur

85 [°C]

Corrosion

slight corrosive effect on metals

Beispiel / example: RT54HC Teilenthalpie / Partial enthalpy distribution



*measured with 3-layer-calorimeter

Rubitherm Technologies GmbH
Imhoffweg 6
D-12307 Berlin
Tel: +49 (30) 7109622-0
E-Mail: info@rubitherm.com
Internet: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version:

09.10.2020

RT60

RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

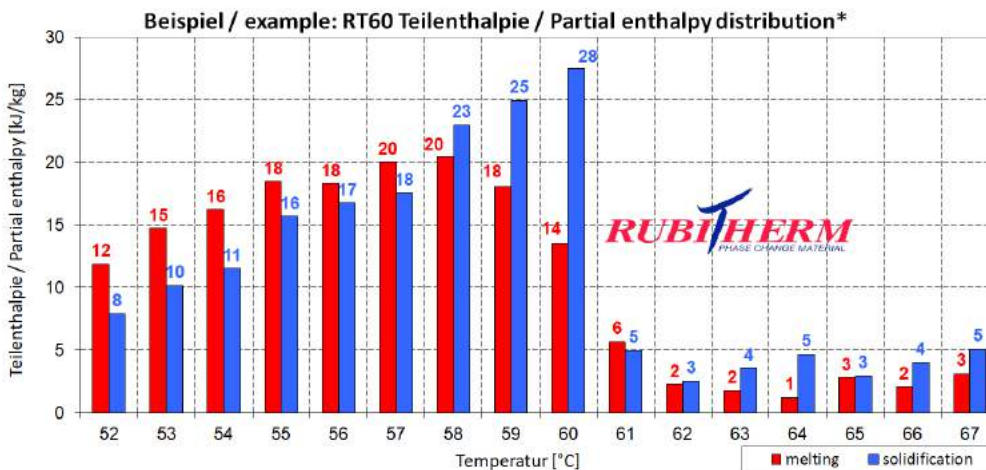


Properties for RT-line:

- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -9 °C and 100 °C available

The most important data:

	Typical Values
Melting area	55-61 [°C] main peak: 60
Congeeing area	61-55 [°C] main peak: 61
Heat storage capacity ± 7,5% Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 53°C to 68 °C.	160 [kJ/kg]*
Specific heat capacity	40 [Wh/kg]*
Density solid at 15°C	2 [kJ/kg·K]
Density liquid at 80°C	0,88 [kg/l]
Heat conductivity (both phases)	0,77 [kg/l]
Volume expansion	0,2 [W/(m·K)]
Flash point	12,5 [%]
Max. operation temperature	>200 [°C]
	80 [°C]



Rubitherm Technologies GmbH
 Imhoffweg 6
 D-12307 Berlin
 phone: +49 (30) 7109622-0
 E-Mail: info@rubitherm.com
 Web: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice.
 Version: 09.10.2020

*Measured with 3-layer-calorimeter.

RT62HC



A new generation of ecological heat storage materials utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low operating temperature differences are applicable.

We look forward to discussing your particular questions, needs and interests with you.

Properties RT-line:

- stable performance throughout the phase change cycles
- high thermal storage capacity
- limited supercooling
- non toxic
- melting temperature range between -9 °C and 100 °C available

The most important data:

Melting area

Congealing area

Heat storage capacity ± 7,5%
Combination of latent and sensible heat in a temperature range of 55°C to 70°C.

Specific heat capacity

Density solid
at 25°C

Density liquid
at 80°C

Heat conductivity

max. operation temperature

Corrosion

Typical Values

62-63 [°C]

main peak: 63

62 [°C]

main peak: 62

230 [kJ/kg]*

64 [Wh/kg]*

2 [kJ/kg·K]

0,85 [kg/l]

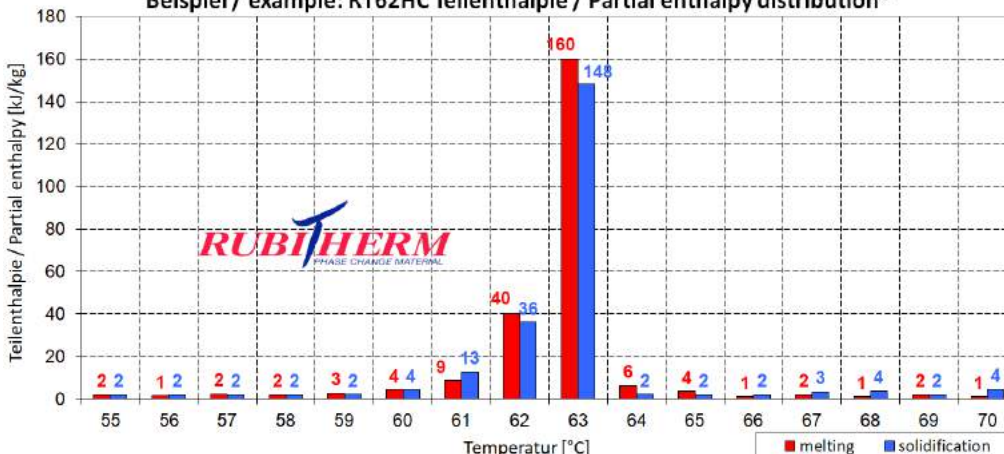
0,84 [kg/l]

0,2 [W/(m·K)]

90 [°C]

corrosive effect on metals

Beispiel / example: RT62HC Teilenthalpie / Partial enthalpy distribution*



*measured with 3-layer-calorimeter

Rubitherm Technologies GmbH
Imhoffweg 6
D-12307 Berlin
Tel: +49 (30) 7109622-0
E-Mail: info@rubitherm.com
Internet: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version:

09.10.2020

RT64HC

RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.



Properties for RT-line:

- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -9 °C and 100 °C available

The most important data:

Melting area

Congealing area

Heat storage capacity ± 7,5%

Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 57°C to 72 °C.

Specific heat capacity

Density solid
at 20°C

Density liquid
at 80°C

Heat conductivity (both phases)

Volume expansion

Flash point

Max. operation temperature

Typical Values

63-65 [°C]

main peak: 64

64-61 [°C]

main peak: 64

250 [kJ/kg]*

70 [Wh/kg]*

2 [kJ/kg·K]

0,88 [kg/l]

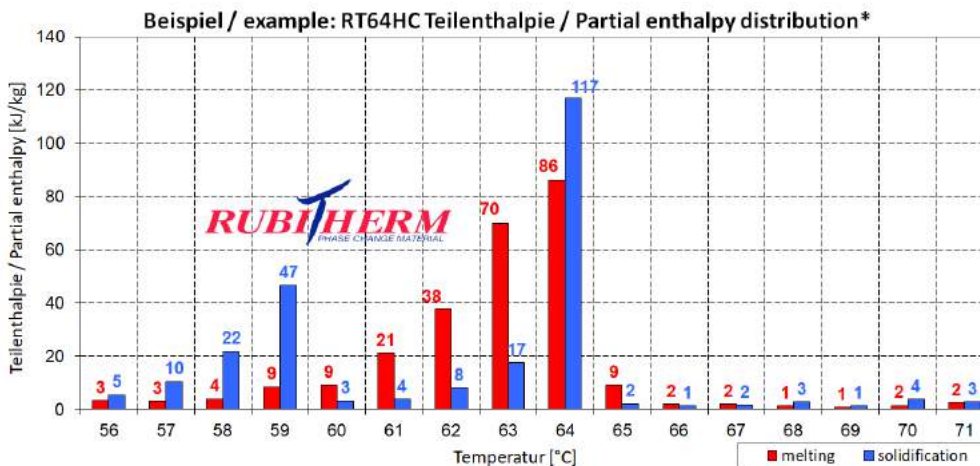
0,78 [kg/l]

0,2 [W/(m·K)]

11 [%]

>190 [°C]

95 [°C]



Rubitherm Technologies GmbH
Imhoffweg 6
D-12307 Berlin
phone: +49 (30) 7109622-0
E-Mail: info@rubitherm.com
Web: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice.
Version: 09.10.2020

*Measured with 3-layer-calorimeter.