

E.T.S. de Ingeniería Industrial,  
Informática y de Telecomunicación

# Caracterización de los Materiales de Cambio de Fase para el almacenamiento de energía.



Máster Universitario en  
Ingeniería de Materiales y Fabricación

Trabajo Fin de Máster

Autor: Claudia de la Caridad Bustamante González

Director: Rafael Rodríguez Trías

Carlos Bengala Labari

Pamplona, 20 junio del 2023

upna

Universidad Pública de Navarra  
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

# Índice

INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS .....	3
Objetivo principal.....	3
Objetivos específicos .....	4
ESTRUCTURA.....	4
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
1.1. Contexto político-económico y medioambiental.....	5
1.2. Almacenamiento de energía .....	5
1.3. Almacenamiento de energía térmica.....	6
1.3.1. Almacenamiento de energía por calor sensible .....	8
1.3.2. Almacenamiento de energía por calor latente .....	9
1.3.3. Almacenamiento termoquímico.....	9
1.4. Materiales de cambio de fase .....	9
1.4.1. Propiedades de materiales de cambio de fase .....	10
1.4.2. Clasificación de los PCM.....	11
1.4.3. Ventajas e inconvenientes .....	14
2. METODOLOGÍA.....	15
2.1. Materiales .....	15
2.1.1. Nitrato de sodio .....	15
2.1.2. Nitrato de potasio .....	16
2.1.3. Nitrito de sodio.....	16
2.1.4. Mezcla binaria de nitrato de sodio y nitrato de potasio .....	17
2.1.5. Mezcla ternaria de nitrato de sodio, nitrato de potasio y nitrito de sodio .....	18
2.2. Método de análisis.....	19
2.2.1. Preparación de la muestra .....	20
2.2.2. Relación de equipos .....	21
2.2.3. Calorimetría diferencial de barrido .....	23
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	26
3.1. Presentación de los resultados .....	26
3.1.1. Mezcla de 60 % $\text{NaNO}_3$ + 40 % $\text{KNO}_3$ .....	26
3.1.2. Mezcla de 40 % $\text{NaNO}_2$ + 7 % $\text{NaNO}_3$ + 53 % $\text{KNO}_3$ .....	28
3.2. Discusión de los resultados.....	31
3.2.1. Resultados de 60 % $\text{NaNO}_3$ + 40 % $\text{KNO}_3$ .....	31
3.2.2. Resultados de 40 % $\text{NaNO}_2$ + 7 % $\text{NaNO}_3$ + 53 % $\text{KNO}_3$ .....	31
3.2.3. Comparación de los resultados.....	32
4. CONCLUSIONES.....	33
4.1. Líneas futuras de investigación.....	34
5. GLOSARIO.....	35
Glosario de términos .....	35

Símbolos.....	36
Abreviaturas .....	36
6. ANEXOS.....	37
7. BIBLIOGRAFÍAS .....	40

## Figuras

Figura 1.Número de proyectos operativos de tecnologías de almacenamiento [4].....	2
Figura 2.Clasificación de tecnologías de almacenamiento de energía [4].....	6
Figura 3.Diferentes tipos de almacenamiento térmico de la energía solar [12].....	7
Figura 4.Opciones tecnológicas de almacenamiento de energía térmica [4] .....	7
Figura 5.Cuota de la cantidad de energía almacenada mediante sistema térmico [4].....	8
Figura 6.Clasificación de los PCM [12] .....	12
Figura 7.Relación entre la temperatura y calor de fusión para los PCM [14] .....	12
Figura 8.Diagrama de fase del nitrato de sodio y nitrato de potasio [25].....	18
Figura 9.Diagrama de fase de $\text{NaNO}_3+\text{NaNO}_2+\text{KNO}_3$ [31].....	19
Figura 10.Tipos de análisis térmicos [32].....	19
Figura 11.Curva característica de un DSC [24] .....	20
Figura 12.Preparación de las muestras .....	21
Figura 13.Preparación de la muestra en los crisoles .....	23
Figura 14.Rampa de temperatura programada para el ensayo.....	24
Figura 15.Secuencia de ciclos .....	25
Figura 16.DSC calentamiento/enfriamiento de un ciclo de la mezcla 1.....	27
Figura 17.DSC calentamiento/enfriamiento de un ciclo de la mezcla 2.....	27
Figura 18.DSC calentamiento/enfriamiento de un ciclo de la mezcla 3.....	27
Figura 19.Muestra 60 % $\text{NaNO}_3$ + 40 % $\text{KNO}_3$ luego 5 ciclos .....	28
Figura 20.DSC calentamiento/enfriamiento de un ciclo de la mezcla 4.....	29
Figura 21.DSC calentamiento/enfriamiento de un ciclo de la mezcla 5.....	29
Figura 22.DSC calentamiento/enfriamiento de un ciclo de la mezcla 6.....	30
Figura 23. Muestra 40 % $\text{NaNO}_2$ + 7 % $\text{NaNO}_3$ + 53 % $\text{KNO}_3$ luego 5 ciclos .....	30

## Tablas

Tabla 1.Relación de sustancias para la preparación de los PCM .....	15
Tabla 2.Datos del nitrato de sodio.....	15
Tabla 3.Datos del nitrato de potasio.....	16
Tabla 4.Datos del nitrito de sodio.....	16
Tabla 5.Datos de 60 % $\text{NaNO}_3$ + 40 % $\text{KNO}_3$ .....	17
Tabla 6.Datos de 40 % $\text{NaNO}_2$ + 7 % $\text{NaNO}_3$ + 53 % $\text{KNO}_3$ .....	18
Tabla 7.Relación de equipos e instrumentos .....	22
Tabla 8.Peso de muestras de PCM .....	24
Tabla 9.Programación de la técnica.....	25
Tabla 10.Resumen de resultados de ensayos de 60 % $\text{NaNO}_3$ + 40 % $\text{KNO}_3$ .....	26
Tabla 11.Comparación de resultados bibliográficos 60 % $\text{NaNO}_3$ + 40 % $\text{KNO}_3$ .....	28
Tabla 12.Resumen de los resultados de 40 % $\text{NaNO}_2$ + 7 % $\text{NaNO}_3$ + 53 % $\text{KNO}_3$ .....	29
Tabla 13.Comparación de resultados bibliográficos 40 % $\text{NaNO}_2$ + 7 % $\text{NaNO}_3$ + 53 % $\text{KNO}_3$ . 30	
Tabla 14.Comparación de los resultados entre ambas muestras.....	32

## Resumen

El uso de materiales de cambio de fase (PCM, por sus siglas en inglés) para el almacenamiento de energía térmica ha surgido como una solución prometedora en el campo de la eficiencia energética y la gestión de la demanda de energía. Los PCM son materiales capaces de almacenar y liberar grandes cantidades de energía térmica durante su proceso de cambio de fase, generalmente de sólido a líquido o de líquido a gas, a temperaturas y presiones constantes. La mezcla de nitrato de sodio y nitrato de potasio han mostrado propiedades termofísicas favorables, lo que las hace adecuadas para aplicaciones de almacenamiento de energía térmica. En el presente trabajo se realizó caracterización de la mezcla de sal binaria, además se llevó a cabo una comparación con una sal ternaria, ampliando así el análisis. Se evaluó las posibles ventajas y desventajas de cada una de ellas en términos de sus propiedades y capacidad de almacenamiento de energía. La caracterización de los PCM se realizó a través de la técnica de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), que permitió determinar las temperaturas de fusión y solidificación, las entalpías de fusión y otros parámetros termofísicos relevantes. Estos resultados mejorarán la información crucial para evaluar la idoneidad de la mezcla de sal binaria como PCM y comparar su desempeño con la sal ternaria.

**Palabras Clave:** Materiales de cambio de fase, entalpía de fusión, calorimetría diferencial de barrido, almacenamiento energético, calor latente.

## **Abstract**

The use of phase change materials (PCM) for thermal energy storage has emerged as a promising solution in the field of energy efficiency and energy demand management. PCMs are materials capable of storing and releasing large amounts of thermal energy during their phase change process, generally from solid to liquid or liquid to gas, at constant temperatures and pressures. The mixture of sodium nitrate and potassium nitrate have shown favorable thermophysical properties, making them suitable for thermal energy storage applications. In the present work, characterization of the binary salt mixture was carried out, in addition, a comparison with a ternary salt was carried out, thus expanding the analysis. The possible advantages and disadvantages of each of them in terms of their properties and energy storage capacity were evaluated. The characterization of the PCM was carried out through the Differential Scanning Calorimetry (DSC) technique, which allowed determining the melting and solidification temperatures, the fusion enthalpies and other relevant thermophysical parameters. These results will provide crucial information for evaluating the suitability of the binary salt mixture as a PCM and comparing its performance with ternary salt.

**Keywords:** Phase change materials, enthalpy of fusion, differential scanning calorimetry, energy storage, latent heat

## INTRODUCCIÓN

La creciente demanda energética mundial y la necesidad de reducir la huella de carbono son dos de los mayores desafíos a los que se enfrenta el mundo en la actualidad. El aumento constante de la población, el crecimiento económico y el desarrollo industrial han llevado a un mayor consumo de energía, principalmente basado en combustibles fósiles. Sin embargo, esta dependencia tiene consecuencias ambientales significativas, como la emisión de gases de efecto invernadero y el consiguiente calentamiento global.

El cambio climático resulta un grave riesgo para el medio ambiente y la sociedad en general. Es de suma importancia tomar medidas para abordar estos problemas y reducir sus impactos negativos. Durante los últimos cuatro años ha existido una disminución significativa del número de patentes “verdes” que fomentan el uso de tecnologías desde el punto de vista sostenible para el planeta, es por eso que se aboga que los gobiernos asuman un papel protagónico desde el punto de vista financiero para que inviertan de forma racional e inteligente por la investigación, desarrollo e innovación de tecnologías que ayuden a erradicar o disminuir el deterioro que está teniendo nuestro planeta con los problemas que trae la explotación de combustibles fósiles e intrínsecamente las emisiones de dióxido de carbono. [1]

El sistema mundial de suministro de energía está experimentando actualmente un cambio hacia la integración de más fuentes de energía renovables todo esto trae consigo una serie de retos a tratar como es el caso de las intermitencias inherentes de la energía solar y la eólica, planteando desafíos significativos para su integración en la red eléctrica convencional. La naturaleza fluctuante de la generación de energía renovable puede dar lugar a cargas residuales variables y desequilibrios en la oferta y la demanda de electricidad. Estas fluctuaciones pueden causar inestabilidad en la red eléctrica y afectar la calidad y confiabilidad del suministro de energía.

Ante esta situación, el almacenamiento de energía se presenta como una solución prometedora para reducir las fluctuaciones derivadas de la energía renovable. Almacenar el exceso de energía generada durante los períodos de alta producción y liberarla cuando la demanda es mayor o cuando la generación renovable es baja permite suavizar las variaciones y garantizar un suministro constante y confiable de electricidad.[2]

El almacenamiento de energía se está convirtiendo en una parte cada vez más importante del sistema energético a medida que se integran más fuentes de energía renovable. La tecnología de almacenamiento de energía, como las baterías, está mejorando, convirtiéndose en una de las alternativas para el desarrollo sostenible. Un sistema de almacenamiento de energía se compone, generalmente, de un medio de almacenamiento, un sistema de conversión de energía y un balance de planta. Actualmente existen diversas tecnologías para

el almacenamiento de la energía; cada una con una funcionalidad prevista y diferentes niveles de madurez tecnológica con algunas ya probadas para aplicaciones a escala comercial, pero con un objetivo en común mejora la flexibilidad del sistema y permite el almacenamiento y el envío de energía renovable. Se tiene como sistema de almacenamiento actuales el uso de baterías de ion litio, electroquímicas, de hidrógeno, energía hidráulica, mecánica y el almacenamiento térmico. A pesar de las ventajas obvias para la aplicación de sistemas de almacenamiento en el campo de las centrales eléctricas de energía renovable, parece claro que son obligatorios esfuerzos adicionales para superar las barreras actuales. El principal es el costo de capital inicial de almacenamiento por kilovatio de cada una de las tecnologías de almacenamiento.[3]

Las baterías, en particular, han experimentado avances significativos en los últimos años, tanto en términos de eficiencia como de capacidad de almacenamiento. En este concepto se tiene diferentes tecnologías empleadas a escala industrial actualmente y de nuevos proyectos que se están implementando por todo el mundo. Alguno de los desafíos que dificultan el despliegue de estas tecnologías a nivel comercial son los grandes costos de operación que incluyen operación, mantenimiento, eliminación y reemplazo; además de los costes de capital. Otro de los retos para la tecnología de almacenamiento es su vida útil, capacidad de carga y descarga y capacidad de almacenamiento, densidad energía / potencia y volumen que ocupa. En la Figura 1 se muestra una gráfica donde se relacionan las distintas tecnologías de almacenamiento con respecto a los proyectos existentes.

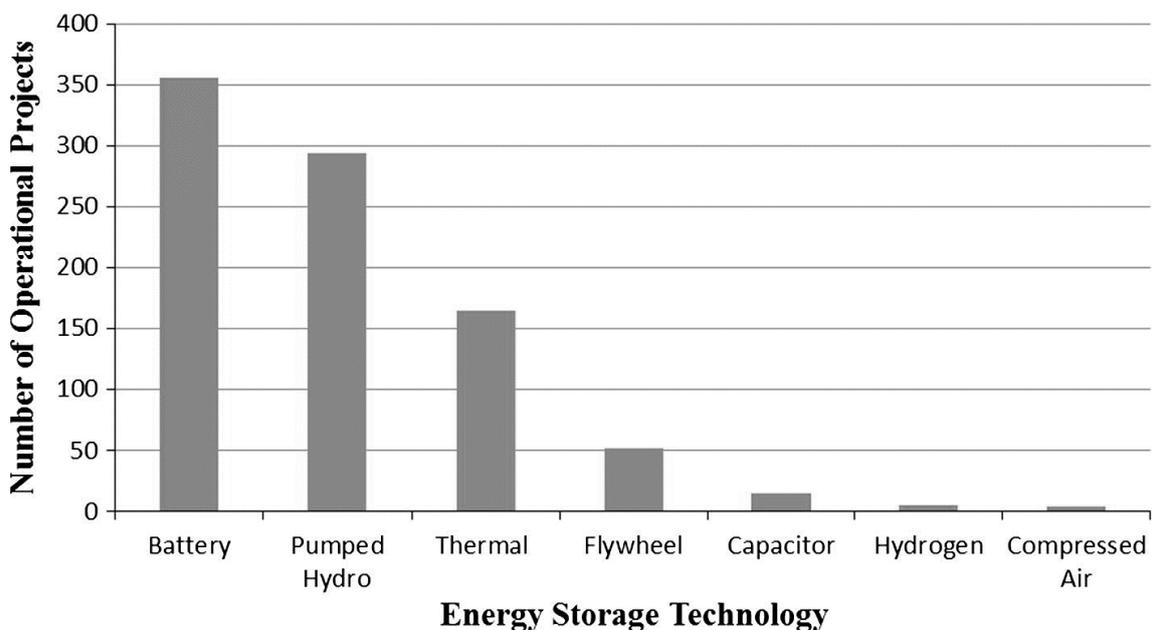


Figura 1. Número de proyectos operativos de tecnologías de almacenamiento [4]

El desarrollo sostenible es otro factor clave que impulsa el crecimiento del almacenamiento de energía ya que este contribuye a la transición hacia un sistema energético más verde al permitir una mayor integración de fuentes renovables y reducir la dependencia de combustibles fósiles.[4]

Sobre el almacenamiento térmico se enfocan en la investigación y desarrollo de tecnologías que permitan la conservación y uso de la energía térmica de manera eficiente y razonable. Esto se ha logrado en la actualidad a través de la utilización de diversos materiales como sales fundidas, agua, materiales sólidos, en sistema de almacenamiento térmico de fase cambiante empleándose en el sector de la construcción, climatización y centrales termo solares.

Cada vez son más utilizados materiales de cambio de fase (PCM) en aplicaciones de almacenamiento térmico. Existiendo diversas investigaciones logrando combinaciones de materiales, encapsulación y adición de nanopartículas para lograr un bajo punto de congelación, buena estabilidad térmica en un amplio rango de temperaturas, baja viscosidad, alta capacidad calorífica, así como una tasa de corrosión aceptablemente baja.[5]

El uso de nitrato de sodio ( $\text{NaNO}_3$ ) y nitrato de potasio ( $\text{KNO}_3$ ) como materiales de cambio de fase (PCM) para almacenamiento térmico son prometedores para el almacenamiento de energía térmica, ya que ofrecen una alta densidad de energía, una buena conductividad térmica y una estabilidad química y térmica adecuada. Pero existen desafíos técnicos y económicos asociados con el uso de nitratos como PCM, como la degradación del material a largo plazo y el costo elevado de los nitratos de alta pureza; es por lo que se han llevado a cabo diferentes investigaciones científicas con el objetivo de mejorar dichas propiedades.[6]

## **OBJETIVOS**

El almacenamiento de energía térmica utilizando PCM presenta numerosas ventajas en comparación con los métodos tradicionales de almacenamiento de calor. Por un lado, los PCM tienen una alta densidad de energía, lo que significa que pueden almacenar grandes cantidades de energía en un volumen relativamente pequeño. Además, el proceso de cambio de fase es reversible, lo que permite la recuperación de la energía almacenada cuando sea necesario. En este contexto, este trabajo responderá a los siguientes objetivos con lo que se espera obtener una comprensión más profunda acerca del tema y que contribuya al desarrollo de soluciones más eficientes y sostenibles en el ámbito de las energías renovables.

### **Objetivo principal**

El presente trabajo tiene como objetivo principal explorar y caracterizar una mezcla de sales como PCM para el almacenamiento de energía térmica.

## **Objetivos específicos**

1. Realizar una revisión exhaustiva de la literatura sobre el contexto actual de la generación de la energía y los distintos sistemas de almacenamiento existentes.
2. Contribuir al conocimiento y desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía térmica profundizando en el uso de materiales de cambio de fase para el almacenamiento de la energía.
3. Caracterizar las propiedades físicas y térmicas de la mezcla de sales de nitrato de sodio y nitrato de potasio, además de la mezcla ternaria de nitrato de sodio, nitrato de potasio y nitrito de sodio a través de DSC para determinar sus propiedades clave, como las temperaturas de fusión, los picos endotérmicos y exotérmicos, las entalpías de fusión y solidificación.
4. Analizar la influencia que tiene la adición de sales de nitrito al comportamiento del termodinámico de la mezcla de sales de nitrato.
5. Comprender el comportamiento térmico de las sales y su idoneidad como PCM para aplicaciones de almacenamiento de energía.

## **ESTRUCTURA**

El presente Trabajo Fin de Máster va a disponer una estructura que permita cumplir con el objetivo central y los específicos planteados. Para ello, se presenta un primer capítulo que recoge la información necesaria para la comprensión del contexto actual, la necesidad del uso de almacenamiento de la energía, distintos tipos de almacenamiento profundizando en el uso y ventajas del almacenamiento térmico y tipos de materiales que se utilizan para este tipo de aplicación.

Luego en el capítulo 2 “Materiales y Métodos” se especifica las características y propiedades físico – químicas de la mezcla de sales de nitrato de sodio, nitrato de potasio y nitrito de sodio; además de la técnica de ensayo que se realiza y la relación de equipos de medición junto con el procedimiento a seguir para la preparación de las muestras a estudiar.

En el capítulo 3 “Análisis de los resultados” se exponen los resultados de los ensayos realizados, la interpretación de las curvas, entalpías y temperaturas de fusión de las muestras preparadas; así como la comparación y funcionalidad de estas para su uso como PCM. Finalizando así con las “Conclusiones” donde se exponen los hallazgos obtenidos en la investigación y el cumplimiento del objetivo central y objetivos generales la presente memoria.

# 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

## 1.1. Contexto político-económico y medioambiental

Luego de la Revolución Industrial y desarrollo de la máquina de vapor en el año 1765 permitió el uso del carbón como combustible y trajo consigo la mecanización de muchos procesos productivos que proporcionaron el crecimiento económico y del comercio a nivel mundial. La creciente demanda de la energía a lo largo de los años ha llevado consigo a la explotación de los combustibles fósiles como el petróleo y el gas natural de forma excesiva teniendo graves consecuencias medioambientales como la emisión de gases efecto invernadero, contaminación del aire y del agua.

Durante los últimos años se ha desarrollado sistemas energéticos más sostenibles con energías limpias como la energía solar, eólica, geotérmica; producto a la crisis energético ambiental, lo que conlleva a la disminución de la huella de carbono para minimizar los efectos del cambio climático, contaminación atmosférica e independencia de los combustibles fósiles.[7]

## 1.2. Almacenamiento de energía

El almacenamiento de energía es una pieza fundamental en la cadena de suministro de energía. Es necesario tener en cuenta que ningún sistema es completamente eficiente desde el punto de vista termodinámico, y la mayoría de los sistemas experimentan pérdidas de energía en forma de calor que se disipan en el medio ambiente. Sin embargo, este calor residual puede ser una fuente de energía valiosa si se captura y almacena, lo que permite su utilización en otros procesos energéticos. Además, en el contexto de una transición hacia una economía de baja en carbono que busca aprovechar más fuentes renovables como la solar y la eólica, el almacenamiento de energía juega un papel crucial.

Uno de los desafíos principales de estas fuentes es su naturaleza intermitente, lo que las hace poco confiables para el suministro constante de energía. Sin embargo, mediante el almacenamiento de energía, es posible convertir estas fuentes renovables en fuentes de energía confiables y constantes. Esto se logra almacenando el exceso de energía generada cuando los recursos renovables están disponibles, para luego utilizarla cuando no se encuentran disponibles, asegurando así un suministro continuo de energía. En la Figura 2 se relacionan las diferentes tecnologías de almacenamiento de la energía divididas en el tipo de almacenamiento térmico y eléctrico.[4]

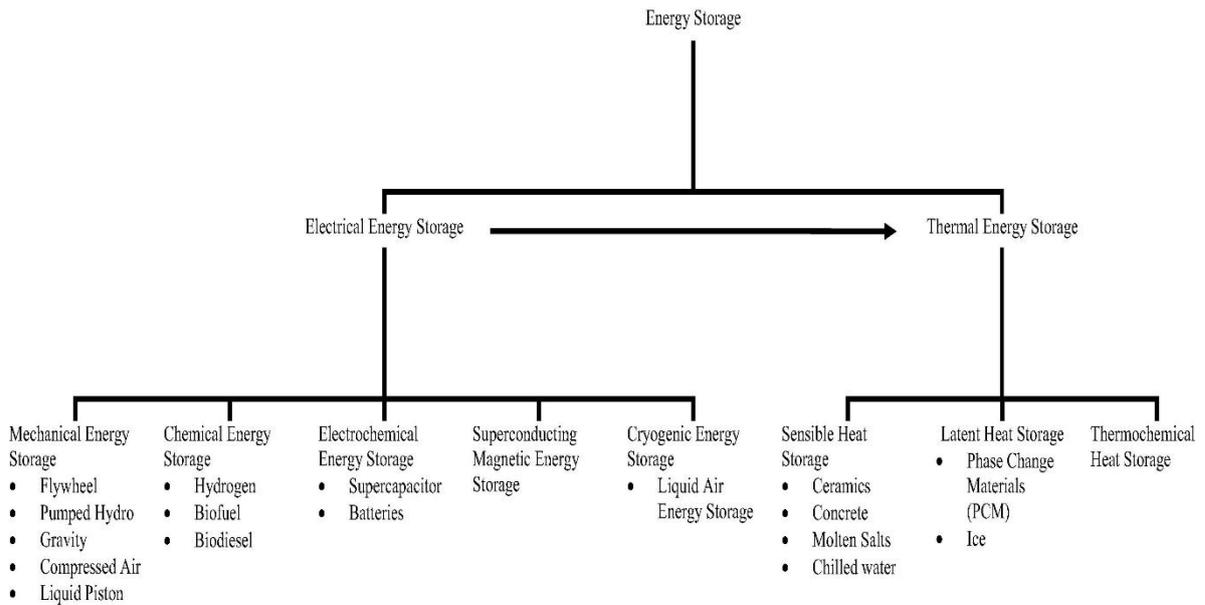


Figura 2. Clasificación de tecnologías de almacenamiento de energía [4]

### 1.3. Almacenamiento de energía térmica

El almacenamiento de energía térmica (TES) es una forma común de almacenar electricidad y calor residual en forma de energía térmica para su uso posterior. Hay tres métodos principales de almacenamiento de energía térmica: almacenamiento de calor sensible, almacenamiento de calor latente y almacenamiento termoquímico. La elección del método de TES depende de factores como la temperatura de almacenamiento, la aplicación específica y los medios de almacenamiento. Los sistemas de TES se clasifican en sistemas de baja y alta temperatura, según la temperatura de operación del material. Los sistemas de TES de baja temperatura se utilizan en aplicaciones como calefacción y refrigeración de edificios, cocinas solares y sistemas de calefacción de aire, mientras que los sistemas de TES de alta temperatura se utilizan en tecnologías de energía renovable, recuperación de calor residual y sistemas de energía térmica.[8] En la Figura 3 se relacionan los tipos de almacenamiento de energía térmica.

Existen un gran número de proyectos operativos a nivel mundial de este tipo de almacenamiento. En la Figura 4 se muestra las cifras en términos de la cantidad real de energía almacenada; donde el almacenamiento de energía térmica con hielo es la tecnología más utilizada ya que se emplea generalmente para aplicaciones de intervalos muy cortos para proporcionar aire acondicionado en periodos pico. Le sigue el almacenamiento de energía térmica de sales fundidas se utiliza para aplicaciones de alta temperatura a gran escala, como las que se encuentran en las plantas de energía solar térmica o cualquier otra aplicación de alta temperatura, donde se puede apreciar con más precisión en la Figura 5 que representa alrededor del 77 % de la cantidad de energía almacenada como energía térmica.[4]

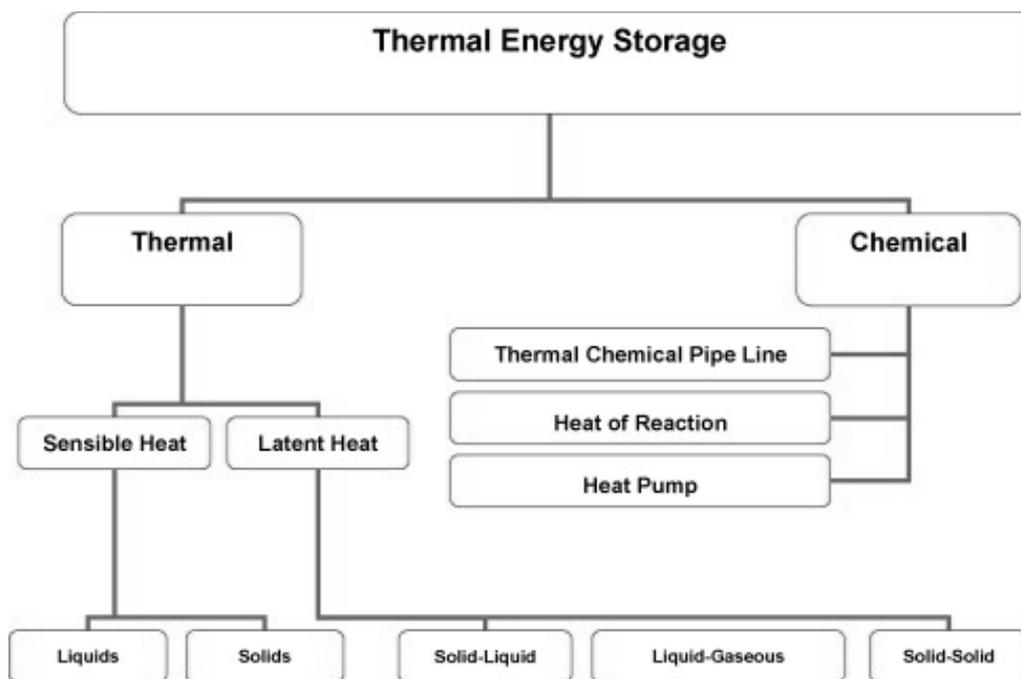


Figura 3. Diferentes tipos de almacenamiento térmico de la energía solar [12]

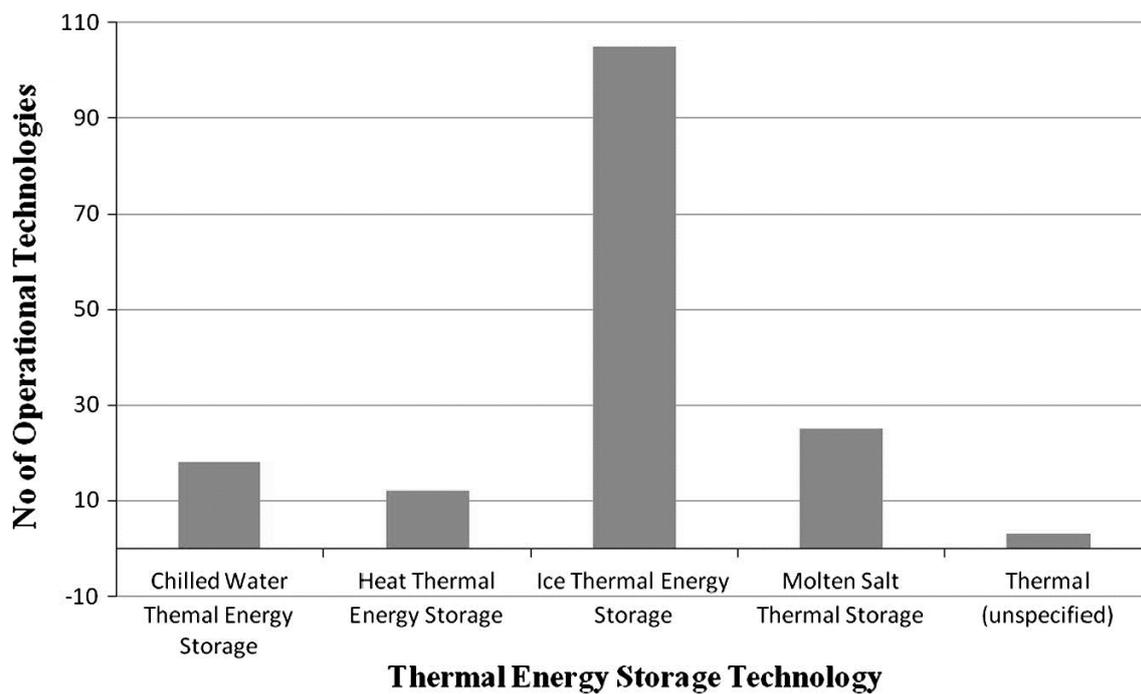


Figura 4. Opciones tecnológicas de almacenamiento de energía térmica [4]

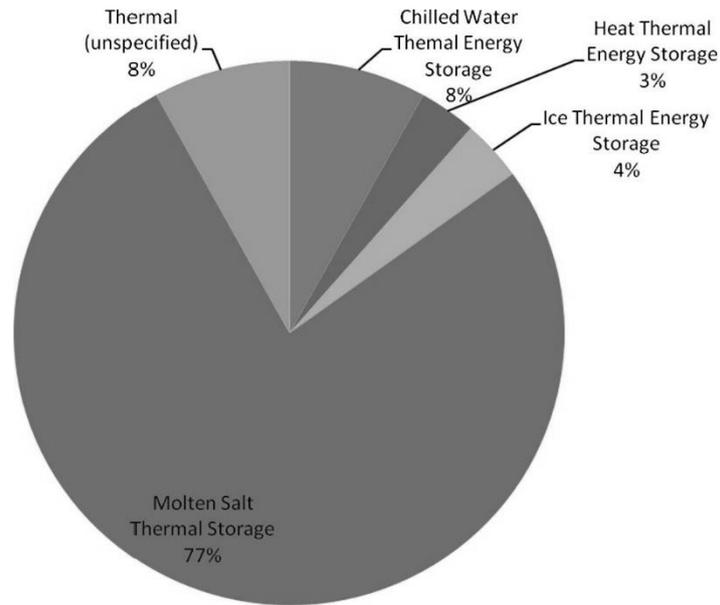


Figura 5. Cuota de la cantidad de energía almacenada mediante sistema térmico [4]

### 1.3.1. Almacenamiento de energía por calor sensible

Este tipo de almacenamiento es simple y se utiliza ampliamente en aplicaciones como sistemas térmicos solares, calefacción urbana y procesos industriales. Los materiales de almacenamiento de calor sensible son aquellos que no experimentan cambios de fase durante el proceso de almacenamiento. La capacidad de almacenamiento de calor sensible de un material depende de su densidad de energía, es decir, su capacidad calorífica por unidad de volumen. Para ser útil en aplicaciones de almacenamiento de energía térmica, un material debe ser económico y tener una buena conductividad térmica. El almacenamiento de calor sensible implica cambiar la temperatura de un material sin cambiar su fase, y se puede lograr utilizando líquidos como agua o aceite, o sólidos como rocas, ladrillos u hormigón.

En las ecuaciones (1) y (2) se muestra la dependencia de la cantidad de calor con respecto a la temperatura:[9]

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} mC_p dT \quad (1)$$

$$Q = mC_p(T_f - T_i) \quad (2)$$

### 1.3.2. Almacenamiento de energía por calor latente

El almacenamiento de calor latente implica cambiar la fase de un material, como de sólido a líquido o de líquido a gas, para almacenar o liberar una gran cantidad de calor mientras mantiene una temperatura constante. Los materiales de cambio de fase (PCM), como la parafina, los hidratos de sal o las mezclas eutécticas, son utilizados debido a su alta capacidad de almacenamiento de calor y su capacidad de absorber o liberar calor durante la transición de fase.

La capacidad de almacenamiento del sistema LHS con un medio PCM viene dada por la ecuación (3) y (4):[10]

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} mC_p dT + ma_m \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} mC_p dT \quad (3)$$

$$Q = m[C_{sp}(T_m - T_i) + a_m \Delta h_m + C_{lp}(T_f - T_m)] \quad (4)$$

### 1.3.3. Almacenamiento termoquímico

El almacenamiento de calor mediante reacciones termoquímicas implica una reacción reversible en la que se almacena calor durante una reacción endotérmica y se libera calor durante una reacción exotérmica. Durante la carga, se utiliza energía térmica para dissociar un reactivo químico en productos en una reacción endotérmica, que se almacenan por separado. Durante la descarga, los productos almacenados se mezclan y reaccionan exotérmicamente para formar el reactivo inicial, liberando calor que se utiliza como fuente de energía. Este tipo de almacenamiento de energía está en etapa de investigación y desarrollo, y se han analizados varios materiales, como hidruros metálicos, carbonatos, hidróxidos, óxidos, sistemas amoniacales y sistemas orgánicos.[11]

## 1.4. Materiales de cambio de fase

Los materiales de cambio de fase son seleccionados por su capacidad de cambiar de fase (generalmente de sólido a líquido) a una temperatura, coincidiendo con la fuente de entrada térmica. El alto calor latente liberado o absorbido durante el cambio de fase permite una alta densidad de almacenamiento de energía en comparación con otros materiales de almacenamiento de alta temperatura que no experimentan cambio de fase. Sin embargo, debido a que implica un cambio de fase sólido/líquido, se requiere un medio de transferencia de calor para mover el calor desde la fuente hasta el PCM. Actualmente, se están investigando dos enfoques principales: la encapsulación de pequeñas cantidades de PCM y la incrustación de PCM en una matriz hecha de otro material sólido con alta conductividad térmica.[10]

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Las transiciones de fase sólido-gas y líquido-gas tienen un alto calor latente, pero sus grandes cambios de volumen las hacen imprácticas para sistemas de almacenamiento térmico. Las transiciones sólido-líquido tienen un calor latente menor, pero involucran cambios de volumen más pequeños, lo que las hace económicamente atractivas para almacenamiento de energía térmica. Sin embargo, los PCM no pueden transferir calor por sí mismos y requieren un medio separado con un intercambiador de calor diseñado especialmente debido a su baja difusividad térmica. Los contenedores para almacenar estos materiales también deben ser diseñados para absorber los cambios de volumen que ocurren al fundirse y ser compatibles con estos. Cualquier sistema de almacenamiento de energía de calor latente, por lo tanto, posee al menos los siguientes tres componentes:[12]

- Un PCM adecuado con su punto de fusión en el rango de temperatura deseado.
- Una superficie de intercambio de calor adecuada.
- Un recipiente adecuado compatible con el PCM.

### 1.4.1. Propiedades de materiales de cambio de fase

El PCM que se utilizará en el diseño de sistemas de almacenamiento térmico debe pasar las propiedades térmicas, cinéticas y químicas deseables que son las siguientes:

#### Propiedades térmicas

- Temperatura de transición de fase adecuada.
- Alto calor latente de transición.
- Buena transferencia de calor.

Al seleccionar un PCM para una aplicación en particular, la temperatura de funcionamiento de la calefacción o refrigeración debe coincidir con la temperatura de transición de este. El calor latente debe ser lo más alto posible, especialmente en términos volumétricos, para minimizar el tamaño físico del almacenamiento de calor. La alta conductividad térmica ayudaría a la carga y descarga del almacenamiento de energía.

#### Propiedades físicas

- Equilibrio de fases favorable.
- Alta densidad.
- Pequeño cambio de volumen.
- Baja presión de vapor.

La estabilidad de fase durante la congelación y fusión ayudaría a establecer el almacenamiento de calor y es deseable una alta densidad para permitir un tamaño más pequeño de contenedor de almacenamiento. Pequeños cambios de

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

volumen en la transformación de fase y pequeña presión de vapor a temperaturas de funcionamiento para reducir el problema de contención.

### Propiedades cinéticas

- Sin superenfriamiento.
- Tasa de cristalización suficiente.

El sobreenfriamiento ha sido un aspecto problemático del desarrollo de PCM, particularmente para los hidratos de sal. El sobreenfriamiento de más de unos pocos grados interfiere con la extracción adecuada de calor, y un sobreenfriamiento de 5 a 10 °C puede evitarlo por completo.

### Propiedades químicas

- Estabilidad química a largo plazo.
- Compatibilidad con los materiales de construcción.
- Sin toxicidad.
- Sin peligro de incendio.

El PCM puede sufrir degradación por pérdida de agua de hidratación, descomposición química o incompatibilidad con los materiales de construcción. Los PCM deben ser no tóxicos, no inflamables y no explosivos por seguridad.

### Ciencias económicas

- Abundante.
- Disponible.
- Económico.

El bajo costo y la disponibilidad a gran escala de los materiales de cambio de fase también son muy importantes.[13]

#### **1.4.2. Clasificación de los PCM**

Existe una amplia variedad de materiales orgánicos e inorgánicos que se pueden considerar como PCM, basados en su temperatura de fusión y calor latente de fusión. Sin embargo, la mayoría de estos materiales no cumplen con los criterios necesarios para ser un medio de almacenamiento térmico adecuado. Por lo tanto, se deben utilizar los materiales disponibles y compensar sus deficiencias mediante un diseño de sistema adecuado, como agregar aletas metálicas para mejorar la conductividad térmica o introducir agentes de nucleación para evitar el sobreenfriamiento. En general, los compuestos inorgánicos tienen una mayor capacidad volumétrica de almacenamiento de calor latente (250-400 kg/dm<sup>3</sup>) en comparación con los compuestos orgánicos (128-200 kg/dm<sup>3</sup>). Cada subgrupo de materiales tiene diferentes propiedades térmicas y químicas, lo que afecta el diseño de los sistemas de almacenamiento de energía que utilizan. Se deben analizar detalladamente estas propiedades para determinar el material más

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

adecuado para cada aplicación. En la Figura 6 se relacionan los diferentes tipos de materiales de cambio de fase según sus características y en la Figura 7 se relacionan los distintos tipos de PCM con respecto a la temperatura y entalpía que presentan.[14]

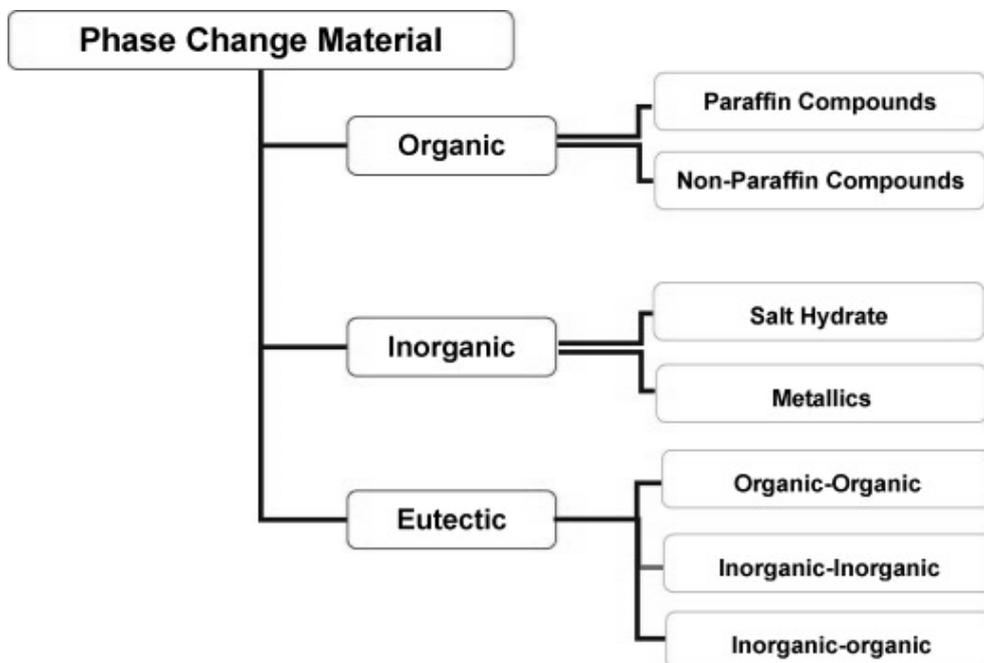


Figura 6. Clasificación de los PCM [12]

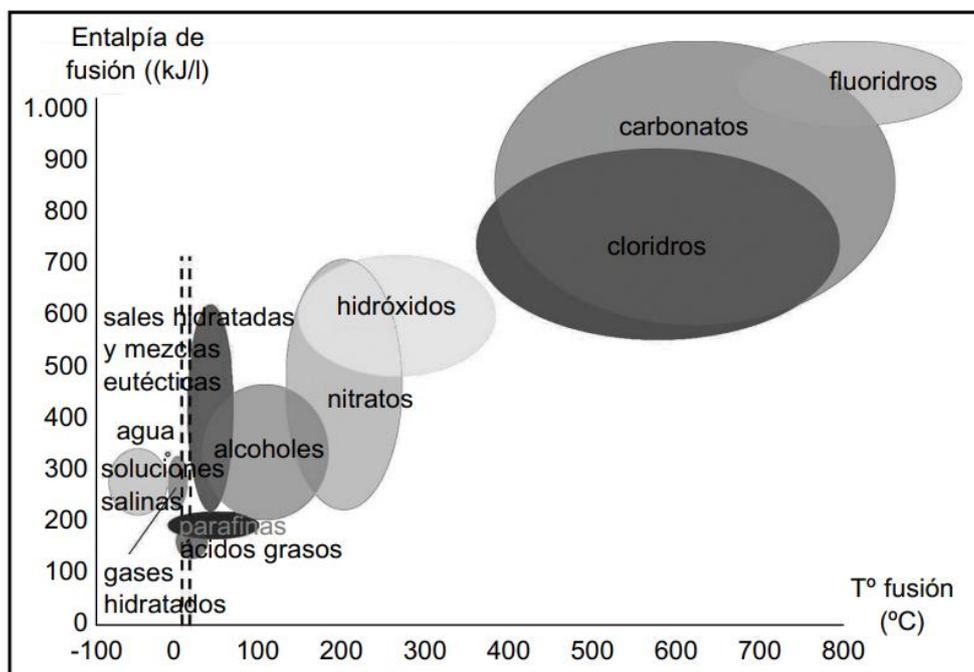


Figura 7. Relación entre la temperatura y calor de fusión para los PCM [14]

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### Materiales orgánicos de cambio de fase

Los materiales orgánicos, pueden ser parafínicos o no parafínicos. Los primeros, presentan las siguientes características:

Seguros, químicamente inertes, confiables, de bajo costo, no corrosivos, estabilidad dimensional durante el proceso de fundición.

Entre las desventajas que puede presentar este tipo de materiales están las siguientes:

Baja conductividad térmica, no son compatibles con contenedores plásticos e inflamables.

Los materiales no parafínicos presentan buena estabilidad térmica, son inflamables, inestables a altas temperaturas, baja conductividad térmica y pueden ser corrosivos en algunos casos.[13]

### Materiales inorgánicos de cambio de fase

Dentro de la categoría de PCM inorgánicos, entran los metales y las sales hidratadas. Presentan ventajas tales como alta capacidad de almacenamiento por unidad de volumen, sin embargo, ninguna sal hidratada solidifica en su punto de congelación presentando subenfriamiento.[14]

- Hidratos de sal

Los hidratos de sal pueden considerarse aleaciones de sales inorgánicas y agua que forman un sólido cristalino típico de fórmula general  $AB \cdot n H_2O$ . La transformación sólido-líquido de los hidratos de sal es en realidad una deshidratación de la hidratación de la sal, aunque este proceso se parece a la fusión o congelando termodinámicamente. Un hidrato de sal generalmente se derrite en un hidrato de sal con menos moles de agua.

- Metálicos

Esta categoría incluye los metales de bajo punto de fusión y los eutécticos metálicos. Estos materiales aún no se han considerado seriamente para la tecnología PCM debido al peso que poseen; sin embargo, en cuanto al volumen es una consideración, son posibles candidatos debido al alto calor de fusión por unidad de volumen. Tienen conductividades térmicas altas, por lo que no se requieren rellenos con penalizaciones de peso adicionales. El uso de elementos metálicos plantea una serie de problemas de ingeniería inusuales. Una diferencia importante entre los metálicos y otros PCM es su alta conductividad térmica.[12]

### Materiales eutécticos de cambio de fase

Los PCM eutécticos, están constituidos por una mezcla de diferentes materiales que presentan una temperatura fija de cambio de fase. Los materiales que

forman el PCM eutéctico tienen un punto de fusión más elevado que el de la mezcla. Se clasifican en tres grupos; inorgánico-inorgánico, orgánico-orgánico y orgánico-inorgánico. Los componentes del PCM eutéctico se funden y congelan simultáneamente evitando la segregación en el cambio de fase.[15]

### **1.4.3. Ventajas e inconvenientes**

Los sistemas de almacenamiento basados en materiales de cambio de fase que experimentan transiciones sólido-líquido son considerados una alternativa eficiente a los sistemas de almacenamiento térmico sensible. Estos sistemas ofrecen ventajas en términos de eficiencia energética, ya que pueden funcionar con pequeñas diferencias de temperatura entre el proceso de carga y descarga. Además, los almacenamientos PCM tienen altas densidades de energía en comparación con los sistemas de almacenamiento de calor sensible.

Los materiales más comunes utilizados en esta categoría para el almacenamiento de energía térmica de alta temperatura son las sales fundidas, que han sido utilizados en aplicaciones de energía solar térmica. Sin embargo, estos materiales tienen desventajas, como su alto punto de congelación (alrededor de 100 °C), lo que puede provocar pérdidas de energía. Además, durante el proceso de descarga, se recupera solo una fracción del calor almacenado debido a las irreversibilidades en el dispositivo de intercambio de calor.[9]

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Materiales

Como parte de la investigación se ensayaron muestras de sales fundidas para su uso como PCM, los compuestos químicos empleados fueron sales de base de nitrato como es el caso del nitrato de sodio ( $\text{NaNO}_3$ ) y el nitrato de potasio ( $\text{KNO}_3$ ) y en base de nitrito; nitrito de sodio ( $\text{NaNO}_2$ ).

En la Tabla 1 se especifica el origen y referencia de las sustancias que se emplearon en el estudio.

Tabla 1. Relación de sustancias para la preparación de los PCM

Sustancia	Fórmula	Proveedor	CAS	% Pureza
Nitrato de sodio	$\text{NaNO}_3$	PANREA S.L.U.	7631-99-4	99
Nitrato de potasio	$\text{KNO}_3$	PANREAC S.L.U.	7757-79-1	99
Nitrito de sodio	$\text{NaNO}_2$	PANREAC S.L.U.	7632-00-0	98

#### 2.1.1. Nitrato de sodio

El nitrato de sodio es una sal blanca, de red cristalina centrada. En la Tabla 2 se detalla toda la información referente a algunas de sus propiedades físicas, termodinámicas y datos de seguridad.[16]

Tabla 2. Datos del nitrato de sodio

<b>Densidad</b>	2.260 kg/m <sup>3</sup>
<b>Masa Molar</b>	84,99 g/mol
<b>Temperatura de fusión</b>	308 °C
<b>Temperatura de descomposición</b>	380 °C
<b>Entalpía*</b>	255 kJ/kg
<b>Aplicaciones</b>	Fertilizante, se utiliza como explosivo y nutrientes en animales. En el tratamiento de aguas y conservación de alimentos, se utiliza el salitre por su propiedad oxidante.
<b>Peligrosidad**</b>	Puede agravar un incendio; comburente. Provoca irritación ocular grave.

\* Datos extraídos de la bibliografía [17]

\*\* Datos extraídos de la bibliografía [18]

### 2.1.2. Nitrato de potasio

El nitrato de potasio es un sólido cristalino incoloro o de color blanco, en la Tabla 2 se detallan las características, propiedades termodinámicas y datos de peligrosidad.[16]

Tabla 3. Datos del nitrato de potasio

<b>Densidad</b>	2.109 kg/m <sup>3</sup>
<b>Masa Molar</b>	101,11 g/mol
<b>Temperatura de fusión</b>	332 °C
<b>Temperatura de descomposición</b>	400 °C
<b>Entalpía*</b>	334 kJ/kg
<b>Aplicaciones**</b>	Se usa en la fabricación de explosivos, cerillas, fertilizantes, pirotécnicos, vidrios y combustible de cohetes.
<b>Peligrosidad***</b>	Puede agravar un incendio; comburente. Peligro de fuego con otros materiales.

\* Datos extraídos de la bibliografía [17]

\*\* Datos extraídos de la bibliografía [19]

\*\*\* Datos extraídos de la bibliografía [20]

### 2.1.3. Nitrito de sodio

El nitrito de sodio es una sal cristalina de color amarillento que no presenta olor. Sus propiedades y datos de peligrosidad se relacionan en la Tabla 4.[16]

Tabla 4. Datos del nitrito de sodio

<b>Densidad</b>	2.168 kg/m <sup>3</sup>
<b>Masa Molar</b>	69,00 g/mol
<b>Temperatura de fusión</b>	271 °C
<b>Temperatura de descomposición</b>	320 °C
<b>Entalpía*</b>	200 kJ/kg
<b>Aplicaciones**</b>	Fijador de color y conservante en carnes y pescados. Fabricación de colorantes e inhibidor de corrosión; en metal revestimientos para fosfatar y desestañar.
<b>Peligrosidad***</b>	Puede agravar un incendio; comburente. Tóxico en caso de ingestión. Provoca irritación ocular grave. Muy tóxico para los organismos acuáticos.

\* Datos extraídos de la bibliografía [21]

\*\* Datos extraídos de la bibliografía [22]

\*\*\* Datos extraídos de la bibliografía [23]

#### 2.1.4. Mezcla binaria de nitrato de sodio y nitrato de potasio

La mezcla de nitrato de sodio y nitrato de potasio, conocida también como sal solar o sal binaria, ha ganado reconocimiento en el campo de la energía renovable como un medio efectivo de almacenamiento de energía térmica. Esta combinación de sales inorgánicas tiene la capacidad de absorber y liberar energía térmica de manera eficiente, lo que la convierte en un componente clave en los sistemas de almacenamiento térmico concentrados.

El uso de la mezcla de nitrato de sodio y nitrato de potasio como sal solar presenta ventajas significativas. Estas sales son abundantes, económicas y no tóxicas, lo que las convierte en una opción segura y sostenible. Además, la estabilidad química de esta mezcla permite una larga vida útil y ciclos de carga y descarga repetidos sin degradación significativa.

Algunas de las características que destacan a esta mezcla de sales compuestas por 60 %  $\text{NaNO}_3$  + 40 %  $\text{KNO}_3$  son las descritas en la Tabla 5; además de una baja reactividad química y baja presión de vapor (menor a 0,01 Pa), unidos a un precio asequible.[24][25]

Tabla 5. Datos de 60 %  $\text{NaNO}_3$  + 40 %  $\text{KNO}_3$

<b>Densidad</b>	1.880 kg/m <sup>3</sup>
<b>Calor específico</b>	1.500 J/kg·K
<b>Entalpía*</b>	117 kJ/kg
<b>Temperatura de cambio de fase**</b>	222 °C
<b>Temperatura de descomposición**</b>	600 °C
<b>Conductividad térmica**</b>	0,52 W/m·K

\* Datos extraídos de la bibliografía[26]

\*\* Datos extraídos de la bibliografía [25]

La interpretación de la Figura 8 es importante para comprender las propiedades físicas y químicas de esta mezcla de sales, como la temperatura de fusión, la solubilidad y las transiciones de fase. También puede proporcionar información sobre la cristalización, la solidificación y la estabilidad de estas sales en diferentes condiciones.

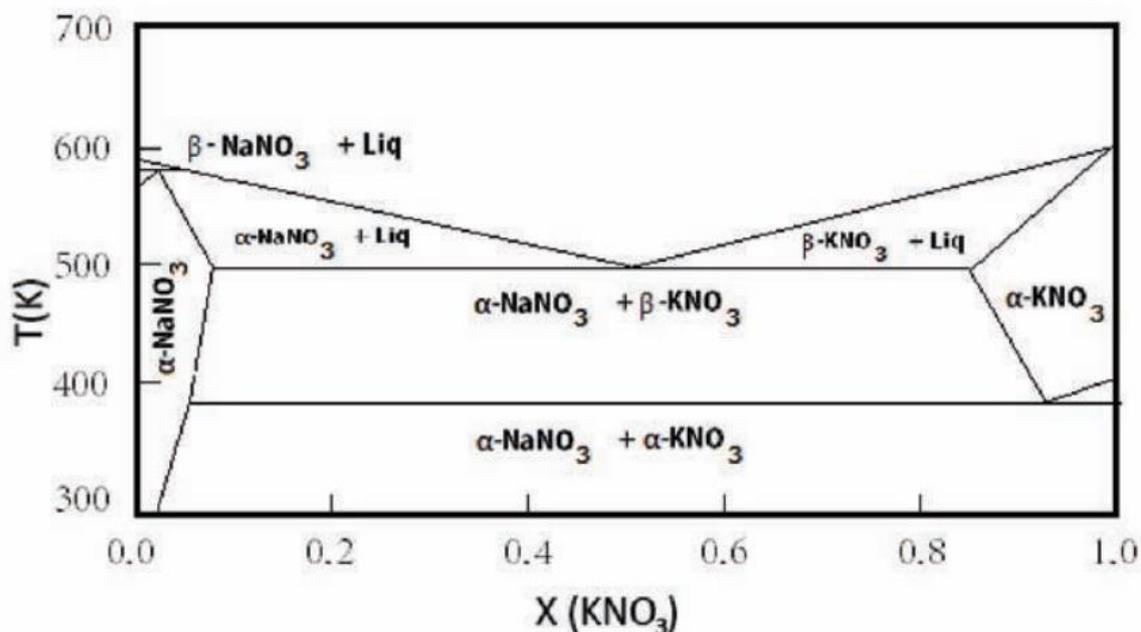


Figura 8. Diagrama de fase del nitrato de sodio y nitrato de potasio [25]

El sistema de NaNO<sub>3</sub>- KNO<sub>3</sub> presenta miscibilidad tanto en la fase líquida como en la fase sólida.[27]

### 2.1.5. Mezcla ternaria de nitrato de sodio, nitrato de potasio y nitrito de sodio

Luego de diferentes estudios e investigaciones para mejorar las características de la sal solar detalladas en el acápite anterior, en la década de 1980 se implementó el uso de la mezcla ternaria 40 % NaNO<sub>2</sub>+ 7 % NaNO<sub>3</sub>+ 53 % KNO<sub>3</sub>, denominada comercialmente como HITEC, para el almacenamiento de energía. Sus características y propiedades termodinámicas son descritas a continuación en la Tabla 6.[24][28]

Tabla 6. Datos de 40 % NaNO<sub>2</sub> + 7 % NaNO<sub>3</sub> + 53 % KNO<sub>3</sub>

<b>Densidad*</b> (ver anexo 3)	1.800 kg/m <sup>3</sup>
<b>Calor específico</b>	1.560 J/Kg·K
<b>Entalpía**</b>	80 kJ/kg
<b>Temperatura de cambio de fase</b>	140 °C
<b>Conductividad térmica</b>	0,52 W/m·K

\* Datos extraídos de la bibliografía [29]

\*\* Datos extraídos de la bibliografía [30]

## METODOLOGÍA

Como principal inconveniente de esta mezcla se tiene es que se oxida en presencia de  $O_2$ , por lo que es necesario mantenerlo en un ambiente inerte por encima de los  $350\text{ }^\circ\text{C}$ .

Con respecto al diagrama de fase de esta mezcla ternaria se representa en la Figura 9 obtenido en un estudio de modelación matemática y simulación, debido a que no se reflejan en literaturas propiedades termodinámicas suficientes de esta mezcla.[31]

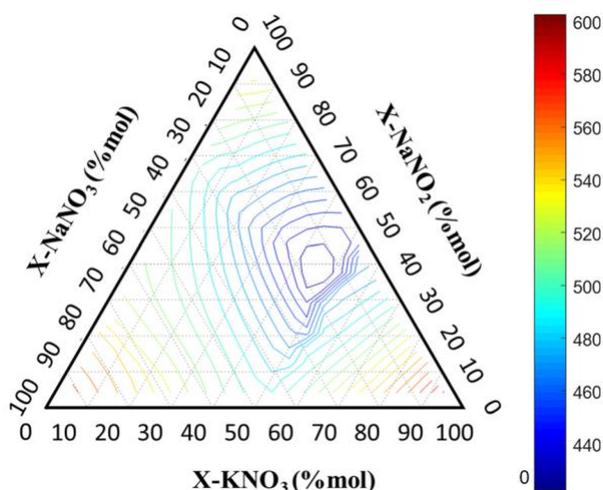


Figura 9. Diagrama de fase de  $NaNO_3+NaNO_2+KNO_3$  [31]

### 2.2. Método de análisis

Análisis térmico es la medida de una propiedad física de una sustancia cuando es sometida a un programa de calentamiento controlado. Dependiendo de la propiedad que se mida, se definen varias técnicas, las más comunes de las cuales citamos a continuación en la Figura 10.[32]

Nombre	Abreviatura	Propiedad medida
Análisis térmico diferencial	DTA	Diferencia de temperatura
Calorimetría diferencial de barrido	DSC	Flujo de calor
Termogravimetría	TG	Masa
Análisis Termoóptico	TOA	Aspecto físico
Análisis Termomecánico	TMA	Deformación
Análisis Dinamomecánico	DMA	Viscoelasticidad

Figura 10. Tipos de análisis térmicos [32]

El termograma es una representación gráfica de las curvas térmicas características observadas durante el análisis térmico. Estas curvas indican los cambios de temperatura en función del tiempo o la energía absorbida o liberada por la muestra a medida que se somete al ciclo de temperatura. En la Figura 11 se representa una curva característica obtenida de un sistema DSC.[24]

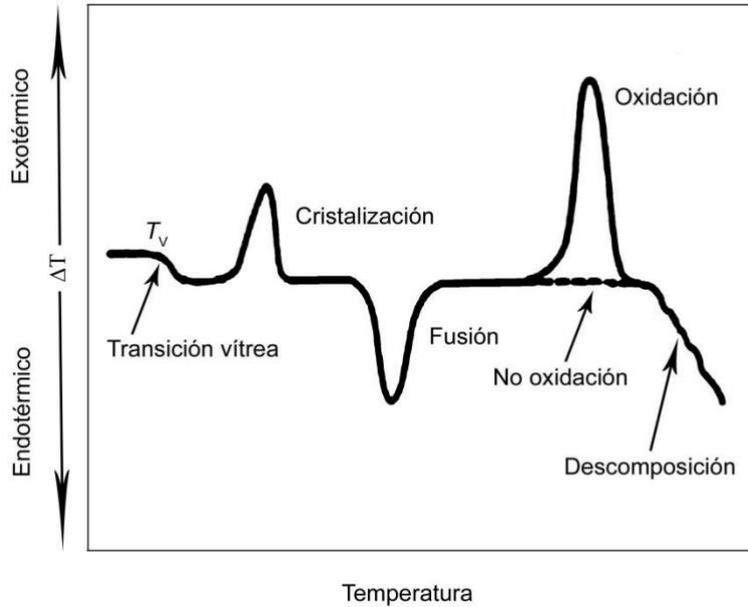


Figura 11. Curva característica de un DSC [24]

La calorimetría diferencial de barrido es una técnica analítica muy utilizada en la caracterización de materiales. Esta técnica se basa en la medición de las diferencias de calor entre una muestra y una referencia mientras se someten a un programa de control de calentamiento o enfriamiento. El análisis de DSC proporciona información valiosa sobre las transiciones de fase, las reacciones químicas, las propiedades térmicas y la estabilidad de los materiales.[33]

A través de esta técnica se determinarán las entalpías de cambio de fase, junto con las temperaturas de transición para cada muestra preparada.

### 2.2.1. Preparación de la muestra

Para la preparación de la mezcla 60 %  $\text{NaNO}_3$  + 40 %  $\text{KNO}_3$  para la realización del DSC implica los siguientes:

1. Cálculo de la cantidad necesaria determinando la cantidad de cada componente ( $\text{NaNO}_3$  y  $\text{KNO}_3$ ) necesarios para obtener la proporción deseada para obtener una muestra de 100 g de PCM. Es decir, 60 g de nitrato de sodio y 40 g de nitrato de potasio.
2. El pesado de los componentes se realizó en una balanza analítica para medir con precisión la masa de cada componente. Se pesa 60 gramos de  $\text{NaNO}_3$  y 40 gramos de  $\text{KNO}_3$  por separado. Comprobando que la balanza estuviera previamente encendida y calibrada antes de realizar el pesaje.
3. La mezcla de los componentes se realiza colocando cada una de las sustancias previamente pesadas en un recipiente limpio y seco. Se mezcla cuidadosamente agitando para asegurarte de obtener una distribución uniforme de los materiales.

## METODOLOGÍA

4. Para asegurar la homogeneización de la mezcla se realizó una trituration suave para obtener una distribución más uniforme de las partículas con la ayuda de un mortero.
5. Una vez que la mezcla estaba preparada, fue acumulada en un recipiente hermético y etiquetado correctamente para evitar la humedad y la contaminación. Almacenándolo en un lugar fresco y seco hasta su uso.

Para la preparación de la mezcla de 40 %  $\text{NaNO}_2$  + 7 %  $\text{NaNO}_3$  + 53 %  $\text{KNO}_3$ , fue realizado el mismo procedimiento, pero en este caso las cantidades preparadas fueron 40 gramos de nitrito de sodio, 7 gramos de nitrato de sodio y 53 gramos de nitrato de potasio.

En la Figura 12 se muestra alguno de los pasos que fueron realizados en el proceso de preparación de las muestras.



Figura 12. Preparación de las muestras

### 2.2.2. Relación de equipos

En la Tabla 7 se relacionan los equipos e instrumentos que fueron utilizados para la realización del ensayo y la manipulación de la muestra.[34]

Tabla 7. Relación de equipos e instrumentos

No.	Nombre	Imagen	Uso y características
1	DSC		El DSC consiste en una celda de medición que contiene tanto la muestra como una referencia, y permite medir las diferencias de calor entre ellos mientras se someten a un programa controlado de calentamiento o enfriamiento.
2	Crisoles y tapas		Los crisoles son recipientes en los que se colocan la muestra y la referencia durante el experimento. Los crisoles deben ser compatibles con la temperatura y el tipo de muestra que se va a analizar. Además, se requieren tapas adecuadas para sellar los crisoles y evitar la pérdida o ganancia de masa durante el experimento.
3	Prensa de sellado de crisol		Este dispositivo es específico para el equipo de DSC utilizado y está diseñado para asegurar un cierre hermético entre el crisol y la tapa.
4	Balanza		Balanza analítica de alta precisión para medir con exactitud la masa de la muestra y la referencia utilizada en el ensayo de DSC. Esto es importante para realizar cálculos precisos y obtener resultados confiables.
5	Pinzas		Son pinzas especiales diseñadas para sujetar los crisoles de manera segura. Permiten sujetar firmemente los crisoles sin causar deformaciones o pérdida de masa.

### 2.2.3. Calorimetría diferencial de barrido

Para efectuar el estudio es necesario introducir la mezcla de sales anteriormente preparadas y debidamente pesadas en los crisoles. Preparando como un primer paso un crisol de aluminio vacío que sirva como blanco y otro como referencia para proceder con el ensayo. Luego, con una espátula se introduce el PCM en los crisoles y como es debido, con ayuda de las pinzas se manipulan los crisoles para trasladarlos a la balanza de alta precisión como se muestra en Figura 13. Se anota su peso y posteriormente se sella para que quede herméticamente cerrado.

Una vez preparada las muestras de forma triplicada como se aprecia en la Tabla 8 se trasladan en el equipo DSC para efectuar el estudio previamente programado, realizando ciclos de calentamiento y enfriamiento como se evalúa en Figura 14 y es detallado en la Tabla 9. Con el objetivo de examinar el comportamiento de parámetros termofílicos y pérdida de peso de ambas mezclas luego de varios períodos de calentamiento fueron programado 5 ciclos como se muestra en la Figura 15.



*Figura 13. Preparación de la muestra en los crisoles*

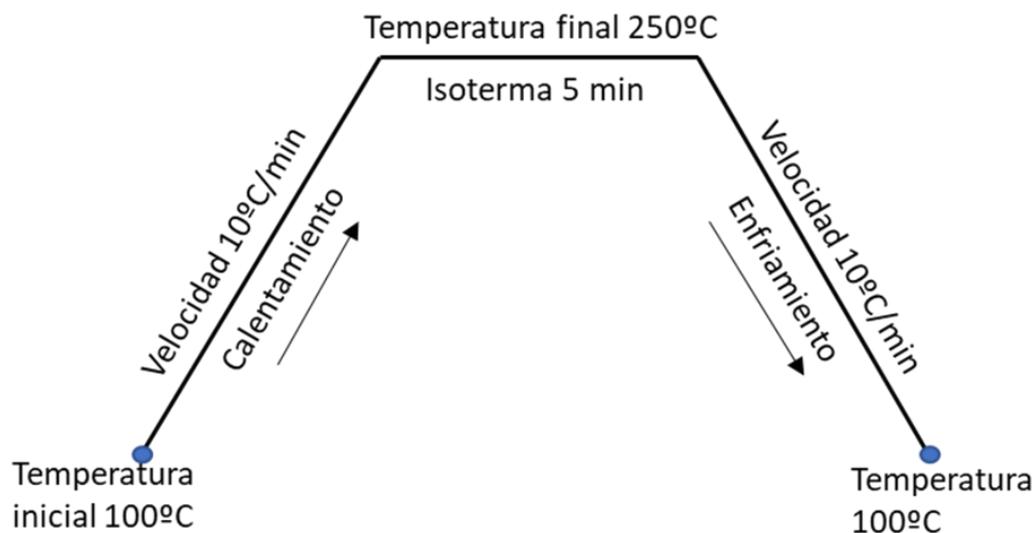


Figura 14. Rampa de temperatura programada para el ensayo

Tabla 8. Peso de muestras de PCM

Muestra	Sustancia	Composición	Peso [mg]
1	NaNO <sub>3</sub>	0,6	64,645
	KNO <sub>3</sub>	0,4	
2	NaNO <sub>3</sub>	0,6	66,681
	KNO <sub>3</sub>	0,4	
3	NaNO <sub>3</sub>	0,6	65,683
	KNO <sub>3</sub>	0,4	
4	NaNO <sub>3</sub>	0,07	63,339
	KNO <sub>3</sub>	0,40	
	NaNO <sub>2</sub>	0,53	
5	NaNO <sub>3</sub>	0,07	66,464
	KNO <sub>3</sub>	0,40	
	NaNO <sub>2</sub>	0,53	
6	KNO <sub>3</sub>	0,40	65,564
	NaNO <sub>2</sub>	0,53	

Tabla 9. Programación de la técnica

Parámetro	Valor
Gas de barrido	N <sub>2</sub> (50 ml/min)
Portamuestras	Aluminio hermético, Capacidad 100 µl
Rampas de temperatura	100 °C y 250 °C
Velocidad de calentamiento/enfriamiento	10 °C/min
Duración de las isotermas	5 min
Número de ciclos	5

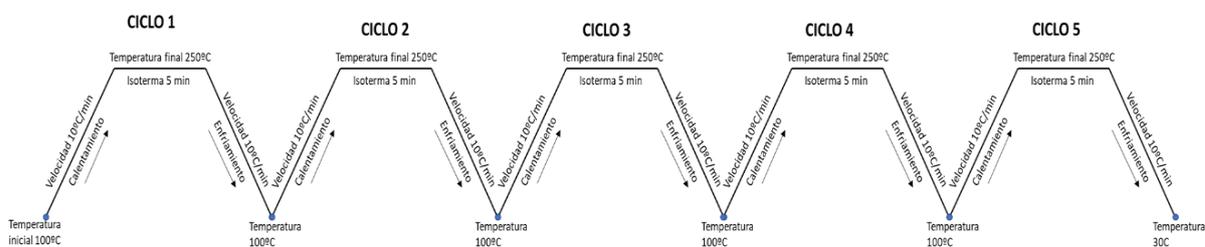


Figura 15. Secuencia de ciclos

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente capítulo se propone evaluar el desempeño y la viabilidad de la combinación de una mezcla binaria de nitrato de sodio, nitrato de potasio y una mezcla de  $\text{NaNO}_2$ ,  $\text{NaNO}_3$  y  $\text{KNO}_3$  como materiales de almacenamiento de energía térmica en sistemas de alta temperatura. Los objetivos específicos que se abordarán en este incluyen:

1. Presentar de los resultados del DSC de las mezclas analizadas.
2. Resumir los principales valores obtenidos en la mezcla.
3. Comparar los parámetros térmicos con los presentados en la búsqueda bibliográfica.
4. Analizar la influencia de la adición de nitrito a la mezcla binaria.
5. Comparar los resultados de los análisis de ambas mezclas de PCM.

#### 3.1. Presentación de los resultados

Mediante el software *STAR<sup>e</sup> Excellence Mettler Toledo* fueron extraídos todos los resultados ya que este posee una interfaz de usuario que posibilita gran comodidad y versatilidad de análisis. Alguna de sus características son las siguientes:

- Posibilidades de evaluación ilimitadas: elevada flexibilidad.
- Automatización confiable: alto rendimiento de muestras con evaluación automática espectacular mejora la eficiencia.
- Solución única de base de datos integrada: garantiza el más alto nivel de seguridad de datos.[35]

##### 3.1.1. Mezcla de 60 % $\text{NaNO}_3$ + 40 % $\text{KNO}_3$

Tal como se ha señalado en el capítulo 2 fueron realizados tres ensayos de la muestra de esta sal mediante el DSC. La Tabla 10 relaciona los resultados obtenidos de este análisis.

Tabla 10. Resumen de resultados de ensayos de 60 %  $\text{NaNO}_3$  + 40 %  $\text{KNO}_3$

Muestra	Figura	Calentamiento		Enfriamiento	
		H [J/g]	T [°C]	H [J/g]	T [°C]
<b>M1</b>	Figura 16	117,60	229,11	92,79	211, 75
<b>M2</b>	Figura 17	118,59	230,77	94,41	212,18
<b>M3</b>	Figura 18	117,50	229,54	83,49	212,89

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

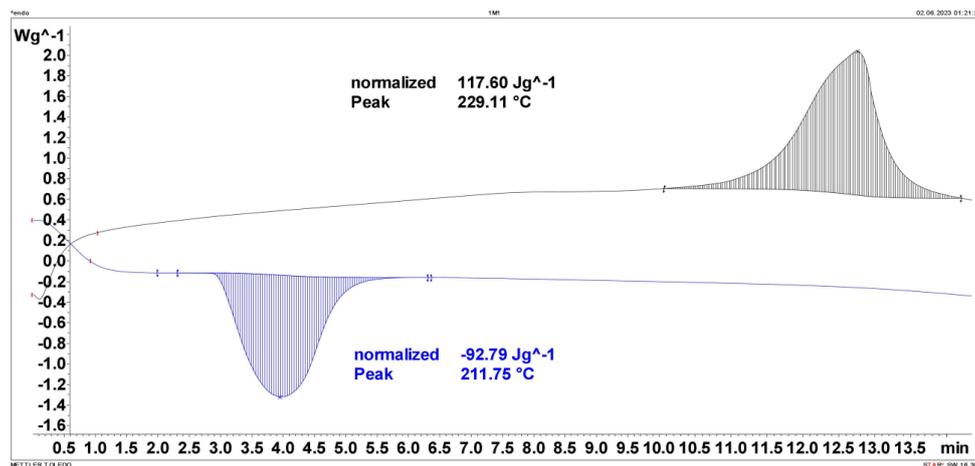


Figura 16. DSC calentamiento/enfriamiento de un ciclo de la mezcla 1 (M1)

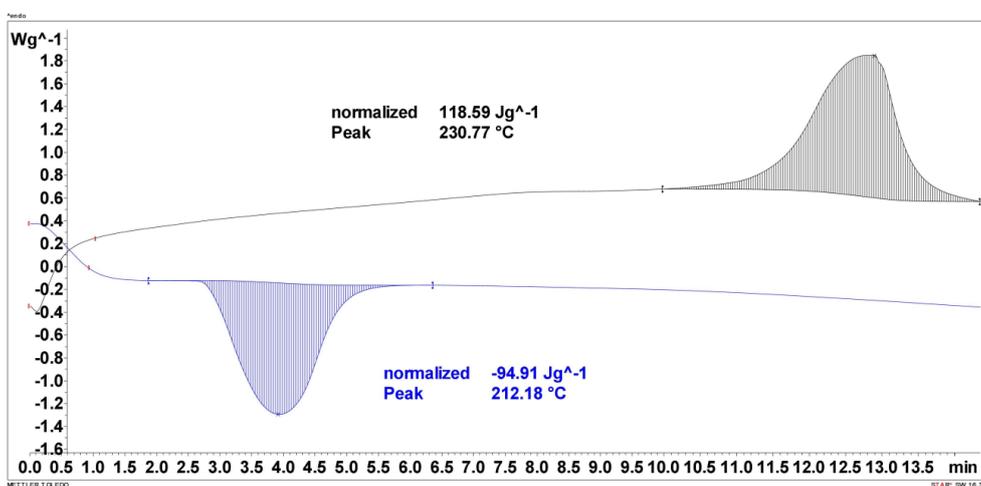


Figura 17. DSC calentamiento/enfriamiento de un ciclo de la mezcla 2 (M2)

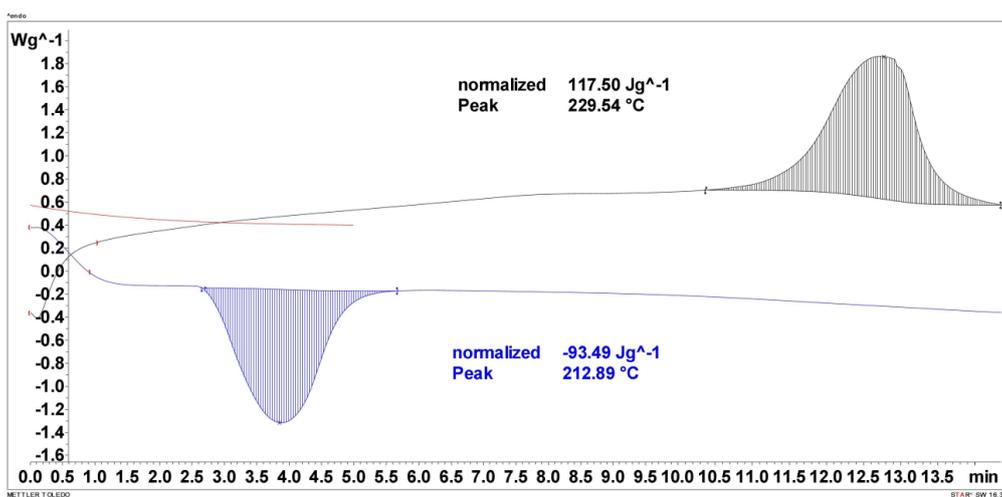


Figura 18. DSC calentamiento/enfriamiento de un ciclo de la mezcla 3 (M3)

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en cuanto a entalpías y temperaturas de transición para las tres mezclas preparadas fueron prácticamente los mismos; con lo cual, se ha tomado como valores para la realización de los demás análisis el promedio de estos. En la Tabla 11 se muestra los resultados promedios y una comparación con los descritos en las bibliografías consultadas.

Tabla 11. Comparación de resultados bibliográficos 60 %  $\text{NaNO}_3$  + 40 %  $\text{KNO}_3$

Parámetro	Resultado	Referencia	Error Absoluto
Entalpía fusión [J/g]	117,89	117,00	0,89
Temperatura fusión [°C]	229,80	222,00	7,80

En la Figura 19 se muestra la curva de enfriamiento y calentamiento luego de cada uno de los ciclos a los que la muestra fue expuesta.

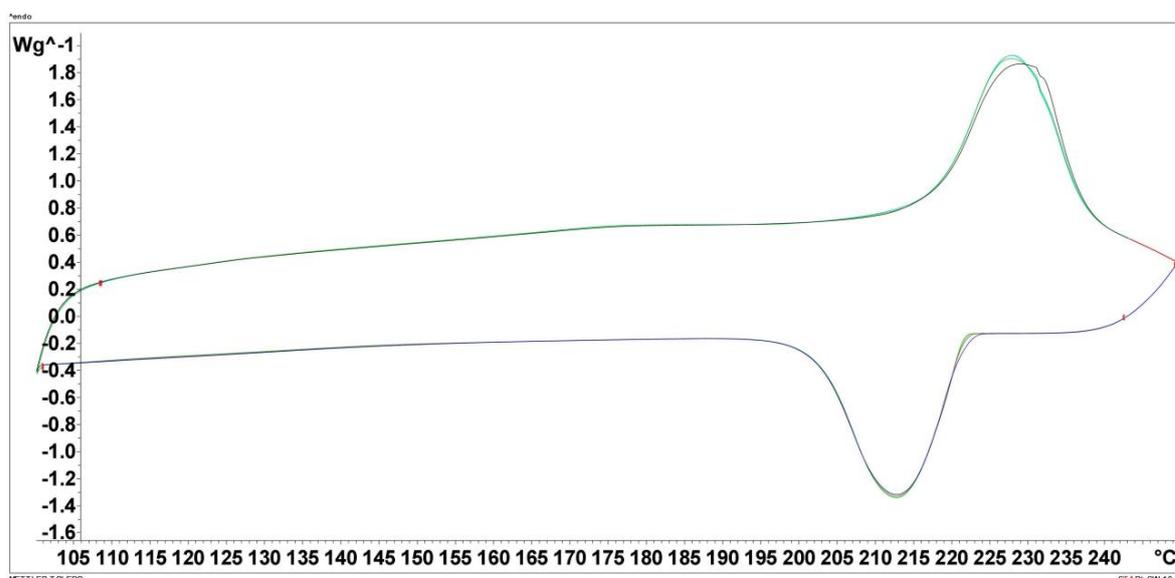


Figura 19. Muestra 60 %  $\text{NaNO}_3$  + 40 %  $\text{KNO}_3$  luego 5 ciclos

### 3.1.2. Mezcla de 40 % $\text{NaNO}_2$ + 7 % $\text{NaNO}_3$ + 53 % $\text{KNO}_3$

Al igual que en la muestra de sales binarias fueron analizadas las correspondientes a la mezcla de 40 %  $\text{NaNO}_2$  + 7 %  $\text{NaNO}_3$  + 53 %  $\text{KNO}_3$  donde se relacionan los resultados obtenidos en la Tabla 12.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 12. Resumen de los resultados de 40 %  $\text{NaNO}_2$  + 7 %  $\text{NaNO}_3$  + 53 %  $\text{KNO}_3$

Muestra	Figura	Calentamiento		Enfriamiento	
		H [J/g]	T [°C]	H [J/g]	T [°C]
M4	Figura 20	71,27	146,83	51,72	135,98
M5	Figura 21	72,75	147,40	52,07	137,14
M6	Figura 22	75,46	147,27	69,93	135,94

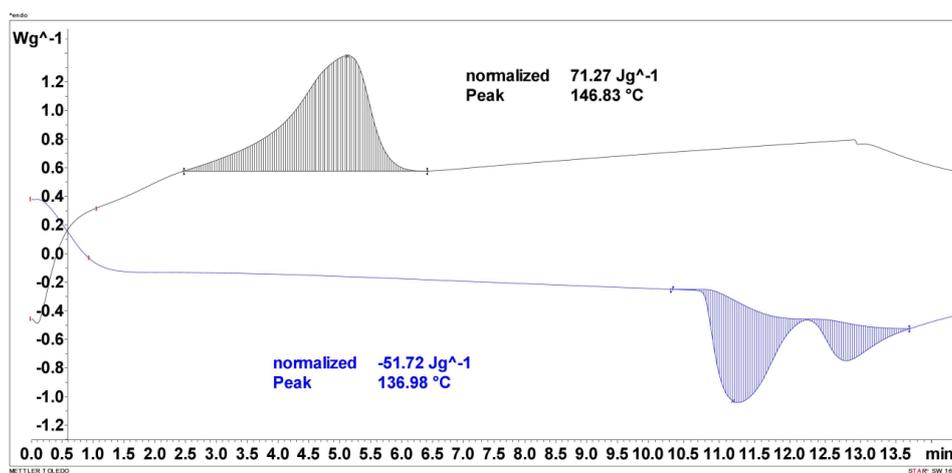


Figura 20. DSC calentamiento/enfriamiento de un ciclo de la mezcla 4 (M4)

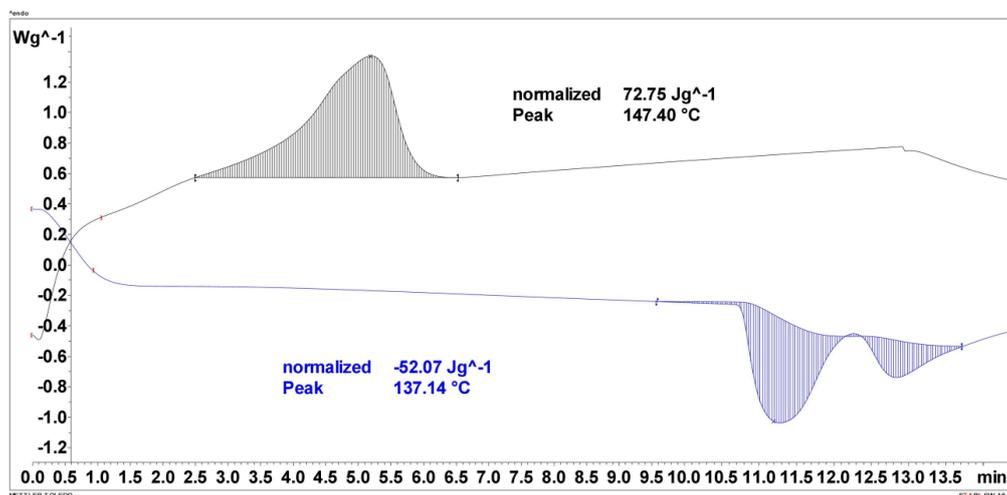


Figura 21. DSC calentamiento/enfriamiento de un ciclo de la mezcla 5 (M5)

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

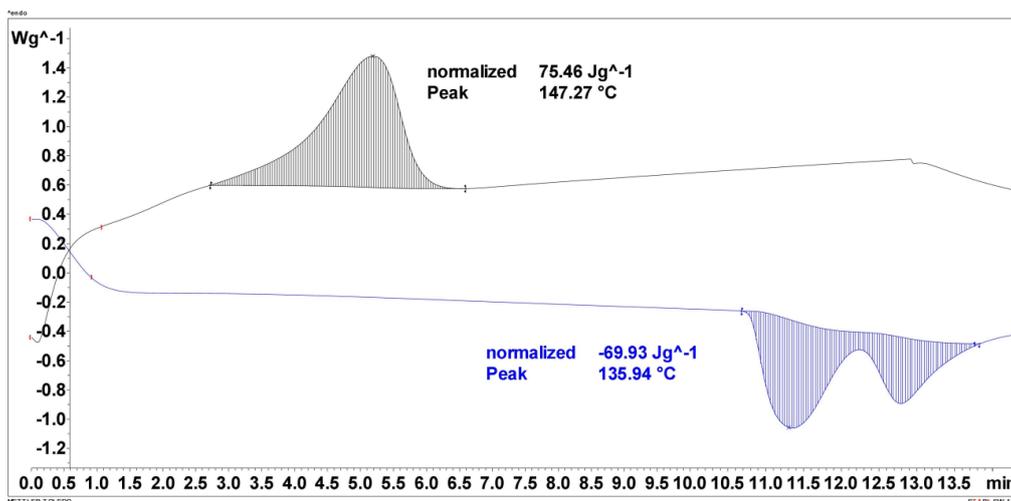


Figura 22. DSC calentamiento/enfriamiento de un ciclo de la mezcla 6 (M6)

En la Tabla 12 se aprecia que existe muy poca variación entre los resultados obtenidos en las tres muestras ensayadas es por tanto, que se utilizará el promedio de estos valores en la Tabla 13 para hacer una comparación con la bibliografía consultada.

Tabla 13. Comparación de resultados bibliográficos 40 %  $\text{NaNO}_2$  + 7 %  $\text{NaNO}_3$  + 53 %  $\text{KNO}_3$

	Resultado	Referencia	Error Absoluto
Entalpía fusión [J/g]	73,16	80	6,84
Temperatura fusión [°C]	147,16	140	7,16

En la Figura 23 se muestra la representación gráfica de la mezcla luego de haber realizado los cinco ciclos que fueron descritos en el capítulo anterior.

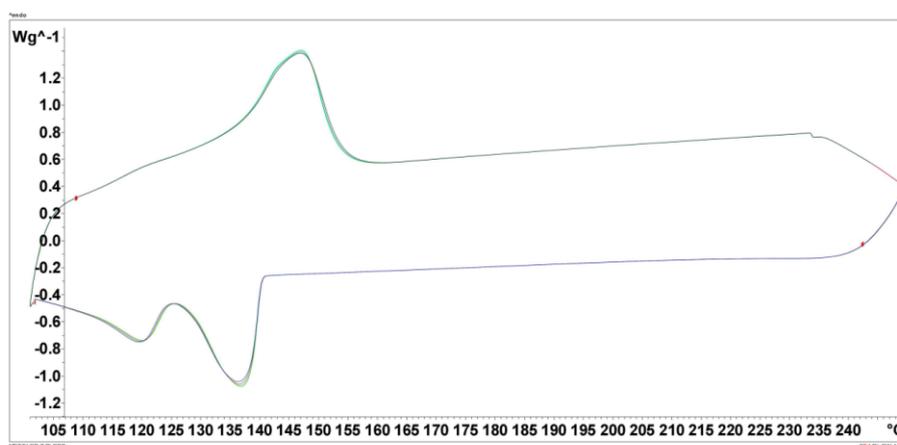


Figura 23. Muestra 40 %  $\text{NaNO}_2$  + 7 %  $\text{NaNO}_3$  + 53 %  $\text{KNO}_3$  luego 5 ciclos

### 3.2. Discusión de los resultados

#### 3.2.1. Resultados de 60 % NaNO<sub>3</sub> + 40 % KNO<sub>3</sub>

Luego de la realización del DCS en la mezcla de sales 60 % NaNO<sub>3</sub> + 40 % KNO<sub>3</sub> se puede observar en la curva de calentamiento la transición de fase de estado sólido a líquido con el pico endotérmico que representa la fusión del PCM, esta transición ocurrió a una temperatura de 229,80 °C que es menor que la de sus componentes puros por separado. Con respecto a la entalpía de fusión que representa el calor absorbido por el material se determinó el área debajo de la curva a través de software, obteniendo un resultado confiable con un error menor de 1 J/g en relación con la bibliografía consultada, siendo este de 117,89 J/g.

La curva de enfriamiento muestra el proceso inverso, se observa una transición de fase de líquido a sólido correspondiente a la solidificación de la sal a una temperatura de 212,27 °C. Dichas transiciones se producen a una temperatura algo menor que las detectadas en el proceso de calentamiento, debido al fenómeno de sobreenfriamiento característico de estas sales.

Luego de realizar cinco ciclos de calentamiento y enfriamiento de esta mezcla de sales se observa que las curvas presentan igual comportamiento. Lo que corrobora una buena estabilidad térmica, importante para su uso como material de cambio de fase ya que al aplicarse varios ciclos no ocurre ninguna degradación en ninguna de sus fases.

#### 3.2.2. Resultados de 40 % NaNO<sub>2</sub> + 7 % NaNO<sub>3</sub> + 53 % KNO<sub>3</sub>

En la curva de calentamiento del DSC realizado a esta mezcla ternaria se puede observar como la temperatura de transición de fase sólido a líquido es menor que la de los componentes puros por separado siendo esta de 147,17 °C situado en el rango de temperatura de las bibliografías consultadas. En este estudio no se pudo observar el pico característico que corresponde a la evaporación del agua inmersos en la mezcla producto a que la lectura de datos comenzó a partir de los 100 °C. La entalpía de fusión necesaria para la mezcla ternaria 40 % NaNO<sub>2</sub> + 7 % NaNO<sub>3</sub> + 53 % KNO<sub>3</sub> es de 73,16 J/g y fue determinada a partir del área debajo de la curva.

La curva de enfriamiento indica que la solidificación del material ocurre en el mismo rango de temperaturas, solapándose en este caso con la condensación del agua presente en la muestra, la cual no ha sido liberada al realizarse el ensayo en crisoles herméticos.

Al igual que la mezcla binaria posterior a realizar los ciclos descritos en el capítulo anterior se observa una ciclicidad de las trayectorias de la curva tanto de enfriamiento como calentamiento, demostrando que no existe ninguna segregación en ninguna de sus fases luego de estar sometidas a cinco ciclos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este comportamiento confirma que el uso de esta mezcla de sal ternaria es aceptable en este sentido para su uso como PCM.

### 3.2.3. Comparación de los resultados

Como se evidencia en diversos estudios bibliográfico con la adición de componentes como son el caso de nanopartículas, carbonatos y nitritos a la mezcla de sal de nitrato de sodio y nitrato de potasio alguna de sus características y propiedades térmicas varías, esto se debe a que las sales fundidas ternarias o cuaternarias de sales de nitratos tienen menores puntos de fusión que las mezclas binarias. En el caso de la adición de nitritos se evidencia un desplazamiento del punto de fusión disminuyendo esta temperatura de transición de fase de la mezcla binaria con respecto a la mezcla ternaria. En la Tabla 14 se comparan los resultados obtenidos para ambas muestras analizadas.

Tabla 14. Comparación de los resultados entre ambas muestras

Parámetro	Entalpía fusión [J/g]	Temperatura fusión [°C]
60 % NaNO <sub>3</sub> + 40 % KNO <sub>3</sub>	117,89	229,80
40 % NaNO <sub>2</sub> + 7 % NaNO <sub>3</sub> + 53 % KNO <sub>3</sub>	73,16	147,16
Desplazamiento [%]	37,94	35,96

Si se comparan la trayectoria de las curvas de enfriamiento y calentamiento (Figura 19, Figura 23) para ambas mezclas de sales se evidencia que con la adición de nitrito se mejora el fenómeno de sobreenfriamiento, logrando que la fusión y solidificación estén en el mismo rango de temperatura para la mezcla 40 % NaNO<sub>2</sub> + 7 % NaNO<sub>3</sub> + 53 % KNO<sub>3</sub> a diferencia de lo que ocurre con la mezcla 60 % NaNO<sub>3</sub> + 40 % KNO<sub>3</sub>.

A pesar de que la sal ternaria tiene menor entalpía de cambio de fase, esta se puede utilizar para aquellas aplicaciones de almacenamiento térmico en donde el fluido calor portador (fuente de calor) no sobrepase los 300 °C; mientras que la mezcla de sal binaria por sus propiedades es conveniente utilizarlas para aplicaciones de mayor temperatura, además que como posee una entalpía superior el depósito de la batería ocuparía mayor energía por unidad de volumen.

## 4. CONCLUSIONES

Debido al incremento de la demanda de energía a nivel mundial y las problemáticas y consecuencias negativas que traen es necesario desarrollar tecnologías más sostenibles para el medio ambiente. Una de las alternativas para erradicar el problema de las intermitencias de las energías renovables sería el uso de dispositivos que permitan almacenar esa energía excedente en los momentos de punta para luego ser utilizadas cuando no se disponga de ese recurso. Durante el desarrollo de este trabajo se realizó una revisión de la literatura donde fue planteada los distintos sistemas de almacenamiento existentes, reafirmando que hoy en día son un elemento clave en la cadena de suministros moderna para lograr la estabilidad de la red, aumentar la penetración de los recursos de energía renovable, mejorar la eficiencia de los sistemas de energía, conservar los recursos de energía fósil y reducir el impacto ambiental de la generación de energía. Aunque existen muchas tecnologías de almacenamiento no todas poseen un nivel de madurez propicio para incorporarlas a la industria por lo que el almacenamiento de energía ha atraído recientemente la atención de gobiernos, partes interesadas, investigadores e inversores, ya que puede utilizarse para mejorar el rendimiento de la cadena de suministro de energía.

Fue desarrollado el tema del almacenamiento de energías térmica concluyendo que no existe un sistema termodinámicamente eficiente al 100 %. Las pérdidas de energía en la mayoría de los sistemas se producen en forma de calor, que normalmente se pierde en el medio ambiente. Estos calores residuales son recursos esenciales que, si se capturan y almacenan, pueden servir como recursos energéticos útiles para otros procesos. Además, fueron mencionados los distintos tipos de forma de almacenamiento de calor, especificando sus características, aplicaciones y materiales que se emplean en los mismos. Se realizó una revisión del uso de materiales de cambio de fase y la gran cantidad de energía que se puede almacenar en ellos en dependencia del calor latente que posean en la transición de fase de cada uno dependiendo de la aplicación.

Se caracterizaron las propiedades físicas y térmicas de la mezcla de sales de nitrato de sodio y nitrato de potasio, además de la mezcla ternaria de nitrato de sodio, nitrato de potasio y nitrito de sodio a través de DSC donde fue descrita la metodología de preparación de las mezclas de PCM, así como la descripción del ensayo realizado. Se analizaron los resultados obtenidos como es el caso de temperatura de cambio de fase y entalpía de fusión de las muestras preparadas y fueron comparadas con los resultados de distintas investigaciones recogidas en las bibliografías consultadas donde se lograron resultados favorables con un error absoluto sobre los 0,78 J/g en el caso de la entalpía de la mezcla de nitrato de sodio, nitrato de potasio y errores por debajo de un 10 J/g para el resto de los parámetros estudiados. Además, luego de la realización de cinco ciclos de calentamiento y enfriamiento en las muestras ensayadas se evidencia que existe

## CONCLUSIONES

igual comportamiento en la distribución de flujo de calor con respecto a la temperatura.

Fueron comparados los resultados de los ensayos de ambas muestras donde se pudo observar claramente que la adición de nitrito a la mezcla de sal hace variar las propiedades de la mezcla de sales binarias en cuanto a punto de fusión disminuyéndolo en un 37,94 % y la entalpía de cambio fusión en un 35,96 %. Esta puede ser una solución comprometedor para aquellas aplicaciones de almacenamiento térmico donde la fuente de calor o la temperatura del fluido calor portador sea inferior a los 300 °C y así se pueda efectuar el almacenamiento de energía con la utilización de esta sal que se encuentra en disposición comercial.

De forma general, se pudo comprender el comportamiento térmico de estas dos mezclas de sales desde el punto de vista gráfico mediante los ensayos de DSC donde fue evidenciado que con el aumento de la temperatura de las muestras analizadas se formó un pico exotérmico que representa el almacenamiento de energía que luego mediante el proceso de enfriamiento fue liberada. Esto evidencia su idoneidad para aplicaciones de baterías térmicas debido a la reversibilidad del proceso.

### **4.1. Líneas futuras de investigación**

Durante el estudio realizado en este Trabajo Fin de Máster se han identificado aspectos relevantes que, por la limitación temporal, no ha sido posible analizar. Se mencionan a continuación los tres aspectos más relevantes identificados que se pueden acometer en futuros estudios.

1. Ampliar el rango de temperaturas de trabajo y determinar la temperatura de descomposición de las muestras preparadas, con esto se puede limitar la temperatura máxima de trabajo para el sistema de almacenamiento térmico.
2. Analizar otros parámetros como es el caso de conductividad térmica, capacidad calórica que permita realizar una caracterización completa de las mezclas preparadas.
3. Realizar un estudio de corrosión exponiendo estas sales a distintos materiales en una atmósfera acelerada lo que va a permitir seleccionar el medio de almacenamiento adecuado para el diseño de la batería térmica debido a que la corrosividad de estas sales es uno de sus principales inconvenientes.

## 5. GLOSARIO

### Glosario de términos

**Calor:** Transferencia de energía que se produce entre dos sistemas a distintas temperaturas. Suele definirse en distintas literaturas con la letra Q y sus unidades son de energía, es decir, kJ o kW/s.[17]

**Calor latente:** Cantidad de energía térmica necesaria para cambiar el estado de la materia de un sólido a un líquido o de un líquido a un gas, sin que la temperatura de la sustancia cambie.[17]

**Capacidad calórica:** Es la constante de proporcionalidad entre el calor absorbido por un cuerpo y su variación de temperatura. Esta constante es proporcional a la masa del cuerpo que efectúa el cambio de temperatura. Es por eso por lo que la capacidad calórica de un gramo de una sustancia determinada se denomina calor específico. Este término se define por la letra C y sus unidades se relacionan entre el término de energía partido entre la masa por unidad de temperatura, kJ/kg·K.[17]

**Diagrama de fase:** Representación gráfica que muestra los diferentes estados físicos de una sustancia en función de la temperatura y la presión. Las diferentes fases de una sustancia (por ejemplo, sólido, líquido y gas) se representan en diferentes regiones del gráfico, y las transiciones entre las fases se muestran como líneas o curvas. Las condiciones en las que dos fases coexisten se representan como una línea que separa las dos regiones correspondientes.[27]

**Entalpía:** es una propiedad termodinámica que indica la cantidad de energía que se libera o absorbe cuando la sustancia experimenta un cambio de estado o una reacción química a presión constante. Es representada con la letra H y se define como la suma de la energía interna de la sustancia y el producto de la presión y el volumen de la sustancia. Sus unidades están definidas por energía entre masa de la sustancia kJ/kg.[27]

**Entalpía de fusión:** Cantidad de energía que se requiere para fundir una cantidad determinada de una sustancia sólida a su temperatura de fusión a presión constante.[27]

**Eutéctico:** Es una mezcla de dos o más sustancias que se funde o se solidifica a una temperatura única y constante. La composición eutéctica, los componentes se distribuyen de manera uniforme en la fase líquida y en la fase sólida que se forma durante el proceso de enfriamiento. Cuando se alcanza el punto de eutéctica, cualquier cambio en la temperatura solo conduce a la transferencia de calor y no a una transición de fase, ya que la cantidad de cada componente en la mezcla se mantiene constante.[27]

## GLOSARIO

Sal binaria: Combinación química de dos elementos que forman un compuesto iónico, en el que un elemento actúa como un catión (con carga positiva) y el otro como un anión (con carga negativa). Las sales binarias son comunes en la química inorgánica y pueden formarse a través de una variedad de reacciones químicas.[17]

### Símbolos

Q: Cantidad de calor almacenado

Cp: Calor específico del material (J/kg·K)

m: Masa del material

T<sub>i</sub>: Temperatura inicial

T<sub>m</sub>: Temperatura de cambio de fase

T<sub>f</sub>: Temperatura final

a<sub>m</sub>: Fracción fundida del material

h: Calor de fusión por unidad de masa (J/kg)

### Abreviaturas

No.	Abreviatura	Descripción
1	PCM	<i>Phase change materials</i>
2	TES	<i>Thermal energy storage</i>
3	LHS	<i>Latent heat sensible</i>
3	DSC	<i>Differential scanning calorimetry</i>

## 6. ANEXOS

### *Anexo. 1 Comparación de diferentes tipos de TES [13]*

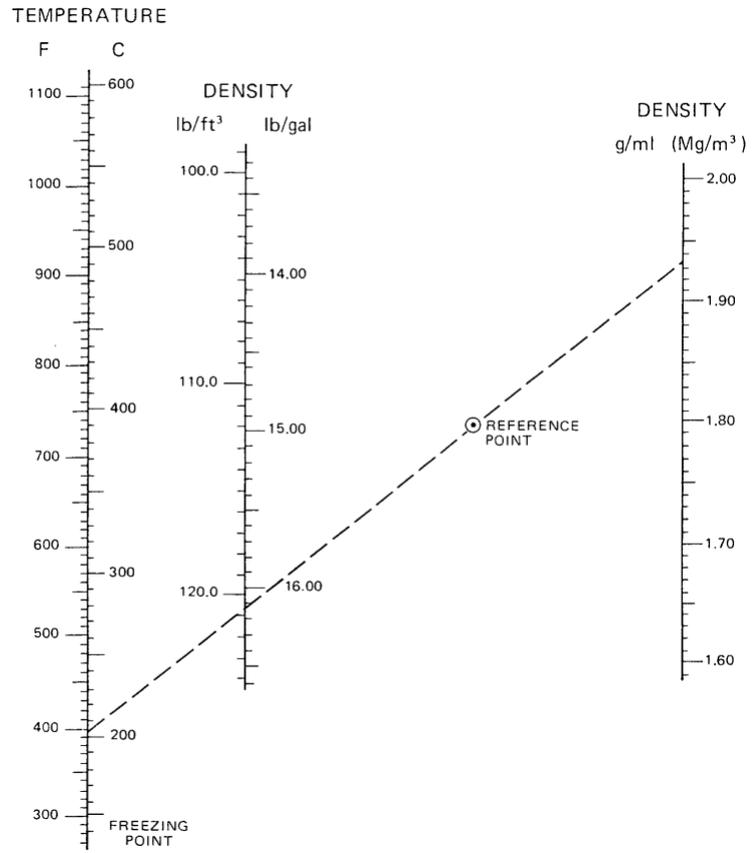
Performance parameter	Type of thermal energy storage		
	Sensible TES	Latent TES	Chemical TES
<b>Temperature range</b>	Up to: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 110 °C (water tanks)</li> <li>• 50 °C (aquifers and ground storage)</li> <li>• 400 °C (concrete)</li> </ul>	20–40 °C (paraffins) 30–80 °C (salt hydrates)	20–200 °C
<b>Storage density</b>	Low (with high temperature interval) 0.2 GJ/m <sup>3</sup> (for typical water tanks)	Moderate (with low temperature interval) 0.3–0.5 GJ/m <sup>3</sup>	Normally high 0.4–3 GJ/m <sup>3</sup>
<b>Lifetime</b>	Long	Often limited due to storage material cycling	Depends on reactant degradation and side reactions
<b>Technology status</b>	Available commercially	Available commercially for some temperatures and materials	Generally not available, but undergoing research and pilot project tests
<b>Advantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Low cost</li> <li>• Reliable</li> <li>• Simple application with available materials</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medium storage density</li> <li>• Small volumes</li> <li>• Short distance transport possibility</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• High storage density</li> <li>• Low heat losses</li> <li>• Long storage period</li> <li>• Long distance transport possibility</li> <li>• Highly compact energy storage</li> </ul>
<b>Disadvantage</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Significant heat loss over time (depending on level of insulation)</li> <li>• Large volume needed</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Low heat conductivity</li> <li>• Corrosively of materials</li> <li>• Significant heat losses (depending on level of insulation)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• High capital costs</li> <li>• Technically complex</li> </ul>

## Anexo. 2 Listado de materiales de cambio de fase y sus propiedades [12]

System	CAS	T <sub>mp</sub> (°C)	T <sub>bp</sub> (°C)	T <sub>fp</sub> (°C)	L (J·g <sup>-1</sup> )	ρ (g·cm <sup>-3</sup> )	MSDS*	LD50 rat (mg·kg <sup>-1</sup> )	Econom. criteria**
<b>Solid-solid transition materials</b>									
<b>Trometanol (TAM)</b>	77-86-1	132 (tr)	220	n.a.	<b>285</b>	1.35	<i>Xi</i>	5900	0
<b>DMPA</b>	4767-03-7	185 (tr)	n.a.	n.a.	<b>289</b>	n.a.	<i>Xi</i>	n.a.	0
<b>Dicarboxylic acids and similars</b>									
<b>Sebacic acid</b>	111-20-6	130-134	294	220	<b>228</b>	1.27	<i>Xi</i>	3400	0
<b>Maleic acid</b>	110-16-7	131-140	355	127	<b>235</b>	1.59	<i>Xn</i>	708	+
Malonic acid	141-82-2	132-136	n.a.	172	n.a.	1.62	<i>Xn</i>	1310	0
<i>Suberic acid</i>	505-48-6	141-144	230	210	<b>245</b>	1.02	<i>Xi</i>	n.a.	-
<b>Adipic acid</b>	124-04-9	151-155	256	196	<b>260</b>	1.36	<i>Xi</i>	n.a.	+
<b>Sugars and similars</b>									
<del>Xylose-D</del>	<del>58-86-6</del>	<del>147-151</del>	<del>n.a.</del>	<del>n.a.</del>	<del>216-280</del>	<del>1.53</del>	<del>/</del>	<del>23000</del>	<del>-</del>
<del>Xylose-L</del>	<del>609-06-3</del>	<del>147-151</del>	<del>n.a.</del>	<del>n.a.</del>	<del>213</del>	<del>1.53</del>	<del>/</del>	<del>n.a.</del>	<del>--</del>
<b>Glucose-D</b>	50-99-7	149-152	n.a.	n.a.	174-192	n.a.	/	25800	+
<del>Fructose-D</del>	<del>3615-37-0</del>	<del>144-145</del>	<del>n.a.</del>	<del>n.a.</del>	<del>145</del>	<del>n.a.</del>	<del>/</del>	<del>n.a.</del>	<del>--</del>
<b>Sugar Alcohols</b>									
<del>Erythritol</del>	<del>149-35-6</del>	<del>120</del>	<del>330</del>	<del>n.a.</del>	<del>340</del>	<del>1.45</del>	<del>/</del>	<del>n.a.</del>	<del>--</del>
Isomalt	64519-82-0	145	n.a.	n.a.	170	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Maltitol	585-88-6	145-152	n.a.	n.a.	173	n.a.	/	n.a.	-
Lactitol	585-86-4	146-152	n.a.	n.a.	135-149	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
<b>Polymeric hydrocarbons</b>									
<b>Polyethylene (HDPE)</b>	9002-88-4	130	n.a.	287	<b>211-233</b>	0.96	/	n.a.	-
<b>Aromatic hydrocarbons/ Arenes</b>									
Mandelic acid	90-64-2	118-121	n.a.	n.a.	161	1.30	<i>Xi</i>	n.a.	-
<b>Benzoic acid</b>	65-85-0	121-123	249	128	114-147	1.08	<i>Xn</i>	1700	+
<del>Picric acid</del>	<del>88-89-1</del>	<del>121-122</del>	<del>n.a.</del>	<del>n.a.</del>	<del>75</del>	<del>n.a.</del>	<del>T, F, E</del>	<del>n.a.</del>	<del>n.a.</del>
<del>trans-Stilbene</del>	<del>103-30-0</del>	<del>124</del>	<del>305</del>	<del>n.a.</del>	<del>167</del>	<del>0.97</del>	<del>Xn, N</del>	<del>920***</del>	<del>0</del>
Benzamide	55-21-0	125-129	288	180	169	1.34	<i>Xn</i>	1125	-
<b>Phthalic anhydride</b>	85-44-9	131	295	152	159	1.53	<i>Xn</i>	1530	+
trans-Cinnamic acid	140-10-3	133	300	>100	153	1.25	<i>Xi</i>	100****	-
<del>Phenacetin</del>	<del>62-44-2</del>	<del>134-137</del>	<del>n.a.</del>	<del>n.a.</del>	<del>137</del>	<del>n.a.</del>	<del>T</del>	<del>1650</del>	<del>0</del>
Chlorobenzoic acid	118-91-2	140	285	153	164	1.54	<i>Xi</i>	>3200	0
<b>Dimethyl terephthalate</b>	120-61-6	142	288	153	170	1.29	/	>3200	+
<del>4-Methylacetamide</del>	<del>103-89-9</del>	<del>146-151</del>	<del>306</del>	<del>n.a.</del>	<del>180</del>	<del>n.a.</del>	<del>Xn</del>	<del>980***</del>	<del>--</del>
Anthranilic acid	118-92-3	147	n.a.	150	148	1.41	<i>Xi</i>	4550	+
<del>4-Nitroaniline</del>	<del>100-01-6</del>	<del>147</del>	<del>260</del>	<del>198</del>	<del>152</del>	<del>1.44</del>	<del>T</del>	<del>750</del>	<del>+</del>
<b>Others</b>									
<del>Hexacarbonyltung.</del>	<del>140-11-0</del>	<del>127</del>	<del>n.a.</del>	<del>n.a.</del>	<del>211</del>	<del>n.a.</del>	<del>T</del>	<del>n.a.</del>	<del>--</del>
<b>Urea</b>	57-13-6	133-135	n.a.	n.a.	170-258	1.34	/	8471	+
<del>Dimethylpyrone</del>	<del>1004-36-0</del>	<del>134</del>	<del>n.a.</del>	<del>n.a.</del>	<del>234</del>	<del>/</del>	<del>Xn</del>	<del>1670***</del>	<del>--</del>

Anexo. 3 Densidad del HITEC [29]

DENSITY OF LIQUID HITEC<sup>®</sup>



## 7. BIBLIOGRAFÍAS

- [1] Chaves, I. V., & Wodnicky, M. D. (2022). Las patentes verdes como un eslabón para fomentar la innovación en las energías renovables. *Jurídicas CUC*, 18(1), 447-476.
- [2] Böckl, B. (2020). *The Effects of Energy Storage Systems and Sector Coupling on the Integration of Intermittent Energy* (Doctoral dissertation, University of Leoben).
- [3] Amrouche, S. O., Rekioua, D., Rekioua, T., & Bacha, S. (2016). Overview of energy storage in renewable energy systems. *International journal of hydrogen energy*, 41(45), 20914-20927.
- [4] Aneke, M., & Wang, M. (2016). Energy storage technologies and real life applications—A state of the art review. *Applied Energy*, 179, 350-377.
- [5] Xu, B., Li, P., & Chan, C. (2015). Application of phase change materials for thermal energy storage in concentrated solar thermal power plants: a review to recent developments. *Applied Energy*, 160, 286-307.
- [6] Xiao, X., Zhang, P., & Li, M. (2013). Thermal characterization of nitrates and nitrates/expanded graphite mixture phase change materials for solar energy storage. *Energy conversion and management*, 73, 86-94.
- [7] Stern, N. (2008). Stern review: la economía del cambio climático. Resumen de las conclusiones. *Comentario Internacional. Revista del Centro Andino de Estudios Internacionales*, (8), 209-214.
- [8] Ibrahim, H., Ilinca, A., & Perron, J. (2008). Energy storage systems—Characteristics and comparisons. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12(5), 1221-1250.
- [9] Fernández, A., Martínez, M., Segarra, M., Martorell, I., & Cabeza, L. F. (2010). Selection of materials with potential in sensible thermal energy storage. *Solar energy materials and solar cells*, 94(10), 1723-1729.
- [10] Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., & Ding, Y. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in natural science*, 19(3), 291-312.
- [11] Pardo, P., Deydier, A., Anxionnaz-Minvielle, Z., Rougé, S., Cabassud, M., & Cognet, P. (2014). A review on high temperature thermochemical heat energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 591-610.
- [12] Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 13(2), 318-345.
- [13] Kousksou, T., Bruel, P., Jamil, A., El Rhafiki, T., & Zeraouli, Y. (2014). Energy storage: Applications and challenges. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 120, 59-80.
- [14] García Santos, A., Neila González, F. J., & Oliver Ramírez, A. (2012). Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus

- características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica. *Materiales de construcción*, 62(305), 131-140.
- [15] Orozco, M., Martínez, J., Chico, A. y Acurio, K. (2018). Procesado y Caracterización de Nitratos como Materiales de Cambio de Fase para Evaluar su Capacidad de Almacenamiento Energético. *Revista Técnica" energía"*, 14(1), 224-235.
- [16] Panreac Química. (2023). ITW Reagents - División Life Sciences. Recuperado de <https://www.itwreagents.com/iberia/es>
- [17] Green, D.W; Southard, M.Z. (2019). *Physical and Chemical Data. Perry's Chemical Engineers, Handbook (9th edition)*. United States. McGraw-Hill Education.
- [18] Panreac Química. (2021). Ficha de seguridad nitrato de sodio (7631-99-4). Recuperado de <https://www.itwreagents.com/iberia/es>
- [19] Departamento de salud y servicio para personas mayores de New Jersey. (2004). Hoja informativa sobre sustancias peligrosas. Nitrato de potasio (7757-79-1).
- [20] Panreac Química. (2021). Ficha de seguridad Nitrato de potasio (7757-79-1). Recuperado de <https://www.itwreagents.com/iberia/es>
- [21] Orozco Salcedo, M. A. (2019). Procesado y caracterización de nitratos como materiales de cambio de fase para evaluar su capacidad de almacenamiento energético. (Tesis de máster). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- [22] U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service. National Institutes of Health. (2001). *Toxicology and Carcinogenesis studies of sodium nitrite (CAS 7632-00-0)*.
- [23] Panreac Química. (2021). Ficha de seguridad Nitrito de sodio (7632-00-0). Recuperado de <https://www.itwreagents.com/iberia/es>.
- [24] Fernández Díaz-Carralero, Á. G. (2013). Estudios físico-químicos y de corrosión a elevada temperatura para el diseño de nuevos fluidos almacenadores de energía en centrales solares de concentración. (Tesis doctoral). Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.
- [25] Andreu Cabedo, P. (2014). Mejora de las propiedades térmicas de sal solar mediante adición de nanopartículas. (Tesis de máster). Universidad Jaime I, Castellón, España.
- [26] Jankowski, N. R., & McCluskey, F. P. (2014). A review of phase change materials for vehicle component thermal buffering. *Applied energy*, 113, 1525-1561.
- [27] Levine Ira, N. (2014). *Equilibrio de fase en sistemas multicomponentes. Principios de fisicoquímico (6ta edición)*. México. McGraw-Hill Education.
- [28] Fernández, A. G., Galleguillos, H., Fuentealba, E., & Pérez, F. J. (2015). Thermal characterization of HITEC molten salt for energy storage in solar linear concentrated technology. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 122, 3-9.
- [29] Brenntag Company (s.f.). HITEC® Heat Transfer Salt. Recuperado de <https://www.studocu.com>
- [30] Sathish, T., Suresh, P., Sharma, K., Saravanan, R., Saleel, C. A., Shaik, S., ... & Panchal, H. *Case Studies in Thermal Engineering*.

## BIBLIOGRAFÍAS

- [31] Delise, T., Tizzoni, A. C., Votyakov, E. V., Turchetti, L., Corsaro, N., Sau, S., & Licoccia, S. (2020). Modeling the Total Ternary Phase Diagram of NaNO<sub>3</sub>-KNO<sub>3</sub>-NaNO<sub>2</sub> Using the Binary Subsystems Data. *International Journal of Thermophysics*, 41, 1-20.
- [32] Martínez, L. R. (2006). Calorimetría y análisis térmico. *Laboratorio de Termofísica*, 1, 111.
- [33] Nijman, M. (2016) *Thermal Analysis in Practice Tips and Hints. Introductory Handbook*. Mettler Toledo. Vol 2. Recuperado de [Novedades sobre análisis térmico - METTLER TOLEDO \(mt.com\)](https://www.mt.com/es)
- [34] Análisis térmico Excellence. *Sistemas para la caracterización de materiales*. (2023). Mettler Toledo. Recuperado de <https://www.mt.com/es>
- [35] STAR<sup>®</sup> Software. *The Standard in Thermal Analysis*. (2023). Mettler Toledo. Recuperado de <https://www.mt.com/es>