UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE MATERIALES PARA EL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA SOLAR MEDIANTE CAMBIO DE FASE

Melissa Aguas De Hoyos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento ingeniería química.

Medellín, Colombia

2016

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE MATERIALES PARA EL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA SOLAR MEDIANTE CAMBIO DE FASE

Melissa Aguas De Hoyos

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Química

Director:

Ph.D. Farid Chejne Janna

Línea de Investigación:

Energías alternativas.

Grupo de Investigación:

Termodinámica avanzada y energías alternativas (TAYEA).

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de minas, Departamento de ingeniería química.

Medellín, Colombia

2016

A mis padres y a esposo.

Agradecimientos

Infinitos agradecimientos a Dios .

A mi director el Doctor Farid Chejne Janna, profesor asociado a la universidad nacional de Colombia, por su confianza y apoyo permanente durante el desarrollo de este proyecto.

A mi familia por estar siempre, incentivarme y guiarme el camino a seguir.

A los miembros del grupo de “Termodinámica Aplicada y Energías Alternativas – TAYEA”, por su gran apoyo para lograr la culminación del proyecto.

A Diego Hincapié, por su apoyo en el sistema adquisición de datos.

A Jorge Alberto Arango Johnson, por su financiación del equipo de almacenamiento de energía solar a través de su empresa Es Energía Solar Ltda.

Resumen

En esta investigación se estudió el comportamiento térmico de cuatro materiales para su posible utilización en el almacenamiento de energía térmica solar. Tres de estos materiales son sales hidratadas de origen inorgánico (Cloruro de magnesio hexahidratado, Sulfato de sodio decahidratado y el Tiosulfato de sodio pentahidratado) y una sustancia de origen orgánico orgánica (parafina para la fabricación de velas).

Se realizaron estudios de análisis térmico diferencial (DTA) y un primer ciclo de fusión - solidificación para cada uno de los materiales estudiados con el fin de caracterizar térmicamente estos materiales. Con estos datos se calculó la energía almacenada en los materiales, además se prepararon 3 mezclas de sales a diferentes porcentajes de cloruro de magnesio hexahidratado y sulfato de sodio decahidratado; los materiales empleados y mezclas desarrolladas fueron sometidos a 150 ciclos de solidificación - fusión con el fin de monitorear la evolución de la temperatura y detectar algún cambio significativo entre los diferentes ciclos de solidificación – fusión para cada uno de estos materiales estudiados; así mismo se implementó una estrategia experimental que permitió la captación y almacenamiento de energía térmica solar con materiales de cambio de fase empleando como sustancia almacenadora de energía la parafina de uso común, el cual permite monitorear tanto la temperatura del material como la del agua.

Palabras clave: Fusión, solidificación, energía, calor sensible, calor latente, almacenamiento.

Abstract

In this research was studied the thermal behavior of four materials for their possible use in the storage of solar thermal energy. Three of these materials are hydrated salts of inorganic origin (magnesium chloride hexahydrate, sodium sulphate decahydrate and sodium thiosulfate pentahydrate) and a materials of organic organic origin (paraffin for the manufacture of candles).

Studies were conducted of differential thermal analysis (DTA) and a first cycle of melting – solidification for each of the materials studied in order to characterize these materials thermally. With these data the energy stored in the materials was calculated, in addition 3 salt mixtures were prepared at different percentages of magnesium chloride hexahydrate and sodium sulfate decahydrate; The materials used and developed mixtures were subjected to 150 solidification - fusion cycles in order to monitor the evolution of the temperature and detect some significant change between the different solidification - melting cycles for each of these materials studied; also implemented an experimentals strategy that allowed the capture an storage of solar heat energy with phase chage materials.

Keywords: Fusion, solidification, energy, sensible heat, latent heat, storage.

Contenido

Pág.

Resumen ..... **IX**

Lista de figuras ..... **XII**

Lista de tablas ..... **XIV**

Lista de Símbolos y abreviaturas ..... **XV**

Introducción **1**

1. Estado del arte **5**
1.1 Materiales 5
1.2 Caracterización de sales hidratadas 6
1.3 Estabilidad química. 8
1.4 Aplicaciones 9

2. EVALUACIÓN TÉRMICA DE LOS MATERIALES UTILIZADOS PARA EL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA. **13**
2.1 Análisis térmico diferencial (DTA). 14

3. EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE LOS MATERIALES. **19**

4. ESTUDIOS DE LOS CICLOS DE ALMACENAMIENTO PARA LOS DIFERENTES MATERIALES EMPLEADOS. **33**
4.1 Preparación de mezclas de materiales. 35
4.2 Equipo de almacenamiento de energía térmica solar 37

5. Conclusiones y recomendaciones **41**
5.1 Conclusiones 41
5.2 Recomendaciones 43

Anexo A: Planos del equipo de almacenamiento de energía. **45**

Anexo B: Tablas de datos **49**

Bibliografía **51**

Lista de figuras

Figura 1. Categorización de sales hidratadas para el almacenamiento de energía 3
Figura 2. DTA para los diferentes materiales utilizados en el estudio (a) Sulfato de sodio decahidratado. (b) Tiosulfato de sodio pentahidratado. (c) Cloruro de magnesio hexahidratado. y (d) Parafina 15
Figura 3. Montaje para las pruebas de S-F. 19
Figura 4. Primer ciclo de S-F para el - Sulfato de sodio decahidratado. 22
Figura 5. Primer ciclo de fusión-solidificación para - el Tiosulfato de Sodio pentahidratado. 23
Figura 6. Primer ciclo de fusión-solidificación para - el Cloruro de Magnesio hexahidratado 23
Figura 7. Primer ciclo de fusión-solidificación para la parafina 24
Figura 8. Proceso de solidificación de los diferentes materiales de cambio de fase. 26
Figura 9. Evolución de la temperatura entre los diferentes materiales cambio de fase y el agua cuando se colocan en contacto. 27
Figura 10. Energía transferida por el cloruro de magnesio hexahidratado y el aceite, al agua de enfriamiento y la energía almacenada en el material. 29
Figura 11. Energía transferida por el sulfato de sodio decahidratado y el aceite, al agua de enfriamiento y la energía almacenada en el material. 30
Figura 12. Energía transferida por el tiosulfato de sodio pentahidratado y el aceite, al agua de enfriamiento y la energía almacenada en el material. 31
Figura 13. Energía transferida por la parafina y el aceite, al agua de enfriamiento y la energía almacenada en el material. 31
Figura 14. Ciclos de solidificación-fusión de los diferentes materiales (a) Sulfato de sodio decahidratado. (b) Tiosulfato de sodio pentahidratado. (c) Cloruro de magnesio hexahidratado y (d) Parafina 33
Figura 15. Ciclos de solidificación-fusión para las mezclas de materiales. 35
Figura 16. Primer ciclo de solidificación – fusión para la mezcla M9S1 36

Figura 17. Diseño experimental para el tanque para el almacenamiento de energía térmica solar. 38
Figura 18. Temperaturas dentro del equipo de almacenamiento de energía térmica solar. 39

Lista de tablas

Tabla 1**.** Comparación entre los distintos medios de almacenamiento de energía 2
Tabla 2 Propiedades térmicas de los materiales a utilizar. [1,2 y 3] 11
Tabla 3. Condiciones para los análisis térmicos de cada material 14
Tabla 4. Caracterización térmica del material. 16
Tabla 5. Condiciones para el primer ciclo de solidificación-fusión de los materiales 20
Tabla 6. Capacidad de almacenamiento y temperatura de fusión experimental. 25
Tabla 7. Comparación de la energía transferida por los PCM y el aceite y la energía almacenada en los materiales de cambio de fase. 32
Tabla 8. Mezcla de materiales entre el cloruro de magnesio hexahidratado y el sulfato de sodio pentahidratado 35

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
m	Masa	g	$Ec.1$
Cp	Capacidad Calorifica	$\frac{\text{Cal}}{\text{°C}}$	Ec. 2
R	Coeficiente de correlación		Cap. 3

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
ΔH	Entalpia	$\frac{J}{\text{g}}$	Tabla 4
ΔT	Diferencia de temperatura	°C	Ec. 2

Abreviaturas

Abreviatura	Término
PCM	Materiales de cambio de fase
DTA	Análisis térmico diferencial
S-F	Solidificación - Fusión

Introducción

Uno de los principales problemas en la implementación de fuentes alternativas de energía, y muy en particular en el caso de la energía solar es el carácter intermitente entre los periodos de disponibilidad y requerimientos del recurso, ya que por lo general se necesita de este tipo de energía cuando no se dispone de radiación solar. Por lo que almacenamiento de calor juega un papel decisivo en la aplicabilidad de dicha tecnología, existen dos formas generales para el almacenamiento de calor, una por calor sensible y la otra por calor latente, en ambas se necesitan de materiales en los cuales la energía se pueda acumular, tanto en el almacenamiento por calor sensible como por calor latente existen cambios en la energía interna del sistema asociado con cambios en la energía cinética y potencial de las moléculas y átomos, lo que se traduce en el almacenamiento de energía.

Los materiales de cambio de fase han despertado un gran interés en los últimos años por lo anteriormente expuesto, especialmente en su uso como sustancias almacenadora de energía térmica mediante calor latente. Es importante mencionar que estos sistemas de almacenamiento de energía que incorporan la utilización de materiales de cambio de fase PCM (Phase change materials) tienen la gran ventaja de acumular mayores densidades de energía comparados con otros sistemas de almacenamiento. Dentro de este grupo de sustancias apropiadas para el almacenamiento de energía están las sustancias de origen orgánico e inorgánico teniendo estas últimas ventajas en relación con el calor latente. Existen ciertas propiedades básicas en los materiales para que puedan ser utilizados en el almacenamiento de energía como lo son: alta temperatura de fusión, alta capacidad calorífica, alta conductividad térmica, pequeños cambios de volumen al realizarse el cambio de fase, no ser corrosivos, ni ser tóxicos, no presentar problemas de inestabilidad térmica física (sobreenfriamiento) o química (segregación) y que su tiempo de vida útil se apropiado en relación a sus precio, en la tabla 1 se presenta una comparación entorno a los diferentes materiales utilizados para el almacenamiento de energía.

Tabla 1**.** Comparación entre los distintos medios de almacenamiento de energía1

Propiedad	Rocas	Agua	PCM Orgánicos	PCM Inorgánicos
Densidad (kg./m^3)	2240	1000	800	1600
Calor específico (kJ/kg.)	1.0	4.2	2.0	2.0
Calor Latente (kJ/kg.)	-----	-----	190	230
Calor Latente (kJ/m^3)	-----	-----	152	368
Masa de almacenamiento por cada 10^6 J (kg.)	67,000	16,000	5300	4350
Volumen de almacenamiento por cada 10^6 J (m^3)	30	16	6.6	2.7

Entre los materiales inorgánicos se destacan las sales hidratadas que han sido sustancias muy estudiadas para su uso como PCM debido a su alta densidad volumétrica de almacenamiento (~350 MJ/m^3), alta conductividad térmica (~0.5 W/m ºC) y moderado costo comparado con las parafinas, y otros compuestos orgánicos. En una investigación realizada por *Atul sharmay* (2008) y colaboradores categorizaron una serie de sales hidratadas, desde las más promisorias hasta las menos promisorias como se presenta en la figura 1, por esta razón en el presente trabajo se estudiara el comportamiento de sales hidratadas y de mezclas de estas para el almacenamiento de energía térmica solar, entre las sales escogidas están el Cloruro de magnesio hexahidratado ($MgCl_2*6H_2O$), el Sulfato de sodio decahidratado ($Na_2SO_4*10H_2O$) y el Tiosulfato de sodio pentahidratado ($Na_2S_2O_3*5H_2O$).

[1] (Farid M. M., 2004.)

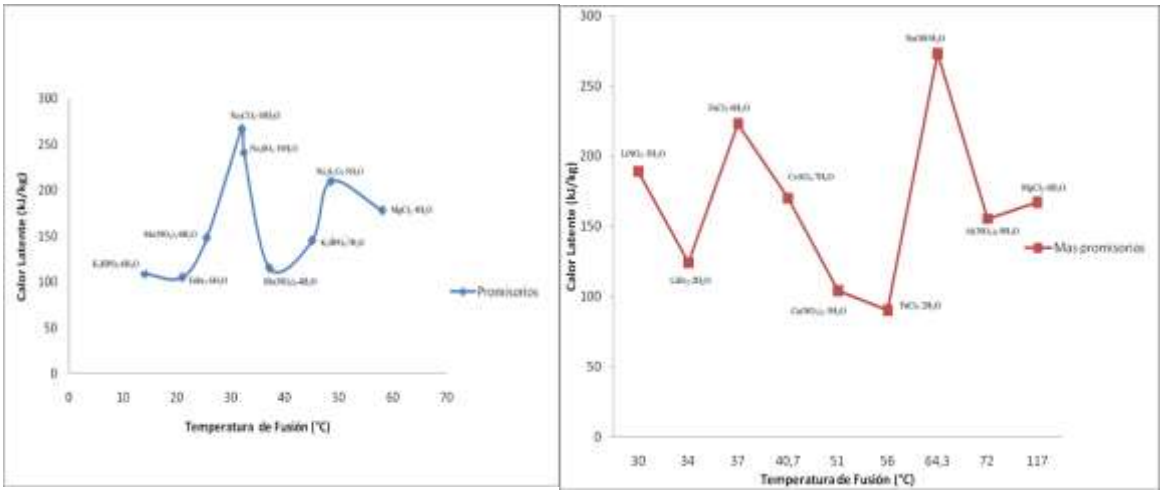


Figura 1. Categorización de sales hidratadas para el almacenamiento de energía

La sal de Glauber ($Na_2SO_4*H_2O$) ha sido extensamente estudiada desde 1952, tiene una temperatura de fusión sobre los 32.4 ºC y un calor latente de 254 kJ/kg (≈377MJ/m^3); siendo uno de los materiales más baratos para el uso como PCM en el almacenamiento de energía térmica solar en forma de calor latente, pero presenta problemas de segregación y subenfriamiento, lo que han limitado sus aplicaciones. El cloruro de magnesio hexahidratado ($MgCl_2$ *$6H_2O$) ha sido una de las más utilizada para el almacenamiento de energía ya que para 1000 ciclos de solidificación-fusión no presento problemas de estabilidad [16, 17], con una temperatura de fusión de 117°C y un calor latente de 168.6 kJ/kg (≈ 254.5 MJ/m^3), pero su temperatura lo hace de poca aplicabilidad para el almacenamiento de energía solar y el Tiosulfato de sodio pentahidratado ($Na_2S_2O_3*5H_2O$), ha sido estudiado ampliamente tiene una temperatura de fusión de 48.5 y un calor latente de 210 kJ/kg, presenta problemas de segregación y subenfriamiento.

1. Estado del arte

Varios autores han trabajado en materiales de cambio de fase para el almacenamiento de energía térmica y en particular en el uso de sales hidratas. La presente revisión del estado del arte se dividirá en cuatro partes en las cuales comentaremos las investigaciones realizada por diferentes autores, estas partes son: Materiales utilizados para el almacenamiento de energía térmica solar, Caracterización de las sales hidratadas, Estabilidad química y Aplicaciones de este tipo de tecnología.

1.1 Materiales

A. Sharma et al. (2009) Realizó una revisión del estado del arte en torno al almacenamiento de energía térmica con materiales de cambio de fase, la cual se centró en tres tópicos básicos: los materiales, la transferencia de calor las aplicaciones, dentro de los materiales se encontró que las sales hidratas son materiales promisorios para el almacenamiento térmico de energía en forma de calor latente ya que tienen un alto calor latente de fusión por unidad de volumen, Conductividad térmica relativamente alta (casi el doble de las parafina), pequeños cambios de volumen en la fusión, no corrosivas, compatible con los plásticos, poco toxicas y baratas, por lo que podemos decir que estas sales hidratadas son un excelente material para ser usado en el almacenamiento de energía térmica solar.

A. Regin et al. (2006) Realizaron una investigación para estudiar el comportamiento de una parafina encapsulada en un cilindro horizontal durante la fusión, usada en un sistema de almacenamiento de energía en forma de calor latente acoplado a un colector solar. El calor para la fusión del PCM es proporcionado por agua calentada por el sol. Se observó que la fusión de estos materiales almacenadores ocurre realmente en un intervalo de temperatura, este estudio consideró el intervalo de temperatura para la fusión de la parafina encontrándose así que la temperatura de fusión es de 59.9 ± 8.7 °C y una

capacidad de almacenamiento de 190 kJ/kg. Además propusieron un modelo matemático para describir la fusión del PCM, usando el método entálpico, cuyos resultados obtenidos con este modelo se ajustaron bien a los datos obtenidos experimentales. En general estos resultados indicaron que el proceso de fusión está afectado principalmente por la magnitud del número de Stefan, el intervalo de temperatura de fusión y el radio del cilindro; además el ajuste de los resultados del modelo a los datos experimentales mejora cuando se tiene en cuenta la convección libre en la fase líquida, en lugar de un proceso dominado puramente por la convección.

Z. Belén et al. (2003) Realizó una revisión del estado del arte en torno al almacenamiento de energía térmica con materiales de cambio de fase, la cual se centró en tres tópicos básicos: los materiales, la transferencia de calor y las aplicaciones. El uso de sistemas de almacenamiento de energía en forma de calor latente con materiales de cambio de fase (PCM) es una forma eficaz de almacenar energía térmica y tienen como ventajas una alta densidad de almacenamiento de energía y una naturaleza isotérmica en el proceso de almacenamiento. Los PCM han sido ampliamente utilizados en almacenamiento térmico de calor en sistemas de bombas de calor, en ingeniería solar, térmica y aplicaciones de control en nave espacial, en esta última década se ha utilizado e investigado los PCM para la calefacción y refrigeración de edificios. Caracterización de las sales hidratadas.

1.2 Caracterización de sales hidratadas

Durante varios años el uso de sales hidratadas, ha despertado un gran interés para el almacenamiento de energía térmica solar, presentando múltiples inconvenientes en su aplicabilidad, uno de los principales inconvenientes que se presentan en la implementación de este tipo de tecnología es la forma incongruente en que estas sales se funden, presentando un problema de irreversibilidad en los sistemas, ya que el agua de hidratación de las sal se separa de la sal (segregación). Teniendo en cuenta estos inconvenientes se han estudiado diferentes alternativas que permitan la utilización de este tipo de sales, como por ejemplo el uso del principio de EXTRA WATER *S. Furbo et.al 1980*, el cual recomienda la adición de una cantidad extra de agua en sales inorgánicas que funden

incongruentemente, para el caso del Sulfato de Sodio decahidratado se utiliza un 11% de agua extra, junto con agitación con el fin de evitar deterioro en las propiedades térmicas de estos materiales, así como también se hace uso de mezcla de diferentes sales en punto eutéctico *A.A. El-Sebaii et.al.2009-2011.*

Choi et al. (1996) Analizaron las características de transferencia de calor del acetato de sodio trihidratado (CH3COONa. $3H_20$) el cual mezclaron con un 2.0 wt% carboximetil celulosa-Na (CMC-Na) y 1.0 wt% super-absorbing polymer con el fin de evitar la separación de fases también le adicionaron un 2.0 wt%-sulfato de potasio (K_2SO_4) con el fin de evitar subenfriamiento las propiedades termofísicas se encontradas por análisis DSC y fueron temperatura de fusión 58°C y calor latente de fusión 226 kJ/kg. Este análisis se llevó a cabo tanto en sistemas de tubos anulares aleteados y sin aletas. Determinaron además la influencia de la temperatura de entrada y la velocidad de flujo del fluido de transferencia de calor sobre la transferencia de calor, así mismo como el grado de subenfriamiento del sistema a la temperatura de entrada del fluido de transferencia y correlacionaron las cantidades de energía acumulables dentro de un sistema de almacenamiento anular en términos de cantidades adimensionales como los números de Fourier, Stefan y Reynolds reportando datos básicos en el diseño de este tipo de unidades. Las velocidades del frente de fusión dentro de los sistemas propuestos se ajustaron bien a las predicciones del modelo analítico propuesto aunque no se considera variaciones axiales de la temperatura.

K. Nagano et al (2004). Investigaron las características térmicas de una mezcla de Nitrato de Magnesio Hexahidratado ($Mg(NO_3)_2*6H_2O$) como material base, con Cloruro de Magnesio Hexahidratado ($MgCl_2*6H_2O$) como material modulador del punto de fusión; como sistema de recuperación de calor de desecho; realizaron pruebas repetitivas de solidificación-fusión para caracterizar las propiedades térmicas de los compuestos en el intervalo de temperatura de trabajo, este análisis se realizó con Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC). En su investigación se concluyó que la adición de hasta 20% en peso de $MgCl_2*6H_2O$ a la mezcla, podía disminuir el punto de fusión hasta 60ºC, se encontró que las propiedades térmicas de la mezcla se mantenían después de 1000 ciclos de solidificación/fusión y que el sobre-enfriamiento no era un problema para este sistema.

Y. Marcus et al (2005). Obtuvieron diagramas de fase de mezclas binarias de diferentes sales hidratadas, entre las que se encontraban: nitrato de magnesio hexahidratado, nitrato de cobalto hexahidratado, nitrato de níquel hexahidratado, nitrato de hierro nonahidratado,

cloruro de magnesio hexahidratado, cloruro de níquel hexahidratado, cloruro de cobalto hexahidratado, cloruro de manganeso tetrahidratado, la obtención de tales diagramas puede ser útil para observar el comportamiento físico-químico de la sal de interés, el cloruro de magnesio hexahidratado, los resultados obtenidos son muy útiles, para hacer mezclas estables de estas sales con el fin de minimizar los problemas de estabilidad química, en este caso por ejemplo obtuvieron que las mezclas de Nitrato de magnesio hexahidratado – nitrato de hierro nonahidratado, Nitrato de magnesio hexahidratado - nitrato de magnesio tetrahidratado y cloruro de magnesio hexahidratado – cloruro de níquel hexahidratado presenta un punto eutéctico mientras que las mezclas de Nitrato de magnesio hexahidratado – Nitrato de níquel hexahidratado, cloruro de magnesio hexahidratado – cloruro de cobalto hexahidratado y cloruro de magnesio hexahidratado – cloruro de manganeso hexahidratado presentan dos puntos eutécticos.

1.3 Estabilidad química.

B. Sandnes et. Al (2006). Obtuvieron diagramas de entalpía-temperatura para tres sales hidratadas comunes basados en un método de medida de las pérdidas de calor a través de las paredes de los tubos contenedores durante el enfriamiento. En estos diagramas de entalpía se puede observar directamente propiedades termofísicas importantes para las aplicaciones de almacenamiento de energía térmica tales como el calor de transición de fase, el calor específico de la fase sólido/líquido y el punto de fusión. En la ocurrencia de sobreenfriamiento para la sal estudiada se pueden observar los siguientes efectos: La temperatura máxima alcanzada durante la cristalización de la sal decrece con el grado de sobreenfriamiento; el diagrama de entalpía obtenido en este estudio puede determinar el incremento de temperatura que resulta de la cristalización. La diferencia en entalpía entre una sustancia sobreenfriada y una cristalizada es función de la temperatura. A mayor grado de sobreenfriamiento la diferencia e entalpía decrece puesto que el calor específico de la fase líquida es mayor que el de la fase sólida. A mayor grado de sobreenfriamiento menos energía puede ser utilizada a la temperatura del cambio de fase. En particular la metodología usada por estos autores puede ser útil para el análisis de posible sobreenfriamiento en el proceso de fusión/solidificación del $MgCl_2*6H_2O$.

1.4 Aplicaciones

A. Hoshi et al. (2005) Investigaron la posibilidad de utilizar materiales de cambio de fase (PCM) con altos puntos de fusión en plantas de generación de electricidad por energía solar de tecnologías de bajo costo como CLFR (Compact Linear Fresnel Reflector) y MTSA (Multi-Tower Solar Array). Identificaron algunos candidatos a PCM para estas aplicaciones y analizaron algunos de sus parámetros operacionales y modelaron las características matemáticas de carga y descarga de estos materiales. Describieron además la implementación de estos materiales a las plantas con tecnologías CLFR y MTSA y los sistemas de almacenamiento adecuados a este tipo de tecnologías, que también pueden ser de aplicación a plantas solares de concentradores lineales y de platos parabólicos, de este estudio se obtuvo que el punto de fusión así como la capacidad de almacenamiento de algunas sales aumenta, en su orden nitratos, cloruros, carbonatos y fluoruros.

M. Mazman et al.(2009) Realizaron un estudio para el calentamiento de agua para uso doméstico empleando materiales de cambio de fase y estratificación térmica por gravedad, con el fin optimizar el equipo de almacenamiento. Los materiales de cambio fase utilizado fueron unas mezclas de parafina con ácido esteárico y palmítico (80:20) y de ácido estérico con mirístico (80:20), el valor de las propiedades termofísicas para cada una de estas mezclas fue calculado a partir de análisis DSC y se obtuvo que el rango de temperatura de fusión para cada una de las mezclas fue (49-53), (48-52) y (61-64) respectivamente, también se calculó el calor latente de fusión el cual fue de 150, 150 y 190.87 respectivamente. En este estudio se realizaron varias pruebas de calentamiento y enfriamiento para las cuales se pudo concluir que la mezcla de parafina con ácido estérico se acopló mejor al sistema permitiendo una buena recuperación de calor.

D.P. Bentz et al (2007) Estudiaron tres aspectos fundamentales para la utilización de materiales de cambio de fase como agregados de peso ligero LWA (por sus siglas en ingles pre-wetted lightweight aggregates); en el primer caso el material de fue utilizado con el fin de reducir el aumento de la temperatura en una sección grande de concreto durante el proceso de curado adiabático con el fin de minimizar la degradación térmica del material, en el segundo caso se tomó en cuenta la modelación del sistema y por último se validó el modelo con resultados experimentales.

Michels et al. (2007) Investigaron una secuencia de Almacenadores de Calor Latente (Cascaded latent heat storages, CLHS) como posible alternativa económica y efectiva para

plantas de generación de energía eléctrica de concentradores parabólicos. Su estudio reportó resultados numéricos y experimentales de CLHS de algunas sales alcalinas de nitrato. Los experimentos fueron realizados en un intercambiador de calor de tubos y coraza en condiciones reales de operación; estos resultados numéricos fueron usados en un modelo numérico para simular diferentes configuraciones de CLHS. Ellos dedujeron dos conclusiones importantes; por un lado, el diseño de CLHS para el intervalo de temperaturas de operación de 250ºC – 500ºC es más complejo que para el rango de temperaturas hasta 100ºC y por otro lado que la baja conductividad de los PCM disponibles para esta forma de concentración solar es una dificultad que se debe vencer para poder aprovechar al máximo esta tecnología.

A.Shukla et al. (2009) Realizaron una revisión bibliográfica de los diferentes sistemas de almacenamiento de energía térmica usando o no materiales de cambio de fase para el calentamiento de agua, este estudio se dividió en dos partes, el tipo de colector usado y el tipo de almacenamiento utilizado (sensible o latente), de esta investigación se obtuvo que los sistemas de calentamiento de aguas para uso domestica con materiales de cambio de fase tiene mejores rendimiento en especial aquellos que tiene un alto calor latente y una mayor superficie de transferencia de calor.

M. Akgün et al. (2007) Estudiaron experimentalmente el proceso de fusión y solidificación de una parafina utilizada como material de cambio de fase en un intercambiador de calor, con el objetivo de diseñar y construir un sistema de almacenamiento de energía enfocándose en el aumento de la transferencia de calor. El dispositivo diseñado consta de dos tubos concéntricos verticales, el fluido de transferencia de calor fluye por el tubo interior y el material de cambio de fase se encuentra en el espacio anular, en este artículo se estudió el efecto de la temperatura de entrada y el caudal másico del fluido de transferencia en los procesos de solidificación/fusión del material de cambio de fase. Las propiedades termofísicas para la parafina fueron calculadas a partir de análisis calorimétrico diferencial de barrido en el cual se encontró que la temperatura de de fusión es de 44.23°C, la capacidad de almacenamiento de calor latente de 249 kJ/kg y una densidad de 794 kg/m^3.

Macía (2007) investigó el almacenamiento de energía térmica a escala de laboratorio en un prototipo a de tubos concéntricos, usando como material de almacenamiento de cambio de fase Cloruro de Magnesio Hexahidratado ($MgCl_2.6H_2O$), entre los resultados más destacados de esta investigación se resaltan la construcción de un sistema de almacenamiento de energía térmica versátil, con el potencial de análisis para diferentes sustancias almacenadoras de energía que cambian de fase, comprobar que el Cloruro de Magnesio Hexahidratado ($MgCl_2.6H_2O$) es viable para ser utilizado como material almacenador de energía térmica por cambio de fase, ya que después de 200 ciclos de fusión-solidificación no se presentó ninguna variación en la temperatura de fusión y de solidificación. Además se obtuvo un incremento del 20% en la capacidad de almacenamiento usando el prototipo construido comparado con el almacenamiento por calor sensible y se comparó la capacidad de almacenamiento utilizando ($MgCl_2.6H_2O$) con almacenamiento con una aceite térmico se observó que hay un incremento de un 25% al utilizar ($MgCl_2.6H_2O$), demostrando su aplicabilidad desde el punto de vista térmico.

Tabla 2 Propiedades térmicas de los materiales a utilizar. [1,2 y 3]

Material	Temp.	Calor Especifico		Densidad		Conductividad térmica		Calor latente.
	Fusión	(kJ /kg K)		(kg/m^3)		(W/m K)		(kJ/kg)
	(°C)	Sol	Liq	Sol	Liq	Sol	Liq	
Cloruro de magnesio Hexahidratado	117			1569	1450	0.694	0.570	168.60
Sulfato de sodio decahidratado	32.4	1.76	3.31	1458	1458			254.00
Tiosulfato de sodio pentahidratado	48.5	1.46	2.38	1666	1666			208.80
Parafina.	64			916	790	0.346	0.167	173.60

En la tabla 2 se encuentran alguna propiedades térmicas de los materiales que se van a utilizar en este estudio, esta propiedades son muy importantes para realizar las comparaciones entre estos datos teóricos y los que encontremos a lo largo d la investigación, además, algunos de estos datos los tomaremos como constantes en los cálculos realizados.

2. EVALUACIÓN TÉRMICA DE LOS MATERIALES UTILIZADOS PARA EL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA.

En el almacenamiento de energía térmica solar existen dos tipos de materiales ampliamente utilizados, los materiales orgánicos y los materiales inorgánicos. Dentro de los materiales inorgánicos se encuentran las sales hidratadas las cuales ofrecen la ventaja de que tienen una alta conductividad térmica, pequeños cambios de volumen durante el cambio de fase, puntos de fusión altos y altos valores de calor de fusión comparados con los materiales de origen orgánico, pero presentan la desventaja de que poseen mayores problemas de estabilidad química como lo son la segregación y sub-enfriamiento los cuales pueden cambiar las propiedades térmicas de las sustancias y presentar problemas de histéresis. Mientras los materiales de origen orgánicos no presentan problemas de estabilidad química, es decir funden congruentemente, fáciles de usar, y no presentan problemas de corrosión.

Teniendo un poco claro ya el panorama de investigación decidimos la utilización de tres sales hidratadas: Sulfato de sodio decahidratado ($Na_2SO_4*10H_2O$), Tiosulfato de sodio pentahidratado ($Na_2S_2O_3*5H_2O$), Cloruro de magnesio hexahidratado ($MgCl_2*6H_2O$) y un material orgánico como una parafina común utilizada para la fabricación de velas, las sales inorgánica utilizadas en esta investigación fueron compradas grado analítico, en cuanto a la parafina es de tipo comercial.

Con el fin de llevar a cabo la caracterización térmica de los materiales empleados para el almacenamiento de energía térmica se empleó la técnica de análisis térmico diferencial (DTA), para obtener los puntos o rangos de fusión y la entalpia de fusión de cada uno de los materiales estudiados.

2.1 Análisis térmico diferencial (DTA).

El Análisis térmico diferencial (DTA) es una técnica que mide la diferencia de temperatura entre una muestra y un material de referencia o inerte, ambos sometidos al mismos proceso de calentamiento. La prueba se realizó a un intervalo de temperatura y a una velocidad dada de calentamiento establecida en una termobalanza Linseys 1600. En la Tabla 3 Se presentan las condiciones de operación, en las que se llevaron a cabo los análisis térmicos bajo atmósfera inerte de Argón (Ar) para cada una de las sustancias estudiadas.

Tabla 3. Condiciones para los análisis térmicos de cada material

Material	Rampa de Calentamiento (°C/min)	Peso de la muestra (mg)	Temperatura final (°C)
$Na_2SO_4*10H_2O$	2.1	≈15	50
$Na_2S_2O_3*5H_2O$	3.7	≈15	70
$MgCl_2*6H_2O$	3.5	≈15	130
Parafina	3.5	≈15	70

En las Figuras 2 se comparan las gráficas de flujo de calor versus temperatura obtenidas en el equipo (DTA), para cada uno de los materiales empleados en el estudio.

Al observar la Figura 2 (a) se presenta el análisis realizado para el Sulfato de Sodio decahidratado, en la gráfica se nota una concavidad en un rago de temperatura entre 34°C y 40°C, la cual evidencia el cambio de estado (sólido a líquido) experimentado por el material, a una tempertura aproximada de 36°C se puede considerar como el punto de fusión del material.

En la figura 2 (b) se presenta el analisis realizado el Tiosulfato de sodio pentahidratado, presentando un intervalo de fusión aproximadamente entre los 49°C y los 65°C, con un detrimento a los 56°C aproximadamente evidenciando la temperatura de fusión del material.

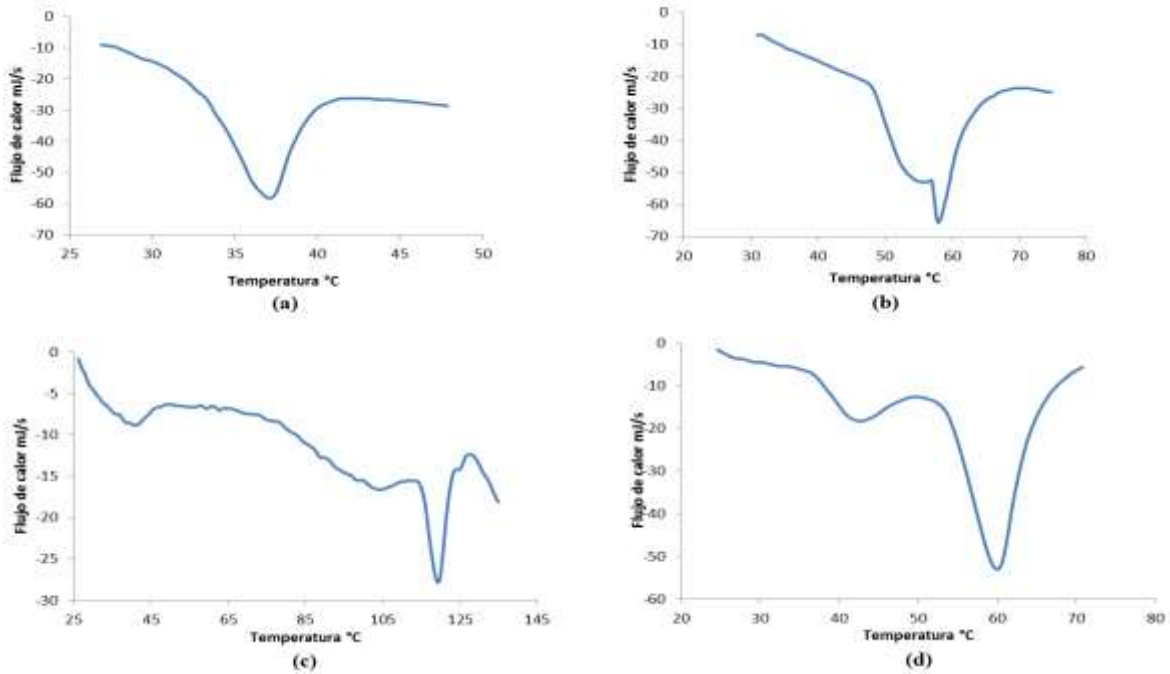


Figura 2. DTA para los diferentes materiales utilizados en el estudio (a) Sulfato de sodio decahidratado. (b) Tiosulfato de sodio pentahidratado. (c) Cloruro de magnesio hexahidratado. y (d) Parafina

En la parte (c) de la Figura 2 se observa el diagrama para el Cloruro de magnesio hexahidratado, en el que se evidencian 3 señales significativas para el estudio, la primera concavidad se presenta aproximadamente a los 40 °C, la cual puede atribuirse a un proceso de desorción del agua de hidratación contenida en material, la segunada concavidad se presenta aproximadamente a los 105°C, temperatura a la cual, el agua de hidartación desorvida experimeta una cambio de fase de liquido a gas y el tercer detrimento, se le atribuye al cambio de fase de solido a liquido que experimenta el material aproximadamente a unos los 120 °C, el cual es mucho más notorio y significativo que los anteriores.

En figura 2 (d) se ilustra el diagrama de flujo de calor contra la temperatura para una parafina de uso común, en la que se presentan dos detrimentos claros evidenciando que está, es una mezla de hidrocarbuos de alto peso molecular, por lo que para este material no se puede hablar de una tempertura de fusión si no de un intervalo de fusión, que en este caso esta entre los (47 – 60 °C), para este estudio en particular, se tomó como temperatura de fusión la temperatura del detrimento más notorio ya a esta temperatura (≈ 57°C) se garantiza que toda la parafina presente cambio de fase.

En la tabla **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta un resumen de algunas propiedades térmicas como la temperatura de fusión y entalpia de fusión, encontradas para cada uno de los materiales estudiados, asi como tambien datos teóricos de temperaturas de fusión, con el fin de comparar los datos obtenidos en la bibligrafía con los datos obtenidos experimentalmente.

Tabla 4. Caracterización térmica del material.

Material	T. fusión [°C].	T. Onset [°C].	T. Offset [°C].	∆H de fusión [J/g].	T.fusión teórica[2] [°C]
Sulfato de sodio decahidratado.	35.8	34	40.6	245.4868	32
Tiosulfato de sodio pentahidratado.	57.3	55.3	62.2	324.3181	57
Cloruro de magnesio hexahidratado.	116.7	114.2	123.1	340.3032	117
Parafina.	57.4	52.7	64.6	325.5396	-

Al comparar los datos de punto de fusión experimentales y teóricos para el tiosulfato de sodio pentahidratado y el cloruro de magnesio hexahidratado, se puede decir que los datos obtenidos experimental guardan relación con los datos teóricos, para el caso de sulfato de sodio decahidratado hay una pequeña variación aproximadamente del 10% entre el valor del punto de fusión los cual se puede deber a que es una sustancia altamente hidroscópica

[2] Farid et al.

en comparación con las otras dos sales estudiadas, de hecho en la manipulación realizada en al laboratorio se comprobó que estas absorve agua, factor que hace que cuando se manipule esta sal pueda ser contaminada con agua contenida en el ambiente.

Al comparar los diferentes materiales de almacenamiento termico podemos analizar que tanto la parafina como el Cloruro de sodio decahidartado son buenos candidatos para el almacenamiento de energía térmica solar ya que nos dan los valores mas altos de temperatura de fusión y de calores de fusión.

3. EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE LOS MATERIALES.

Para estudiar la capacidad de almacenamiento de los diferentes materiales utilizados se realizaron los siguientes ensayos:

- Pruebas de solidificación-fusión (S-F). Con el fin de encontrar condiciones de operación en el laboratorio.
- Adición de agua en exceso. Con el fin de mejorar el proceso de fusión de los materiales.

Con el fin de estudiar el comportamiento de los diferentes materiales como sustancias almacenadora de energía térmica y encontrar en las condiciones de laboratorio, los rangos de fusión para los diferentes materiales, la capacidad de almacenamiento y cambios observados en la apariencia de estos, una vez realizado el primer ciclo de solidificación-fusión. Para realizar estas pruebas de solidificación-fusión se utilizó un montaje como el de la figura 3.

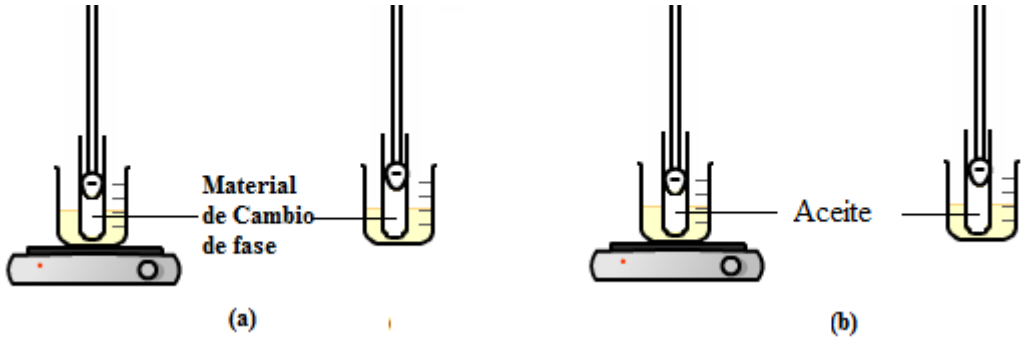


Figura 3. Montaje para las pruebas de S-F.

Las pruebas para el primer ciclo de solidificación-fusión se llevaron a cabo de la siguiente manera: En un tubo de ensayo se colocó cada uno de los materiales que se estudiaron

figura 3 (a) junto con una termocupla acoplada a una tarjeta de adquisición de datos, luego estos tubos de ensayo fueron sometido a calentamiento en un baño maría con agua como fluido de transferencia de calor, con el fin de mantener homogénea la temperatura dentro de los materiales de cambio de fase, este procedimiento de realizó tanto para el sulfato de sodio decahidratado, tiosulfato de sodio pentahidratado como para la parafina y en el caso del cloruro de magnesio hexahidratado el fluido de transferencia de calor es un aceite térmico, este calentamiento se realizó hasta que se percibiera un cambio de estado de solido a líquido (fusión) en los materiales anteriormente mencionados, en la tabla 5 están estos valores de temperaturas (Ver figuras 4-7). Seguido de esto los tubos de ensayos de llevaron a un vaso de precipitado, que contenía agua a una temperatura de 20°C y una termocupla, con el fin de censar el cambio de temperatura experimentada por el agua cuando se colocan en contacto con el tubo que contiene cada uno de los materiales hasta alcanzar el equilibrio térmico; para así poder calcular la energía térmica entregada por cada uno de los materiales estudiados, con el fin de comparar la capacidad de almacenamiento de estos materiales se realizó el procedimiento descrito anteriormente utilizando un aceite térmico en vez del material de cambio de fase figura 3 (b).

En el caso de sulfato de sodio y del tiosulfato de sodio se apreció que el agua de hidratación de la sal se separó; por lo tanto, fue necesario agregar un exceso de agua y realizar varias pruebas. Se encontró que para el caso del sulfato de sodio decahidratado fue necesario la adición de un 10% adicional de agua [18] y para el tiosulfato de sodio pentahidratado se encontró que fue necesario un 11% de agua en exceso.

En la Tabla 5 se reportan las condiciones en las que realizamos el primer ciclo de solidificación-fusión así como la cantidad de agua que se le adición a cada material con el fin de que no se presentara precipitación de la sal.

.

Tabla 5. Condiciones para el primer ciclo de solidificación-fusión de los materiales

Material	T. del baño (°C)	T. del baño inverso (°C)	Cantidad (mg)	Cantidad de agua. (ml)

$Na_2SO_4*10H_2O$	55	18	10.001	3.33
$Na_2S_2O_3*5H_2O$	55	20	10.025	2.10
$MgCl_2*6H_2O$	120	20	10.051	No
Parafina	60	20	10.061	No

Se analizó un primer ciclo de solidificación-fusión con el fin de calcular la energía entregada por los materiales de cambio de fase y se comparó la energía almacenada en estos materiales bajo las mismas condiciones de operación. Este procedimiento se realizó haciendo el seguimiento térmico tanto para el material de cambio de fase como al agua de enfriamiento.

Para calcular la capacidad de almacenamiento del material, se parte del principio de conservación de energía, sin considerar pérdidas con los alrededores ya que las temperaturas en la que estamos trabajando los materiales, no son tan altas comparadas con la temperatura ambiente; estos cálculos se realizaron para 4 procesos diferentes de Fusión – Solidificación de los materiales y la capacidad de almacenamiento del material se calculó promediando estos 4 procesos para cada material.

$$E_{Entregada} = E_{Almacenada} \tag{1}$$

$$\frac{E_{Entregada}}{m} = \left[\frac{\int_{t_0}^{t_f} \Delta T(t) dt}{\left[t_f - t_0 \right]} \right] * C_p \tag{2}$$

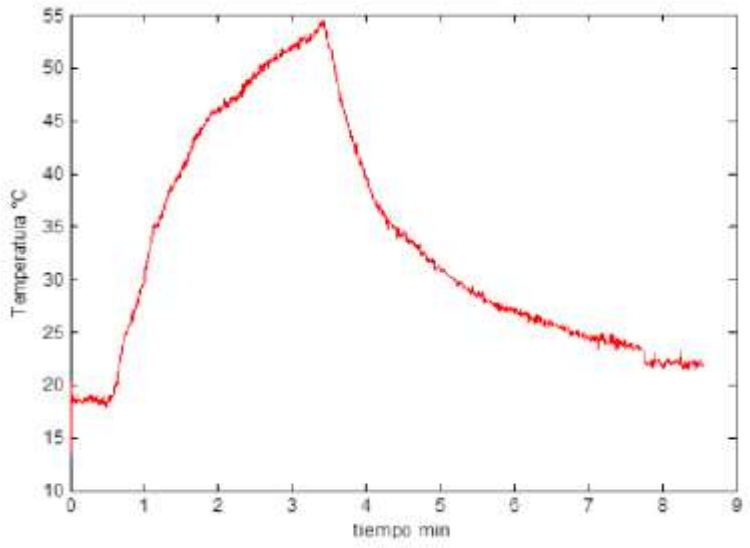


Figura 4. Primer ciclo de S-F para el - Sulfato de sodio decahidratado.

En la figura 4 se ilustra la evolución de la temperatura durante el primer ciclo de solidificación-fusión del Sulfato de sodio decahidratado para el cual se obtiene la siguiente línea de tendencia $T(t) = -2E\text{-}09t^4 + 5E\text{-}06t^3 - 0{,}003t^2 + 0{,}6321t + 6{,}0768$, con un coeficiente de correlación $R^2 = 0{,}9083$ y con una capacidad de almacenamiento promedio de 148.5627 kJ/kg.

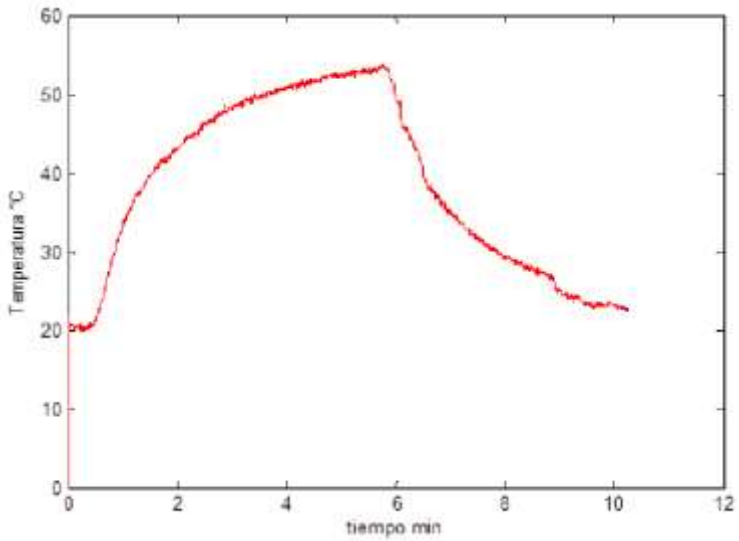


Figura 5. Primer ciclo de fusión-solidificación para - el Tiosulfato de Sodio pentahidratado.

En la figura 5 se ilustra la evolución de la temperatura durante el primer ciclo de solidificación-fusión para el Tiosulfato de Sodio pentahidratado para el cual se obtiene la siguiente línea de tendencia $T(t) = 2E\text{-}09t^4 - 2E\text{-}06t^3 - 6E\text{-}05t^2 + 0{,}2347t + 17{,}786$, con un coeficiente de correlación $R^2 = 0{,}9636$ y con una capacidad de almacenamiento promedio de 170,8059 kJ/kg.

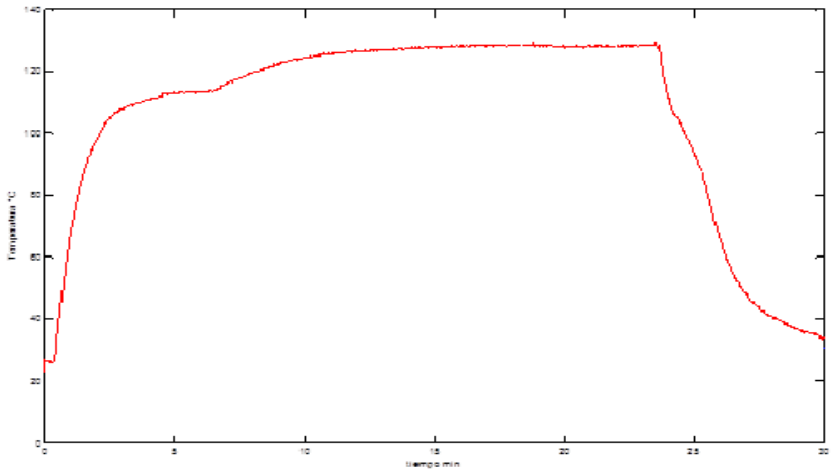


Figura 6. Primer ciclo de fusión-solidificación para - el Cloruro de Magnesio hexahidratado

.

En la figura 6 se puede ver el primer ciclo de solidificación-fusión para el Cloruro de Magnesio hexahidratado para el cual se obtiene la siguiente línea de tendencia T(t) = -

$0{,}003t^4 + 0{,}1622t^3 - 3{,}1461t^2 + 26{,}399t + 43{,}168$, con un coeficiente de correlación $R^2 = 0{,}9319$ y con una capacidad de almacenamiento promedio de 347.6868 kJ/kg.

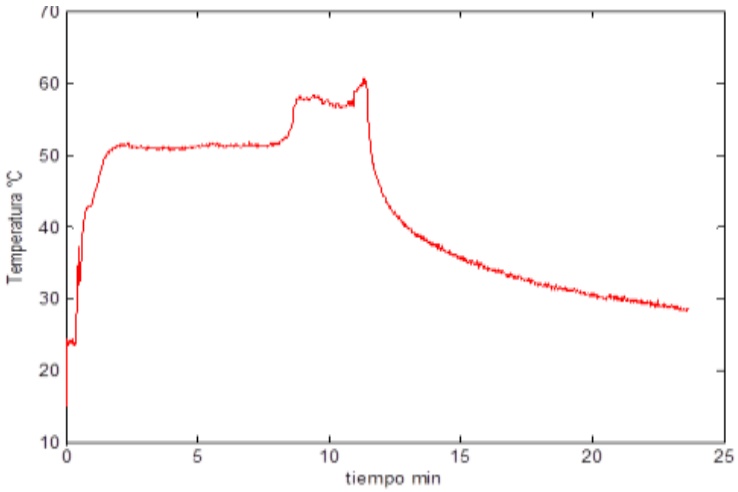


Figura 7. Primer ciclo de fusión-solidificación para la parafina

En la figura 7 se ilustra la evolución de la temperatura durante el primer ciclo de solidificación-fusión de la parafina de uso común para el cual se obtiene la siguiente línea de tendencia $T(t) = -1E\text{-}04t^4 + 0{,}0223t^3 - 0{,}8002t^2 + 7{,}6434t + 33{,}45$, con un coeficiente de correlación $R^2 = 0.8631$ y con una capacidad de almacenamiento promedio de 181.6268 kJ/kg.

Analizando los procesos realizados experimentalmente se observó que para el primer ciclo de fusión–solidificación las sales hidratadas, presentaban dos fases al finalizar este proceso, lo cual indica que hay un proceso alterno de desorción del agua de hidratación; este proceso también se pudo observar en los DTA realizados. En la tabla 6 se suministra un resumen de los datos encontrados para el primer ciclo de Fusión-Solidificación de los materiales y se compara la energía almacenado en los materiales con un aceite térmico común; al realizar esta comparación se obtiene que la parafina almacena mayor cantidad de energía que el aceite tratado bajo las mismas condiciones de calentamiento.

Tabla 6. Capacidad de almacenamiento y temperatura de fusión experimental.

Material	**T. experimental de fusión °C.**	**Energía almacenada kJ/kg**	**Energía almacenada en el aceite kJ/kg**	**Cp**
Sulfato de sodio decahidratado.	34	148.6	160.9	32.8
Tiosulfato de sodio pentahidratado.	57.3	170.8	170.8	86.2[3]
Parafina.	53.1	181.6	170.8	NA
Cloruro de magnesio hexahidratado.	113.9	347.7	347.6	71.1[3]

En la figura 8 se presenta el proceso de solidificación de los diferentes materiales de cambio de fase, con el fin de comparar como se da este proceso en los diferentes materiales, se compara el comportamiento de los diferentes materiales estudiados en el proceso de solidificación. El Tiosulfato de sodio pentahidratado presenta una reducción gradual de la temperatura en comparación con los otros materiales estudiados, el cloruro de magnesio hexahidratado tiene punto de fusión más alto y en su perfil de temperatura se aprecia el cambio de estado del material, al comparar las gráficas de las sales hidratadas con la de la parafina encontramos que esta puede ser utlizada como sustancia almacenadora de energía.

[3] Perry tabla 2-194

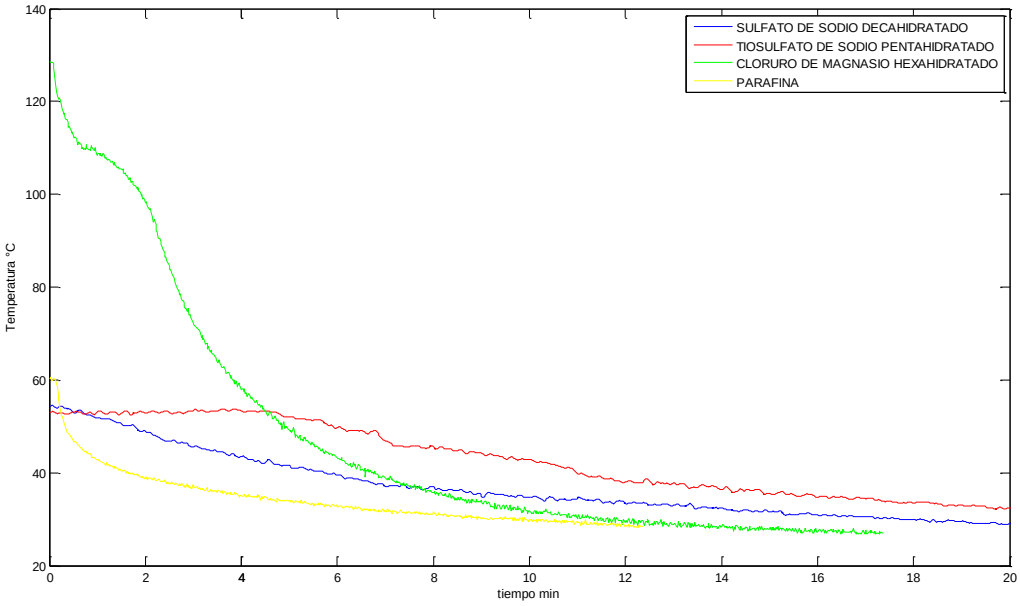


Figura 8. Proceso de solidificación de los diferentes materiales de cambio de fase.

Experimentalmente se pudo observar que para el caso del sulfato de sodio decahidratado y para el tiosulfato de sodio pentahidratado, que una vez realizado este primer ciclo de solidificación-fusión hubo desorción del agua de hidratación de esto materiales, realizando una revisión del estado del arte en relación a este tema encontramos que una adición de agua aproximada el 11% mejora la estabilidad de estos materiales ya que no se presentan problemas de segregación una vez adicion de esta.

En la figura 9 se presentan las curvas de evolución de la temperatura de enfriamiento de (a) Sulfato de sodio decahidratado. (b) Tiosulfato de sodio pentahidratado. (c) Parafina y (d) Cloruro de sodio hexahidratado junto con la temperatura agua de enfriamiento de los materiales respectivamente cuando se colocan en contacto hasta tener el equilibrio térmico entre los materiales y el agua de enfriamiento.

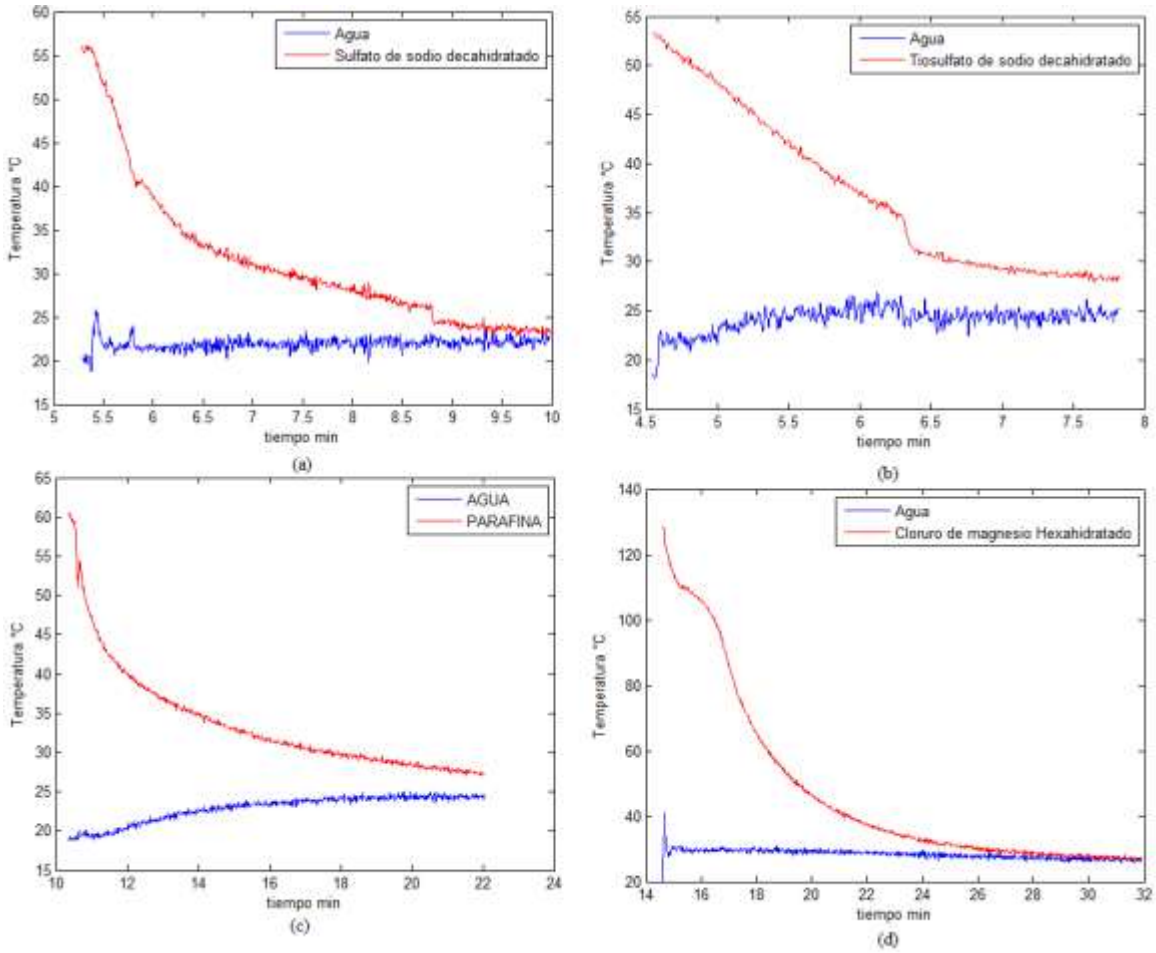


Figura 9. Evolución de la temperatura entre los diferentes materiales cambio de fase y el agua cuando se colocan en contacto.

Al analizar la figura 9 se puede observar que tanto para el (a) Sulfato de sodio decahidratado, el (b) Tiosulfato de Sodio pentahidratado, y para el (d) Cloruro de sodio hexahidratado en curva de enfriamiento hay indicios de un cambio de fase de los materiales al estar en contacto con agua a temperatura ambiente comprobándose así el almacenamiento tanto de calor sensible como de calor latente de los materiales estudiados.

Para el caso del Sulfato de sodio decahidratado (Figura 9(a)) encontramos que para este primer ciclo de almacenamiento la temperatura en la que se da el cambio de fase es aproximadamente 40 °C, en los análisis de DTA la temperatura de fusión del material es de 36 °C, esta variación en el punto de fusión puede deber principalmente a la adición extra de agua o problemas de estabilidad de la sal (subenfriamiento); para el Tiosulfato de

sodio pentahidratado (Figura 9(b)) el descenso aproximadamente de 12°C en la de fusión del material al compararlo con la posible temperatura de fusión que se encontró en el análisis térmico diferencial, este fenómeno se puede atribuir al exceso de agua que se le adiciono al material , este exceso de agua favoreció a la solubilización de la sal, por lo tanto el Tiosulfato de sodio pentahidratado no sufrió un cambio de fase.

Mientras que la curva para el Cloruro de magnesio hexahidratado (Figura 9(d)) observa un cambio de estado notorio del material aproximadamente a los 115°C y la temperatura de fusión que arrojo el análisis térmico diferencial (DTA) fue de 116.7 °C, comparando los dos datos de temperatura de fusión analizamos que comportamiento presentado por dicha sal es el esperado ya que esta sal es más estable que las dos anteriormente mencionadas.

Para la parafina (Figura 9(c)) en este caso no se alcanza a preciar un cabio en la trayectoria de curva que nos indique un cambio de estado, esto debe básicamente a que como se apreció en el análisis térmico diferencial (DTA), esta parafina no es una sustancia pura si no una mezcla de diferentes hidrocarburos de alto peso molecular, por esta razón la parafina comercial para la fabricación de velas no tiene un punto fusión definido como tal si no un intervalo de fusión, por lo cual en esta primera curva de almacenamiento de energía térmica no se puede distinguir el cambio de fase.

Con el fin de comparar el proceso de almacenamiento de energía en cada uno de los materiales se realiza un primer ciclo de solidificación – fusión para un aceite térmico tratado bajo las mismas condiciones en las que se trataron cada uno de los materiales y se monitorio la evolución en la temperatura del aceite y el agua de enfriamiento de este, luego se compararon mediante graficas la temperatura del agua de enfriamiento tanto de los materiales como para el agua de enfriamiento del aceite, también se realizó la diferencia de temperatura entre el material de cambio fase en la etapa de solidificación con el agua de enfriamiento junto con la diferencia entre la temperatura de aceite y el agua de enfriamiento, con el fin de analizar como son los coeficientes de transferencia de calor en cada uno de los sistemas con materia de cambio fase y con aceite, por último se calculó la energía real acumulada en los materiales de cambio de fase para compararla con energía que puede almacenar un aceite térmico común.

Para seguir analizando el comportamiento de las sales como sustancias capaces de entregar la energía térmica almacenada tanto sensible como latente, se continua con la siguiente parte del procedimiento, en la cual se censa la temperatura en el proceso de enfriamiento tanto para los materiales de cambio de fase estudiados como para el agua a la cual se va a transferir la energía almacenada en los materiales, en la figuras 10-13 se presenta la energía almenada en cada material y el tiempo en el que se tardan los dos sistemas en alcanzar el equilibrio térmico cuando se encuentran en contacto.

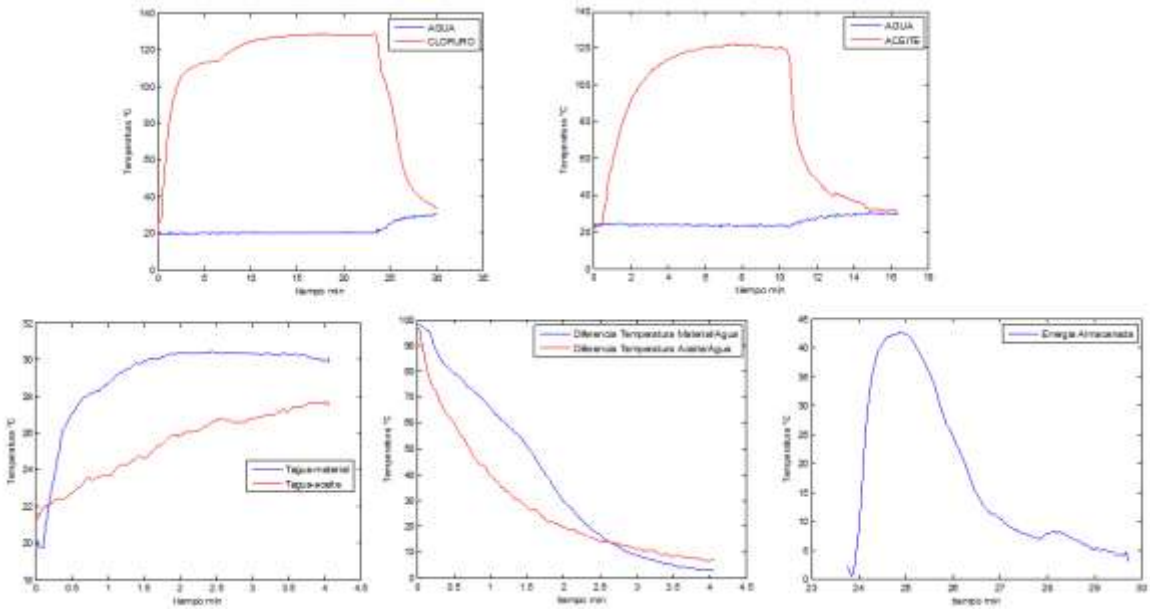


Figura 10. Energía transferida por el cloruro de magnesio hexahidratado y el aceite, al agua de enfriamiento y la energía almacenada en el material.

Al analizar el comportamiento térmico de los diferentes materiales frente al comportamiento de un aceite térmico mostrados en las figuras de la 10 hasta 13 se puede percibir que en general para los sistemas de almacenamiento de energía con materiales de cambio de fase, la acumulación de energía es mayor que el experimentado por el sistema que contiene aceite térmico, al igual se puede observar que los coeficientes de transferencia de calor en el caso de los sistemas con los materiales de cambio de fase deben ser mayores que los coeficientes de transferencia de calor para el mismo sistema pero trabajado con aceite.

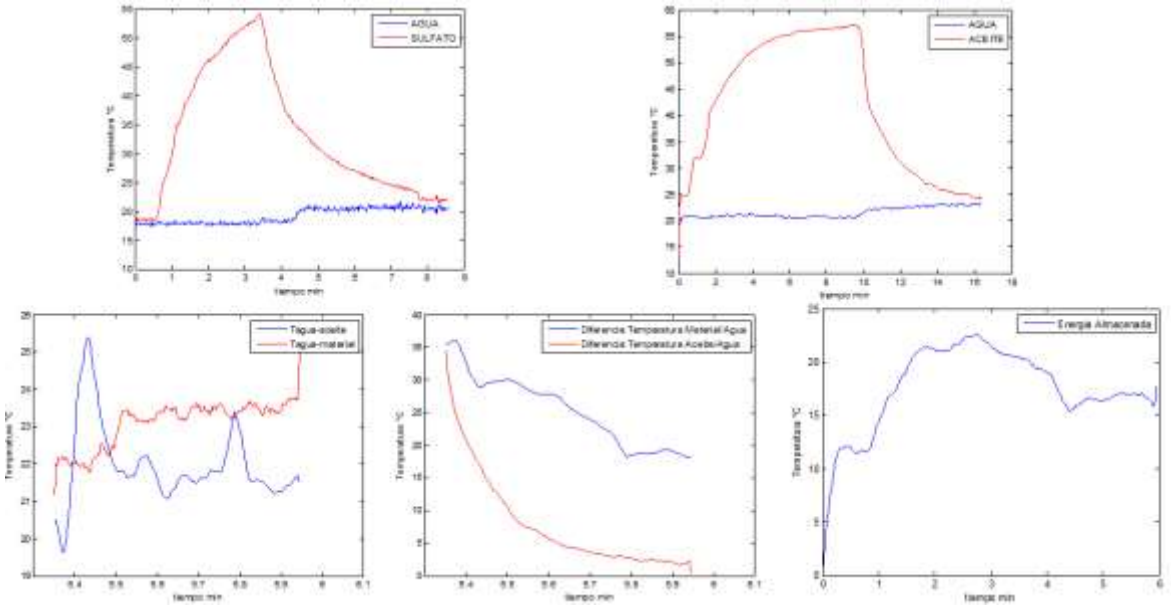


Figura 11. Energía transferida por el sulfato de sodio decahidratado y el aceite, al agua de enfriamiento y la energía almacenada en el material.

Al comparar el proceso de enfriamiento del sistema con material - calentamiento del agua de enfriamiento para los sistemas de con materiales de cambio de fase y al realizar la diferencia entre estas dos temperatura, encontramos que esta diferencia de temperatura cae más lentamente (menor pendiente), para los sistemas en el que se utiliza materiales de cambio de fase, que para el enfriamiento de aceite – calentamiento del agua de enfriamiento, lo que se traduce que la utilización de estos materiales hace más eficiente la entrega de energía almacenada.

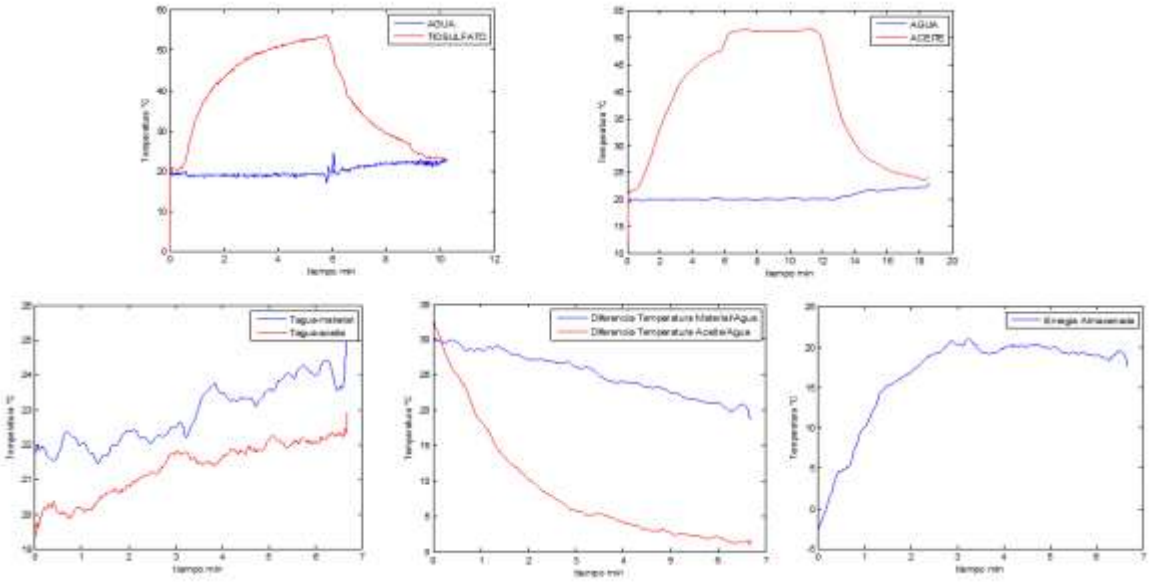


Figura 12. Energía transferida por el tiosulfato de sodio pentahidratado y el aceite, al agua de enfriamiento y la energía almacenada en el material.

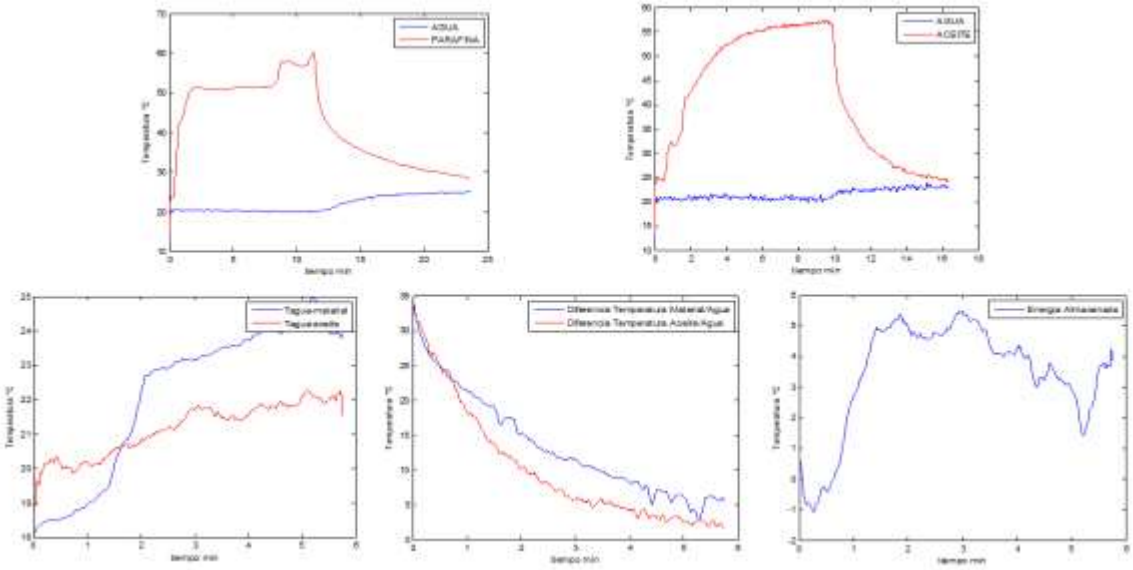


Figura 13. Energía transferida por la parafina y el aceite, al agua de enfriamiento y la energía almacenada en el material.

Así mismo al comparar los sistemas con materiales de origen inorgánico estos entregan más eficientemente la energía acumulada que el sistema que utiliza materiales de origen orgánico (parafina), lo que se ve reflejado en la diferencia entre energía almacenada en el material y en el aceite que para el caso de la parafina en el menor. En caso de sistema

que utiliza el cloruro de magnesio hexahidratado se observa que presenta una mayor cantidad de energía acumulada debida básicamente al cambio de fase.

En la tabla 7 se describen de manera resumida los resultados comparativos entre los diferentes materiales empleados en la investigación con el aceite térmico tratado bajos las mismas condiciones de calentamiento y enfriamiento.

Tabla 7. Comparación de la energía transferida por los PCM y el aceite y la energía almacenada en los materiales de cambio de fase.

Material	**T. experimental de fusión °C.**	**Energía transferida del PCM-Agua kJ/kg**	**Energía transferida del Aceite-Agua kJ/kg**	**Diferencia entre energía almacenada en el material y un aceite kJ/kg**
$Na_2SO_4*10H_2O$	34.0	148.6	140.8	50.61
$Na_2S_2O_3*5H_2O$	57.3	170.8	168.7	75.3
Parafina.	53.1	181.6	170.8	14.3
$MgCl_2*6H_2O$	113.9	347.7	347.7	75.4

Al comparar la diferencia entre la energía almacenada en los materiales de cambio de fase y el aceite observamos que para el caso del tiosulfato de sodio pentahidratado y para el cloruro de magnesio notamos que esta diferencia es prácticamente la misma lo que indica que el tiosulfato de sodio pentahidratado se comporta bien como sustancia almacenadora de energía ya que la temperatura de trabajo de este fue menor que la del cloruro magnesio hexahidratado, por otra parte, comparar la diferencia entre la parafina y el aceite notamos que esta diferencia no están marcada ya que los dos materiales son de origen orgánicos y la diferencia entre dos se debe básicamente al cambio de fase que experimenta la parafina.

4. ESTUDIOS DE LOS CICLOS DE ALMACENAMIENTO PARA LOS DIFERENTES MATERIALES EMPLEADOS.

Una vez caracterizados térmicamente los materiales de cambio de fase estudiamos el comportamiento que estos tienen después de 150 ciclos de solidificación-fusión, con el fin de detectar cambios en el perfil de temperatura de los diferentes materiales que nos indiquen degradación de los materiales. En las figura 14 (a) se presentan 12 ciclos de solidificación-fusión entre el ciclo 74 y el 86 para el Sulfato de sodio decahidratado; en la parte (b) se presentan 7 ciclos de solidificación-fusión entre el ciclo 74 y el 80 para el Tiosulfato de Sodio; (c) se presentan 12 ciclos de solidificación-fusión entre el ciclo 70 y el 82 para el Cloruro de Magnesio hexahidratado y en la parte (d) se presentan 14 ciclos de solidificación-fusión entre el ciclo 70 y el 84 para la parafina.

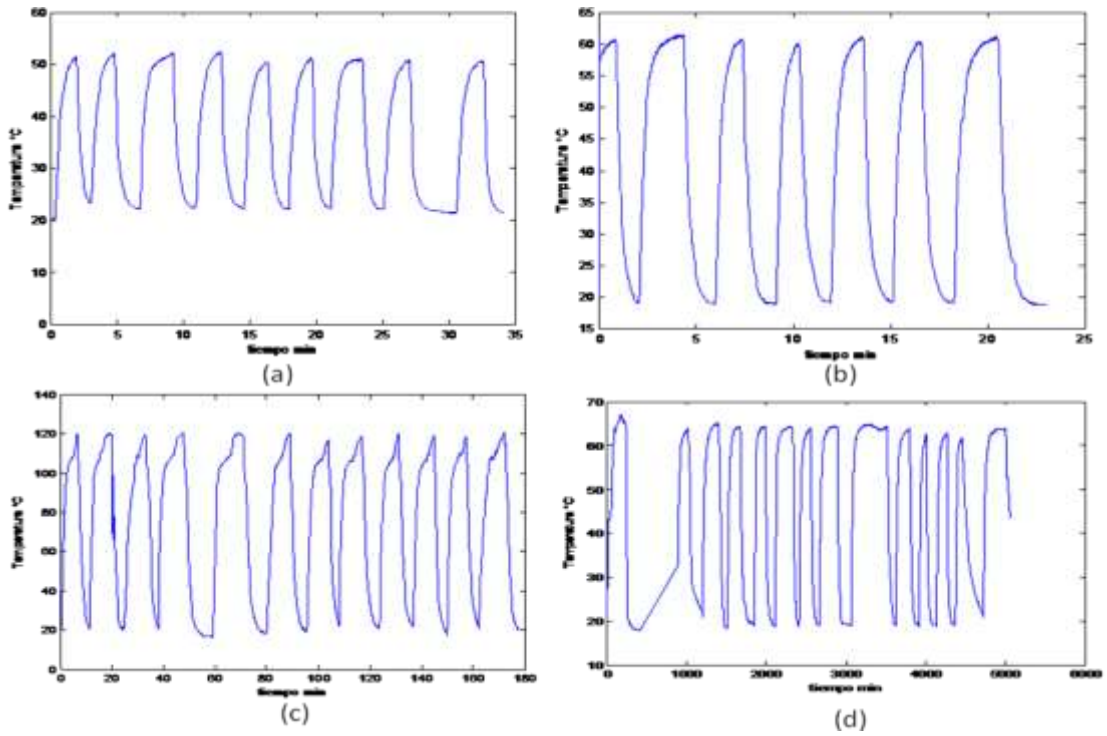


Figura 14. Ciclos de solidificación-fusión de los diferentes materiales (a) Sulfato de sodio decahidratado. (b) Tiosulfato de sodio pentahidratado. (c) Cloruro de magnesio hexahidratado y (d) Parafina

En las figura 14 (a) y (b) se presentan algunos ciclos de solidificación-fusión para el sulfato de sodio decahidratado (figura 14 (a)) y para el tiosulfato de sodio pentahidratado (figura 14 (b)), el comportamiento térmico de estos materiales es repetitivo tras varios ciclos de solidificación-fusión, para ambos materiales no se percibe un punto claro de fusión, por lo tanto no se evidencia un cambio de fase de estos material, esto se debe a la adición de agua extra, esta adición lo que hace es que la sal solubilice en el agua desorbida y adicionada, también a que los ciclos de solidificación-fusión fueron relativamente rápidos como para que se alcance a detectar un cambio de fase en el material. En el caso del Sulfato de sodio decahidratado que en la figura 14 (a) se evidenció un cambio de fase, se puede decir que trascurridos varios ciclos de solidificación-fusión la sal sigue presentando problemas de estabilidad y que le 10% adicional de agua que se le adicionó no corrige el problema de segregación de la sal.

En la figura 14 (c) se presentan ciclos de Solidificación – Fusión para el cloruro de magnesio hexahidratado para esta el comportamiento en los diferentes ciclos es repetitivo, por lo que podemos decir que para 15 ciclos de solidificación - fusión este material no presenta problemas de estabilidad quimica, al analizar las gráficas observamos claramente el proceso de calentamiento del material un cambio de fase aproximadamente a los 113°C, comportamiento que es coherente con lo reflejado en la figura 14 (d), en el proceso de enfriamiento en los diferentes ciclos no se alcanza a percibir ese cambio de fase que sufre el material ya que este proceso de enfriamiento se dio de manera muy rápida.

En la figura 14 (d) se presentan ciclos de solidificación – fusión para la parafina para este material de cambio de fase de origen orgánico al igual que para los otros materiales, el comportamiento tras varios ciclos de calentamiento enfriamiento es muy parecido al experimentado por el cloruro de magnesio hexahidratado, por que podemos concluir que para este material hay repetitividad en los ciclos evaluados, observandose una variación en las curvas de calentamiento alrededor de los 60°C, lo cual indica un cambio de fase en el material, en [21] estudiaron el comportamiento de dos tipos de ceras de parafina, concluyendo que para 1000 ciclos de solidificación-fusión estos materiales no presentaban un cambio significativo en su comportamiento térmico.

4.1 Preparación de mezclas de materiales.

Teniendo en cuenta la información suministrada por la figuras 4, 5, 6, 7, 8 y 14, las observaciones experimentales y la bibliografía sobre el tema, se plantea la preparación de mezclas con el cloruro de magnesio hexahidratado y el sulfato de sodio pentahidratado como lo indica la tabla 7 y en las figuras 15, se presentan varios ciclos de solidificación-fusión para cada una de estas mezclas, en las mezclas realizadas no se tuvo en cuenta el Tiosulfato de sodio pentahidratado, ya que esta sal hidratada presentan problemas de inestabilidad química (Figura 14 (b)).

Tabla 8. Mezcla de materiales entre el cloruro de magnesio hexahidratado y el sulfato de sodio pentahidratado.

Mezclas	**% Cloruro de magnesio Hexahidratado.**	**% Sulfato de sodio decahidratato**
M85S15	85	15
M9S1	90	10
M83S17	83	17

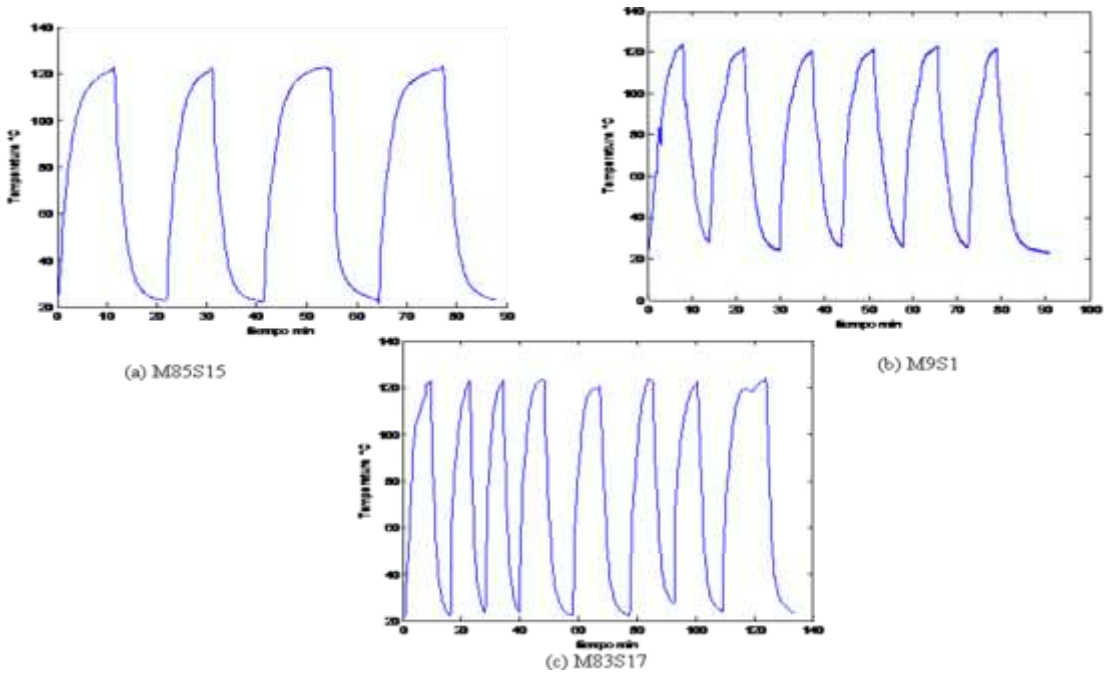


Figura 15. Ciclos de solidificación-fusión para las mezclas de materiales.

Al analizar la figura 15 observamos que solo para la mezcla de 90% Cloruro de magnesio hexahidratado y 10% Sulfato de sodio decahidratado se evidencia un cambio de fase alrededor de los 100°C, factor que es muy importante en este estudio ya que lo que se quiere son sustancia que almacenen tanto calor sensible como latente, al estudiar un primer ciclo de solidificación-fusión de esta mezcla encontramos el perfil de temperatura que se presenta en la figura 16.

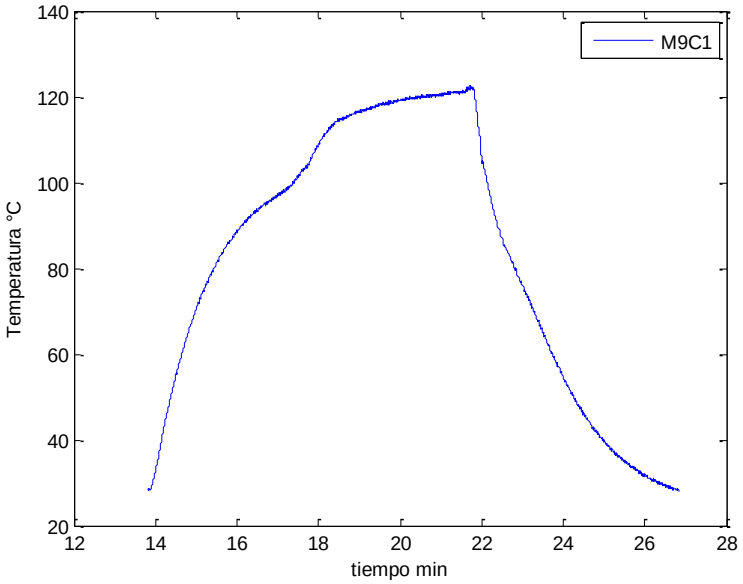


Figura 16. Primer ciclo de solidificación – fusión para la mezcla M9S1

En la figura 16 se puede percibir mejor el cambio que experimenta la curva de calentamiento de la mezcla, evidenciando así un cambio de fase en ésta. Al realizar los cálculos encontramos una capacidad de almacenamiento de energía promedio de 342.2767 kJ/kg al compararla con la capacidad de almacenamiento del cloruro de magnesio hexahidratado encontramos que hay una disminución de aproximadamente 1.5% en esta propiedad, mientras que para la temperatura de fusión encontramos una disminución aproximada del 13%. Aunque esta mezcla tiene propiedades que la hacen susceptible para el utilizar la como sustancia almacenadora de energía, en este estudio no

la utilizaremos ya que la idea es utilizar energía solar para el calentamiento de estos materiales.

4.2 Equipo de almacenamiento de energía térmica solar

En esta parte se pretende analizar algunas de las variables a tener en cuenta para el diseño del prototipo experimental en el que se realizaron las pruebas de almacenamiento de energía térmica solar para el calentamiento de agua de uso doméstico, y luego se exhiben resultados para las pruebas realizadas con el equipo, utilizando como material de cambio de fase una parafina comercial.

Para el almacenamiento de energía térmica solar se realizó el diseño de un intercambiador de calor el cual consta de un taque aislado térmicamente, que en su interior contiene cuatro tubos con una longitud de 26 cm y un diámetro de 6 cm en los cuales se almacenó el material de cambio fase (parafina) y en el espacio vacío entre tanque y los tubos con el material había agua como fluido de transferencia de calor; esta agua se calentaba con energía solar, por lo que se realizó un acople por medio de una bomba de succión entre el tanque y un panel solar, la entrada de agua al tanque proveniente del panel que se colocó en la superior de este, y la salida de agua para calentar en el panel se colocó en la parte inferior del tanque; como se evidencia en la figura 17, la capacidad de almacenamiento de agua en el tanque es de aproximadamente 250 litros y la capacidad de almacenamiento de los PCM contenido en los tubos es de aproximadamente de 2.7 litros. Se utilizó acero inoxidable como material para la construcción del tanque almacenamiento como para los tubos donde va el material de cambio de fase (PCM) [6] y [12]. Como la variable que nos interesa medir es la temperatura, se dispusieron de cuatro termocuplas acopladas al intercambiador de calor organizadas de la siguiente manera: una termocuplas en parte superior e inferior del tanque de almacenamiento de agua con fin de analizar la temperatura del agua dentro del tanque y dos termocuplas dentro del tubos para censar la temperatura dentro del material de cambio fase para poder percibir almacenamiento de energía en forma de calor sensible y latente; estas termocuplas se conectaron a un software de la National Instruments labVIEW 2009 SP1, en el cual se realizó un programa para

adquisición y almacenamiento de datos, además de realizar un tratamiento estadístico de los datos adquiridos, para su posterior almacenamiento en los archivos de texto generados.

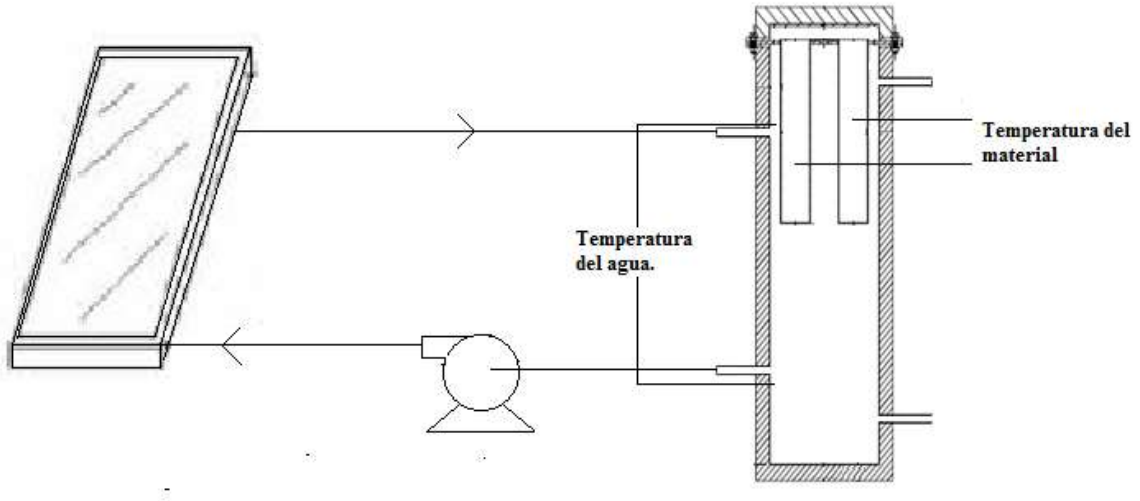


Figura 17. Diseño experimental para el tanque para el almacenamiento de energía térmica solar.

En la figura 18 se presentan los perfiles de temperatura dentro del intercambiador de calor obtenidos durante un ciclo de fusión-solidificación, en este ciclo el agua recirculó entre el tanque intercambiador de calor y al panel solar hasta alcanzar la máxima temperatura suministrada por el colector solar, para este caso es de aproximadamente 60 °C , luego es apagada la bomba que permite esta recirculación, después de haber transcurrido un tiempo aproximado 6 horas, el cual es el número de horas promedio de brillo solar para el municipio de Medellín entre los meses (Marzo y Mayo) [20] y se deja el sistema en reposo para analizar el tiempo que transcurre hasta alcanzar el equilibrio térmico entre el agua de calentamiento, los materiales de cambio de fase y el medio ambiente.

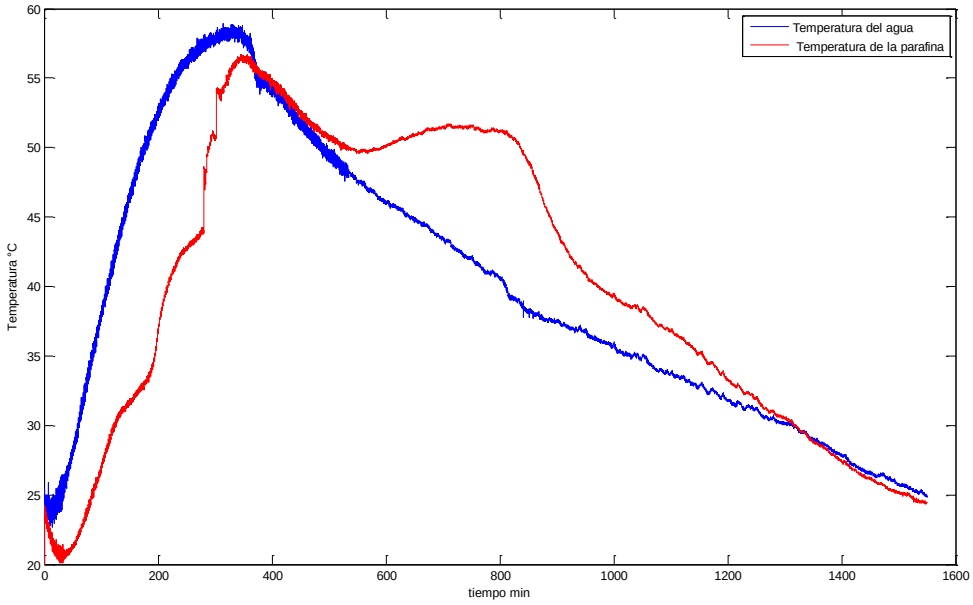


Figura 18. Temperaturas dentro del equipo de almacenamiento de energía térmica solar.

En la figura 18 se presentan los perfiles temperatura con relación al tiempo dentro del equipo de almacenamiento de calor tanto para el agua de calentamiento como para los materiales de cambio de fase, como se mencionó anteriormente se midió la temperatura en dos puntos tanto para el agua como para el material de desde el inicio del ciclo, estas dos temperaturas se promediaron arrojando una sola curva tanto para el agua como para la parafina.

Aproximadamente a los 350 min de haber iniciado la experimentación, se obtiene los valores más altos de temperaturas a partir de este punto es apagada la bomba que recircula el agua entre el intercambiador de calor y panel solar, quedando así el sistema en reposo; los 600 – 800 min hay un cambio en la tendencia de la curva del material de cambio de fase aproximadamente entre unos 52 y 53 °C, al comparar estos valores con los de la tabla 4 podemos asegurar que este cambio en la tendencia se debe al cambio de fase (Sólido – Líquido) experimentado por la parafina. Luego a los 1400 min se alcanza el equilibrio térmico del agua, la parafina y el medio ambiente.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- El Sulfato de sodio decahidratado y el Tiosulfato de sodio pentahidratado, tiene un rango bien definido en que se da el cambio de fase, según los resultados arrojados por el análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC), pero estos materiales no son óptimos para el almacenamiento de energía ya que presentan problemas como segregación y nucleación.

- La agitación y la adición de aproximadamente de 11% de agua extra al sulfato de sodio y al Tiosulfato de sodio, disminuyen visiblemente problemas de segregación presentes en el Sulfato de sodio decahidratado, para el caso del Tiosulfato de sodio pentahidratado**,** los problemas de estabilidad permanecen.

- La adición de un 11% de agua al Sulfato de sodio decahidratado y el Tiosulfato de sodio pentahidratado, hacen que estas sales se puedan usar como sustancias para el almacenamiento de energía pero solo pueden almacenar calor sensible.

- Al analizar el proceso de solidificación del Cloruro de magnesio hexahidratado se encontró que esta sal solo varia un 1.5% el punto de fusión al comparar su punto de fusión (tabla 6) con el punto de fusión obtenido después de 150 ciclos de solidificación-fusión.

- El Cloruro de Magnesio hexahidratado y la parafina son sustancias que al ser utilizadas en el almacenamiento de energía con cambio de fase, ya no se presentan problemas de segregación y/o nucleación, por lo que podemos decir que dichos materiales funden congruentemente.

- Al comparar la temperatura de enfriamiento del sistema Aceite-Agua y Material-Agua, en este último la temperatura disminuye más lentamente, por lo que podemos concluir que hay una mayor cantidad de energía en los materiales utilizados tratados bajo las mismas condiciones que un aceite térmico común tratados bajo las mismas condiciones.
- Los sistemas de almacenamiento de energía que utilizan materiales de origen inorgánicos entregan más eficientemente la energía acumulada en comparación con los sistemas que emplean materiales de origen orgánicos

- La mezcla de 90% de Cloruro de magnesio y un 10% de sulfato de sodio se tiene un punto de fusión para la mezcla de aproximadamente 100 ºC.

- Tras varios ciclos de solidificación-fusión (150), Sulfato de sodio decahidratado, el Tiosulfato de sodio pentahidratado con 11% de agua, la parafina y el cloruro de magnesio hexahidratado no sufren ningún cambio en sus propiedades térmicas.

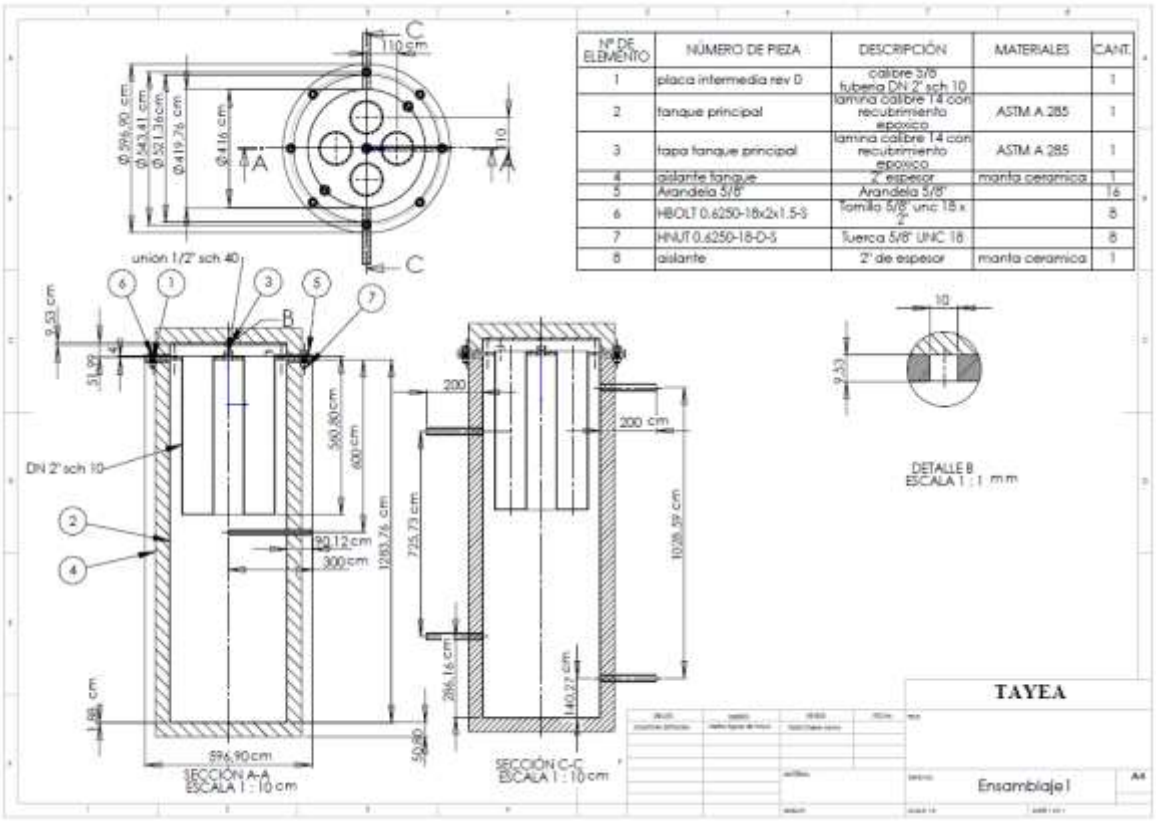
- Se logró el diseño y construcción de un sistema de almacenamiento de energía térmica solar que permite analizar el comportamiento de cualquier material como almacenador de energía, tanto por calor sensible como por calor latente obteniendo resultados muy importantes para analizar su aplicabilidad en este campo.

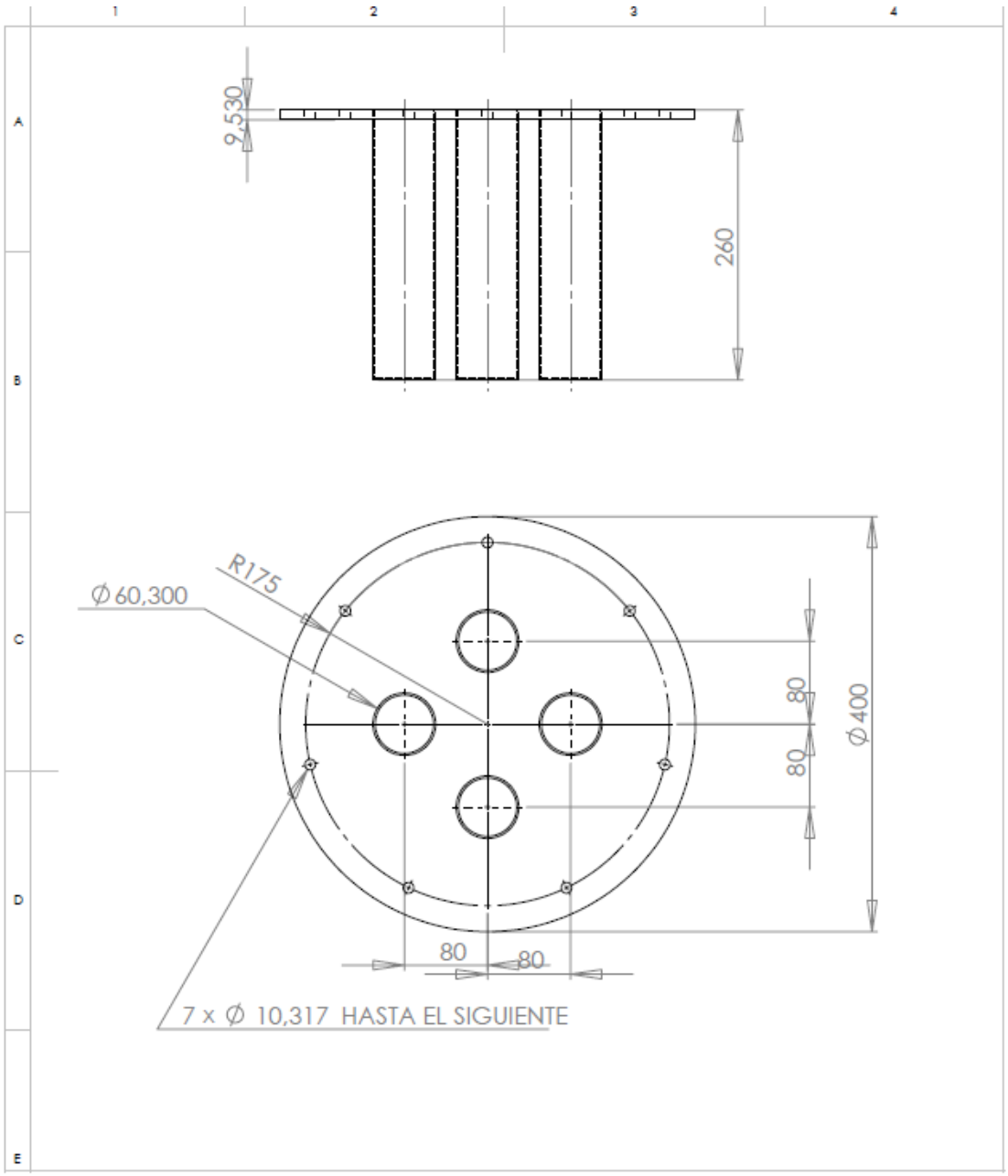
5.2 Recomendaciones

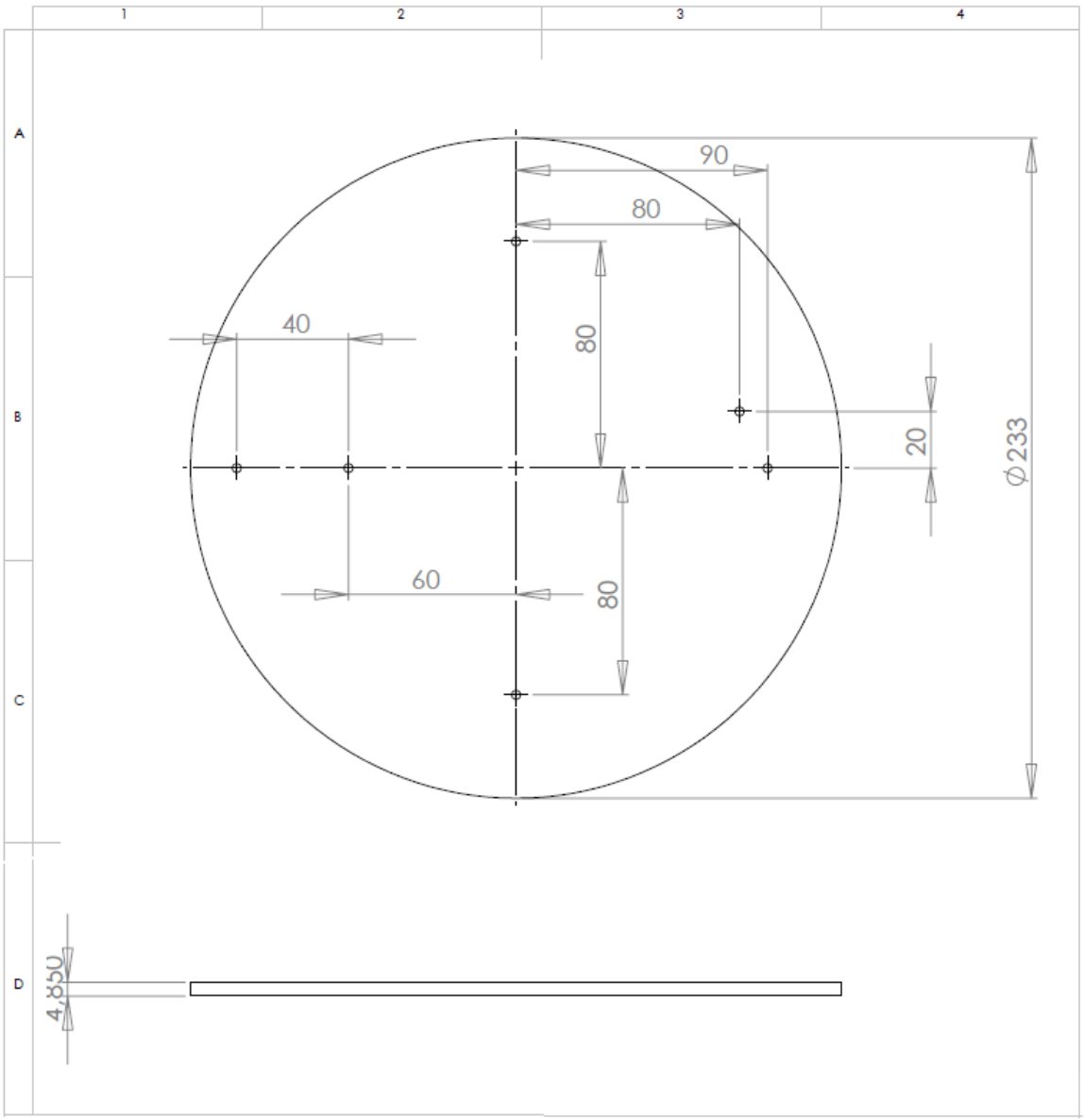
Luego de los logros obtenidos y los alcances propuestos con el proyecto se proponen algunos temas de trabajo para dar una continuidad en esta área de trabajo.

- Realizar un diseño experimental que permita la realización de mezclas en el punto eutéctico de diferentes sales hidratadas con el fin de optimizar el almacenamiento de energía térmica que presenta estos materiales.
- Experimentar con el dispositivo de almacenamiento de energías térmica solar otros materiales de cambio de pase (PCM) o mezclas de estos, cuyos rangos de temperatura de fusión estén dentro de los rangos de temperatura que me proporciona el colector solar.
- Acoplar el sistema de almacenamiento de energía, un sistema de energía fotovoltaica, con el objetivo de que el agua de recirculación entre el sistema de captación y el intercambiador de calor, sea impulsado con este tipo de energía.
- Realizar diferentes diseños en el dispositivo que contiene los materiales de cambio de fase con el fin de optimizar la transferencia de calor en el intercambiador de calor.
- Desarrollar el modelo matemático que tenga en cuanta radiación para lograr simular las condiciones reales en las que opera el equipo de almacenamiento de energía solar para optimizar las diferentes variables que participan en el proceso de captación y almacenamiento.

Anexo A: Planos del equipo de almacenamiento de energía.


Nº DE ELEMENTO | NÚMERO DE PIEZA | DESCRIPCIÓN | MATERIALES | CANT.
1 | placa intermedia rev 0 | calibre 3/8 tubería DN 2" sch 10 | | 1
2 | tanque principal | lamina calibre 14 con recubrimiento epoxico | ASTM A 285 | 1
3 | tapa tanque principal | lamina calibre 14 con recubrimiento epoxico | ASTM A 285 | 1
4 | aislante tanque | 2" espesor | manta ceramica | 1
5 | Arandela 5/8" | Arandela 5/8" | | 16
6 | HBOLT 0.6250-18x2x1.5-S | Tornillo 5/8" unc 18 x 2" | | 8
7 | HNUT 0.6250-18-D-S | Tuerca 5/8" UNC 18 | | 8
8 | aislante | 2" de espesor | manta ceramica | 1
union 1/2" sch 40
DN 2" sch 10
SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 10 cm
SECCIÓN C-C
ESCALA 1 : 10 cm
DETALLE B
ESCALA 1 : 1 mm
TAYEA
Ensamblaje1


1
2
3
4
A
B
C
D
E
9,530
260
R175
Ø 60,300
80
80
Ø 400
80
80
7 x Ø 10,317 HASTA EL SIGUIENTE


1
2
3
4
A
B
C
D
90
80
40
80
20
Ø233
60
80
4,850

Anexo B: Tablas de datos

Compound	Melting temp. (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Thermal conductivity (W/mK)	Density (kg/m^3)
Inorganics				
$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	117	168.6	0.570 (liquid, 120 °C) 0.694 (solid, 90 °C)	1450 (liquid, 120 °C) 1569 (solid, 20 °C)
$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	89	162.8	0.490 (liquid, 95 °C) 0.611 (solid, 37 °C)	1550 (liquid, 94 °C) 1636 (solid, 25 °C)
$Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$	48	265.7	0.653 (liquid, 85.7 °C) 1.225 (solid, 23 °C)	1937 (liquid, 84 °C) 2070 (solid, 24 °C)
$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	29	190.8	0.540 (liquid, 38.7 °C) 0.1.088 (solid, 23 °C)	1562 (liquid, 32 °C) 1802(solid, 24 °C)
Organics				
Paraffin wax	64	173.6	0.167 (liquid, 63.5 °C) 0.346 (solid, 33.6 °C)	790 (liquid, 65 °C) 916 (solid, 24 °C)
Polyglycol E600	22	127.2	0.189 (liquid, 38.6 °C) –	1126 (liquid, 25 °C) 1232 (solid, 4 °C)
Fatty acids				
Palmitic acid	64	185.4	0.162 (liquid, 68.4 °C) –	850 (liquid, 65 °C) 989 (solid, 24 °C)
Capric acid	32	152.7	0.153 (liquid, 38.5 °C) –	878 (liquid, 45 °C) 1004 (solid, 24 °C)
Caprylic acid	16	148.5	0.149 (liquid, 38.6 °C) –	901 (liquid, 30 °C) 981(solid, 13 °C)
Aromatics				
Naphthalene	80	147.7	0.132 (liquid, 83.8 °C) 0.341 (solid, 49.9°C)	976 (liquid, 84 °C) 1145 (solid, 20 °C)

Tabla1 Propiedades de algunos materiales

Salt hydrates	Metlting point (°C)	Melting latent heat (kJ/kg)	Specific heat c_p (kJ/kgK)		Density (kg/m^3)	Mass [kg]	Latent heat (kJ)	Sensible heat (kJ)		Total heat (kJ)	Time[a] (min.)	Produced hot water mass (kg)	Mass ratio[b]
			Solid	Liquid				Solid	Liquid				
Zinc nitrate hexahydrate	36.1	146.95	1.34	2.26	1954	211	31007	–	16166	55777	75.26	452	2.81
Sodium thiosulfate pentahydrate	48.5	208.80	1.46	2.38	1666	180	37584	920	9211	56319	76.00	456	2.83
Disodium hydrogen phosphate-dodecahydrate	35.0	278.84	1.55	2.51	1522	164	45730	–	14407	68741	92.76	557	3.45
Calcium chloride hexahydrate	29.7	169.98	1.46	2.13	1560	168	28557	–	14421	51582	69.60	418	2.59
Sodium sulfate decahydrate	32.4	254.00	1.76	3.31	1458	157	39878	–	19540	68022	91.79	551	3.42

Bibliografía

[1] Z. Belén, M. José, C. Luisa F. (2003).Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and, Applied Thermal Engineering; 23:251–83.

[2]. Farid M. M., Khudhair A. M., Razack S. A. K., Al-Hallaj S. (2004). A review on phase change energy storage: materials and applications, Energy Conversion and Management 45., 1597–1615,

[3] M. Akgün, Orhan Aydın, Kamil Kaygusuz. (2007).Experimental study on melting / solidification characteristics of a paraffin as PCM, Energy Conversion and Management. ; 48 669–678.

[4] A. Regin, S. Solanki, J. Saini. (2006).Latent heat thermal energy storage using cylindrical capsule: Numerical and experimental investigations, Renewable Energy, 31:2025-2041.

[5] A. Hoshi, D. R. Mills, A. Bittar, T. S. Saitoh. (2005). Screening of high melting point phase change materials (PCM) in solar thermal concentrating technology based on CLFR. Solar Energy; 79:332–339.

[6] M. Mazman, L. Cabeza, H. Mehling. (2009). Utilization of phase change materials in solar domestic hot water systems. Renewable Energy; 34: 1639–1643.

[7] D. P. Bentz, R. Turpin. (2007).Potential applications of phase change materials in concrete technology. Cement & Concrete Composites; 29: 527–532.

[8] H. Michels, R. Pitz-Paal. (2007). Cascaded latent heat storage for parabolic trough solar power plants. Solar Energy; junio: 829-837.

[9] Anant Shukla, D. Buddhi, R.L. Sawhney. (2009). Solar water heaters with phase change material thermal energy storage medium: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews; 13: 2119–2125.

[10] Mohammed M. Farid, Amar M. Khudhair, Siddique Ali K. Razack, Said Al-Hallaj. (2004). A review on phase change energy storage: materials and applications. Energy Conversion and Management; 45:1597–1615.

[11] J. C. Choi, S. D. Kim, G. Han.(1996). Heat transfer characteristics in low-temperature latent heat storage systems using salt-hydrates at heat recovery stage. Solar Energy Materials and Solar Cells; 40:71-87.

[12] Nagano, K., Ogawa, k., Mochida, T., Hayashi, K., Ogoshi, H. (2004). Performance of Heat Charge/Discharge of Magnesium Nitrate Hexahydrate and Magnesium Chloride Hexahydrate Mixture to a Single Vertical Tube for a Latent Heat Storage System, Applied Thermal Engineering; 24:209 – 220.

[13] Y. Marcus, A. Minevich, L. Ben-Dor. (2005).Solid–liquid equilibrium diagrams of common ion binary salt hydrate mixtures involving nitrates and chlorides of magnesium, cobalt, nickel, manganese, and iron(III). Thermochimica Acta; 432, pp 23–29.

[14] Sandnes B., Rekstad J. (2006). Supercooling salt hydrates: Stored enthalpy as a function of temperature. Solar Energy 80, pp 616–625.

[15] A. Sharma, V. Tyagi, C. Chen, D. Buddhi. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, pp 318–345.

[16] A. F. Macía. (2007). Almacenamiento de energía solar térmica usando cloruro de magnesio hexahidratado. Tesis de Maestría. Universidad nacional de Colombia.

[17] A.A. El-Sebaii, S. Al-Amir, F.M. Al-Marzouki, Adel S. Faidah, A.A. Al-Ghamdi, S. Al-Heniti. (2009). Fast thermal cycling of acetanilide and magnesium chloride hexahydrate for indoor solar cooking. Energy Conversion and Management 50 pp 3104–3111.

[18] A.A. El-Sebaii, S. Al-Heniti, F. Al-Agel, A.A. Al-Ghamdi, F. Al-Marzouki. (2011).One thousand thermal cycles of magnesium chloride hexahydrate as a promising PCM for indoor solar cooking. Energy Conversion and Management 52 pp 1771–1777.

[19] S. Furbo. (1980). Heat storage with an incoingruently melting salt hydrate as storage medium based on the extra water principle. Technical university of denmark.

[20] Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo y ministerio de minas y energía. (2012). Mapas de Brillo Solar. Republica de Colombia pp 47-49.

[21] A.Reyes, J. Vasquez, F. Sepulveda. (2015).Análisis de ciclos fusión-solidificación de ceras de parafina. Revista de la facultad de ciencias químicas de la Universidad Santiago de Chile N° 12 (Mayo – Septiembre) pp 1-9.

[22] C. Veerakumar, A. Sreekumar. (2016). Phase change material based cold thermal energy storage: Materials, techniques and applications – A review. International Journal of Refrigeration 67, pp 271–289.

[23] Y. Allouche, S. Varga, C. Boudena, C.A. Oliveira. (2015). Experimental determination of the heat transfer and cold storage characteristics of a microencapsulated phase change material in a horizontal tank. Energy Conversion and Management 94 pp. 275–285.

[24] E. Osterman, V.V. Tyagi, V. Butala, N.A. Rahim, U. Stritih. (2012). Review of PCM based cooling technologies for buildings. Energy and Buildings, Volume 49, June, Pages 37-49.