

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL PERFIL DE TEMPERATURA DE
MATERIAL DE CAMBIO DE FASE (PCM) EN EL ALMACENAMIENTO DE
ENERGÍA SOLAR UTILIZANDO HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES



WILLIAM FERNÁNDEZ RODRÍGUEZ

UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL CARIBE
INGENIERIA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS
BARRANQUILLA, ATLÁNTICO

2012

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL PERFIL DE TEMPERATURA DE
MATERIAL DE CAMBIO DE FASE (PCM) EN EL ALMACENAMIENTO DE
ENERGÍA SOLAR UTILIZANDO HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES.

Presentado por:

WILLIAM FERNÁNDEZ RODRÍGUEZ

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO

Director:

Ing. ARGEMIRO PALENCIA

Codirector:

Ing. JONATHAN FÁBREGAS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL CARIBE
INGENIERIA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIAS
BARRANQUILLA, ATLÁNTICO
2012

NOTA DE ACEPTACION

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

18 de Noviembre 2013

Dedicatoria

Primero que todo le doy gracias a Dios por permitirme la oportunidad de estudiar en la Universidad Autónoma Del Caribe y segundo a mis padres por el apoyo tan grande que me dieron para poder culminar esta meta personal.

TABLA DE CONTENIDO

	pag.
INTRODUCCION	10
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	12
2. JUSTIFICACIÓN.....	17
3. OBJETIVOS.....	20
3.1. OBJETIVO GENERAL:.....	20
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	20
4. MARCO REFERENCIAL	21
4.1. ANTECEDENTES	21
4.2. MARCO TEÓRICO	26
4.3. CALOR LATENTE	26
4.4. <i>PHASE CHANGE MATERIAL</i>	26
4.5. CLASIFICACIÓN DE LOS <i>PHASE CHANGE MATERIALS</i> (PCM)	27
4.5.1. GRUPOS PRINCIPALES DE PCM	28
4.6. MATERIAL DE CAMBIO DE FASE ADECUADO	26
4.6.1. NITRATO DE SODIO (NANO ₃)	30
4.6.2. PROPIEDADES TERMO FISICAS DEL NANO ₃	26
4.7. ANSYSFLUENT©.....	35

4.7.1. LIMITACIONES.....	36
4.7.2. ECUACION DE ENERGIA	37
4.7.3. ECUACION DE MOMENTO	38
4.7.4. ECUACION DE ESPECIES	39
4.8. PROCESO DE VALIDACION DEL PERFIL DE TEMPERATURA DEL PCM .	40
4.9. GEOMETRIA	40
4.10. MALLADO.....	41
4.11. INDEPENDENCIA DE MALLA	47
4.12. CONDICIONES DE FRONTERA	47
5. METODOLOGIA.....	47
5.1. PRIMERA ETAPA	47
5.2. SEGUNDA ETAPA	47
5.3. TERCERA ETAPA.....	47
5.4. CUARTA ETAPA.....	48
5.5. QUINTA ETAPA	48
6. RESULTADOS	47
7. CONCLUSIONES.....	47
8. BIBLIOGRAFÍA.....	57

LISTA DE TABLAS

pag.

TABLA 1. SINOPSIS DE UNA EMPRESA TERMO SOLAR.....	13
TABLA 2. DATOS EXPERIMENTALES DE LA DENSIDAD CON RESPECTO A LA TEMPERATURA.....	32
TABLA 3. ÍNDICES DE CALIDAD DE MALLA.....	41
TABLA 4. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL MALLADO.....	43
TABLA 5. TABLA DE INDEPENDENCIA DE MALLA POR TIME STEP.....	45
TABLA 6. CONDICIONES DE FRONTERA.....	46
TABLA 7. TABLA COMPARATIVA DE LA DENSIDAD CON RESPECTO A LA TEMPERATURA.....	52

LISTA DE FIGURAS

	pag.
FIGURA 1. CICLO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN UNA PLANTA TERMO SOLAR.....	15
FIGURA 2. PARTICIPACIÓN DE CADA SECTOR Y EMISIÓN TOTAL DE GEI AÑO 2004.....	18
FIGURA 3. CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA.....	29
FIGURA 4. CAMBIO DE DENSIDAD-TEMPERATURA EXPERIMENTAL.....	31
FIGURA 5. CAMBIO DE DENSIDAD-TEMPERATURA EVALUADA.....	33
FIGURA 6. CAMBIO DE CONDUCTIVIDAD CON RESPECTO A LA TEMPERATURA.....	34
FIGURA 7. MODELO UTILIZADO PARA EL ESTUDIO.....	40
FIGURA 8. CALIDAD DE MALLA.....	42
FIGURA 9. MALLADO DE LA GEOMETRÍA DE ESTUDIO.....	42
FIGURA 10. INDEPENDENCIA DE MALLA POR NO. DE ELEMENTOS.....	44
FIGURA 11. INDEPENDENCIA DE MALLA POR TIME STEP.....	45
FIGURA 12. TEMPERATURA EN 10S.....	49
FIGURA 13. TEMPERATURA EN 30S.....	50
FIGURA 14. TEMPERATURA EN 60S.....	50
FIGURA 15. DENSIDAD Y TEMPERATURA EN 0S.....	51
FIGURA 16. DENSIDAD Y TEMPERATURA EN 20S.....	51

FIGURA 17. DENSIDAD Y TEMPERATURA EN 50S.51

FIGURA 18. TEMPERATURA CON RESPECTO AL TIEMPO.....53

FIGURA 19. COMPARACIÓN DE LA TEMPERATURA EN EL PUNTO D Y LA
SIMULACIÓN.54

FIGURA 20. COMPARACIÓN DE LA TEMPERATURA EN DIFERENTES
PUNTOS.....55

INTRODUCCION

En esta investigación se busca caracterizar el proceso de transferencia de calor de una unidad de almacenamiento térmico por calor latente, utilizando como base de estudio los materiales de cambio de fase o *phase change materials* (PCM). El análisis se realizará utilizando mecánica computacional de fluidos.

Una gran cantidad de investigación es que se relacionan con los fenómenos de cambios de fase (fusión o solidificación) se han desarrollado en los diversos ámbitos científicos y tecnológicos, así como para aplicaciones industriales que incluyen la metalurgia y la petroquímica, empresas de vidrio y plástico, industrias alimentarias, el control térmico de la naves espaciales, intercambiadores de calor, purificación de agua y en muchas otras aplicaciones. Los sistemas de almacenamiento se utilizan con el fin de recoger energía térmica durante un período mientras que el suministro es suficiente o más barato, para ser descargado cuando el suministro se vuelve insuficiente o caro, por ejemplo: La alta capacidad térmica de almacenamiento de un material de cambio de fase puede reducir el consumo de energía en los edificios, gracias a la acumulación de energía durante los periodos de demanda, para su utilización en la refrigeración en los periodos donde la radiación solar es escasa.

El almacenamiento de energía térmica puede realizarse mediante calor sensible y/o calor latente. Los sistemas de acumulación por calor sensible han sido utilizados durante siglos por los constructores para almacenar/liberar energía térmica. El principio de la utilización de materiales de cambio de fase es simple, a medida que aumenta la temperatura, el material cambio de fase de sólido a líquido. Debido a que la reacción es endotérmica, el PCM absorbe el calor. De

manera similar, cuando la temperatura disminuye, el material cambia de líquido a sólido.

El uso de los PCM para el almacenamiento de energía se remonta a la década de 1950 y su uso incluye una amplia gama de áreas de aplicación. La central de colectores cilindro parabólicos, Andasol 3 de Andalucía, en España, utiliza 28.500kg de material de cambio térmico de sal eutéctica en un sistema de almacenamiento para almacenar la energía suficiente para hacer funcionarlas turbinas a plena carga de hasta 7,5 horas cuando el sol no está brillando (Solar Millennium, 2008). Cada una de estas instalaciones utiliza un sistema de almacenamiento con el fin de que la energía requerida siempre esté disponible.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El agotamiento de las fuentes tradicionales de energía (combustibles fósiles) y el calentamiento global impulsan a la mayoría de países del mundo a encontrar soluciones en energías alternativas. Colombia tiene un gran potencial para el aprovechamiento de este tipo de energías por su posición geográfica, en nuestro país actualmente la generación de energía eléctrica proviene de la hidroelectricidad, y en un segundo lugar de los combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón), cuyas reservas ya se están agotando, Según la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), el 2011 concluyó con unas reservas del llamado "oro negro" de 2.259 millones de barriles. En ese mismo año las empresas petroleras produjeron 334 millones de barriles, un ritmo de extracción que agotaría las existencias de crudo en 6 años y 8 meses ¹. Por eso el Gobierno Colombiano en los últimos años ha invertido en el desarrollo y aplicación de tecnologías alternativas de producción de energía que funcionen con recursos renovables, para contribuir a la solución del problema energético mundial y a un medio ambiente más limpio. Una solución al problema, es la implementación de la energía térmica solar en sistemas de almacenamiento de energía con materiales de cambio de fase (PCM, esta tecnología ha recibido una atención considerable en los últimos años debido a su gran capacidad de almacenamiento).

¹ _____

El universal [En línea]. Las reservas de petróleo en Colombia solo dan para 7 años. [Citado el: 11 de enero de 2014]. Disponible en: <http://www.eluniversal.com.co/cartagena/economica/las-reservas-de-petroleo-en-colombia-solo-dan-para-7-anos-116887>

En la actualidad los complejos termo solares utilizan un sistema basado en dos tanques de almacenamiento de sales fundidas para almacenar energía en forma de calor latente, esta tecnología es utilizada por una empresa en España llamada Andasol 3 ². En la tabla 1, se muestran las características de esta empresa en la prestación del servicio, a su vez la figura 1, es un esquema de una planta termo solar.

Tabla 1. Sinopsis de una empresa termo solar.

Sinopsis	
Encargo	Andasol 3: Central termo solar de 50 MW
Cliente	Marquesado Solar S.L
Contratista	Empresa conjunta dirigida por Ferrostaal AG
Socios	Duro Felguera S.A., Flagsol GmbH, Solar Millenium AG
Gama de prestaciones	EPCC (Engineering, Procurement, Construction y Commissioning) de una central termo solar con acumulador térmico, operación conjunta a cargo de los socios de la central eléctrica
Capacidad de la central eléctrica	50 MW de potencia eléctrica Acumulador salino con capacidad de funcionamiento a plena carga durante 7,5 horas 640 colectores solares, cada uno de 150 m de longitud 500.000 m ² de superficie de espejos
Sede de la central eléctrica	"Plataforma Solar de Almería" en las cercanías de la ciudad de Guadix, España
Volumen de inversión	€ 315 millones
Periodo	De 2008 a 2011
Entrega de la obra	Verano tardío de 2011

Fuente. <http://www.ferrostaal.com>

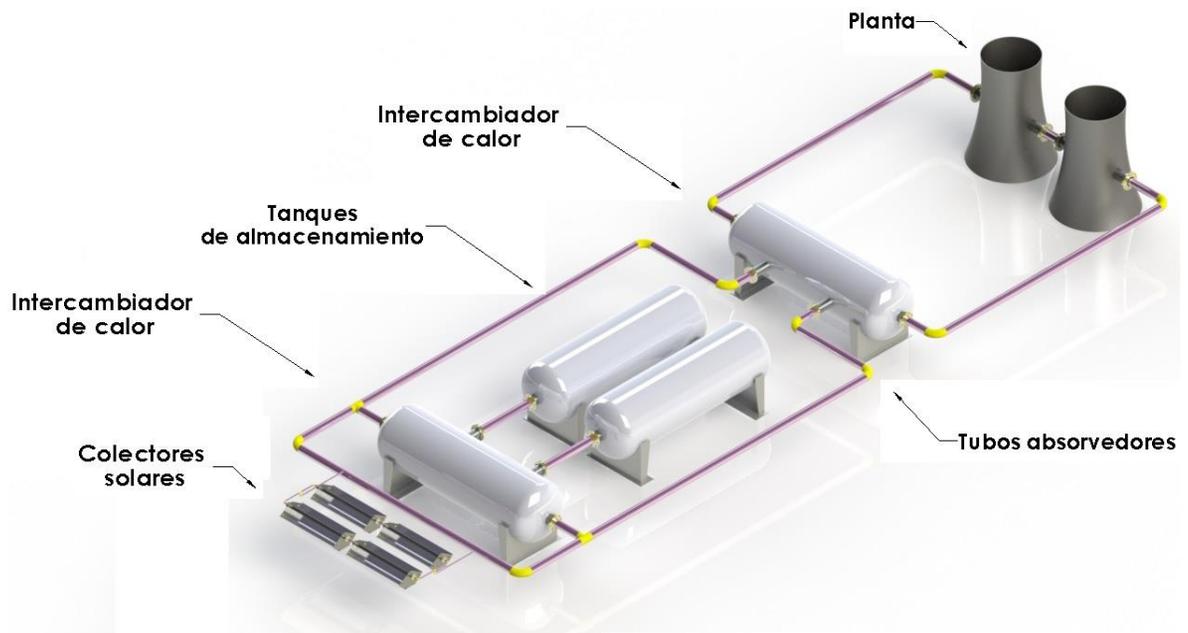
² _____

Ferrostaal [En línea]. Andasol 3. [Citado el: 11 de enero de 2014]. Disponible en: http://www.ferrostaal.com/business/referenzen/andasol3/?tx_editfiltersystem_pi1%5Bcmd%5D=detail

El proceso de producir electricidad a base de energía solar como principal fuente de energía, consiste en la captación y concentración de la radiación solar por parte de un campo de colectores cilindro parabólicos sobre tubos absorbedores, rellenos con un aceite térmico que se encuentran en la línea focal de los colectores.

El método más utilizado para el almacenamiento de energía térmica en plantas termo solares es un sistema basado de dos tanques, en esta configuración, el *heat transfer fluid* (HTF) del campo solar es enviado a un intercambiador de calor donde se utiliza para cargar el sistema de almacenamiento térmico. La sal del tanque frío se calienta arriba de unos 385 °C y se almacena en el tanque de sales calientes. Cuando el sistema de almacenamiento se descarga, la sal del tanque caliente es enviada de nuevo al HTF, al intercambiador de sales calientes y ahí se utiliza para calentar el HTF frío. El HTF caliente se envía a la planta de energía y las sales fundidas de este depósito se les hacen circular a través de un intercambiador de calor, donde ceden su alta temperatura al agua generando el vapor necesario para mover una turbina. Una vez que las sales ceden su calor al agua, se las devuelve ahora con una temperatura más baja al tanque que almacena las sales una temperatura más baja.

Figura 1. Ciclo de generación de energía eléctrica en una planta termo solar.



Fuente. Autor

Uno de los principales problemas actuales con respecto a la utilización de la energía, tales como las energías renovables (energía solar, energía eólica, etc.), es la dificultad de su almacenamiento, así como la variabilidad tanto en la potencia obtenida como en el momento de su obtención, en efecto, se conocen sistemas para aprovechar dicho tipo de energías y convertirlas en energía eléctrica aprovechable, pero no existen sistemas eficaces para almacenar dicha energía para su uso posterior. Con respecto a la energía solar como fuente energética existen inconvenientes debido a la naturaleza intermitente de la radiación solar durante los periodos de baja demanda, que no permiten tener un flujo constante de energía, este inconveniente genera un problema y es que los perfiles de temperatura se hacen impredecibles, así como la transferencia de calor de los materiales utilizados para almacenar energía térmica solar

Existe por tanto, en la actualidad, una gran necesidad de un sistema que permita almacenar energía solar térmica, de cualquier procedencia y características, de manera eficaz y duradera, y suministrarla posteriormente cuando se necesite dicha energía. Es por eso que para el desarrollo de la investigación se emplea un material que utiliza la energía solar para almacenar energía en forma de calor latente, esta energía es absorbida y cedida cuando la demanda de radiación solar sea escasa, estos materiales son denominados PCM, los cuales son considerados eficientes en la acumulación de energía térmica que posteriormente será utilizada en un proceso de generación de energía eléctrica. Dentro de esta familia de materiales se encuentran los ácidos grasos y son prometedores para aplicaciones de almacenamiento de energía solar pero tienen el inconveniente de su alto precio.

1.2. PREGUNTA PROBLEMA

¿Cuál es el comportamiento del perfil de temperatura que se produce en un sistema de almacenamiento de energía térmica que utiliza PCM durante los procesos de cambio de fase?

2. JUSTIFICACIÓN.

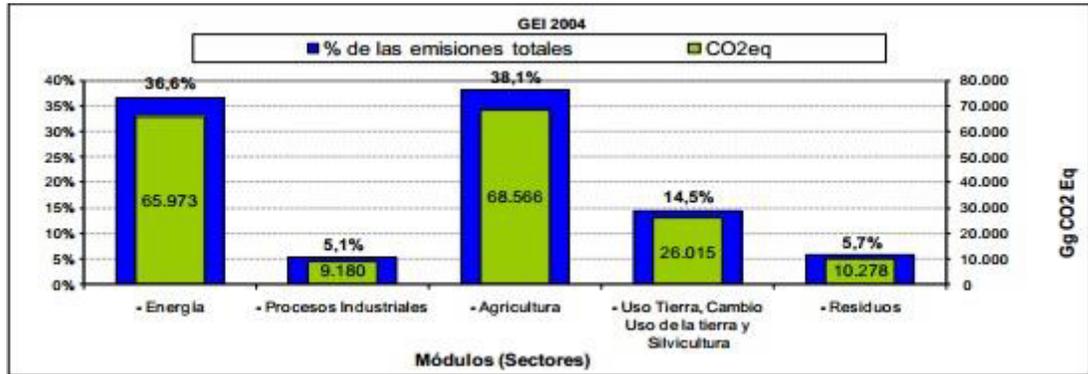
Este proyecto se enfocara en conocer el comportamiento del perfil de temperatura de los materiales de cambio de fase, para su implementación en un sistema de almacenamiento de energía térmica solar ya que es de vital importancia en aplicaciones de generación de energía, tales como los sistemas solares térmicos o de recuperación de calor residual. Un sistema de almacenamiento térmico apropiado es esencial en la generación de energía térmica, ya que permite aprovechar los periodos donde la radiación solar es abundante y económica para utilizarla en los momentos donde la demanda de energía sea muy baja. De igual manera conocer las características de los PCM nos permite diseñar sistemas de almacenamiento de energía térmica mucho más eficientes y menos costosos ya que se puede predecir cuales serían las ventajas y desventajas en el momento de escoger los materiales, equipos, para las construcción del proyecto.

El continuo aumento en el nivel de emisiones de gases de efecto invernadero y el aumento de los precios de los combustibles son las principales fuerzas impulsoras para un uso más eficiente de fuentes de energía renovables. En Colombia los sectores que más emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) aportaron en el año 2004 fueron: Agricultura (38%); Energía (37%); y Uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura –Uscuss– (14%). Seguidos por: Residuos sólidos (6%) y Procesos Industriales (5%). Al sumar las emisiones totales de los módulos de Agricultura con los de Uscuss, es evidente el aporte que tiene el sector agropecuario (Aproximadamente. 50%) de las emisiones totales ³. De igual forma el precio de los combustibles

³

Ministerio de mina [En línea]. Memoria De La Segunda Comunicación Nacional De Colombia Ante La CMNUCC. [Citado el: 22 de diciembre de 2013]. Disponible en: http://www.minambiente.gov.co/documentos/5783_res_ejecut_segun_comun_camb_clima.pdf.

Figura 2. Participación de cada sector y emisión total de GEI año 2004.



Fuente. IDEAM 2009.

En muchas partes del mundo, la radiación solar directa se considera una de las fuentes más viables de producción de energía. La energía solar como una energía limpia y renovable está atrayendo la atención de muchos investigadores y para esto el almacenamiento de energía térmica juega un papel importante en la utilización racional de energía.

Al utilizar el PCM como principal elemento de estudio para el almacenamiento de energía térmica, se realiza una indagación preliminar sobre las propiedades del material, identificando un problema de baja conductividad térmica. Diversos investigadores como: Keumnam Cho, Philip B. Grimado, Sanjay K. Roy, han propuestos varias ideas y sistemas para mejorar la transferencia de calor, tanto numérica como experimentalmente. Algunos estudios que proponen mejorar la transferencia de calor se pueden agrupar en las siguientes categorías:

- Después de haber insertado en el PCM un metal.
- Añadiendo partículas metálicas con mayor conductividad térmica que el PCM.
- Macro y micro encapsulación de los PCM.
- Utilizando un material PCM-grafito compuesto de otro tipo de PCM y utilizando tubos con aletas con diferentes configuraciones

3. OBJETIVOS.

3.1. OBJETIVO GENERAL:

Caracterizar el comportamiento del perfil de temperatura del material de cambio de fase para su utilización en el almacenamiento de energía solar térmica.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Determinar los modelos matemáticos actuales para la descripción del fenómeno de transferencia de calor en un sistema de almacenamiento de energía que utiliza PCM.
- Establecer los parámetros de funcionamiento, propiedades y condiciones de frontera a utilizar en el modelado del proceso de almacenamiento de energía en PCM
- Realizar un Diseño de experimento y Desarrollar las corridas computacionales para determinar el comportamiento energético del proceso de almacenamiento de energía en PCM.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1. ANTECEDENTES

Es muy relevante para el alcance de esta investigación, que está relacionado con sistemas de almacenamiento de energía térmica, tener en cuenta un número de estudios que se han centrado en PCM en el punto de fusión y solidificación, que se almacenan dentro de recipientes de diferentes formas. De este modo, son revisados los estudios pertinentes en materia de los PCM, dentro de cápsulas esféricas, otros estudios relacionados han sido reportados antes de 1980, varios informes analíticos de difusión controlada en procesos de cambio de fase, por ejemplo, Grimado y Boley, presentan un método numérico para la solución del problema de conducción de calor radialmente en una esfera simétrica. El método emplea la técnica de incrustación; esto permite que la solución sea escrita en la forma de una simple ecuación integro-diferencial que es fácilmente resuelta numéricamente por medio de un esquema de integración. (Philip B. Grimado, 2005)

Entre los antecedentes más relevantes en este caso se encontró una investigación realizada en el 2008 por, F.L. Tan, S.F. Hosseinizadeh, J.M. Khodadadi, Liwu Fan, es una investigación experimental y computacional dirigida a la comprensión del papel de la flotabilidad del material de cambio de fase durante la fusión en el interior de una cápsula esférica. El frente de fase de fusión y la fracción de fusión del PCM se analizan y se comparan con la solución numérica obtenida desde el código ANSYSFLUENT©. (F.L. Tan, 2009)

S.K. Roy, S. Sengupta, en su investigación presentan un proceso de fusión dentro de un recinto esférico en la fase sólida de manera uniforme inicialmente sub enfriado. El análisis preliminar del problema es similar a un estudio previo donde el grado de sub enfriamiento era cero. Sin embargo, la ecuación de transferencia de calor ha sido modificada para incluir los efectos de un gradiente de temperatura en el núcleo sólido. El tiempo de fusión, el número de Nusselt, se han obtenido en un intervalo de los parámetros que se encuentran normalmente en los sistemas térmicos solares. (Sanjay K. Roy, 1988)

K. Cho, S.H. Choi, realizaron una investigación severa de las características térmicas de la parafina en una cápsula esférica durante los procesos de congelación y fusión. Los experimentos se realizaron con parafina, es decir, n-tetra decano, y una mezcla de den-tetra de cano (40%) y n-hexadecano (60%) y agua. Los parámetros fueron el número de Reynolds y la entrada de temperatura durante el proceso de fusión y de congelación y la temperatura inicial para un sistema de almacenamiento térmico PCM. (Keumnam Cho, 2000)

J.M. Khodadadi, Y. Zhang, realizaron un estudio computacional de los efectos de flotabilidad impulsado por convección en fusión restringida de materiales de cambio de fase dentro de recipientes esféricos. Los cálculos se basan en un proceso iterativo, de volumen finito y un procedimiento numérico usando variables dependientes. Una formulación de entalpía de dominio único se utiliza para la simulación del fenómeno de cambio de fase. El efecto del cambio de fase en la convección se ha contabilizado aplicando la ley de Darcy tipo de tratamiento de los medios porosos. Los resultados de cálculo se verifican a través de experimentos de fusión cualitativos restringidos utilizando una cera de alto número de Prandtl como el material de cambio de fase. (J.M. Khodadadi, 2001)

K.T. Adref, I.W. Eames, en su investigación se describe y evalúa los resultados de un estudio experimental dirigido a la caracterización de los procesos de congelación y deshielo del agua contenidos en los elementos esféricos del tipo que se encuentran en los lechos de los sistemas de almacenamiento térmico (hielo) que se utilizan en los sistemas de construcción de acondicionamiento de aire. Los resultados incluyen semi empíricas ecuaciones que permiten que la masa de hielo dentro de una esfera que se predijo en cualquier momento durante los procesos de congelación o de fusión. Se cree que estas ecuaciones serán útiles en la modelización del comportamiento dinámico del almacenamiento térmico usando elementos esféricos como el cambio de fase. Un nuevo método que se utilizó para medir la posición de la interface agua-hielo durante el proceso de congelación se describe también. Varios resultados interesantes fueron obtenidos de este estudio. (Ian W. Eames, 2002)

K.T. Adref, I.W. Eames, presentan en su investigación el comportamiento dinámico de un solo elemento esféricos de almacenamiento térmico. Tres esferas de vidrio que tienen radios de 4,07, 3,5 y 3.135 cm fueron escogidos para este estudio. Una corriente de agua-glicol solución en un intervalo de temperatura que varía entre 4,5 y 12°C (durante la fusión) y entre 9,5 y 4,4°C (durante la congelación) fue utilizado como fluido de transferencia de calor o HTF durante las pruebas. Medios fotográficos se utilizaron para caracterizar la posición de la interface agua-hielo y su forma durante la descarga (fusión) del proceso. Sin embargo, durante la carga (congelación) proceso de un nuevo método fue ideado para los mismos objetivos. (Ian W. Eames, 2002)

E. Assis, L. Katsman, G. Ziskind, R. Letan, presentan un estudio numérico y experimentalmente del proceso de fusión en PCM en una geometría esférica. Las propiedades utilizadas en las simulaciones, incluyen la temperatura de fusión, y el

calor específico sensible, la conductividad térmica y la densidad en estado sólido y líquido, se basan en una cera de parafina disponible en el mercado, que es fabricado para ser utilizado principalmente en calor latente basado en sistemas de almacenamiento de energía. Transitorias simulaciones se realizaron utilizando el código ANSYSFLUENT®, estas simulaciones muestran el proceso de fusión desde el principio hasta el final, e incorporan fenómenos tales como la convección en la fase líquida, la expansión volumétrica debida a la fusión, el hundimiento del sólido en el líquido, y de fusión estrecho contacto. (E. Assis, 2007)

F.L. Tan, realizaron una investigación sobre la fusión del PCM dentro de una esfera con n-octadecano tanto para la fusión con y sin restricciones. En fusión restringida, el sólido PCM se ve impedido de hundirse hasta el fondo de la esfera. Para la fusión sin restricciones, el sólido PCM se hunde hasta el fondo de la esfera debido a la gravedad. Los experimentos se llevan a cabo a tres temperaturas diferentes de pared de 35 ° C, 40 ° C y 45 ° C con un sub-enfriamiento de 1 ° C para la fusión sin restricciones y tres diferentes inicial de sub-enfriamiento de 1 ° C, 10 ° C y 20 ° C a una temperatura de pared constante de 40 ° C para la fusión forzada. (Tan, 2008)

T. Kousksou, P. Bruel en el 2010, investigan numéricamente un sistema de almacenamiento formado por un tanque cilíndrico que está embalado al azar con esferas que tienen tamaños uniformes y parafina como PCM. El lecho de relleno se prueba para diversas complejas señales de entrada de temperatura y fluido de trabajo, así como para diferentes diseños internos. Los resultados obtenidos indican también que es posible maximizar la energía almacenada con una correcta selección y clasificación de los diferentes PCM en el lecho. (T. Kousksou, 2010)

En las investigaciones realizadas hasta el momento no se compara de manera directa el desempeño de un sistema de almacenamiento de energía térmica solar en las condiciones de nuestra ciudad, razón por la cual un estudio encaminado en ese sentido es pertinente como medio para conocer las ventajas y desventajas que brinda cada una de las alternativas. El objetivo del estudio es entonces brindar herramientas mediante el uso de modelado de procesos, para conocer el comportamiento térmico de un sistema de almacenamiento de energía térmica solar que utiliza PCM.

4.2. MARCO TEÓRICO

4.3. CALOR LATENTE

Para fundir un sólido o evaporizar un líquido se requiere una gran cantidad de energía. La cantidad de esta que es absorbida o liberada durante el proceso de cambio de fase se llama calor latente. Específicamente, la cantidad de energía absorbida durante la fusión se llama calor latente de fusión y equivale a la cantidad de energía liberada durante la congelación. De modo similar, la cantidad de energía absorbida durante la evaporización se llama calor latente de evaporización y es equivalente a la energía liberada durante la congelación ⁴.

4.4. *PHASE CHANGE MATERIALS*

Los materiales de cambio de fase (PCM) son productos ideales para las soluciones de gestión térmica. Esto es debido a que almacenan y liberan energía térmica durante el proceso de fusión y de congelación (cambian de una fase a otra). Cuando dicho material se congela, libera grandes cantidades de energía en forma de calor latente de fusión, o la energía de cristalización. A la inversa, cuando el material se funde, una cantidad igual de energía es absorbida desde el entorno inmediato, ya que cambia de sólido a líquido.

4

Yunus A. Çengel, Michael A. Boles. 2009. *TERMODINÁMICA*. Mexico, D.F : 978-970-10-7286-8, 2009.

Esta propiedad de los PCM se puede utilizar en un número de maneras, tales como almacenamiento de energía térmica mediante el cual se puede almacenar energía de un proceso o periodo de tiempo, y se utiliza en una fecha posterior o ubicación diferente. Los PCM son también muy útiles para proporcionar barreras térmicas o aislamiento, por ejemplo en la temperatura de transporte controlado.

4.5. CLASIFICACIÓN DE LOS PCM

En 1983 Abhat dio una clasificación útil de las sustancias utilizadas para TES, que se muestran en la figura 3. Entre las referencias más detalladas relacionadas con los materiales de cambio de fase, se puede citar Abhat, Lane y Dincer y Rosen. Estos contienen una completa revisión de los tipos de material que se han utilizado, su clasificación, características, ventajas y desventajas, y las diversas técnicas experimentales para determinar el comportamiento de estos materiales en fusión y solidificación.

El material de cambio de fase más conocido y utilizado es el hielo, que a 0 °C, al aplicarle energía pasa de la fase sólida a líquido sin variar la temperatura. Siendo este proceso reversible.

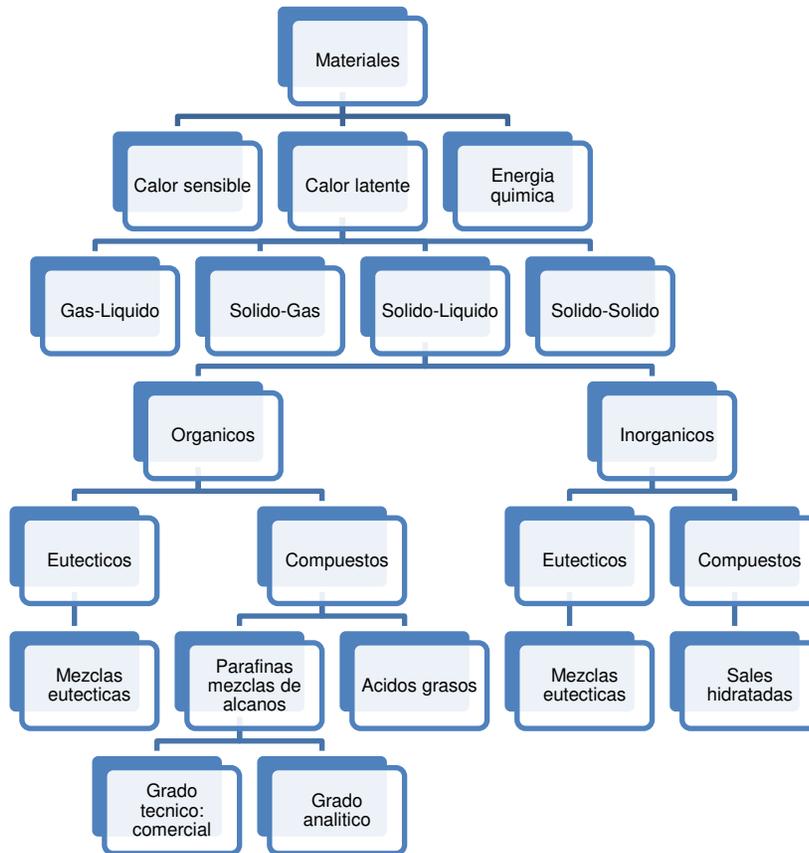
4.5.1. GRUPOS PRINCIPALES DE PCM

- PCM inorgánicos (sales hidratadas y metálicas) muestran sobre enfriamiento y la segregación de fases en los procesos de transición.
- PCM orgánicos, tales como Parafinas, ácidos grasos y glicol de polietileno, están disponibles en una amplia gama de temperaturas y son compatibles con los materiales de construcción convencionales.

De entre los posibles cambios de fase, el más interesante es el de sólido a líquido, ya que aunque la cantidad de energía almacenada es inferior que entre otros cambios de estado (sólido a gas), la variación de volumen es menor. Los materiales de cambio de fase líquido-sólido más comunes en el rango de temperaturas 20 °C y 80 °C son las ceras de parafina, sales hidratadas, mezclas eutécticas y ácidos grasos.

Según Abhat. Las ceras de parafina están disponibles en el mercado, pero su calor latente (hasta 200 kJ/kg.) es solo la mitad del de las sales hidratadas. Las sales hidratadas son más baratas que las ceras de parafina y también están disponibles en el mercado, pero tienen algunas desventajas como las bajas temperaturas de fusión o la corrosión en contacto con metales ⁵.

Figura 3. Clasificación de los materiales de almacenamiento de energía.



Fuente. Autor.

4.6. MATERIAL DE CAMBIO DE FASE ADECUADO

La investigación se centra en los sistemas de almacenamiento de calor latente, para conocer el comportamiento térmico de los PCM para la utilización de la energía solar en la generación de energía térmica en el rango de alta temperatura (250-350°C). Un ejemplo de un material adaptable para estos sistemas es el nitrato de sodio (NaNO₃), podría ser utilizado como PCM en la generación directa de vapor en un sistema de colectores cilindro-parabólicos. Estos sistemas operan a una presión de unos 100 bares. En esta presión el cambio de fase de vapor de agua se produce a una temperatura de alrededor de 310 °C, esta temperatura se adapta a la temperatura de fusión de NaNO₃.

4.6.1. NITRATO DE SODIO (NaNO₃)

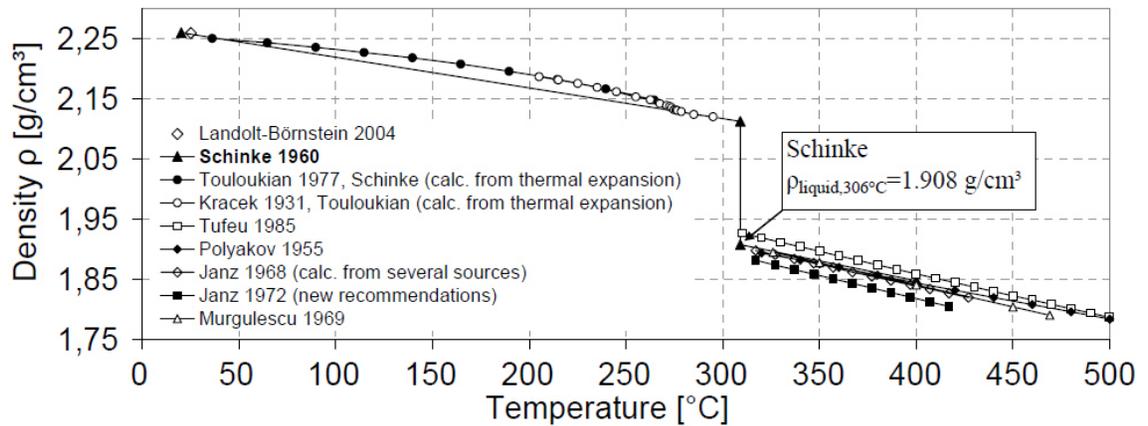
El NaNO₃ se encuentra en depósitos de origen natural. Estos depósitos contienen otras diversas sales y requieren tratamiento para obtener NaNO₃ puros. La sal cristalina incolora o blanca tiene una masa molar de 84,99 *g / mol*. El NaNO₃ es muy soluble en agua. Es higroscópico, pero no forma fases sólidas hidratadas. Las dos principales aplicaciones del NaNO₃ son técnicas y agrícolas. El NaNO₃ se utiliza como fertilizante, así como en un número de procesos industriales. Las industrias incluyen el vidrio, esmalte, porcelana, explosivos, etc. Algunos grados de NaNO₃ contienen anti aglomerante, mezclas de sales fundidas que contienen NaNO₃ se emplean como baños de tratamiento térmico, como fluidos de transferencia de calor y como medios de almacenamiento de energía ⁶.

4.6.2. PROPIEDADES TERMO FÍSICAS DEL NANO3

Las propiedades termo físicas nos sirven para predecir el comportamiento de los materiales cuando están sometidos a fuerzas, presiones, o a la temperatura es por eso que para la configuración de la simulación se tuvieron en cuenta estas propiedades ya que eran las más importantes, estas son:

- El cambio de densidad con respecto a la temperatura.
- El cambio de conductividad en fase sólida.

Figura 4. Cambio de Densidad-Temperatura experimental.



Fuente. Sodium Nitrate For High Temperature Latent Heat Storage.

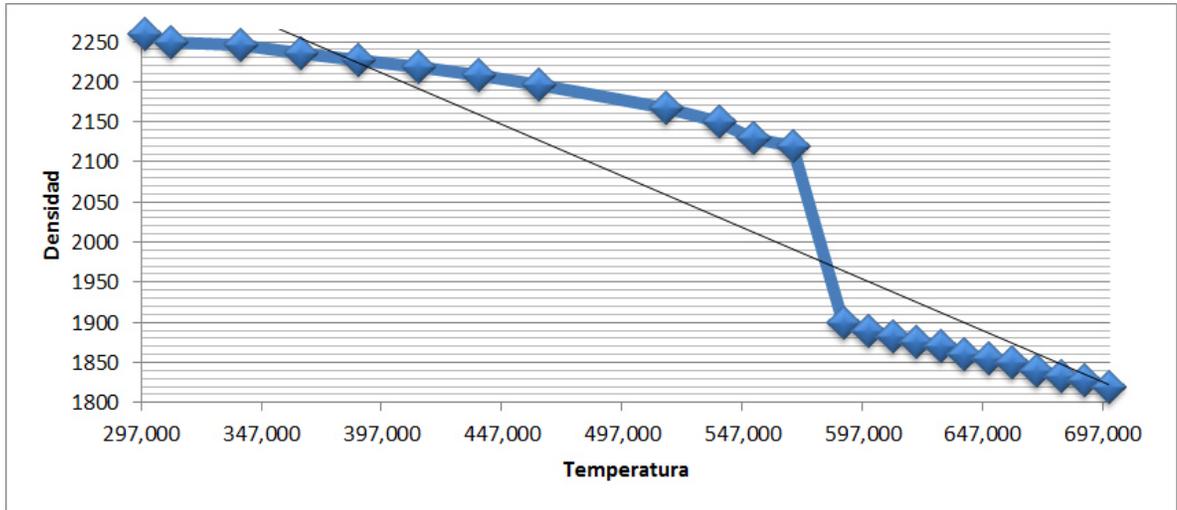
Esta es una recopilación de datos experimentales utilizados para determinar una de las propiedades termo físicas del NANO3 . La figura 4, fue la base de nuestro estudio ya que de aquí extrajimos una serie de datos para poder determinar las ecuaciones de densidad con respecto a la temperatura y de esa manera tener el comportamiento del material de cambio de fase en función de ecuaciones, lo datos obtenidos se resumieron en la tabla 2, y pueden ser apreciados en la figura 5.

Tabla 2. Datos experimentales de la densidad con respecto a la temperatura.

Solido	
T	Densidad
298,150	2,26
309,150	2,25
338,150	2,245
363,150	2,235
387,150	2,227
412,150	2,218
437,150	2,208
462,150	2,196
515,150	2,167
537,150	2,15
551,150	2,13
568,150	2,12
589,150	1,9
599,150	1,89
609,150	1,883
619,150	1,875
629,150	1,87
639,150	1,86
649,150	1,855
659,150	1,85
669,150	1,84
679,150	1,833
689,150	1,827
699,150	1,82

Fuente. Autor.

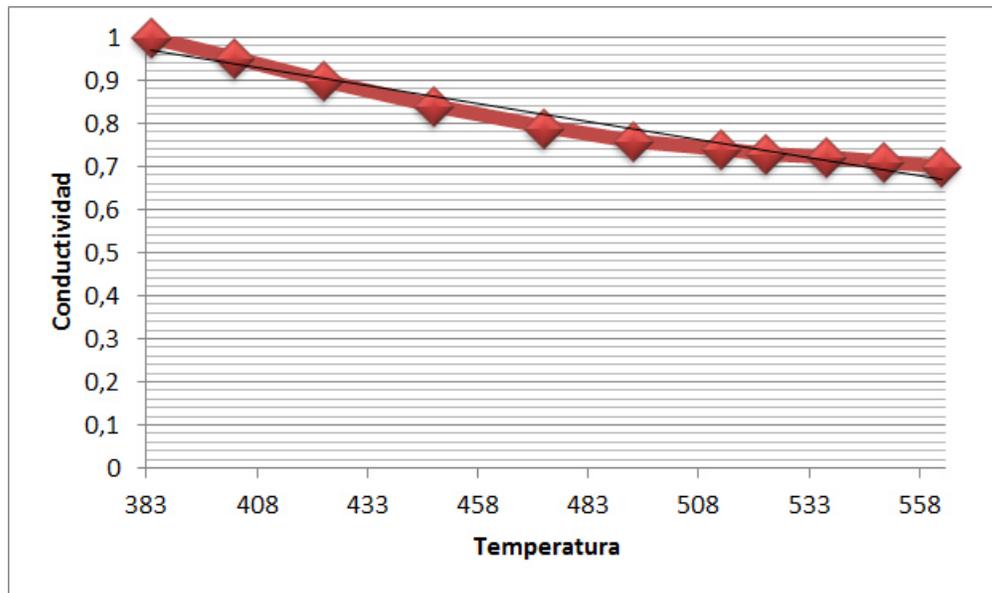
Figura 5. Cambio de Densidad-Temperatura evaluada.



Fuente. Autor.

$$y = -1,2848x + 2720,6 \quad (1)$$
$$R^2 = 0,8681$$

Figura 6. Cambio de conductividad con respecto a la temperatura.



Fuente. Autor.

$$y = -0,0017x + 1,607 \quad (1)$$
$$R^2 = 0,9561$$

4.7. ANSYS FLUENT

ANSYSFLUENT© puede ser usado para resolver problemas de flujo de fluidos involucrando la teoría de solidificación y fusión que tiene lugar a una temperatura o en un rango de temperaturas en lugar de seguir el líquido-sólido de forma explícita, ANSYSFLUENT© utiliza una formulación entalpía-porosidad. El líquido-sólido se trata como una zona porosa con porosidad igual a la fracción de líquido y términos de impulso apropiados se añaden a las ecuaciones de movimiento para tener en cuenta la caída de presión causada por la presencia de material sólido. También se añaden a las ecuaciones de turbulencia para dar cuenta de porosidad reducida en las regiones sólidas.

ANSYSFLUENT© proporciona las siguientes funciones para el modelado de solidificación y fusión:

- Cálculo de solidificación líquido-sólido / fusión en metales puros, así como en aleaciones binarias.
- Modelado de la resistencia de contacto térmico entre el material solidificado y las paredes (por ejemplo, debido a la presencia de un espacio de aire).
- Modelización del transporte de especies de solidificación / fusión
- Procesamiento posterior de las cantidades relativas a la solidificación / fusión (es decir, la fracción líquida y las velocidades de tracción).

4.7.1. LIMITACIONES

Como se ha mencionado en general, la formulación en ANSYSFLUENT© puede ser utilizado para modelar la solidificación/fusión de los materiales puros, así como aleaciones. ANSYSFLUENT© ofrece dos reglas para determinar la fracción de líquido frente a la relación de temperatura, es decir, la ley de momentos lineal y la regla de Scheil no lineal.

Las siguientes limitaciones se aplican al modelo de solidificación/fusión en ANSYSFLUENT©:

- El modelo de solidificación/fusión sólo se pueden utilizar con el editor de resolución basado en la presión, no está disponible con los solucionadores basados en densidad.
- El modelo de solidificación/fusión no se puede utilizar para flujos compresibles.
- De los modelos generales multi fase (VOF, mezcla, y euleriano), sólo el modelo de VOF se puede utilizar con el modelo solidificación/fusión.
- Con la excepción de difusividad, no se puede especificar propiedades de los materiales por separado para el material sólido y líquido.
- Cuando utilice el modelo de solidificación/fusión junto con modelos de transporte y con las reacciones, no existe un mecanismo para restringir las reacciones a sólo la región líquida, es decir, las reacciones son resueltas con todas las partes.

4.7.2. ECUACIÓN DE ENERGIA

La entalpía del material se calcula como la suma de la entalpía sensible h , y el calor latente como ΔH

$$H = h + \Delta H \quad (3)$$

Dónde:

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (4)$$

h_{ref} = entalpia de referencia

T_{ref} = temperatura de referencia

C_p = calor especifico a presion constante

La fracción de líquido β puede ser definido como:

$$\begin{aligned} \beta &= 0 \text{ si } T < T_{solido} \\ \beta &= 1 \text{ si } T > T_{liquido} \\ \beta &= \frac{T - T_{solido}}{T_{liquido} - T_{solido}} \text{ si } T_{solido} < T < T_{liquido} \end{aligned} \quad (5)$$

El calor latente contenido puede ser escrito ahora en términos del calor latente del material, L :

$$\Delta H = \beta L \quad (6)$$

El calor latente contenido puede variar entre cero (para un sólido) y L (para un líquido) para los problemas de solidificación/fusión, la ecuación de energía puede ser escrita como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla * (\rho \bar{v} H) = \nabla * (k \nabla T) + S \quad (7)$$

Dónde:

$H = \text{entalpía}$

$\rho = \text{densidad}$

$\bar{v} = \text{velocidad del fluido}$

$S = \text{termino fuente}$

4.7.3. ECUACIÓN DE MOMENTO

La técnica de entalpía-porosidad trata la región blanda (región parcialmente solidificada) como un medio poroso. La porosidad en cada celda se establece igual a la fracción líquida en esa celda. En las regiones totalmente solidificadas, la porosidad es igual a cero, lo que extingue las velocidades en estas regiones. Debido a la reducción de la porosidad en la zona sensible esta toma la siguiente forma:

$$S = \frac{(1-\beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} A_{mush} (\bar{v} - \bar{v}_p) \quad (8)$$

Donde β es el volumen de la fracción de líquido, ε es número pequeño (0.001) para prevenir la división por cero A_{mush} es la zona sensible constante, y $\overline{v_p}$ es la velocidad de las partículas debido a la tracción del material solidificado fuera del dominio (también conocida como la velocidad de tracción).

4.7.4. ECUACIÓN DE ESPECIES

Para la solidificación y fusión de una sustancia pura, el cambio de fase se produce a una temperatura de fusión distinta, T_{fusion} . Para una mezcla de varios componentes, sin embargo, existe una zona de congelación / fusión entre un el sólido y líquido de una temperatura superior. Cuando se solidifica un líquido multi componente, se difunden a partir de la fase sólida a la fase líquida. Este efecto se cuantifica por el coeficiente de partición del soluto i denotado K_i es la relación de la fracción de masa en el sólido en la interface del líquido.

$$T_{solido} = T_{fusion} + \sum soluto m_i Y_i / K_i \quad (9)$$

$$T_{solido} = T_{fusion} + \sum soluto m_i Y_i / K_i \quad (10)$$

Donde K_i es el coeficiente de partición del soluto i , Y_i es la fracción de masa del fluido i , y m_i es la pendiente de la superficie del líquido con respecto a Y_i esto es asumido que el último material de las especies de la mezcla es el disolvente y que las otras especies son los solutos ⁷.

⁷

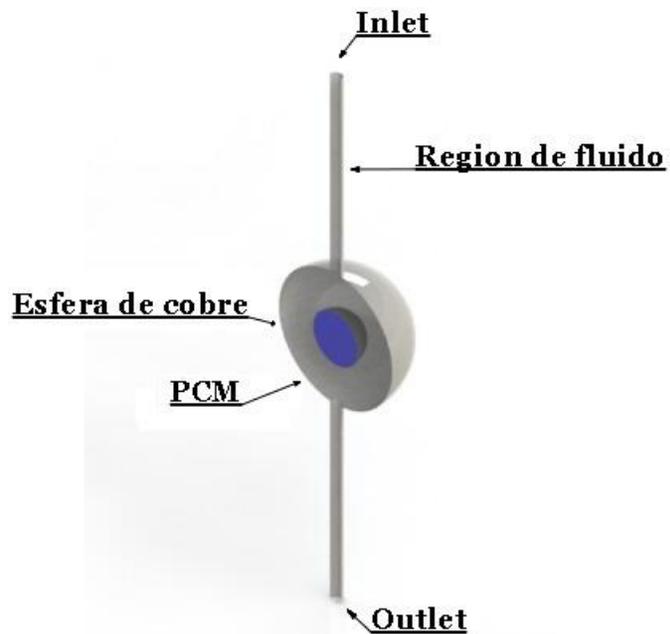
ANSYSFLUENT©. Theory guide. Disponible en:
http://cdlab2.fluid.tuwien.ac.at/LEHRE/TURB/Fluent.Inc/v140/flu_th.pdf. Pag 617. Consultado el: 30 de septiembre de 2013.

4.8. PROCESO DE VALIDACION DEL PERFIL DE TEMPERATURA DEL PCM

Dada la naturaleza compleja del fenómeno físico de cambio de fase fue necesario el uso de la dinámica de fluidos computacional que es una de las ramas de la mecánica de fluidos que usa métodos numéricos y algoritmos para estudiar y analizar problemas que involucran fluidos en movimiento, mediante la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes, transferencia de calor e incluso otras (reacciones químicas). Existen diferentes métodos numéricos y algoritmos que resuelven de distinta forma las ecuaciones fundamentales.

4.9. GEOMETRIA

Figura 7. Modelo utilizado para el estudio.



Fuente. Autor.

4.10. MALLADO

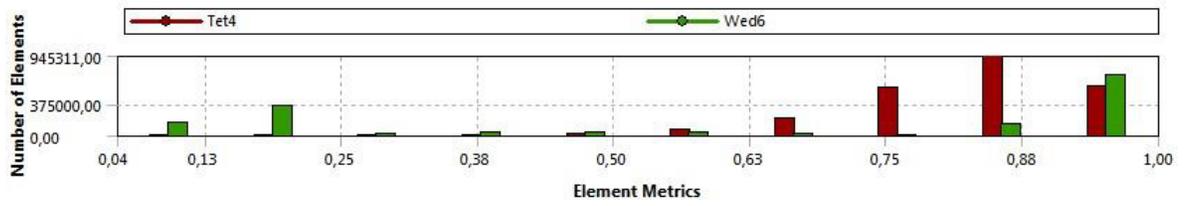
Para el proceso de mallado el ANSYSFLUENT© posee métodos diferentes que permiten realizar una división general de la geometría en una cantidad de elementos para su estudio y de esa manera resolver las ecuaciones diferenciales que involucran el fenómeno físico. A pesar de esto se debe tener cuidado a la hora de realizar el mallado, en este proceso se busca tener una buena calidad del mallado con un número manejable de nodos que no representen un costo computacional demasiado alto. Además de esto se debe tener en cuenta la independencia de malla esto quiere decir que el número de nodos sea el suficiente para obtener una respuesta con una buena confiabilidad es decir que la malla no afecte los resultados obtenidos significativamente. A su vez ANSYSFLUENT© propone unos valores para distinguir la calidad del mallado existen varios métodos para medir la calidad, uno de los más importantes métodos es el "*Skewness*" que es la medida de la distorsión de un elemento comparado con el ideal y es escalado de esta manera, 0 (Excelente) a 1 (inaceptable). La figura que se muestra a continuación da los rangos de valores para la calidad de mallado y su calificación.

Tabla 3. Índices de calidad de malla.

0-0.25	0.25-0.50	0.5-0.80	0.80-0.95	0.95-0.98	0.98-1.00
Excelente	Muy bueno	Bueno	Aceptable	Malo	Inaceptable

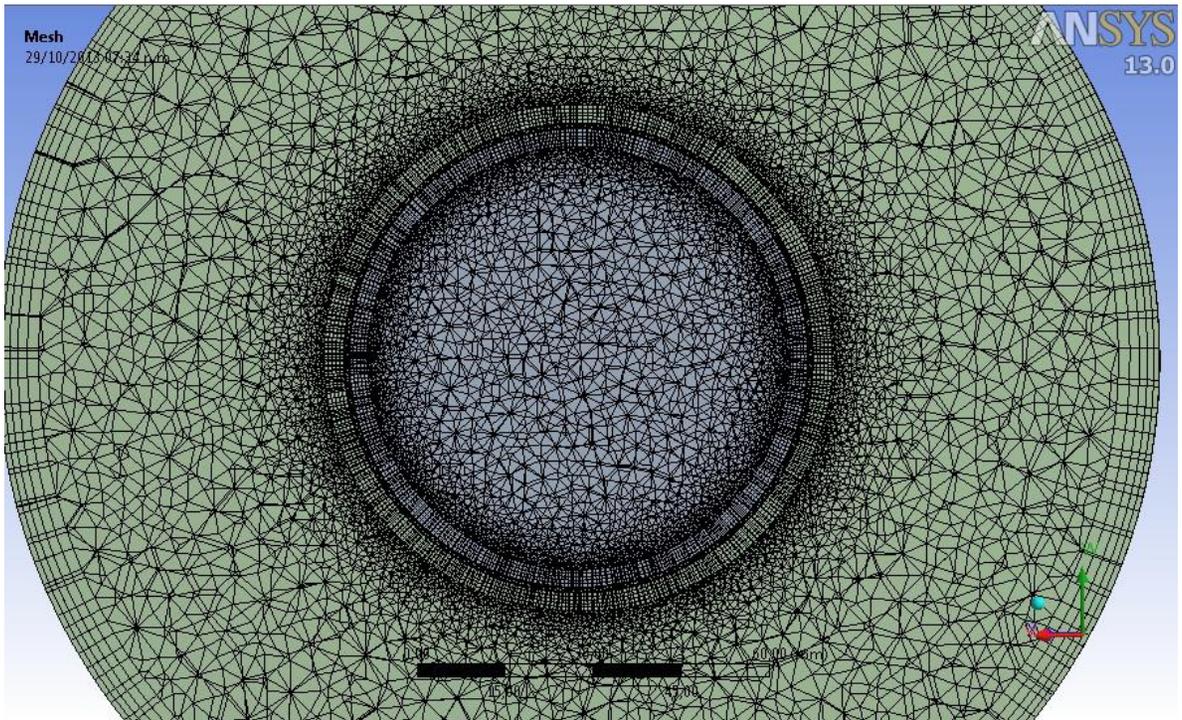
Fuente. Autor.

Figura 8. Calidad de malla.



Fuente. ANSYSFLUENT©.

Figura 9. Mallado de la geometría de estudio.



Fuente. ANSYSFLUENT©.

Tabla 4. Características generales del mallado.

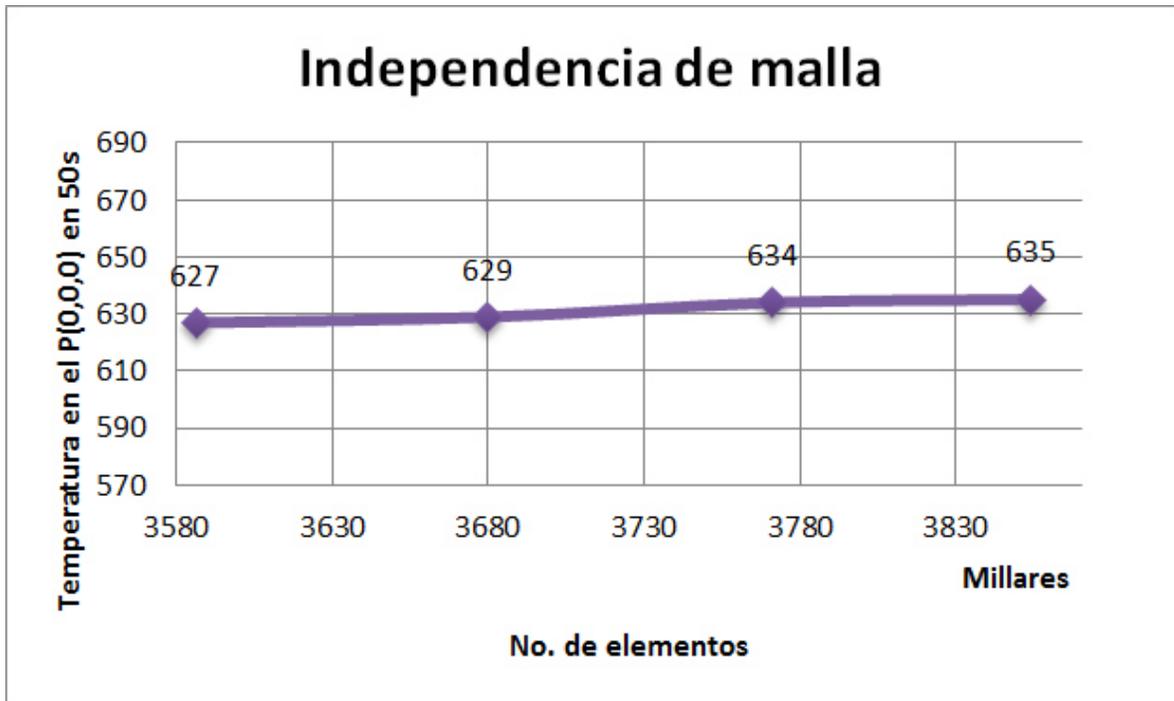
Solver preference	FLUENT
VALORES GLOBALES DE MALLA	
Relevance	0
Use advanced size	On curvature
Relevance center	Coarse
Initial size seed	Active assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span angle center	Fine
Grow rate	1,2
INFLATION	
Geometría	PCM
Geometría	Esfera
Numero de capas	5
Grow rate	1,2
Maximum thickness	7
BODY SIZING	
Geometría	PCM
Geometría	Esfera
Element size	3
Behavior	Soft
CONTACT SIZING	
Geometría	PCM
Geometría	Esfera
Element size	0.7

Fuente. Autor.

4.11. INDEPENDENCIA DE MALLA

Para validar la simulación se tuvo en cuenta diferentes mallados con diferentes números de elementos y así analizar un punto en común para las cuatro simulaciones, punto en común fue el $P(0,0,0)$ y el tiempo de simulación era de 50 segundos, los datos de independencia de malla se analizan en la ilustración 4.

Figura 10. Independencia de malla por No. De elementos.

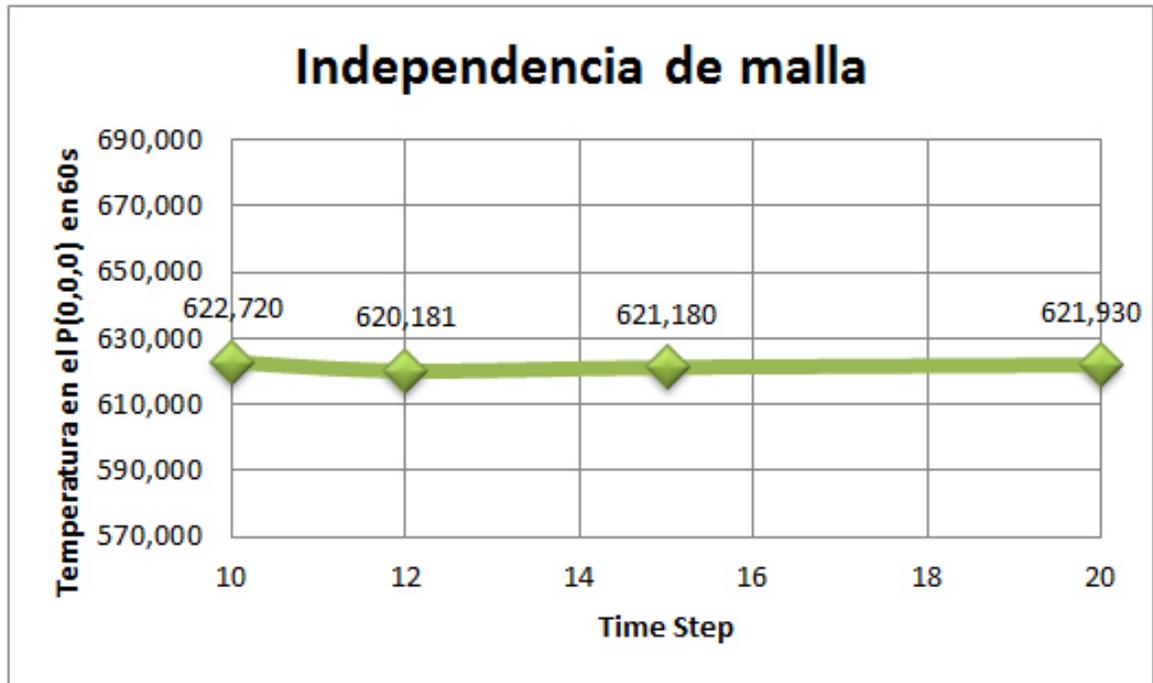


Fuente. Autor.

Otra manera de validar la simulación es tener en cuenta diferentes *time step* y obtener resultados cercanos en un punto para una propiedad. Es un espacio en común para las cuatro simulaciones, fue él $P(0,0,0)$ y el tiempo de simulación era

de 60 segundos, los datos de independencia de malla por *time step* se analizan en la ilustración 7.

Figura 11. Independencia de malla por time step.



Fuente. Autor.

Tabla 5. Tabla de independencia de malla por time step.

Tiempo = 60s	
Independencia de step time	
Step time	Temperatura en p (0,0,0)
10	622,720
12	620,181
15	621,180
20	621,930

Fuente. Autor.

4.12. CONDICIONES DE FRONTERA

Para realizar esta simulación hemos optado por utilizar el código ANSYSFLUENT®. La simulación se plantea en estado transitorio inicialmente con el PCM a una temperatura de $450^{\circ}\text{C} \rightarrow 673,15\text{K}$ en esta condición de temperatura el PCM está completamente en fase líquida y se encuentra por encima del punto de fusión del material 306°C , se procede a inicializar el sistema hasta que alcance una temperatura de $250^{\circ}\text{C} \rightarrow 523,15\text{K}$, para diferentes rangos de temperatura vamos a obtener diferentes tiempos de estabilización por recursos computacionales se adoptó un rango considerablemente pequeño.

Para los diferentes parámetros utilizados en las condiciones de frontera analizaremos la tabla 1:

Tabla 6. Condiciones de frontera.

Frontera	Características	Condición
Entrada	Velocidad entrada	0.5 m/s
Salida	Salida de presión	0 pascal
Paredes	Wall	Free slip
Interface 1	Esfera-Fluido	Fluido-Esfera
Interface 2	PCM-Esfera	Esfera-PCM
Tiempo simulación	1s	Tiempo total
Time step	10 s	
Simulación	Estado transitorio	

Fuente. Autor.

5. METODOLOGÍA.

5.1. PRIMERA ETAPA

La primera etapa del proyecto consiste en recopilar toda la información necesaria para estructurar la investigación. Esta información se obtendrá de fuentes como: libros, revistas indexadas, artículos científicos, patentes, bases de datos, páginas web, videos, información empresarial, entre otros. Luego dicha información será clasificada según el tipo de fuente de donde se obtenga, es decir primaria, secundaria y así sucesivamente.

5.2. SEGUNDA ETAPA

Una simulación CFD comienza con la modelación geométrica CAD del dominio a analizar, es decir representar en el computador la geometría de lo que se quiera simular.

5.3. TERCERA ETAPA

Una vez se tenga el dominio computacional o modelo *computer-aided design* (CAD) del fluido, éste se divide espacialmente en celdas para formar una malla o grilla. Las mallas pueden ser regulares, definidos por celdas en formas de triángulos (2D) o en tetraedros (3D), o pueden ser regulares definidos por celdas en formas de cuadrado (2D) o hexaedros (3D). Las propiedades físicas del fluido,

tales como temperatura o velocidad, son calculadas en cada uno de estos volúmenes como solución de las ecuaciones fundamentales. Un mayor número de elementos necesita mayor capacidad computacional.

5.4. CUARTA ETAPA

Luego de dividir el modelo geométrico en celdas se procede a generar la configuración de la simulación. Esto significa establecer materiales, velocidades en el contorno de la geometría, modelos adicionales para el análisis, etc. Definición de las condiciones físicas y de frontera que serán analizadas durante los procesos de simulación.

5.5. QUINTA ETAPA

Una vez terminada la etapa de pre procesamiento continúa la etapa de solución de las ecuaciones. Los tiempos de cómputo dependen de varios factores: número de elementos, especificaciones del equipo usado, configuración de la simulación. Posterior a la solución se procede a analizar los resultados, sacar conclusiones y por lo general a volver a correr otra simulación ⁸.

⁸

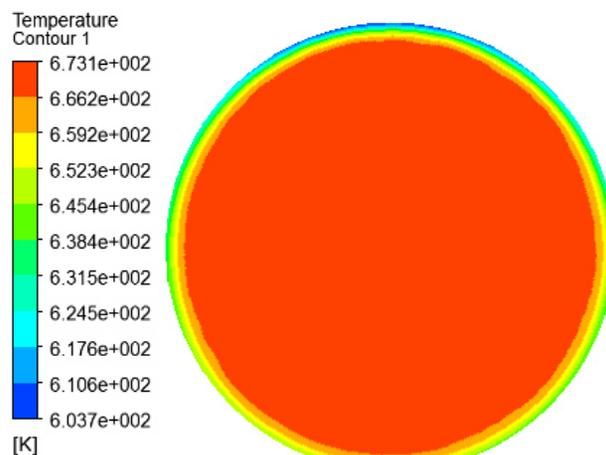
Orrego Santiago. Simulación de fluidos utilizando computadores: una Moderna herramienta para el estudio y análisis de fluidos. Disponible en: <http://mecanica.eafit.edu.co>. pag.5. Consultado el: 30 de septiembre de 2013.

6. RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos después de realizar las simulaciones con el código ANSYSFLUENT®. Las siguientes imágenes son obtenidas con el ANSYSFLUENT® post, el cual muestra de manera gráfica la solución después del proceso iterativo. Perfil de temperatura, y análisis comparativo de las densidades del material a diferentes puntos de temperatura.

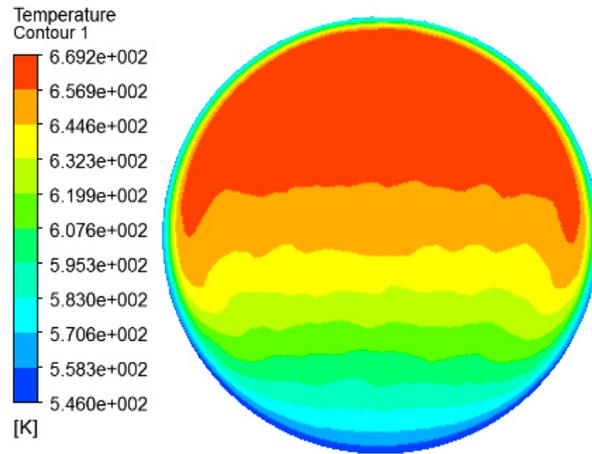
Las imágenes que se aprecian en las figuras 12, 13, 14, muestran los contornos de temperatura a diferentes tiempos de simulación el tiempo de estabilización para un intervalo de temperatura desde 400°C a 250°C, fue de 3 minutos. A su vez se realizó un proceso comparativo de las densidades del PCM a diferentes valores de temperatura y de esa manera comparar la ecuación (1) obtenida experimentalmente, estas imágenes son:

Figura 12. Temperatura en 10s.



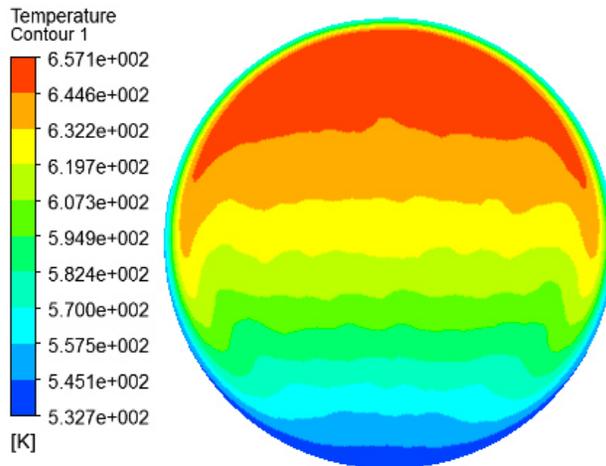
Fuente. Autor.

Figura 13. Temperatura en 30s.



Fuente. Autor.

Figura 14. Temperatura en 60s.



Fuente. Autor.

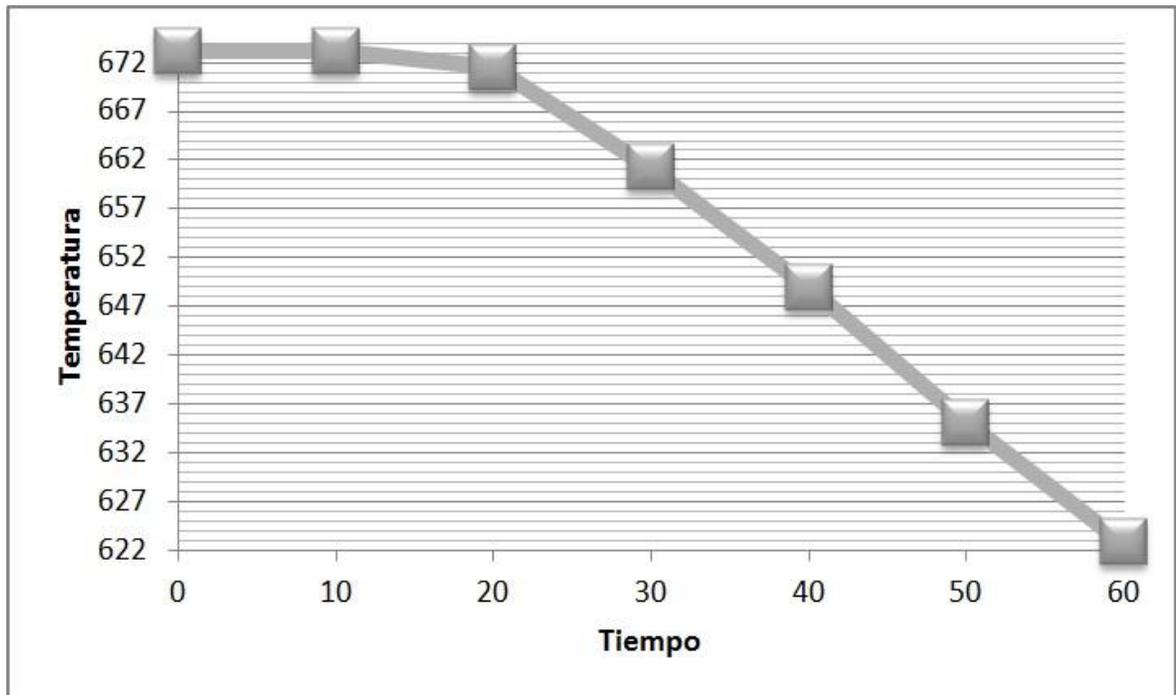
Tabla 7. Tabla comparativa de la densidad con respecto a la temperatura.

Temperatura = 673.15K	
Densidad Real	Densidad Experimental
1.8372	1.856
Temperatura = 603.6 K	
Densidad Real	Densidad Experimental
1.8868	1.894
Temperatura = 536.6 K	
Densidad Real	Densidad Experimental
2.031	2.031

Fuente. Autor.

Para saber el comportamiento del fenómeno se adjunta una ilustración que evidencia el cambio de temperatura con respecto al tiempo, en esta imagen podemos observar que la temperatura del PCM desciende progresivamente al cambio de temperatura del fluido. La simulación inicio en un valor de temperatura de $673.15K$ que corresponde a $450^{\circ}C$, la simulación se configuro para que el fluido tuviera un cambio de temperatura hasta los $523.15K \rightarrow 250^{\circ}C$. El tiempo de simulación fue de 1 segundo, pero el sistema con este rango de temperatura alcanza una estabilización a los 3 minutos.

Figura 18. Temperatura con respecto al tiempo.

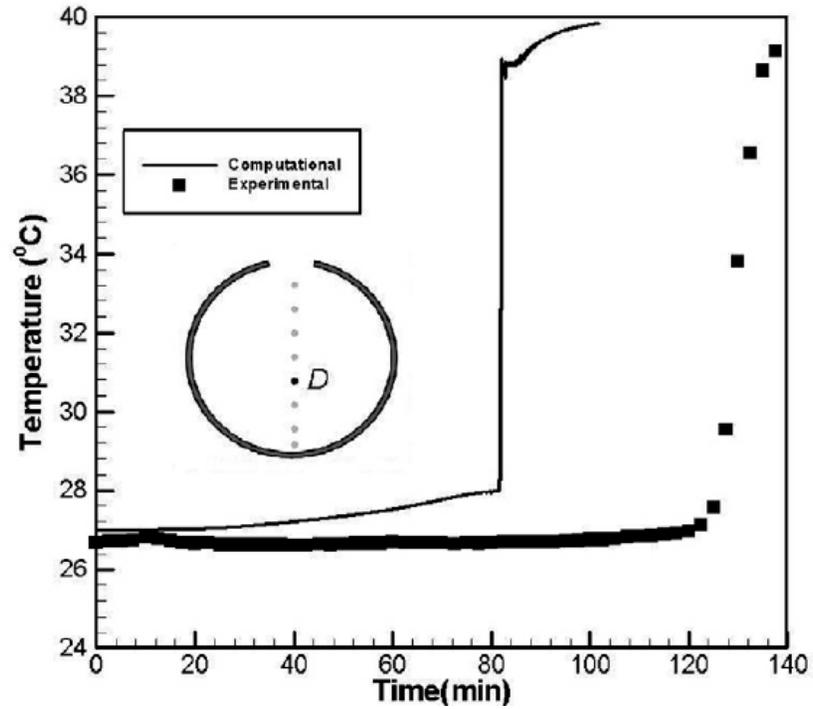


Fuente. Autor.

Para un buen análisis del fenómeno de estudio, se compararon los resultados de otros autores que investigaron los perfiles de temperatura de diferentes materiales de cambio de fase.

Esta investigación experimental y computacional es dirigida a la comprensión del papel de la convección impulsada por la flotabilidad durante la fusión del PCM dentro de una cápsula esférica, el material de cambio de fase utilizado es la cera de parafina n – octadecano, estaba limitada durante la fusión dentro de una esfera de vidrio transparente a través del uso de termopares instalados dentro de la esfera ⁹.

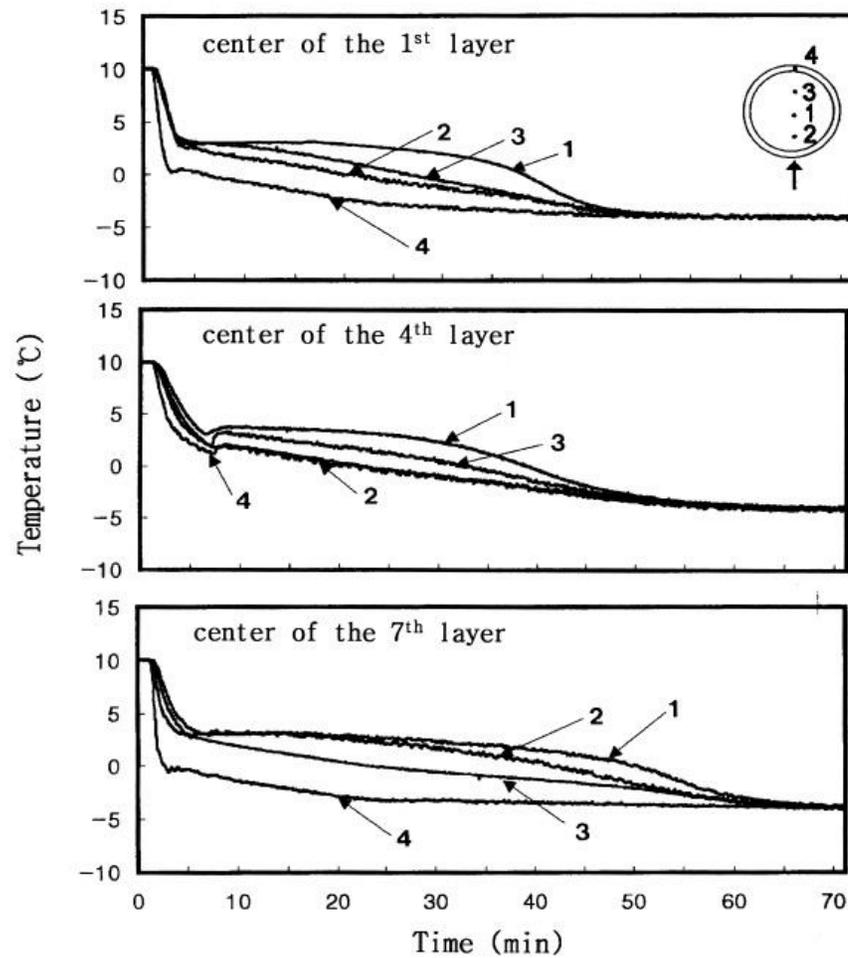
Figura 19. Comparación de la temperatura en el punto D y la simulación.



Fuente. Experimental and computational study of constrained melting of phase change materials (PCM) inside a spherical capsule.

El objetivo del presente estudio fue investigar las características térmicas de la parafina en una cápsula esférica durante los procesos de fusión y solidificación. Los experimentos se realizaron con, n-tetra decano, y una mezcla de n- tetra decano (40 %) y n-hexa decano (60 %) y agua ¹⁰.

Figura 20. Comparación de la temperatura en diferentes puntos.



Fuente. Thermal characteristics of paraffin in a spherical capsule during freezing and melting processes.

¹⁰

Cho Keumnam, Choi S.H. Thermal Characteristics Of Paraffin In A Spherical Capsule During Freezing And Melting Processes. Disponibles en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931099003294>. pag.6. Consultado el: 30 de octubre de 2013.

7. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos por medio de la simulación concuerdan con los resultados obtenidos por Bauer, Laing, Kröner, Tamme, en su investigación, *Sodium Nitrate For High Temperature Latent Heat Storage*, demostrando que la importancia del análisis CFD está fundada en bases sólidas y le brinda confiabilidad al proceso realizado para alcanzar estos resultados por medio de esta investigación.
- Los resultados obtenidos en las figuras 15, 16, 17, muestran que existe una relación entre la densidad del material de cambio de fase y la temperatura que este alcanza, que es inversamente proporcional, ya que los contornos nos demuestran que a medida que la temperatura disminuye la densidad de material aumenta y esta se acomoda en la parte inferior de la esfera.
- En los contornos de densidad se evidencia un movimiento al interior del PCM cuando este está cambiando de fase, este movimiento no es producido por fuerzas externas si no por las diferencias de densidades del material de cambio de fase en el interior de la esfera en presencia de la fase sólida y líquida. Este fenómeno se conoce como *Buoyancy-Driven Convection*.
- Los tiempos de estabilización y los perfiles de temperatura varían en función de la velocidad del fluido y los rangos de temperatura entre menor sea el rango menor será el tiempo de estabilización.

8. BIBLIOGRAFÍA

ANSYSFLUENT© Theory guide. ANSYS. [En línea] 30 de septiembre de 2013. [Citado el: 30 de Septiembre de 2013.] http://cdlab2.fluid.tuwien.ac.at/LEHRE/TURB/Fluent.Inc/v140/flu_th.pdf.

Bauer. T, Laing. D. talon. stockton. [En línea] 28 de septiembre de 2013. [Citado el: 28 de Septiembre de 2013.] http://talon.stockton.edu/eyos/energy_studies/content/docs/effstock09/Session_3_1_Efficient_Solutions_using_short_term_TES/4.pdf.

E. Assis, L. Katsman, G. Ziskind, R. Letan. 2007. sciencedirect. [En línea] 1 de Mayo de 2007. [Citado el: 26 de Septiembre de 2012.] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931006005503>.

F.L. Tan, S.F. Hosseinizadeh, J.M. Khodadadi, Liwu Fan. 2009. *sciencedirect.com*. [En línea] 16 de 4 de 2009. [Citado el: 4 de 11 de 2012.] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931009001896>.

Ian W. Eames, Kamel T. Adref. 2002. onlinelibrary.wiley. [En línea] 20 de Septiembre de 2002. [Citado el: 26 de Septiembre de 2012.] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/er.816/abstract?globalMessage=0>.

J.M. Khodadadi, Y. Zhang. 2001. sciencedirect. [En línea] 1 de Abril de 2001. [Citado el: 26 de Septiembre de 2012.] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931000001927>.

Keumnam Cho, , S.H. Choi. 2000. sciencedirect. [En línea] 1 de Septiembre de 2000. [Citado el: 26 de Septiembre de 2012.] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931099003294>.

Ministerio de mina [En línea]. Memoria De La Segunda Comunicación Nacional De Colombia Ante La CMNUCC. [Citado el: 22 de diciembre de 2013]. Disponible en: http://www.minambiente.gov.co/documentos/5783_res_ejecut_segun_comun_camb_clima.pdf.

Orrego., Santiago. 2009. *mecanica.eafit.edu.co*. [En línea] 9 de 11 de 2009. [Citado el: 6 de 11 de 2012.] http://mecanica.eafit.edu.co/~sorrego/IntroCFD_Mecapl.pdf.

Philip B. Grimado, Bruno A. Boley. 2005. onlinelibrary.wiley. [En línea] 30 de Junio de 2005. [Citado el: 25 de Septiembre de 2012.] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/nme.1620020204/abstract>.

Sanjay K. Roy, Subrata Sengupta. 1990. sciencedirect. [En línea] 1 de Junio de 1990. [Citado el: 26 de Septiembre de 2012.] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/001793109090246Q>.

T. Kousksou, P. Bruel. 2010. sciencedirect. [En línea] 10 de Abril de 2010. [Citado el: 26 de Septiembre de 2012.] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700710001234>.

Tan, F.L. 2008. sciencedirect. [En línea] 1 de Abril de 2008. [Citado el: 26 de Septiembre de 2012.] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S073519330700190X>.

Yunus A. Çengel, Michael A. Boles. 2009. *TERMODINÁMICA*. Mexico, D.F : 978-970-10-7286-8, 2009.

Zalba Belén, Marín José, Cabeza. Luisa F. sciencedirect. [En línea] 30 de septiembre de 2013. [Citado el: 30 de Septiembre de 2013.] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431102001928>.