

MODELO NUMÉRICO CFD DEL CAMBIO DE FASE DE SUSTANCIAS DE ACUMULACIÓN DE CALOR/FRÍO CONFINADAS ENTRE SUPERFICIES PLANAS A TEMPERATURA DADA

Fátima Riestra Artime^[*], María Manuela Prieto González, Inés Suarez Ramón^[]**
[*] Alumno; [**] Tutor(es)
UO81637@uniovi.es

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

RESUMEN

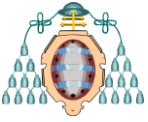
Una de las mejores alternativas para mejorar la eficiencia energética y reducir el consumo de energía primaria a nivel de consumo doméstico es el almacenamiento de energía térmica en sustancia de cambio de fase. Estos sistemas permiten eliminar el desajuste existente entre demanda y aporte energético, mitigar los picos de carga, recuperar el calor residual y para aplicaciones para la conservación de la energía y aire acondicionado. En este estudio se utilizó el software Fluent 14.5 para el cálculo numérico de los procesos de fusión y solidificación de tres sustancias de cambio de fase, agua, RT60 y ácido palmítico confinadas en dos geometrías, vertical y horizontal y con condiciones de contorno de primera especie. Obtenidos y analizados los resultados se observó que el agua es el fluido que más potencia térmica transmite y que lo hace mejor con una geometría horizontal que vertical. En el caso del RT60 y del ácido palmítico su comportamiento difiere en función de la geometría y sería necesario un estudio en mayor profundidad. Lo mismo ocurre con el mecanismo de cambio de fase, mientras que para el palmítico la solidificación es mucho más rápida que la fusión, tanto para el agua como para el RT60 ocurre lo contrario independientemente de la geometría.

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos industriales, los procesos de generación de bienes y servicios a la sociedad como el transporte, y nuestras propias actividades domésticas dependen de la energía para funcionar, de modo que puede afirmarse que la energía es la base de nuestro nivel de bienestar.

Según el estudio [1] realizado en 2011 por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE) [2], en España, el consumo energético residencial supone el 17% del consumo total final del país y el 25% de la demanda de energía eléctrica. El hogar medio español consume 102.7 kWh/m² al año y este valor se multiplica por dos en el caso de una vivienda unifamiliar. En términos del uso energético, el sistema de calefacción supone un 47% de dicho consumo, el agua caliente sanitaria un 18.9% debiéndose el 42% restante al consumo eléctrico para distintos usos como iluminación y electrodomésticos entre otros.

Mediante la combustión de combustibles fósiles se obtiene calor que se utiliza por un lado, en centrales térmicas para generar el vapor de agua necesario para mover una turbina y obtener electricidad, y por otro en nuestros hogares para calentar agua destinada a calefacción y/o agua caliente sanitaria. Los combustibles fósiles son compuestos de base carbono y por tanto, su combustión da lugar a la emisión de gases de efecto invernadero, CO₂ en su mayoría, causantes



directos del aumento de la temperatura del planeta y del actual cambio climático. Por otro lado, los yacimientos de este tipo de combustibles se encuentran localizados en determinadas zonas del planeta que además suelen ser zonas de inestabilidad política. Esto hace que los países occidentales presenten una enorme dependencia de estos países y que se vean obligados a aceptar unos precios en algunas ocasiones abusivo. El fomento del uso de las energías renovables, la reducción del consumo de energía primaria por parte de los países desarrollados y la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías más eficientes energéticamente son medidas adoptadas en la lucha contra el cambio climático y en la búsqueda de una independencia energética.

Una de las alternativas de mejora de eficiencia energética es el almacenamiento de energía térmica en los materiales de cambio de fase. , sistema que permite, entre otros, la mitigación de los picos de carga, el desplazamiento del consumo energético y el almacenamiento de energía procedente de la radiación solar o de la refrigeración nocturna. Las unidades de almacenamiento de calor latente fueron intensamente estudiadas durante la crisis energética de finales de los 70 y principios de los 80 con el objetivo de utilizarlas en sistemas de calefacción solares. Actualmente el interés por dicha aplicación continúa presente aunque los investigadores se decantan cada vez más por su uso para la recuperación de calor residual, la mitigación de los picos de carga, la conservación de la energía en edificios o para aplicaciones de aire acondicionado. [3]

Estos sistemas se basan en la captura y liberación de energía cuando el material experimenta un cambio de fase, de modo que al aumentar la temperatura, el material funde y absorbe calor mientras que al disminuir la temperatura, el material solidifica y desprende el calor absorbido. Son por tanto, sistemas particularmente interesantes porque proporcionan un almacenamiento de energía de alta densidad frente al método convencional de calor sensible ya que requieren un peso o volumen de material menor para una cantidad de energía dada. Esto hace que sean sistemas de un alto rendimiento y una gran fiabilidad que además presentan la ventaja de una gran capacidad de almacenamiento que permite eliminar el desajuste existente entre el aporte y la demanda de energía

almacenando la energía térmica durante los periodos en los que el suministro es suficiente o barato para posteriormente descargar dicha energía durante los periodos de suministro insuficiente o caro. [4,5]

Este estudio forma parte de un proyecto conjunto de tres universidades españolas (Oviedo, PV y la Rioja) ENE2012-38633-C03-02 para el desarrollo de un equipo de almacenamiento de energía destinado al uso doméstico. En este caso, se analizará la transmisión de calor a través de dos placas planas rectangulares con condición de contorno de primera especie y disposición tanto vertical como horizontal de tres materiales (agua, RT60 y ácido palmítico).

2. MÉTODO DE TRABAJO

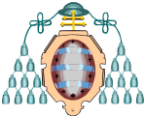
2.1. Modelo matemático de Fluent

Se utilizó el software Fluent 14.5 de ANSYS para la simulación del problema de cambio de fase. Este software contiene un modelo específico para la simulación de problemas de solidificación y fusión [6-10], que puede aplicarse tanto a cambios de fase a temperatura constante, (sustancias puras), como a cambios de fase dentro de un rango de temperaturas (aleaciones o mezclas). A su vez, este modelo presenta una serie de limitaciones, recogidas en la Ansys Fluent Theory Guide. [11]

Durante los procesos de cambio de fase, el dominio se divide en dos regiones, la líquida y la sólida. Estas regiones aparecen separadas por una interfase que se encuentra a la temperatura de cambio de fase y que es la región donde se produce dicho cambio de fase.

Fluent no localiza explícitamente esta región de interfase sino que utiliza un método de entalpía-porosidad según el cual, la región de interfase es tratada como una zona porosa con porosidad igual a la fracción líquida. La fracción líquida se calcula en cada iteración en base al balance de entalpía y se define como la fracción de volumen de cada celda del dominio que está ocupada por líquido. Por tanto, según la formulación de Fluent, en la región de interfase convivirán sólido y líquido y su porosidad podrá tomar valores entre 0 y 1 en función de lo avanzado que esté el cambio de fase.

Por otro lado, la existencia de material sólido en la región de interfase hace que la presión y la



porosidad disminuyan y para que el modelo tenga en cuenta este efecto es necesario introducir en las ecuaciones del momento los llamados términos fuente.

El balance de energía viene dado por la ecuación:

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla(\rho v H) = \nabla(\kappa \nabla T) + S \quad (1)$$

Donde ρ es la densidad, H la entalpía del material, v la velocidad del mismo, κ la conductividad térmica, T la temperatura y S la generación. La resolución del problema por tanto, requerirá de la iteración entre el balance y la ecuación de la fracción líquida.

Por su parte, la entalpía del material se calcula como la suma de la entalpía sensible (h) y la entalpía latente de cambio de fase (ΔH):

$$H = h + \Delta H \quad (2)$$

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (3)$$

$$\Delta H = \beta L \quad (4)$$

Por su lado, la fracción líquida se define como:

$$\beta = \frac{T - T_{solidificación}}{T_{fusión} - T_{solidificación}} \quad (5)$$

De modo que,

$$\beta = 0 \text{ si } T < T_{solidificación}$$

$$\beta = 1 \text{ si } T > T_{fusión}$$

Por otro lado, en las ecuaciones del momento debe introducirse el término fuente, que se describe como:

$$S = \frac{(1 - \beta)^2}{\beta^3 + \epsilon} A_{mush} (v - v_p) \quad (6)$$

Donde ϵ es un número muy pequeño cuya finalidad es evitar que en algún momento el denominador se anule, A_{mush} es la constante de zona de interfase que indica la rapidez con la que la velocidad se anula al solidificar el material y v_p

es la velocidad del sólido cuando es expulsado al exterior.

2.2. Descripción del problema

Los materiales utilizados para el almacenamiento de energía térmica de calor latente deben tener un valor alto de calor latente y alta conductividad térmica. También deben fundir con un subenfriamiento mínimo y deben ser químicamente estables, baratos, no tóxicos, no corrosivos y de amplia disponibilidad [12]. Su presión de vapor debe ser baja, su calor específico por unidad de masa o de volumen alto y debe experimentar un cambio de volumen pequeño durante el cambio de fase [3]. Su punto de fusión debe estar situado dentro del rango de temperaturas de operación de la aplicación que se le vaya a dar, de modo que aquellos que funden por debajo de 15°C se utilizan en almacenamiento de frío en aire acondicionado mientras que los que lo hacen por encima de 90°C se utilizan en refrigeración por absorción. Por otro lado, todos aquellos con puntos de fusión situados entre estas dos temperaturas pueden ser utilizados en calefacción solar y en aplicaciones de mitigación de carga. Los más estudiados durante los últimos 40 años son las sales hidratadas, las parafinas, los ácidos grasos y los eutécticos de compuestos tanto orgánicos como inorgánicos [12].

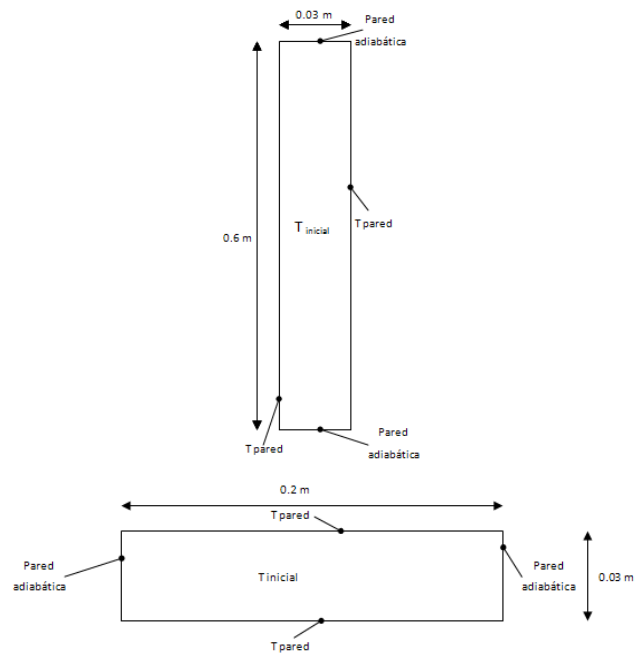
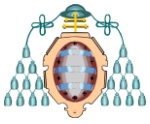


Fig. 1. Geometrías estudiadas



En este trabajo se ha estudiado el comportamiento de tres sustancias durante el cambio de fase de líquido a sólido y viceversa: el agua, cuyo punto de fusión es 273.15K; el RT60, que funde entre 326.15K y 334.15K (53°C y 61°C) y el Ácido Palmítico que funde a 337.65 K (64.5 °C). Por otro lado, se han considerado dos geometrías, una vertical de 60 cm de alto y 3 cm de ancho y otra horizontal de 20 cm de ancho y 3 cm de alto, como se puede observar en la Fig. 1.

Para cada una de estas geometrías y para cada una de las sustancias estudiadas se simuló un caso de solidificación y otro de fusión con las condiciones de contorno de primera especie recogidas en la Tabla 1:

Tabla 1.

Casos a estudiar y condiciones de contorno de primera especie de los mismos.

AGUA				
	T PARED	T INICIAL	ΔT_{sub}	ΔT_{sobrec}
FUSIÓN	277.15K	270.15K	3 K	0 K
SOLIDIFICACIÓN	270.15K	277.15K	0 K	4 K

RT60				
	T PARED	T INICIAL	ΔT_{sub}	ΔT_{sobrec}
FUSIÓN	338.15K	323.15K	3 K	0 K
SOLIDIFICACIÓN	323.15K	338.15K	0 K	4 K

ÁCIDO PALMÍTICO				
	T PARED	T INICIAL	ΔT_{sub}	ΔT_{sobrec}
FUSIÓN	345.15K	333.15K	4.5 K	K
SOLIDIFICACIÓN	323.15K	338.15K	K	0.5 K

Utilizando el software GAMBIT, se dibujaron y mallaron las correspondientes superficies en 2D, fijando para el caso horizontal 100 divisiones a lo ancho y 30 a lo alto haciendo un total de 3000 celdas de 1 mm de ancho y 2 mm de alto, y para el caso vertical se fijaron 30 divisiones a lo ancho

y 300 a lo alto haciendo un total de 9000 celdas de iguales dimensiones que las horizontales.

La malla creada en GAMBIT se importa al FLUENT 14.5 para llevar a cabo la simulación. Se crea el nuevo material, agua, RT60 o ácido palmítico y se introducen sus propiedades por puntos. Estas propiedades se obtuvieron de Cedeño et.all [13-15], y aparecen recogidas en la Tabla 2.

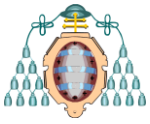
Tabla 2.

Propiedades físicas de los fluidos estudiados.

AGUA				
T	k	ρ	Cp	μ
(K)	(W/m K)	(kg/m ³)	(J/kg K)	(kg/m s)
273.15	2.18	916.8	2090	10
275.15	0.556	1000	4217	0.0017
280.15	0.568	1000	4203	0.00145
285.15	0.58	1000	4192	0.00125

RT60				
T	k	ρ	Cp	μ
(K)	(W/m K)	(kg/m ³)	(J/kg K)	(kg/m s)
326.15	0.2	880	6073	0.03260
334.15	0.2	770.00	2340	0.02853
338.15	0.2	766.92	2340	0.02841
341.15	0.2	764.61	2340	0.02832
344.15	0.2	762.30	2340	0.02824
347.15	0.2	759.99	2340	0.02816
350.15	0.2	757.68	2340	0.02807

ÁCIDO PALMÍTICO						
T	ρ	Cp	T	μ	T	k
(K)	(kg/m ³)	(J/kgK)	(K)	(kg/ms)	(K)	(W/mK)
337.65	852.7	1844.15	337.65	10	334.15	0.32
338.65	858.85	2056.25	338.15	0.00855	337.15	0.16
339.65	858.15	2062.15	343.15	0.00759	342.15	0.155
340.65	857.45	2068.05	348.15	0.0067	345.15	0.16
341.65	856.75	2073.95	353.15	0.00587		
342.65	856.05	2079.85	358.15	0.00534		



Se introducirán también los calores de fusión de cada uno de los materiales, 334000 J/kg para el agua, 134544 J/kg para el RT60 y 208200 J/kg para el ác. Palmítico, y las temperaturas de cambio de fase.

A continuación se introducen las condiciones de contorno de primera especie anteriormente citadas y por último el algoritmo de discretización.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados que se han obtenido y cuyo análisis se va a realizar son: la potencia térmica transmitida en función del tiempo y los mapas de fracción líquida en instantes intermedios.

Se han definido casos según el PCM considerado y para cada caso se han estudiado los resultados tanto en solidificación como en fusión para las dos geometrías descritas, vertical y horizontal. Mediante el análisis de los resultados obtenidos se puede determinar cuál de las dos geometrías será la más adecuada teniendo en cuenta la potencia transmitida por unidad de área y el tiempo que se tarda en realizar el proceso de solidificación y fusión. En primer lugar se hará un estudio para cada uno de los fluidos por separado y finalmente se compararán los tres fluidos entre sí.

3.1. CASO 1. EL AGUA

En la Tabla 3 se muestran los datos alcanzados con la simulación del agua:

Tabla 3.

Puntos finales alcanzados con la simulación.

		Tiempo Final	Fracción Líquida
FUSIÓN	HORIZONTAL	3400 s	0.947
	VERTICAL	2750 s	0.655
SOLIDIFICACIÓN	HORIZONTAL	4850 s	0.003
	VERTICAL	5800 s	0

En la Fig. 2. se representa comparativamente para las dos geometrías, horizontal y vertical, el comportamiento del agua durante el proceso de fusión. Se observa una

zona entre $\beta = 0.286$ y $\beta = 0.78$ para la geometría horizontal y entre $\beta = 0.42$ y $\beta = 0.644$ para la geometría vertical, donde la potencia térmica transmitida toma valores aproximadamente estables en el tiempo. Se han calculado las potencias térmicas medias transmitidas para cada geometría, obteniéndose un valor de 3778.1 W/m² para la geometría horizontal y de 2674 W/m² para la vertical.

En la Fig. 3. se representa la potencia transmitida por el agua durante la solidificación y se observa que es muy similar en ambas geometrías. En este caso, la zona donde se considera la potencia térmica transmitida estable con el tiempo se localiza entre $\beta = 0.557$ y $\beta = 0.039$ para la geometría horizontal y entre $\beta = 0.48$ y $\beta = 0.047$ para la geometría vertical. Las potencias medias transmitidas calculadas son 2124.4 W/m² para el caso horizontal y 2099.7 W/m² para el caso vertical. Estos valores son muy similares pero es algo superior para el caso horizontal, por tanto la solidificación será más rápida

En las Fig. 4. se representan los mapas de fracción líquida del proceso de fusión del agua para ambas geometrías en la situación intermedia en la que $\beta = 0.5$. La densidad del agua líquida es mayor que la del hielo de modo que al fundirse, el material fundido tiende a desplazarse hacia la parte superior apareciendo corrientes de convección en el seno del mismo. Estas corrientes de convección activan la transmisión de calor en la pared superior y hacen que la potencia transmitida sea mayor que en la inferior. En el caso de la geometría vertical esto es visible ya que en la parte superior apenas hay fluido fundido ya que el líquido se desplaza hacia la parte inferior. Sin embargo sí es visible en la geometría horizontal donde se pueden observar una especie de ondas en la parte superior que no aparecen en la inferior. En la Fig. 5. Se representan los mapas de fracción líquida en el mismo instante temporal para la solidificación del agua. En este caso no se observa la existencia de convección significativa en la geometría horizontal y la solidificación tiene lugar de forma simétrica en ambas superficies, sin embargo, en la geometría vertical se observa un mayor grado de solidificación que sí se debe a los efectos de la convección. Como el hielo es menos denso que el agua, tiende a ascender y flotar acumulándose en dicha zona.

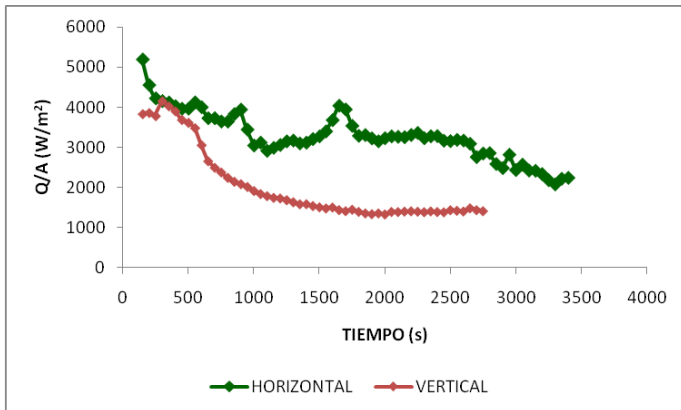
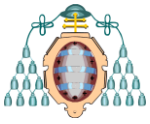


Fig. 2. Potencia transmitida por unidad de área en función del tiempo para la fusión del agua.

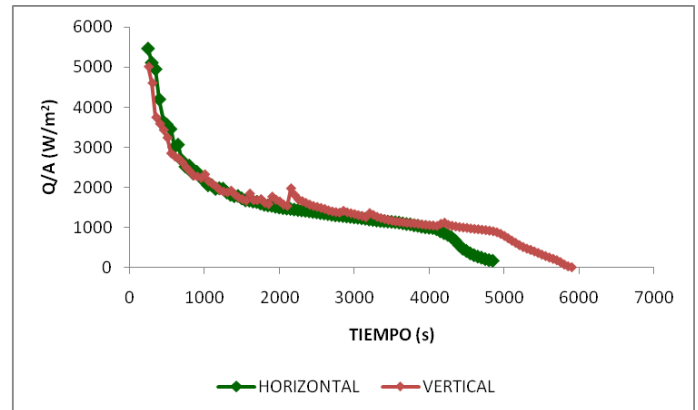


Fig. 3. Potencia transmitida por unidad de área en función del tiempo para la solidificación del agua.

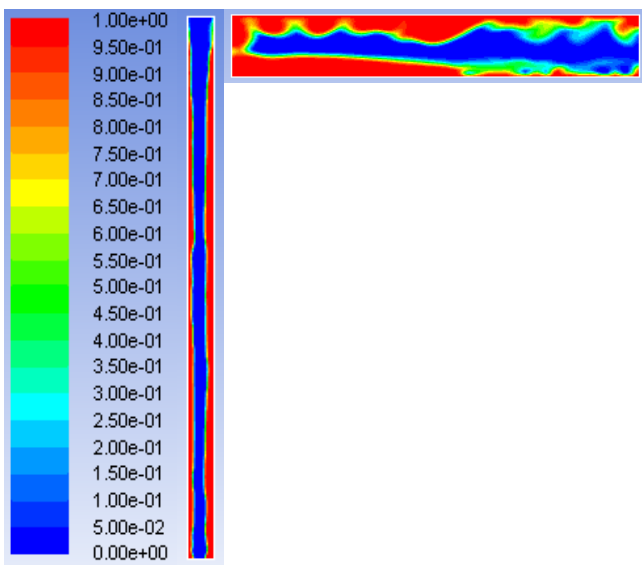


Fig. 4. Mapas de fracción líquida para la fusión del agua para el instante en que $\beta=0.5$

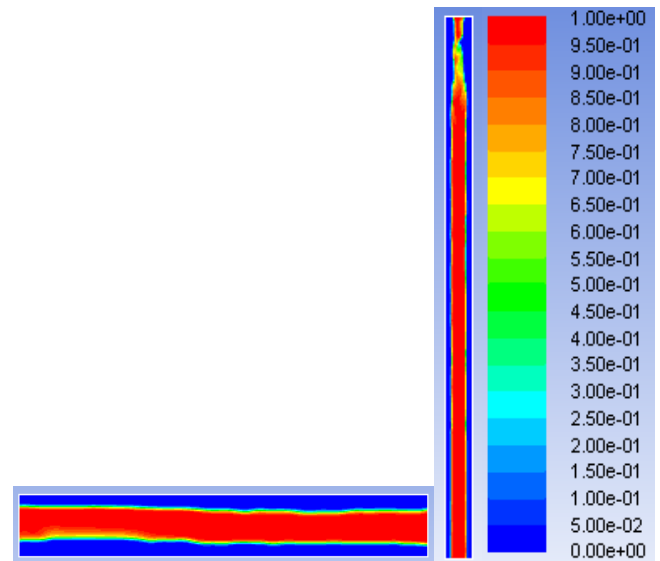


Fig. 5. Mapas de fracción líquida para la solidificación del agua en el instante en que $\beta=0$.

3.2. CASO 2. EL RT60

En la Tabla 4. Se muestran los resultados alcanzados con la simulación del RT60:

Tabla 4.

Puntos finales alcanzados con la simulación

		Tiempo Final	Fracción Líquida
FUSIÓN	HORIZONTAL	2700 s	1
	VERTICAL	5900 s	0.989
SOLIDIFICACIÓN	HORIZONTAL	9150 s	0.009
	VERTICAL	5800 s	0.145

En la Fig. 6 se representan los datos obtenidos de la potencia térmica transmitida por el RT60 durante la fusión. Al igual que en el caso anterior los datos presentan una zona donde la potencia térmica presenta cierta estabilidad en el tiempo. En el caso de la geometría horizontal, esta zona se sitúa entre $\beta=0.317$ y $\beta=0.879$ y en el vertical entre $\beta=0.29$ y $\beta=0.766$. Por otro lado, se calculó que la potencia total media transmitida para la geometría horizontal es de 1770.6 W/m^2 mientras que para la vertical es de 827 W/m^2 y por tanto sería con la geometría horizontal con la que se conseguiría una fusión más rápida.

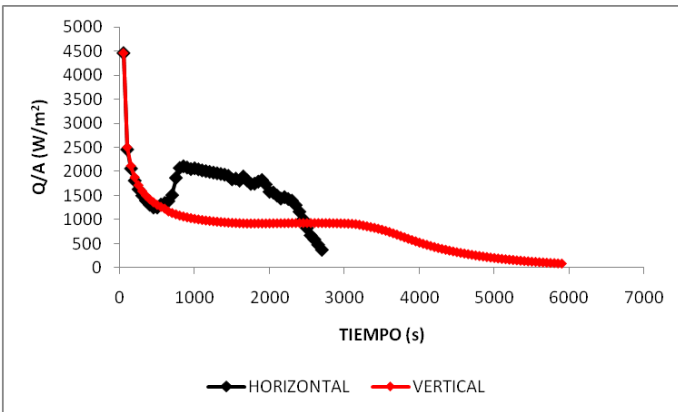
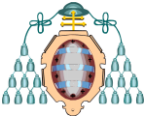


Fig. 6. Evolución temporal de la potencia térmica transmitida durante la fusión del RT60.

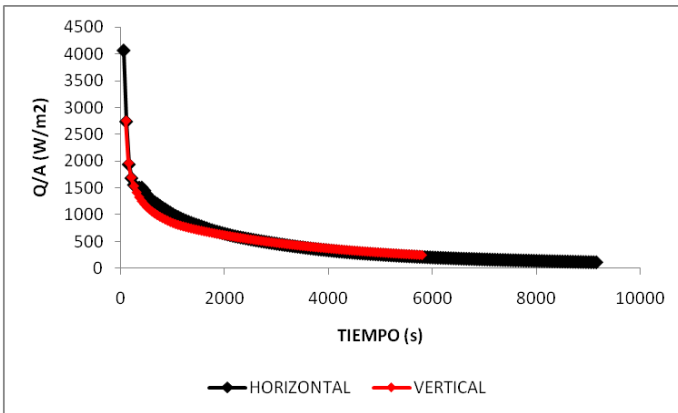


Fig. 7. Evolución temporal de la potencia térmica transmitida durante la solidificación del RT60.

En la Fig. 7. Se representa la evolución con el tiempo de la potencia térmica transmitida durante el proceso de solidificación del RT60 y al igual que en los casos anteriores se observa una tendencia estable de los resultados entre $\beta=0.358$ y $\beta=0.009$ en el caso horizontal y entre $\beta=0.569$ y $\beta=0.145$ en el caso vertical. En este caso, la potencia total media transmitida con la geometría horizontal fue de 504.3 W/m^2 mientras que la transmitida con la geometría vertical fue de 641.7 W/m^2 . Al contrario de lo que ocurría hasta ahora, se logrará una solidificación más rápida con la geometría vertical.

En la Fig. 8. Se representan los mapas de fracción líquida correspondientes a la fusión del RT60 y para las dos geometrías en el instante en que $\beta=0.5$. Al contrario de lo que ocurría con el agua, la densidad del RT60 líquido es menor que la del sólido de modo que el líquido tiende a subir y por tanto en este caso, en la geometría

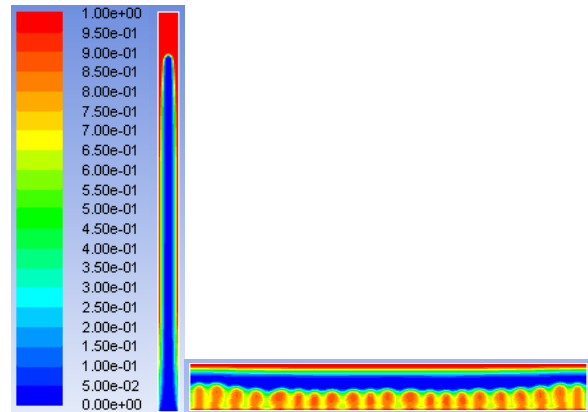


Fig. 8. Mapas de fracción líquida del RT60 durante la fusión al instante en que $\beta=0.5$

horizontal las corrientes de convección se forman en la zona inferior y se activará la transmisión de calor en esta zona. En el caso de la geometría vertical ocurre lo mismo y el material fundido, menos denso, tiende a subir acumulándose en la zona superior de la geometría como se observa en la Fig. 8.

En la Fig. 9. Se representan los mapas de fracción líquida del RT60 durante la solidificación para el instante en que $\beta=0.5$. En este caso al estar enfriando el fluido en las paredes, en la geometría horizontal las corrientes de convección aparecen en la pared superior ya que el RT60 solidificado tiende a desplazarse hacia abajo y el líquido hacia arriba. En el caso vertical ocurre lo mismo y el sólido permanece en la parte inferior mientras que el líquido se desplaza hacia la superior.

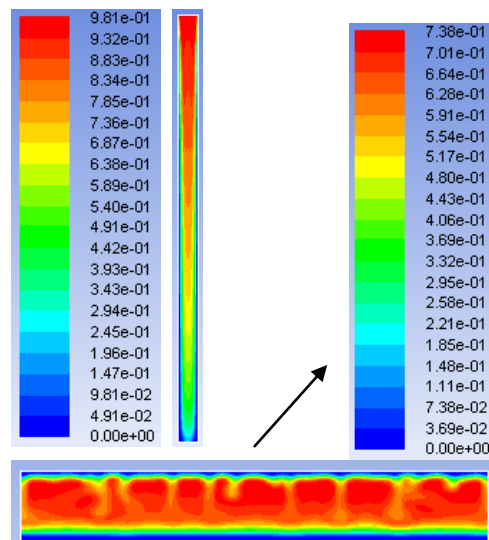
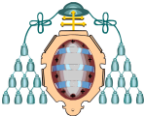


Fig. 9. Mapas de fracción líquida durante la solidificación del RT60 para el instante en que $\beta=0.5$



3.3. CASO 3. EL ÁC. PALMÍTICO

En la Tabla se recogen los resultados finales alcanzados con la simulación de los procesos de cambio de fase del ácido palmítico.

Tabla 5.
Resultados finales de la simulación

		Tiempo Final	Fracción Líquida
FUSIÓN	HORIZONTAL	4800 s	0.620
	VERTICAL	3800 s	0.505
SOLIDIFICACIÓN	HORIZONTAL	5050 s	0.093
	VERTICAL	4050 s	0.19

A diferencia de los casos anteriores en la Fig 10. se observa claramente que la potencia transmitida mantiene un comportamiento estable con el tiempo. Este comportamiento se localiza en la geometría horizontal entre $\beta=0.204$ y $\beta = 0.62$ mientras que en la geometría vertical se localiza entre $\beta=0.204$ y $\beta=0.505$. Al calcular las potencias totales medias transmitidas se ha obtenido que mientras que para la geometría horizontal se transmiten 800.9 W/m^2 para la geometría vertical se transmiten 741 W/m^2 y por tanto, la geometría horizontal proporcionará un proceso de fusión más rápido.

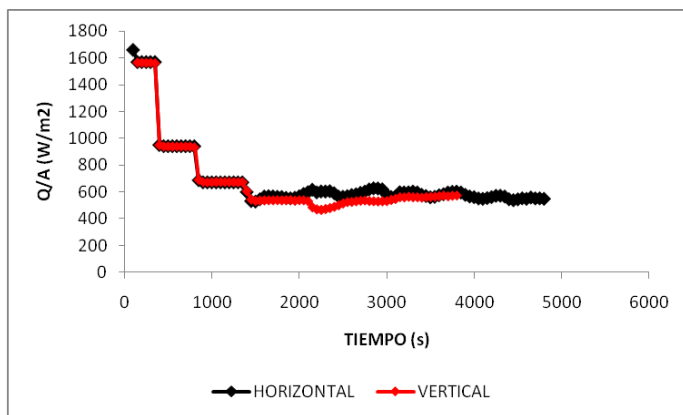


Fig. 10. Evolución temporal de la potencia transmitida durante la fusión del ácido palmítico

En la Fig. 11. Se observa que la potencia transmitida durante la solidificación del ácido palmítico presenta una zona de estabilidad temporal que se sitúa entre $\beta=0.46$ y $\beta=0.094$

para el caso horizontal y entre $\beta=0.532$ y $\beta=0.19$ para el caso vertical. La potencia total media transmitida en la geometría horizontal es de 956.8 W/m^2 mientras que en la geometría vertical es de 1057.2 W/m^2 por lo que en el caso de la solidificación del ácido palmítico la geometría vertical ofrece una mayor rapidez del proceso aunque la diferencia no es grande.

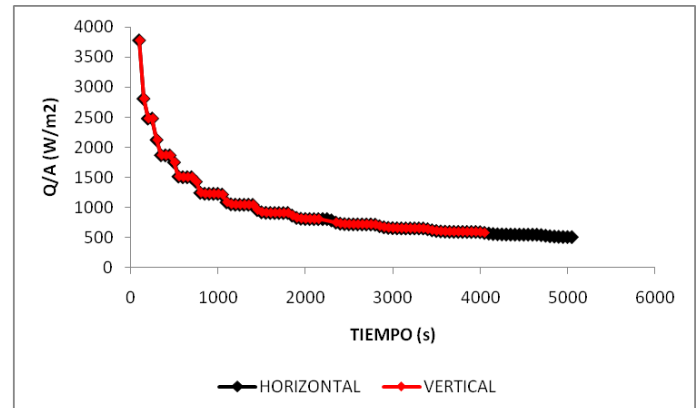


Fig. 11. Evolución temporal de la potencia transmitida durante la solidificación del ácido palmítico

En la Fig. 12. Se representa los mapas de fracción líquida de la fusión del ácido palmítico en el instante en que se alcanza $\beta=0.5$ para las dos geometrías estudiadas. Al igual que ocurre con el agua el ácido palmítico en estado sólido tiene una densidad inferior a la del líquido en el rango de temperaturas en que trabajamos. A pesar de ello la diferencia no es muy grande y como puede observarse en la Fig. 12. En la geometría horizontal no parece que existan flujos convectivos importantes, aparecen pequeñas ondulaciones en la parte inferior que no parecen tener una influencia importante en el resto del material. En el caso de la fusión en la geometría vertical, el líquido tiende a desplazarse hacia la parte superior observándose una acumulación del mismo en dicha zona.

En la Fig. 13. Se representan los mapas de fracción líquida de solidificación del ácido palmítico en el mismo instante. Se observa que en la geometría horizontal la solidificación tiene lugar perfectamente simétrica tanto respecto al eje x como respecto al eje y. Lo mismo ocurre en el caso vertical. Como hemos visto en casos anteriores donde las diferencias de densidades eran mayores que en el ácido palmítico, si existen corrientes de convección, éstas son más pequeñas en la solidificación e influyen menos durante el

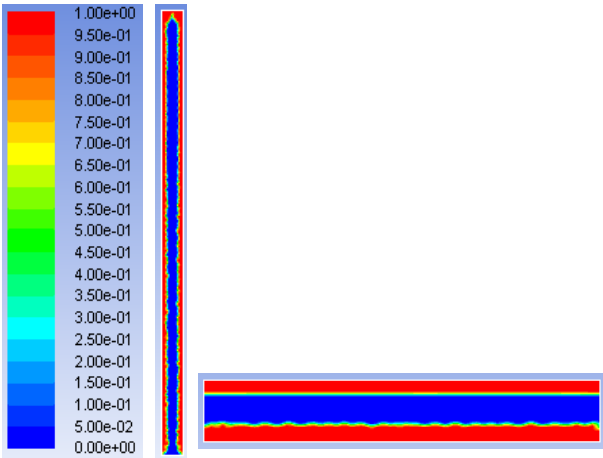
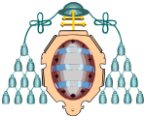


Fig. 12. Mapa de fracción líquida para la fusión del ácido palmítico en el instante en que $\beta=0.5$

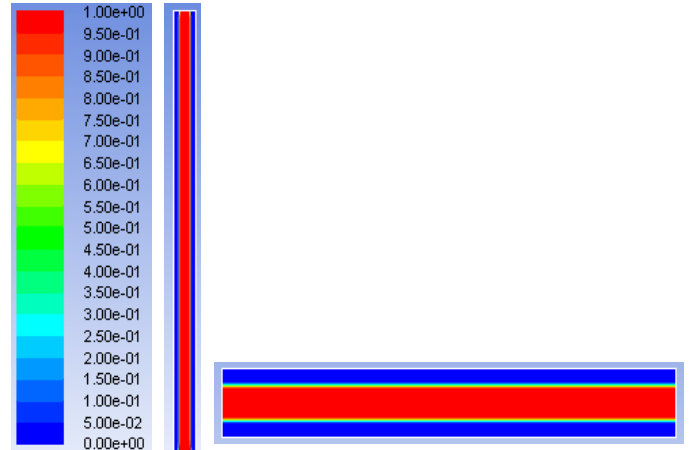


Fig. 13. Mapa de fracción líquida para la solidificación del ácido palmítico en el instante en que $\beta=0$

proceso de solidificación que el de fusión. En el caso del ácido palmítico, la diferencia de densidades es tan pequeña que la existencia de estas corrientes no tiene influencia en la representación de la fracción líquida en el instante representado.

3.4. CASO 4. COMPARACIÓN DE LOS TRES FLUIDOS ENTRE SÍ

En la Fig. 14 se representa el flujo de calor a lo largo del tiempo:

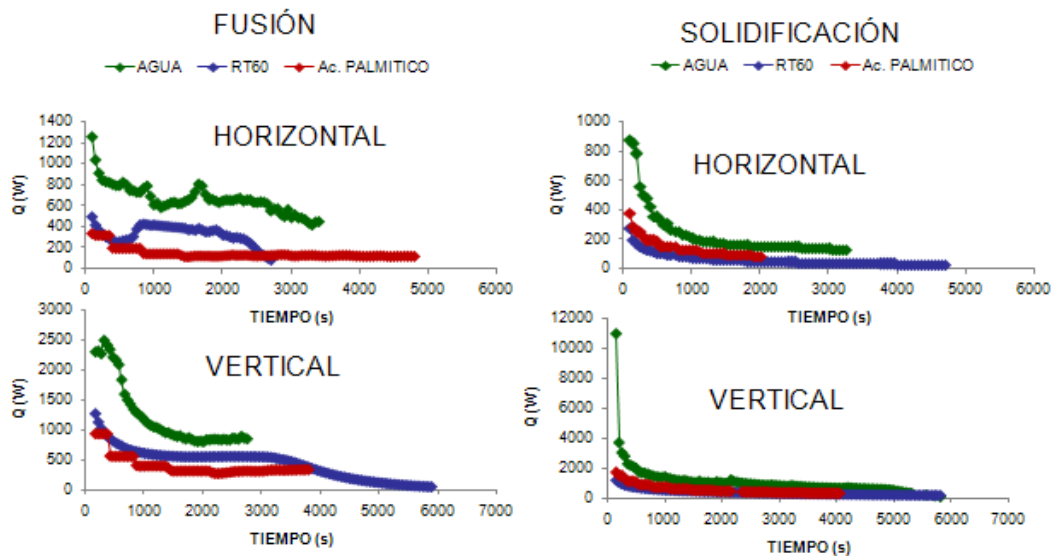
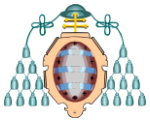


Fig. 4. Flujo de calor de todos los fluidos estudiados para cada mecanismo de cambio de fase ya cada geometría



Se observa que el agua es el fluido con más flujo de calor en todas las situaciones. En el caso del RT60 y del ácido palmítico habría que estudiarlos más en profundidad y con una casuística de gradientes de temperatura más amplio que nos permitiera analizar mejor su comportamiento en las distintas situaciones.

4. CONCLUSIONES

Una vez analizados todos los datos obtenidos se puede concluir en los siguientes aspectos:

- Que el agua es el fluido que mayor potencia térmica transmite en todos los casos, ya sea geometría horizontal o vertical, ya sea durante el proceso de fusión o de solidificación.
- Que de las dos geometrías estudiadas, para el uso del agua como sustancia de almacenamiento térmico la que mejores resultados proporciona es la horizontal tanto durante el proceso de fusión como durante el de solidificación.
- Que tanto el RT60 como el ácido palmítico se comportan de forma distinta durante la fusión y la solidificación de forma que la geometría que más potencia calorífica permite transmitir durante la fusión es la horizontal mientras que durante la solidificación se consiguen una mayor transmisión con la vertical.
- Que el proceso de fusión es más rápido que el de solidificación tanto para el agua como para el RT60 y para ambas geometrías mientras que con el ácido palmítico ocurre lo contrario, es más rápida la solidificación.

NOMENCLATURA

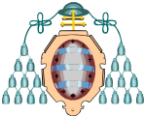
A_{mush}	Constante de zona de interfase
C_p	Calor específico (J/kgK)
h	Entalpía sensible (J/kg)
H	Entalpía (J/kg)
V	velocidad del fluido (m/s)
v_p	velocidad del sólido cuando es expulsado al exterior (m/s)
T	Temperatura (K)

Símbolos griegos

β	Fracción líquida
ε	Constante del término fuente del momento
ρ	Densidad (kg/m ³)
κ	Conductividad térmica

REFERENCIAS

- [1] Proyecto SECH-SPAHOUSEC, "Análisis del consume energético del sector residencial en España". Secretaria General, Departamento de Planificación y Estudios, IDAE. 16 de Julio de 2011
- [2] <http://www.idae.es>
- [3] A. Pasupathy, L. Athanasius, R. Velraj, R.V. Seeniraj, *Experimental investigation and numerical simulation analysis on the thermal performance of a building roof incorporating phase change material (PCM) for thermal management*, Applied Thermal Engineering 28 (2008) 556-565
- [4] Abduljalil A.Al-Abidi, SohifBinMat, K.Sopian, M.Y.Sulaiman, C.H.Lim, AbdulrahmanTh, *Review of thermal energy storage for air conditioning systems*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 5802-5819
- [5] Annabelle Joulin, Zohir Younsi, Laurent Zalewski, Stéphane Lassue, Daniel R. Rousse, Jean-Paul Cavrot, *Experimental and numerical investigation of a phase change material: Thermal-energy storage and release*, Applied Energy 88 (2011) 2454-2462
- [6] V. R. Voller. "Modeling Solidification Processes". Technical report. Mathematical Modeling of Metals Processing Operations Conference, Palm Desert, CA American Metallurgical Society. 1987.
- [7] V. R. Voller, A. D. Brent, and C. Prakash. "The Modeling of Heat, Mass and Solute Transport in Solidification Systems". Int. J. Heat Mass Transfer. 32(9). 1719 1731. 1989.
- [8] V. R. Voller, A. D. Brent, and K. J. Reid. "A Computational Modeling Framework for the Analysis of Metallurgical Solidification Process and Phenomena". Technical report. Conference for



Solidification Processing Ranmoor House,
Sheffield, England. September 1987.

[9] V. R. Voller and C. Prakash. "*A Fixed-Grid Numerical Modeling Methodology for Convection Diffusion Mushy Region Phase-Change Problems*". Int. J. Heat Mass Transfer. 30. 1709–1720. 1987.

[10] V. R. Voller and C. R. Swaminathan. "*Generalized Source-Based Method for Solidification Phase Change*". Numer. Heat Transfer B,. 19(2). 175–189. 1991.

[11] <http://www.ansys.com>

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

[13] Fidel Oscar Cedeño, Manuela Prieto, Jorge Xiberta, "*Measurements and estimate of heat capacity for some pure fatty acids and their binary and ternary mixtures*", Journal of Chemical and Engineering Data 45 (2000) 64-69

[14] Cedeño F.O., Prieto M.M, Huidobro J., "*Viscosities of binary and ternary mixtures of hexadecanoic, octadecanoic and cis-9-octadecenoic acids*", Journal of Chemical and Engineering Data 45 (2000) 219-223

[15] Fidel O. Cedeño, Maria Manuela Prieto, Aranzazu Espina, Jose R. García, "*Measurements of temperatura and melting heat of some pure fatty acids and their binary and ternaly mixtures by differential scanning calorimetry*", Termochemical Acta 369 (2001) 39-50