

# ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA PARAFINA RT-58 COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE PARA AGUA CALIENTE SANITARIA Y RECUPERACIÓN DE CALOR INDUSTRIAL

GASIA, Jaume; MIRÓ, Laia; CABEZA, Luisa F.

jaume.gasia@diei.udl.cat

Universitat de Lleida, GREA Innovació Concurrent, Edifici CREA, Pere de Cabrera s/n, 25001, Lleida.

## RESUMEN

El presente estudio evalúa experimentalmente el comportamiento de una parafina comercial, con una temperatura de cambio de fase de 58 °C, como material de almacenamiento de energía térmica en su fase latente, también conocido como material de cambio de fase (PCM, del inglés *Phase Change Material*) para incrementar la eficiencia energética en sistemas de agua caliente sanitaria (ACS) y recuperación de calor industrial.

Para determinar y evaluar posibles cambios en las propiedades químicas y termofísicas, se analiza el material a dos escalas de estudio diferente: escala de laboratorio ( $\approx 15$  mg) y escala de planta piloto ( $\approx 100$  kg). A escala de laboratorio, se realizan los siguientes análisis: calorimetría diferencial de barrido (DSC, del inglés *Differential Scanning Calorimeter*), análisis termogravimétrico (TGA, del inglés *Thermogravimetric analysis*), termociclado y espectroscopia de infrarrojo (IR). A escala de planta piloto, se realizan varios procesos de carga y descarga según en una instalación experimental diseñada y construida en la Universitat de Lleida, con un tanque de almacenamiento térmico basado en el concepto de tubo y carcasa. Se evalúan tres escenarios diferentes, según el caudal másico del fluido caloportador (HTF, del inglés *Heat Transfer Fluid*): 500 kg/h, 1500 kg/h i 2500 kg/h. Los parámetros estudiados son los tiempos y potencias de carga y descarga, los balances de energía del sistema y eficiencias del proceso. La evaluación en ambas escalas demuestra que la parafina RT-58 es un material adecuado para las aplicaciones propuestas.

Palabras clave: Almacenamiento de energía térmica, Agua caliente sanitaria (ACS), Recuperación de calor industrial, Material de cambio de fase (PCM), RT-58

## 1. Introducción

De acuerdo con la Agencia Internacional de la Energía [1], las tendencias actuales en el uso y suministro de energía son económica, ambiental y socialmente insostenibles ya que las emisiones de dióxido de carbono asociadas se verán duplicadas para el 2050 y la demanda de energía fósil tendrá unos valores superiores a los de seguridad de suministro. Además, las tendencias en el consumo de energía [2] revelan que los sectores industrial, residencial y del transporte consumen la mayor parte de la energía en la Unión Europea y en España a pesar de que existe un descenso en el consumo de energía desde el 2007 debido a la crisis global que es aún más pronunciado en el consumo español. Por los motivos anteriormente mostrados juntamente con el aumento del precio de la energía en los sectores estratégicos como el doméstico y el industrial, la investigación es una pieza elemental en la búsqueda de materiales y sistemas que ayuden a apoyar los objetivos de seguridad energética y el cambio climático y permitan al usuario final disfrutar de un considerable ahorro económico. Uno de los sistemas que combina de forma muy favorable todos estos requisitos es el almacenamiento de energía térmica (TES, del inglés *Thermal Energy Storage*), cuya tecnología permite almacenar energía en los momentos más favorables para el usuario para utilizarse más tarde.

En el caso del sector residencial, el ACS representó un 3,5% del consumo total de energía en España durante el año 2013, donde el gas fue la fuente de energía más utilizada en los hogares españoles (56,41%), seguidos del butano (16,53%) y la electricidad (13,87%), que son la segunda y tercera fuentes de energía más utilizadas respectivamente [2].

En cuanto a la recuperación del calor industrial, Brueckner et al. [3] presentó posibles tecnologías con el fin de no desperdiciar dicho calor y almacenarlo para un uso posterior o bien transformarlo a frío, calor o electricidad. Entre estas tecnologías se encuentra el almacenamiento de energía térmica. Basándonos en esta publicación, la Tabla 1 presenta algunos procesos industriales en los que la temperatura de los gases de escape es de alrededor de 58 °C y donde el uso de RT-58 sería adecuado.

Tabla 2. Temperaturas de los gases de escape de diferentes procesos industriales, basado en [3]

Proceso	T <sup>a</sup> gases de escape (°C)
Gases de escape que salen de los dispositivos de recuperación en las calderas de gas y hornos	70 - 230
Caldera de agua caliente convencional	60 - 230
Condensado de vapor de proceso	50 - 90
Caldera de condensación de agua caliente	40 - 50

Por lo tanto, el objetivo del presente estudio es testear e implementar de forma experimental y a gran escala un sistema TES basado en el concepto de carcasa y tubos utilizando parafina RT-58 como PCM. En cuanto a las posibles aplicaciones de RT-58 y teniendo en cuenta el intervalo de temperatura de cambio de fase, las aplicaciones más adecuadas son para agua caliente sanitaria (ACS) y la recuperación de calor industrial.

Con el fin de determinar la idoneidad de este parafina para las aplicaciones presentadas anteriormente, el material debe caracterizarse completamente, por ello, el trabajo se divide en dos estudios según su escala: un análisis de laboratorio, donde la muestra estudiada tiene una masa de alrededor de 15 mg, y una evaluación experimental en una planta piloto, donde la muestra estudiada tiene una masa de 104 kg. La importancia del testeo de un material en dos escalas diferentes recae en el hecho que en estudios previos se ha detectado que hay propiedades que cambian en función del tamaño de la muestra [4].

## 2. Material y métodos

### 2.1. Material

El material seleccionado para ser usado en el presente análisis como PCM fue la parafina comercial RT-58, suministrada por la compañía alemana Rubitherm GmbH. La Tabla 2 muestra la principales propiedades termofísicas de la parafina RT-58 de acuerdo al fabricante.

Tabla 3. Propiedades termofísicas de la parafina RT-58 de acuerdo al fabricante [5]

Propiedades	Unidades	Valores
Rango de temperatura de cambio de fase	[°C]	53-59
Capacidad de almacenamiento de calor $\pm 7,5\%$	[kJ·kg <sup>-1</sup> ]	160
Calor específico	[kJ·(kg·K) <sup>-1</sup> ]	2
Densidad estado sólido (at 15 °C)	[kg·L <sup>-1</sup> ]	0.88
Densidad estado líquido (at 80 °C)	[kg·L <sup>-1</sup> ]	0.77
Conductividad térmica (both phases)	[W·(m·K) <sup>-1</sup> ]	0.2
Expansión volumétrica	[%]	12.5
Flash point (PCM)	[°C]	>200
Temperatura máxima de operación	[°C]	80

## 2.2. Análisis de laboratorio

Los análisis de laboratorio realizados en las instalaciones de la Universitat de Lleida (UdL) y la Universitat de Barcelona (UB) son los siguientes: calorimetría diferencial de barrido (DSC, del inglés *Differential Scanning Calorimeter*) mediante un DSC-822e comercializado por Mettler Toledo, con el objetivo de determinar los valores de calor y entalpía específica en función de la temperatura, así como el rango de temperatura de fusión, análisis termogravimétrico (TGA, del inglés *Thermogravimetric Analysis*) mediante un Simultaneous SDTQ600 comercializado por TA Instruments, para determinar los cambios de peso en función de la temperatura, análisis de ciclado térmico mediante un Termociclador GENE Q Hangzhou BioerTechnology, para simular 1200 ciclos de carga y descarga correspondiente a la utilización de agua caliente de un año familia durante un año y espectroscopia de infrarrojos (IR) mediante un Spectrum Two comercializado por Perkin Elmer con la ayuda de Dynascan interferometer y OpticsGuard, con el fin de determinar la estabilidad química del material después de una cierta cantidad de ciclos. Estos análisis nos proporcionarán la idoneidad tanto térmica como la durabilidad y estabilidad del sistema.

## 2.3. Análisis en la planta piloto

La parte experimental a gran escala se llevó a cabo en la planta piloto de alta temperatura diseñada y construida en la Universidad de Lleida (Figura 1). Esta instalación está compuesta principalmente por tres partes: (1) el sistema de calentamiento, que simula la fuente de energía de calentamiento durante el proceso de carga, (2) el sistema de enfriamiento, que simula el consumo de energía por parte del usuario durante el proceso de descarga y, (3) el sistema de almacenamiento, que almacena la energía cuando está disponible y no es necesaria y se libera cuando se requiere por el usuario. Tres escenarios son evaluados según el caudal másico del HTF: 500 kg/h, 1500 kg/h y 2500 kg/h) para un rango de temperaturas de 48-68 °C (salto térmico de 20 °C considerando el punto medio como la temperatura de fusión del PCM). Los parámetros evaluados para los tres diferentes escenarios son los tiempos y potencias de carga y descarga, los balances de energía del sistema y eficiencias del proceso.



Figura 10. Instalación de la planta piloto de alta temperatura de la Universitat de Lleida

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Análisis de laboratorio

El análisis DSC (Figura 2) muestra que el rango de cambio de fase es 50-61 °C, con un valor promedio de 58.3 °C, y que el valor de la entalpía de cambio de fase, obtenido por integración numérica en el rango de temperatura de cambio de fase, es de 120,11 kJ·kg<sup>-1</sup>. La pequeña variación de estos resultados con los ofrecidos por el fabricante es debida a que el análisis llevado a cabo por el fabricante se corresponde al método *3-layer-calorimeter* y la masa de la muestra es desconocida.

El análisis de ciclado térmico (Tabla 3) muestra que después de 1200 ciclos de carga y descarga la temperatura promedio del cambio de fase ha disminuido un 1,66% y el calor latente ha aumentado un 2,71%, lo que permite asegurar que la parafina RT-58 presenta ninguna degradación durante un año de uso.

El análisis TGA (Figura 3) muestra que la parafina se degrada en un solo paso, empezando a 200 °C y se terminando a 350 °C, lo que indica que en su uso no se debería sobrepasar los 200 °C pero es idóneo para las aplicaciones propuestas en este estudio.

Finalmente el análisis IR (Figura 4) permite ver que no existe prácticamente variación en los picos característicos del material y la pequeña diferencia existente entre la curva inicial y la correspondiente a 500 ciclos es debida a un cambio de organización de las moléculas del material. Por consecuencia, el material no presenta ninguna variación de la estabilidad química después de 1200 ciclos.

Tabla 4. Análisis de ciclado térmico

	Unidades	Inicial 0 ciclos	500 ciclos	1000 ciclos	1200 ciclos	% variación
Temperatura de cambio de fase	[°C]	58.3	58.8	58.6	57.33	- 1.66 %
Calor latente	[J/g]	204.2	255.5	242.9	209.9	+ 2.71 %

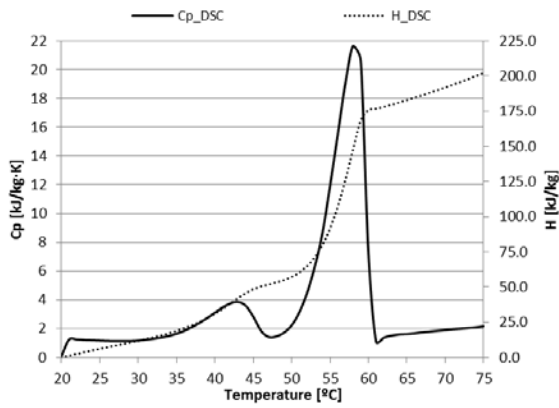


Figura 11. Calor específico y entalpia obtenida por análisis DSC

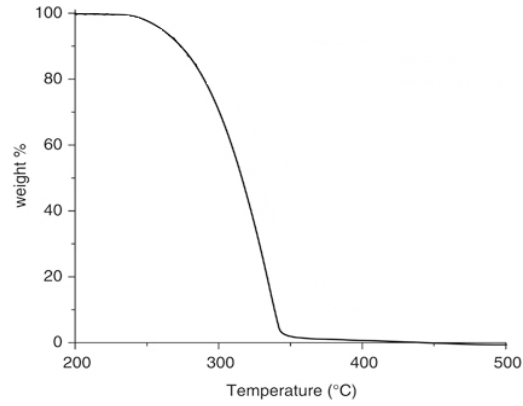


Figura 12. Temperatura de degradación obtenida por análisis TGA

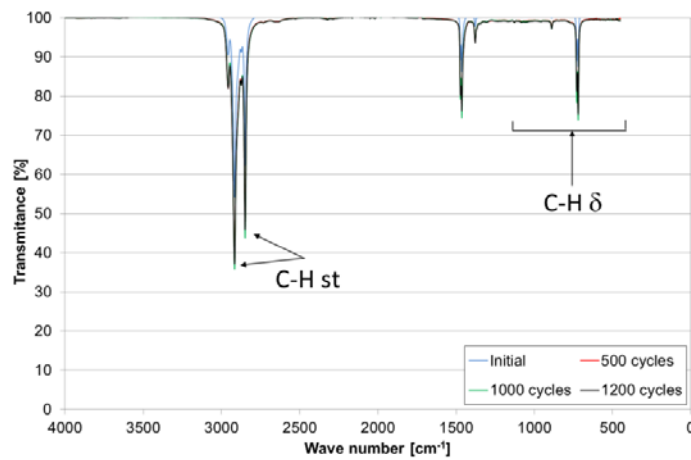


Figura 13. Estabilidad química obtenida por análisis IR

### 3.2. Análisis en la planta piloto

La Tabla 4 muestra una comparativa numérica de los resultados más importantes de los tres escenarios propuestos, donde  $t$  es el tiempo del proceso,  $\Delta E_{HTF}$  es la energía cedida/recuperada por el HTF,  $\Delta E_{PCM.total}$  es la energía total acumulada/cedida por el PCM,  $\Delta E_{PCM.solid}$  es la energía acumulada/cedida por el PCM en la fase sólida,  $\Delta E_{PCM.PC}$  es la energía acumulada/cedida por el PCM en el cambio de fase,  $\Delta E_{PCM.liquid}$  es la energía acumulada/cedida por el PCM en la fase líquida,  $\Delta E_{tank}$  es la energía acumulada en las partes metálicas del tanque de almacenamiento y  $\Delta E_{ins}$  es la energía acumulada en el aislante del tanque de almacenamiento.

Tabla 5. Resultados del análisis en la planta piloto

Escenario	Escenario 1: LF (500 kg/h)		Escenario 2: MF (1500 kg/h)		Escenario 3: HF (2500 kg/h)	
	Carga	Descarga	Carga	Descarga	Carga	Descarga
$t$ [min]	335	384	209	296	149	236
$\Delta E_{HTF}$ [kWh]	5.64	4.42	6.33	5.03	6.38	4.78
$\Delta E_{PCM.total}$ [kWh]	5.11	4.26	5.74	4.80	5.87	4.63
$\Delta E_{PCM.solid}$ [kWh]	0.26	0.10	0.28	0.10	0.30	0.08
$\Delta E_{PCM.PC}$ [kWh]	4.46	3.84	5.03	4.29	5.14	4.10

$\Delta E_{\text{PCM,liquid}}$ [kWh]	0.39	0.32	0.43	0.42	0.43	0.45
$\Delta E_{\text{tank}}$ [kWh]	0.39	0.30	0.45	0.37	0.39	0.29
$\Delta E_{\text{ins}}$ [kWh]	0.14	0.14	0.14	0.15	0.12	0.14
Eficiencia [%]	90.51	96.93	90.68	97.29	92.00	97.15

Además, con el fin de hacer la comparación entre los tres escenarios más visual y ver la influencia del caudal másico en los resultados finales, se representan la potencia cedida o recuperada por el HTF, evolución de la temperatura en dos sensores representativos del tanque de almacenamiento y la energía acumulada o cedida por el PCM (Figuras 5-7).

En el estudio de la potencia cedida por el HTF durante el proceso de carga y la recuperada durante el proceso de descarga (Figura 5) se observa que cuanto mayor es el caudal másico más elevada es la potencia del HTF al comienzo de ambos procesos, ya que el gradiente de temperaturas entre la entrada y la salida del HTF es mayor. No obstante, a medida que el proceso prosigue, el valor de este gradiente de temperatura disminuye y la influencia del caudal másico no es tan relevante y los tres escenarios tienen valores similares. También se observa que mientras que la diferencia en la potencia liberada/absorbida es significativamente diferente entre el escenario de caudal másico bajo y el medio, esta diferencia es menos relevante entre el escenario de caudal másico medio y el alto.

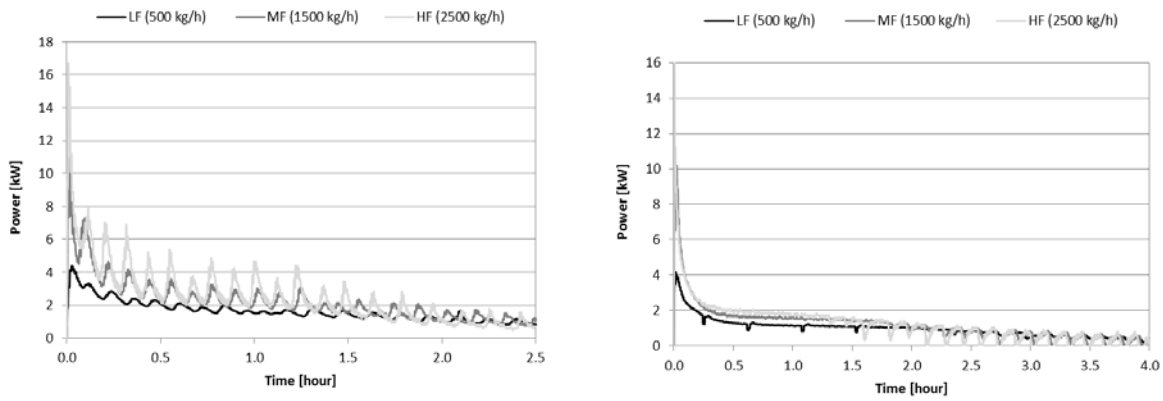


Figura 14. Comparativa de las potencias del HTF en los tres escenarios estudiados. Izquierda, proceso de carga. Derecha, proceso de descarga.

La Figura 6 muestra la comparativa de los perfiles de temperatura de dos sensores de temperatura representativos del PCM (denominados  $T_{\text{PCM},2}$  y  $T_{\text{PCM},11}$ ) durante los procesos de carga y descarga. De la misma manera que en el estudio anterior, cuanto más altos son los valores del caudal másico más rápido el PCM alcanza las temperaturas deseadas. Además, también se puede observar de forma detallada el rango de temperaturas del cambio de fase (50-61 °C).

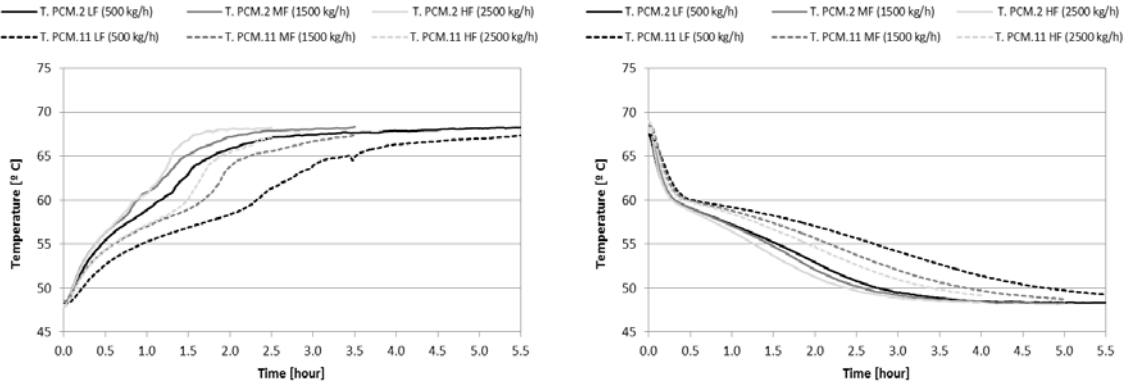


Figura 15. Comparativa del perfil de temperatura de dos sensores de temperatura representativos. Izquierda, proceso de carga. Derecha, proceso de descarga

Finalmente, con respecto a la energía transferida hacia o des del PCM durante los procesos de carga y descarga respectivamente para los tres escenarios estudiadas (Figura 7), se puede observar que el patrón que sigue es el mismo que en los dos casos anteriores. Además, se observa que el 90% de la energía almacenada/liberado por el PCM se consigue a alrededor de la mitad de los procesos de carga y descarga.

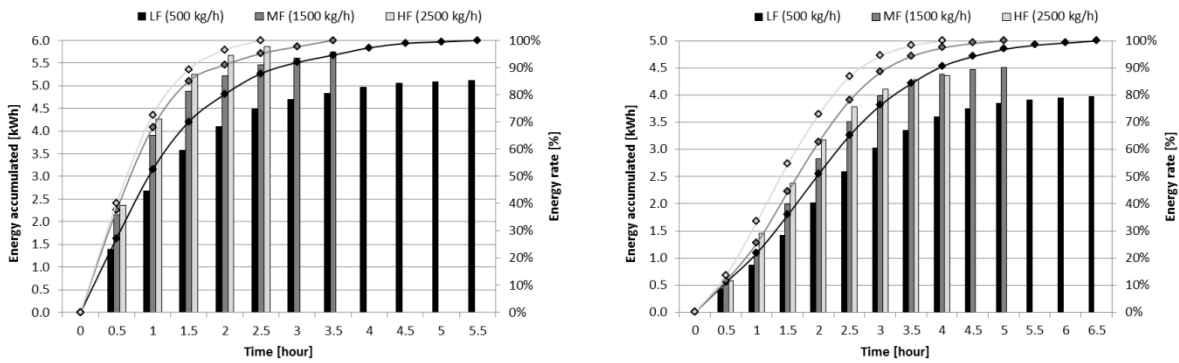


Figura 16. Comparativa de la energía del PCM en los tres escenarios estudiados. Izquierda, proceso de carga. Derecha, proceso de descarga

#### 4. Conclusiones y trabajo futuro

Se presenta un estudio a dos escalas diferentes, la escala de laboratorio ( $\approx 15$  mg) y la escala de planta piloto ( $\approx 100$  kg), del comportamiento de la parafina RT-58 como PCM para aplicaciones de ACS y de recuperación de calor residual en la industria.

A escala de laboratorio, se realizó un análisis de calorímetro de barrido diferencial (DSC), un análisis termogravimétrico (TGA), un análisis de termociclado y un espectroscopia infrarroja (IR). Los resultados del DSC muestran que el rango de temperaturas del cambio de fase es 50-61 °C y el valor del calor latente para este rango es de 120.11 kJ/kg. El análisis TGA muestra que la muestra se degrada en un solo paso a partir de 200 °C y acabado a 350 °C y el termociclado y análisis IR muestra que no existe degradación del material después de 1200 ciclos.

A escala de planta piloto, se realizaron procesos de carga y descarga en tres escenarios diferentes según el caudal másico del HTF (500 kg/h, 1500 kg/h y 2500 kg/h) para un rango de temperaturas de 48-68 °C en la planta piloto diseñada y construida en la Universitat de Lleida. Los parámetros evaluados son el tiempo de carga y descarga, energía almacenada o liberado por el HTF y el PCM, las eficiencias de almacenamiento y los ratios de carga/descarga energética. Los resultados muestran que para un caudal másico de 500 kg/h el tiempo del proceso de carga fue de 335 min, la energía cedida por el HTF fue 5,64 kWh y la eficiencia del 90,51%; el tiempo del proceso de descarga fue 384 min, la

energía absorbida por el HTF 4,42 kWh y la eficiencia del 90,27%. Para un caudal másico de 1500 kg/h el tiempo del proceso de carga fue de 209 min, la energía cedida por el HTF 6,33 kWh y una eficiencia del 90,68%; el tiempo necesario para la descarga fue de 296 min, la energía absorbida por el HTF 5,03 kWh y la eficiencia del 89,15%. Por último, para un caudal másico de 2500 kg/h el tiempo necesario para la carga fue de 149 min, la energía cedida por el HTF 6,38 kWh y la eficiencia del 92%; el tiempo necesario para la descarga fue de 236 min, la energía absorbida por el HTF de 4,78 kWh y la eficiencia del 91,11%. Además, se observó que el 90% de la energía almacenada/cedida por el PCM durante los procesos de carga y descarga se consigue a alrededor de la mitad del proceso.

## 5. Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la Generalitat de Catalunya por la mención de calidad al grupo de investigación GREA (2009 SGR 534). El trabajo está parcialmente financiado por el gobierno de España (ENE2011-22722). Esta investigación también ha sido financiada por el European Union's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) a través de n° PIRSES-GA-2013-610692 (INNOSTORAGE) y No ENER/FP7/295983 (MERITS). Laia Miró quiere agradecer al Gobierno de España su beca de investigación (BES- 2012-051861). Finalmente agradecer a Gerard Peiró, Joan Tarragona y Camila Barreneche por su ayuda en el trabajo.

## 6. Referencias

- [1] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Technology Roadmap. Energy storage, 2014
- [2] EUROSTAT DATA BASE [en línea]. Disponible en: [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/search\\_database](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/search_database) [Consulta: 7 de agosto 2014]
- [3] BRUECKNER, S. et al. *Industrial waste heat recovery technologies: an economic analysis of heat transformation technologies*. Accepted in Applied Energy 2014.
- [4] BARRENECHE, C. et al. *Effect of d-mannitol polymorphism in its thermal energy storage capacity when it is used as PCM*. Solar Energy, 2013, vol. 94, pp. 344–351.
- [5] Data sheet RT58. Rubitherm Technologies GmbH, Germany. [en línea]. Disponible en : [http://www.rubitherm.de/english/download/Techdata\\_%20RT58\\_EN.PDF](http://www.rubitherm.de/english/download/Techdata_%20RT58_EN.PDF) [Consulta: 10 de julio 2014]