

Trabajo Fin de Máster  
Máster en Ingeniería Aeronáutica

Identificación del Estado de Carga de un Sistema de  
Almacenamiento Térmico de Calor Latente

Autor: Jorge Márquez Acedo

Tutor: Manuel Felipe Rosa Iglesias

Dep. Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019





Trabajo Fin de Máster  
Máster en Ingeniería Aeronáutica

# **Identificación del Estado de Carga de un Sistema de Almacenamiento Térmico de Calor Latente**

Autor:

Jorge Márquez Acedo

Tutor:

Manuel Felipe Rosa Iglesias

Catedrático de Universidad

Dep. Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Máster: Identificación del Estado de Carga de un Sistema de Almacenamiento Térmico de Calor Latente

Autor: Jorge Márquez Acedo

Tutor: Manuel Felipe Rosa Iglesias

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal



*A mi familia y amigos*



Este trabajo se basa en una revisión bibliográfica para la identificación del estado de carga de un almacenamiento de energía térmica por calor latente o cambio de fase. El objetivo de este estudio es tener un conocimiento en cada instante del nivel de carga de energía térmica del que se dispone para así aprovecharlo para posteriores aplicaciones.

Se inicia con un análisis de los tres tipos de almacenamiento de energía térmica: calor sensible, calor latente y termoquímico. Para posteriormente, centrarnos en el de calor latente y realizar un estudio del PCM adecuado a utilizar dependiendo de la finalidad que se busca o la aplicación.

Posteriormente se analiza cómo reacciona el sistema durante los proceso de carga y descarga, especialmente la evolución de los perfiles de temperatura y la fracción de PCM que cambia de fase. Finalmente, se desarrollan distintos modelos para poder obtener el estado de carga y se analizan para ver cuál alcanza resultados más exactos y su complejidad operacional.



# Índice

Resumen .....	ix
Índice .....	xi
Índice de Tablas .....	xiv
Índice de Figuras .....	xvi
Notación y Acrónimos .....	xix
<b>1 Introducción .....</b>	<b>3</b>
<b>2 Sistemas de almacenamiento de energía térmica por calor sensible y termoquímico .....</b>	<b>11</b>
2.1. Almacenamiento de energía térmica por calor sensible .....	11
2.1.1 Definición .....	11
2.1.2 Materiales utilizados en el almacenamiento de energía térmica por calor sensible .....	11
2.1.3 Estados del material de almacenamiento de energía térmica por calor sensible .....	13
2.1.3.1 Almacenamiento de energía térmica en material en estado líquido .....	13
2.1.3.2 Almacenamiento de energía térmica en material en estado sólido .....	14
2.2. Almacenamiento termoquímico .....	15
2.3. Tecnologías utilizadas en el almacenamiento de energía térmica .....	16
2.3.1. Acumuladores líquidos .....	16
2.3.1.1. Sistema Thermocline .....	17
2.3.1.2. Sistemas de 2 depósitos .....	18
2.3.2. Acumuladores de vapor .....	19
2.3.3. Acumuladores sólidos .....	19
2.3.4. Acumuladores por cambio de fase .....	20
2.3.5. Últimos desarrollos tecnológicos .....	21
<b>3. Almacenamiento de energía térmica por cambio de fase o calor latente .....</b>	<b>22</b>
3.1. Calor latente del cambio de fase de sólido-líquido .....	24
3.2. Calor latente del cambio de fase de líquido-vapor .....	24
3.3. Calor latente del cambio de fase de sólido-sólido .....	24
3.4. Materiales de cambio de fase (PCM) .....	25
3.4.1. Material de Cambio de Fase Orgánico .....	28
3.4.2. Material de Cambio de Fase Inorgánico .....	29
3.5. Materiales de cambio de fase utilizados comercialmente .....	30
3.6. Aplicaciones del PCM .....	31
<b>4. Estado de cargas del almacenamiento térmico por calor latente .....</b>	<b>33</b>
4.1. Proceso de carga/descarga de PCM macroencapsulado .....	33
4.1.1. Estudio experimental del Proceso de Carga/Descarga: material y procedimiento de medida .....	34
4.1.2. Estudio experimental del Proceso de Carga/Descarga: análisis de los resultados .....	35
4.2. Proceso de Carga/Descarga de PCM en Colector Solar de Alta Temperatura .....	39
4.2.1. Modelo de análisis .....	40
4.2.2. Proceso de almacenamiento de energía: carga y descarga .....	44
4.3. Estimación del estado de carga del almacenamiento por calor latente .....	48
4.3.1. Modelo de carcasa y tubo 2D para almacenamiento de energía térmica por calor latente .....	49

4.3.2. Discretización espacial del modelo reducido para un único tubo .....	54
4.3.3. Detalles de la implementación numérica para el modelo reducido .....	56
4.3.4. Comparación entre el modelo detallado (dMod) y el modelo reducido (rMod) para un único tubo .....	57
4.3.5. Aplicación del método del Observador para el estado.....	59
4.3.6. Predicción del Estado de Carga (SOC) .....	63
<b>5. Conclusiones .....</b>	<b>67</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>69</b>



# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2.1. Clasificación de materiales usados para almacenamiento de calor sensible

Tabla 2.2. Materiales utilizados para almacenamiento termoquímico

Tabla 3.1. Ventajas y desventajas del uso de sistemas de almacenamiento por calor latente

Tabla 3.2. Materiales para almacenamiento de calor por cambio de fase de sólido a líquido

Tabla 3.3. Propiedades de algunos tipos de parafinas

Tabla 3.4. Propiedades de algunos tipos de sales hidratadas



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

- Figura 1.1. Aerogeneradores
- Figura 1.2. Caída del agua
- Figura 1.3. Géiser
- Figura 1.4. Mareas
- Figura 1.5. Dispositivo flotante sobre las olas
- Figura 1.6. Materia orgánica de origen vegetal
- Figura 1.7. Bioetanol
- Figura 1.8. Ciclo de obtención de biodiesel
- Figura 1.9. Aprovechamiento de la energía solar
- Figura 2.1. Paneles solares flotantes
- Figura 2.2. Ejemplo de almacenamiento termoquímico
- Figura 2.3. Ejemplo de Sistema Thermocline
- Figura 2.4. Ejemplo de almacenamiento de calor mediante un sistema de 2 depósitos
- Figura 2.5. Acumulador de vapor
- Figura 2.6. Esquema sistema de generación directa de vapor
- Figura 3.1. Clasificación de materiales de cambio de fase
- Figura 4.1. Posición de los termopares en el tubo
- Figura 4.2. Proceso de carga en tubo en posición horizontal
- Figura 4.3. Proceso de descarga en tubo en posición horizontal
- Figura 4.4. Proceso de carga en tubo en posición vertical
- Figura 4.5. Proceso de descarga en tubo en posición vertical
- Figura 4.6. Esquema de funcionamiento de colectores solares en plantas de potencia
- Figura 4.7. Esquema del receptor solar
- Figura 4.8. Dominio utilizado en el mallado gracias a la simetría
- Figura 4.9. Detalle del mallado de la sección simétrica
- Figura 4.10. Detalle del mallado en todo el dominio computacional
- Figura 4.11. Análisis de variables durante la descarga y carga en función del tiempo
- Figura 4.12. Temperatura y fracción de líquido del PCM durante el proceso de descarga
- Figura 4.13. Temperatura y fracción de líquido del PCM durante el proceso de carga
- Figura 4.14. Temperatura y fracción de líquido del PCM durante el proceso de carga
- Figura 4.15. Mapa de temperaturas de 4 secciones del recipiente cilíndrico
- Figura 4.16. Componentes y disposición del diseño de Carcasa y Tubo S&T

- Figura 4.17. Representación del PCM alrededor del tubo
- Figura 4.18. Modelado axial y radial de los dominios para un modelo de un solo tubo
- Figura 4.19. Función de la densidad de Weibull
- Figura 4.20. Función de  $\xi(r,x)$
- Figura 4.21. Representación gráfica de los valores R y X en función de r y x, respectivamente
- Figura 4.22. Esquema de discretización para el PCM y HTF aplicado al rMod
- Figura 4.23. Definición de los componentes utilizados en la ecuación (22)
- Figura 4.24. Predicción de los modelos dMod y rMod simulados
- Figura 4.25. (a) Predicción generada por simulaciones en rMod, (b) estimaciones generadas por el Observador (EKF-rMod) y resultados experimentales (meas) para las entradas HTF inlet y un flujo de masa constante del HTF de  $\dot{m}_{(H,total)}=1.09$  kg/s
- Figura 4.26. (a) Predicción generada por simulaciones en rMod, (b) estimaciones generadas por el Observador (EKF-rMod) y resultados experimentales (meas) para las entradas HTF inlet y flujo de masa total
- Figura 4.27. (a) Ejemplo de campo de temperaturas local en el PCM, (b) Correspondiente fracción de fase local. Ambos a raíz de la colocación de puntos indicada en apartados anteriores
- Figura 4.28. (a) Resultados del SOC, (b, izquierda) Temperatura del PCM obtenida en el sensor 2 según dMod, (b, derecha) Instantánea del perfil de temperatura radial para  $\text{rend}$ ,  $2\text{rend}$ ,  $3\text{rend}$
- Figura 4.29. Obtención del SOC para el almacenamiento de los ensayos experimentales realizados en la Figura 4.25. (superior) y en la Figura 4.26. (inferior)



# Notación y Acrónimos

Símbolo*	Significado
$a$	Parámetro de forma de la función de densidad de Weibull
$\alpha$	Coefficiente de calor transferido
$c_{p,H}$	Capacidad calorífica específica del HTF
$c_{p,W}$	Capacidad calorífica específica de la pared del tubo
$c_{p,P}$	Capacidad calorífica específica del PCM
$\tilde{c}_P$	Capacidad calorífica específica aparente del PCM
$\delta$	Espesor del PCM en dirección radial
$\Delta H^f$	Calor latente específico del PCM
$\gamma$	Parámetro de forma de la función de densidad de Weibull
$L$	Longitud física de almacenamiento en dirección axial
$\lambda_P$	Conductividad térmica del PCM
$\lambda_W$	Conductividad térmica de la pared del tubo
$\dot{m}_H$	Flujo de masa del HTF
$\mu$	Parámetro de localización de la función de densidad de Weibull
$n_T$	Contador de tubos de HTF en almacenamiento térmico
$N_R, N_X$	Número de puntos de colocación en dirección axial/radial
$\dot{q}_H$	Densidad de flujo de calor del HTF hacia la pared del tubo
$\dot{q}_P$	Densidad de flujo de calor d la pared del tubo hacia el PCM
$r, R$	Coordenada radial (R es la coordenada normalizada)
$r_{end}$	Radio del tubo más el del PCM
$r_{in}$	Radio interno del tubo
$r_{out}$	Radio externo del tubo
$\rho_H$	Densidad volumétrica del HTF
$\rho_W$	Densidad volumétrica de la pared del tubo
$\rho_P$	Densidad volumétrica del PCM
$T_H$	Temperatura del HTF
$T_H^0$	Perfil de temperaturas inicial del HTF
$T_H^{in}$	Temperatura a la entrada del HTF
$T_P$	Temperatura del PCM
$T_P^0$	Campo de temperaturas inicial del PCM
$T_W$	Temperatura de la pared del tubo
$v_H$	Velocidad del HTF
$x, X$	Coordenada axial (X es la coordenada normalizada)
$\xi$	Campo de fracción de fase local
$\Xi$	Estado de carga del almacenamiento térmico



<b>Acrónimo*</b>	<b>Significado</b>
dirMap	Mapeo directo
dMod	Modelo detallado
EKF	Filtro de Kalman Extendido
HTF	Fluido de Transferencia de Calor
LHTES	Almacenamiento de Energía Térmica por Calor Latente
OC	Colocación Ortogonal
ODE	Ecuación diferencial Ordinaria
PCM	Material de Cambio de Fase
PDE	Ecuación diferencial Parcial
rMod	Modelo reducido
SOC	Estado De Carga
S&T	Tubo y Cubierta
TES	Almacenamiento de Energía Térmica

\*Símbolos y acrónimos utilizados especialmente en el apartado 4.3.



# 1 INTRODUCCIÓN

---

Las energías renovables son fuentes naturales de energía aparentemente inagotables debido a la gran cantidad de energía que contienen o, bien porque puedan regenerarse constantemente por sí mismas mediante medios naturales.

El crecimiento de las energías limpias es vital debido a que no tienen emisiones contaminantes ni producen gases que aumenten el efecto invernadero del planeta, combatiendo así el, cada vez más progresivo, cambio climático, limitando sus efectos más devastadores.

Las principales ventajas de las energías renovables frente a la energía obtenida de los combustibles fósiles son:

- Mitigar los efectos del cambio climático: en los procesos de generación de energía, las renovables no emiten gases de efecto invernadero, siendo una solución mucho menos nociva para el medio ambiente.
- Son fuentes de energía inagotables: debido al inminente agotamiento de los recursos utilizados en las fuentes de energía tradicionales como el carbón, el gas, el petróleo o la energía nuclear; las fuentes de energías renovables son la solución más adecuada ya que sus recursos están basados en sucesos naturales como es el Sol, el viento, el calor interno de la Tierra, ... Los cuales no cesan ni se agotan.
- Económicamente competitivas: las tecnologías utilizadas para la obtención de las distintas energías renovables están reduciendo cada vez más sus costes haciéndolas más competitivas que las convencionales.
- Diversidad: existe una gran variedad de tipos de energías, lo que hace posible que en cualquier zona del Planeta se disponga de algún tipo de recurso renovable para poder aprovecharlo.

En cambio, los combustibles fósiles se encuentran en zonas muy concretas lo que supone una importante suma de dinero a desembolsar hacia los países proveedores, aparte de los potenciales conflictos entre distintos países debido a las grandes cantidades de dinero que mueve este mercado.

Los tipos de energías renovables que existen en la actualidad son:

- Energía eólica: se trata de la energía que se obtiene del viento. Actualmente, esta energía se utiliza principalmente para producir energía eléctrica a partir de los aerogeneradores. A través del paso de las corrientes de aire por las palas, generan el movimiento de las mismas obteniendo energía cinética que es transformada en energía eléctrica.



Figura 1.1. Aerogeneradores

- Energía hidráulica: se trata de la energía tanto cinética como potencial que se obtiene de las corrientes de agua dulce. El agua pasa por una turbina la cual transmite la energía a un alternador que la convierte en energía eléctrica.



Figura 1.2. Caída del agua

- Energía geotérmica: esta energía es obtenida a través del calor natural del interior de la Tierra. La energía se transmite por conducción o convección a través de los cuerpos rocosos calientes. Esta energía, principalmente, es utilizada para producir energía eléctrica y para la desalinización del agua.



Figura 1.3. Géiser

- Energía mareomotriz: se trata de la energía que se obtiene del movimiento de mareas. Este tipo de energía se utiliza principalmente para producir energía eléctrica. Un alternador es el encargado de generar la electricidad a partir de la energía mareomotriz.



Figura 1.4. Mareas

- Energía undimotriz u olamotriz: se trata de la energía obtenida de las olas. El movimiento de las olas genera energía mecánica, lo que permite la obtención de la energía eléctrica.



Figura 1.5. Dispositivo flotante sobre las olas

- Biomasa: la biomasa es aquella materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo residuos y desechos orgánicos, que es susceptible de ser aprovechada energéticamente. Las plantas se encargan de transformar la energía radiante del sol en energía química a través de la fotosíntesis, parte de la cual queda almacenada en forma de materia orgánica.



Figura 1.6. Materia orgánica de origen vegetal

- Bioetanol: se trata de un biocombustible que se obtiene a raíz de la fermentación de la materia orgánica y la biomasa rica en hidratos de carbono. Un biocombustible es una mezcla de distintas sustancias orgánicas que es utilizada como combustible de motores de combustión interna.



Figura 1.7. Bioetanol

- Biodiésel: se trata de un líquido obtenido a partir de los lípidos naturales como aceites vegetales o grasas animales (estén usados o no). Este líquido se obtiene a partir de procesos industriales de esterificación y transesterificación. Se aplicará en la preparación de sustitutos parciales o totales del gasóleo.

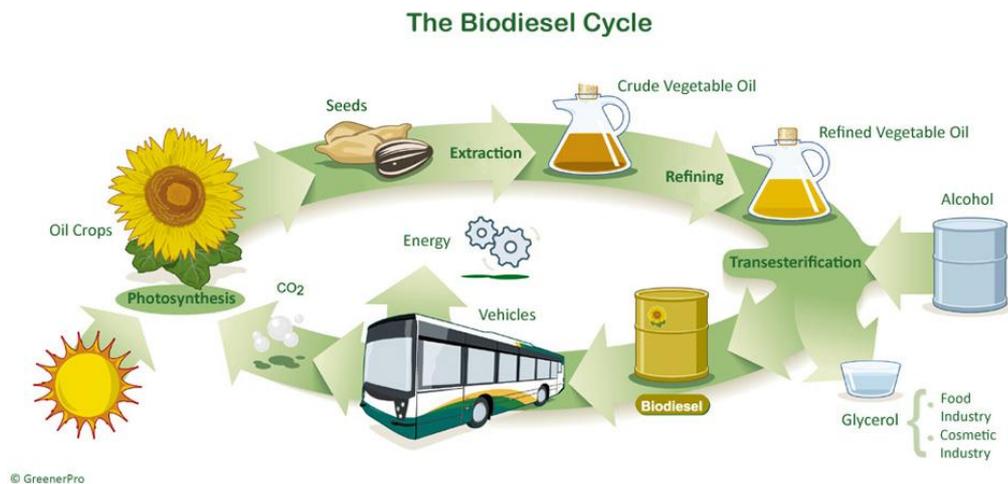


Figura 1.8. Ciclo de obtención de biodiesel

- Energía solar: se trata de la energía obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética que proviene del Sol. Las principales tecnologías son: la energía solar fotovoltaica que es utilizada para producir electricidad aprovechando la radiación solar y la energía solar térmica que aprovecha el calor que produce el Sol.



Figura 1.9. Aprovechamiento de la energía solar

La energía objeto de análisis a lo largo de este trabajo es la térmica. Consiste en el aprovechamiento de la energía procedente de fuentes de calor (como es el caso de la energía solar térmica, cuya fuente es el Sol) y transferirla a un medio portador de calor de menor temperatura.

Al estar en contacto dos cuerpos a diferente temperatura, el cuerpo de mayor temperatura transfiere energía en forma de calor al de menor temperatura y como consecuencia, el cuerpo de mayor temperatura se enfriará y el de menor temperatura se calentará hasta estar ambos a una temperatura semejante.

Las principales aplicaciones de la energía térmica se pueden clasificar en domésticas e industriales:

- Aplicación doméstica: las tres principales aplicaciones son el calentamiento del agua de uso doméstico, la calefacción con suelo radiante (consiste en el calentamiento de tubos de agua situados debajo del suelo elevando así la temperatura ambiente en las estancias) y, por último, su conversión en energía eléctrica para poder ser usada en el hogar.
- Aplicación industrial: es utilizada para el calentamiento del agua que posteriormente será utilizada en procesos de lavado y secado de los productos. También se utilizan en plantas de purificación y desalinización de aguas, así no se usa ningún tipo de combustible.

Existen tres tipos de almacenamiento de energía térmica de acuerdo al mecanismo de almacenamiento:

- Almacenamiento de calor sensible: este tipo de almacenamiento de energía está basado en el cambio de temperatura de un material siempre que no se llegue a producir el cambio de fase. Dicho material al aumentar su temperatura, almacena energía térmica mientras que al bajar su temperatura la libera.
- Almacenamiento por calor latente: la energía térmica se almacena en el material hasta lograr el cambio de fase. Gracias a la transformación, el material absorbe una gran cantidad de energía a una temperatura constante, suponiendo una gran ventaja con respecto al almacenamiento de calor sensible. Los materiales que se utilizan para este tipo de almacenamiento se denominan PCMs (Phase Change Materials).
- Almacenamiento termoquímico: este es el almacenamiento menos utilizado debido a que aún está en proceso de análisis y estudio. Presenta una gran ventaja debido a la gran cantidad de calor que libera cuando se produce la reacción. La energía se almacena en el material separando así los enlaces y, más tarde se recuperará mediante la puesta en contacto y la reacción con los reactantes que fueron separados anteriormente liberándose así la energía.

En el desarrollo de este documento se analizará en más profundidad el almacenamiento por calor latente o cambio de fase para el cual aún no se ha desarrollado una técnica para medir el estado de carga exacto.

Por este motivo, se realizará una completa revisión bibliográfica en la que se podrán analizar los distintos estudios exhaustivos de las técnicas existentes analizando sus ventajas y desventajas y el motivo por el cuál aún no se han podido implementar. Además se aplicarán aquellas técnicas que presenten un mayor nivel de confianza y fiabilidad y se realizará un estudio teórico del cálculo del estado de carga.

Es muy importante saber exactamente el estado de carga que se tiene en el almacenamiento de energía térmica debido a que se debe cubrir unas necesidades para las que se requiere una mayor o menor cantidad, por este motivo es importante saber de los recursos de los que se dispone. Todo esto, teniendo en cuenta que con cada ciclo de liberación y almacenamiento de energía, se irán acumulando una serie de errores en la medida del estado de carga que se deberán de minimizar para conseguir la medida de carga más exacta.

En el caso del almacenamiento de calor sensible es sencillo conocer el estado de carga ya que va en proporción a la temperatura que va alcanzando el material. Sin embargo, en el almacenamiento de calor latente, es mucho más complicado ya que dicho almacenamiento se produce en materiales que realizan un cambio de fase a una temperatura aproximadamente constante por lo que es más complejo conocer con exactitud su estado de carga.

Por este motivo, este trabajo se centrará en averiguar y analizar las técnicas y métodos de los que se disponen actualmente para poder conocer el estado de carga de un sistema de almacenamiento térmico de calor latente.



# 2 SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA POR CALOR SENSIBLE Y TERMOQUÍMICO

---

**E**n este tema se van a detallar dos de los tres principales sistemas de almacenamiento térmico: almacenamiento por calor sensible y almacenamiento termoquímico. Se describirán de manera general para tener una idea de los tipos de almacenamiento de energía térmica existentes y poder así tener una visión global de los sistemas de almacenamiento aparte del de por calor latente.

## 2.1. Almacenamiento de energía térmica por calor sensible

### 2.1.1 Definición

El calor sensible hace variar la temperatura de un medio, dicho medio al aumentar de temperatura está almacenando calor sensible en su interior mientras que al descender de temperatura, libera dicho calor almacenado.

El calor almacenado por calor sensible viene dado por la siguiente fórmula:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Donde la  $Q$  es la cantidad de energía térmica almacenada por calor sensible,  $m$  es la masa del medio de almacenamiento de calor (Kg),  $c_p$  es el calor específico del material y  $\Delta T$  es el cambio de temperatura durante el proceso.

### 2.1.2 Materiales utilizados en el almacenamiento de energía térmica por calor sensible

Se define Capacidad Térmica como la relación existente entre la temperatura y la energía térmica de un medio. Se tiene la siguiente tabla de medios utilizados en este tipo de almacenamiento. Dependiendo de la aplicación para la que se vaya a usar se utilizará un medio líquido o uno sólido.

	<b>Rango de Temperaturas (°C)</b>	<b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Calor Específico (KJ/KgK)</b>
<b>Medios líquidos</b>			
<b>Agua</b>	0 - 100	1000	4.18
<b>Aceite mineral</b>	200 - 300	770	2.6
<b>Aceite de silicona</b>	300 - 400	900	2.1
<b>Aceite de motor</b>	>160	888	1.88
<b>Aceite sintético</b>	250 – 350	900	2.3
<b>Sales nitratos</b>	265 - 565	1870	1.6
<b>Sodio líquido</b>	270 - 530	850	1.3
<b>Sales carbonatos</b>	450 – 850	2100	1.8
<b>Sodio líquido</b>	270 – 530	850	1.3
<b>Etanol</b>	>78	790	2.4
<b>Propanol</b>	>97	800	2.5
<b>Butanol</b>	>118	809	2.4
<b>Octano</b>	>126	704	2.4
<b>Medios sólidos</b>			
<b>Hormigón armado</b>	200 – 400	2200	0.85
<b>Acero colado</b>	200 – 700	7800	0.6
<b>Ladrillos refractarios sílice</b>	200 – 700	1820	1
<b>Ladrillos refractarios magnesita</b>	200 - 1200	3000	1.15

Tabla 2.1. Clasificación de materiales usados para almacenamiento de calor sensible

El agua es uno de los medios con mayor Capacidad Calorífica Específica, esto sumado a que es un recurso abundante, no tóxico, económico y no inflamable, lo convierte en el medio más deseado para ser usado como almacenamiento de calor sensible.

Sin embargo, para ciertos usos, como en las centrales termosolares, es necesario que el medio a utilizar tenga un punto de ebullición muy elevado, bastante más elevado que el del agua, por ese motivo se suelen utilizar medios líquidos como el aceite térmico o bien sólidos como el hormigón armado.

Por otro lado, hay que tener especial cuidado en aquellos medios líquidos con puntos de solidificación muy

elevados, como es el caso de las sales fundidas, ya que se debe evitar en todo momento el cambio de fase para este tipo de almacenamiento. Este problema no sucede con los medios sólidos, por ese motivo, se están usando cada vez más en vez de las sales fundidas en determinadas situaciones.

No se utilizan medios gaseosos en sistemas de almacenamiento de calor sensible puesto que presentan un Calor Específico muy bajo.

### 2.1.3 Estados del material de almacenamiento de energía térmica por calor sensible

Como se ha visto en el apartado anterior, se utilizan materiales en dos tipos estados tipos de estados distintos para almacenar energía por calor sensible: líquido y sólido. Por lo tanto, existen dos tipos de almacenamiento dependiendo del estado del material:

- Almacenamiento líquido.
- Almacenamiento sólido.

#### 2.1.3.1 Almacenamiento de energía térmica en material en estado líquido

Como se ha comentado anteriormente, el material en estado líquido más utilizado es el agua debido a su abundancia, bajo coste e inexistente toxicidad. Además, posee uno de los más elevados valores de calor específico entre los materiales en estado líquido.

Una de las desventajas de utilizarlo es el que el rango de temperaturas llega hasta los 100°C, por lo que para aplicaciones en las que se requiera un gran rango de temperaturas del material de almacenamiento para albergar una gran cantidad de energía térmica, o incluso que requiera temperaturas muy elevadas, este material no sería válido para su uso.

Otra desventaja existente, es la alta presión que produce el vapor de agua, teniendo así que tener unas instalaciones con unos requerimientos más elevados para que aguanten dicha presión.

Unas de las principales innovaciones que se están llevando a cabo son los paneles solares flotantes en pantanos y embalses. Con esta nueva modalidad se pretende aprovechar los depósitos de agua artificiales ya existentes como en los canales de riego, plantas de tratamiento,...



Figura 2.1. Paneles solares flotantes

Ofrece beneficios frente a los paneles situados sobre terreno, ya que la evaporación del agua del depósito se ve reducida, al igual que la formación de algas. También tiene una mayor eficiencia puesto que el agua se encarga de refrigerar el circuito conectado a cada panel evitando así el sobrecalentamiento existente en los paneles situados en tierra firme. Las empresas ahorrarán costes del terreno puesto que usarán su propia superficie existente y, además, generarán su propia energía eléctrica.

También cuenta con algunas desventajas, como una mayor inversión inicial ya que los materiales del panel y cableado deben de ser lo suficientemente resistente a la corrosión. Además, el mantenimiento será más costoso al encontrarse sobre el agua y dificultar así la accesibilidad a ellos.

En caso de ser situados en lagunas naturales, afectarían a la vida natural existente en ellos ya que modificarían el nivel de oxígeno en el agua, por este motivo, se están estudiando dispositivos que regulen dicha oxigenación para hacerlo compatible con la vida.

Aparte del agua, los principales materiales líquidos utilizados son los aceites y las sales fundidas. Las sales fundidas son muy utilizadas debido a la posibilidad de trabajar a altas temperaturas, sobrepasando incluso los 300°C, muy superior al rango de temperaturas del agua en estado líquido, siendo el adecuado para las turbinas utilizadas actualmente, además, presenta un bajo coste haciéndolas muy económicas. Su principal aplicación es en los campos de heliostatos.

Por otro lado, aunque las sales fundidas son más económicas, presentan un inconveniente notable al tener un punto de congelación muy elevado, alrededor de los 150°C, lo cual hace que en todas sus aplicaciones, se tenga como condición, tener siempre elevadas temperaturas durante su uso como almacenamiento de energía térmica.

### 2.1.3.2 Almacenamiento de energía térmica en material en estado sólido

Es muy utilizado especialmente para el almacenamiento de calor sensible a altas temperaturas. Una de las ventajas del almacenamiento en materiales en estado sólido es que se evita la sobrepresión existente en los almacenamientos en materiales en estado líquido que limitaban su diseño.

Se tienen los siguientes tipos de almacenamiento en materiales sólidos principalmente:

- Almacenamiento en rocas: el fluido que transporta el calor pasa a través de las rocas transfiriéndole la energía por conducción. La energía almacenada en las rocas de esta forma depende de diversos parámetros como son las propiedades termofísicas del material, el tamaño y forma del mismo, el fluido transportador del calor,...
- Almacenamiento en construcción: este tipo de almacenamiento es aplicado en las edificaciones, especialmente en las más modernas. Uno de sus usos más comunes es la calefacción del suelo, aclimatando así todo el hogar. El material más utilizado en este caso es el hormigón y suele ser un almacenamiento de baja temperatura.
- Almacenamiento en metales: son utilizados especialmente para almacenamientos de altas temperaturas debido a sus altos puntos de fusión. El rango entre el que suelen oscilar es 110°C y 1450°C.

El principal problema existente con este tipo de almacenamiento, en general, es la transferencia de calor entre el flujo y el material sólido. Los principales estudios están centrados en maximizar la eficiencia en la transferencia de calor entre ambos medios.

## 2.2. Almacenamiento termoquímico

Este tipo de almacenamiento se basa en reacciones endotérmicas reversibles. En el caso de carga provoca la separación de los enlaces y, para el caso de descarga, se invierte la reacción para liberar la energía mediante la puesta en contacto y la reacción con los reactantes separados anteriormente (cuando la reacción es endotérmica absorbe calor, sin embargo, cuando la reacción es exotérmica, libera calor).

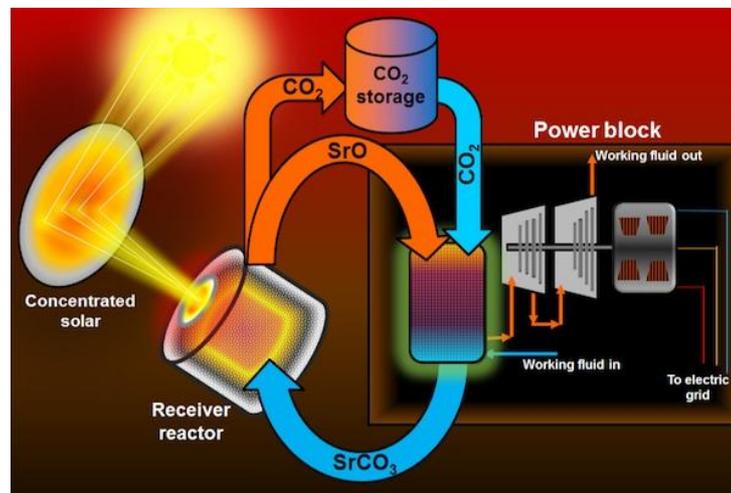


Figura 2.2. Ejemplo de almacenamiento termoquímico

Es el tipo de almacenamiento menos investigado actualmente, aunque presenta una serie de ventajas frente al resto ya que presentan una gran densidad de energía almacenada. La energía puede permanecer almacenada de manera indefinida a temperatura ambiente reduciendo así las pérdidas térmicas al mínimo debido a la separación espacial de los reactantes.

Los principales inconvenientes de este tipo de almacenamiento son: la inestabilidad cíclica, la baja conductividad térmica de los posibles medios de almacenamiento, problemas en la reversibilidad de las reacciones y un coste económico elevado.

El calor almacenado depende de la cantidad de medio de almacenamiento, el calor de reacción endotérmico y el alcance de la conversión. La energía se queda almacenada en el producto originado a partir de la combinación entre energía térmica y los reactivos.

La cantidad de energía almacenada viene dada por:

$$Q = a_r \cdot m \cdot \Delta h$$

Donde la  $Q$  es la cantidad de energía térmica almacenada o liberada en forma de reacción química (KJ),  $m$  es la masa del medio de almacenamiento de calor (Kg),  $a_r$  es la fracción reaccionada y  $\Delta h$  es el calor de reacción por unidad de masa (KJ/Kg).

Para poder utilizar este tipo de almacenamiento se deben de dar una serie de condiciones: este tipo de almacenamiento es capaz de albergar una gran cantidad de energía por eso se debe de tener un sistema adaptado a dichas dimensiones. La reacción debe de ser reversible para poder realizar los procesos de carga y descarga. Por último, los reactivos deben de ser económicos debido a su uso continuado.

Al tener lugar una reacción química, existe una diferencia entre la entalpía de las sustancias al comienzo de la reacción y la entalpía de las sustancias al final de la reacción, esta diferencia de entalpía es conocida como calor de reacción.

Algunos ejemplos de materiales utilizados en este tipo de almacenamiento son:

Compuesto	Reacción	Temperatura de reacción	Densidad energética
Carbonato de hierro	$FeCO_3 \leftrightarrow FeO + CO_2$	180°C	2.6 GJ/m <sup>3</sup>
Óxido de magnesio	$MgO + H_2O \leftrightarrow Mg(OH)_2$	250°C – 400°C	3.3 GJ/m <sup>3</sup>

Tabla 2.2. Materiales utilizados para almacenamiento termoquímico

Actualmente, la tecnología del sistema de almacenamiento termoquímico se está desarrollando en algunos proyectos de implantación en futuras plantas termosolares de concentración.

## 2.3. Tecnologías utilizadas en el almacenamiento de energía térmica

Se pueden clasificar los acumuladores de alta temperatura dependiendo del estado del material usado para el almacenamiento: líquido, sólido y gaseoso. Además, también se dispone de un acumulador para cambio de fase para aquellos materiales que cambian de fase durante el almacenamiento térmico.

Es importante realizar primero una importante diferenciación entre sistemas de almacenamiento activos y sistemas pasivos:

- Sistema de almacenamiento activo: es aquél en el que el medio de almacenamiento circula por el tanque de almacenamiento. Cuando el medio de almacenamiento se utiliza también como fluido de transferencia de calor (HTF), se le conoce como sistema activo directo. En cambio, cuando el medio de almacenamiento intercambia calor, mediante un intercambiador intermedio, con un fluido de transferencia de calor que circula por el tanque, es decir, ambos se encuentran diferenciados, se le conoce como sistema activo indirecto.
- Sistema de almacenamiento pasivo: son aquellos sistemas en los que el HTF es el encargado de pasar a través del medio de almacenamiento durante el proceso de carga y de descarga.

Antes de utilizar un tipo de sistema u otro, es necesario realizar un análisis exhaustivo para ver cuál es el factor económico y energético más óptimo dependiendo de la aplicación para la que se vaya a utilizar, por ejemplo, en un caso industrial, se va a buscar el tipo de almacenamiento que más energía permita almacenar, es decir, con un calor específico y conductividad térmica superior.

Se tienen distintos tipos de acumuladores según el estado del material de almacenamiento para el de calor sensible y de cambio de fase para el almacenamiento de calor latente.

### 2.3.1. Acumuladores líquidos

Para almacenamiento de energía térmica en líquidos a altas temperaturas se utilizan fluidos con puntos de evaporación altos y puntos de solidificación bajos. Los fluidos estables en estos intervalos de temperatura son sales fundidas, aceites minerales y metales fundidos.

El material líquido se calienta al circular entre los intercambiadores de calor externos, generando vapor sobresaturado que impulsará una turbina u otro sistema de generación de energía eléctrica.

Existen varias tecnologías utilizadas como acumuladores líquidos: Sistema Thermocline y Sistemas de 2 depósitos.

### 2.3.1.1. Sistema Thermocline

Se trata de un depósito en el que se encuentra el medio de almacenamiento. El gradiente térmico se produce de manera vertical, de manera que la zona de mayor temperatura se encuentra en la parte superior y la zona de menor temperatura en la parte inferior, esto se debe a que cuanto mayor temperatura tiene el fluido menor es su densidad, por ese motivo se encuentra en la parte superior.

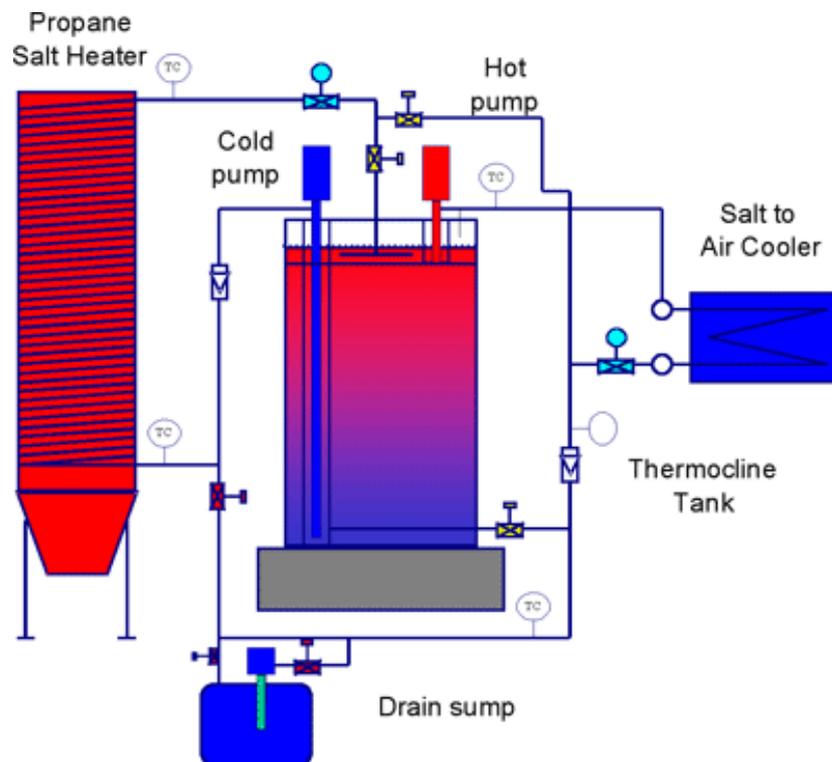


Figura 2.3. Ejemplo de Sistema Thermocline

El depósito contiene también un material de bajo coste que conllevará la gran parte de la capacidad térmica del sistema para evitar la mezcla convectiva y, además, reducir la cantidad de fluido de mayor coste.

Se carga el fluido de la siguiente manera: se extrae de la parte inferior del depósito (la zona de menor temperatura) y se calienta mediante el intercambiador HTF, retornándolo a la parte superior del depósito, donde se encuentra la zona de mayor temperatura. Para descargar el fluido se realiza la operación inversa: se extrae el fluido de la zona superior del depósito, se cede el calor del flujo al circuito de vapor de la turbina y se retorna el fluido a la zona inferior del depósito. Se trata de un sistema activo indirecto.

Lo complicado es separar en estos sistemas el fluido caliente del frío. Los estudios actuales se encuentran encaminados a tener un tipo de aislamiento móvil entre la zona fría y la caliente, impidiendo así que el fluido de ambas zonas se mezcle, además, que se encuentre en movimiento durante los procesos de carga y descarga.

El rango de temperaturas con el que se suele trabajar con este sistema es entre 200°C-300°. Los fluidos más utilizados son el aceite térmico y las sales fundidas.

### 2.3.1.2. Sistemas de 2 depósitos

En este caso, en un depósito se encuentra almacenado el fluido a menor temperatura y en otro el fluido a mayor temperatura. El sistema se carga extrayendo el fluido del depósito de menor temperatura hasta el depósito de mayor temperatura, calentándolo por el camino mediante un intercambiador con el calor que se está recibiendo, por ejemplo, el calor solar. Para descargar el fluido se realiza el proceso contrario, se extrae el fluido del depósito a mayor temperatura y se introduce en el de menor temperatura, por el camino se extrae el calor del flujo.

La separación existente entre la zona fría y caliente del sistema de almacenamiento de energía de dos depósitos permite una adaptación de los materiales a ambas condiciones.

El material utilizado por lo general en este tipo de sistema es la sal fundida, la cuál debe de tener un rango de temperaturas elevado para que no esté próximo al punto de cristalización. Para evitar que se alcance este punto, los sistemas suelen estar equipados con calentadores para mantener a las sales en estado líquido cuando no se obtiene suficiente energía térmica.

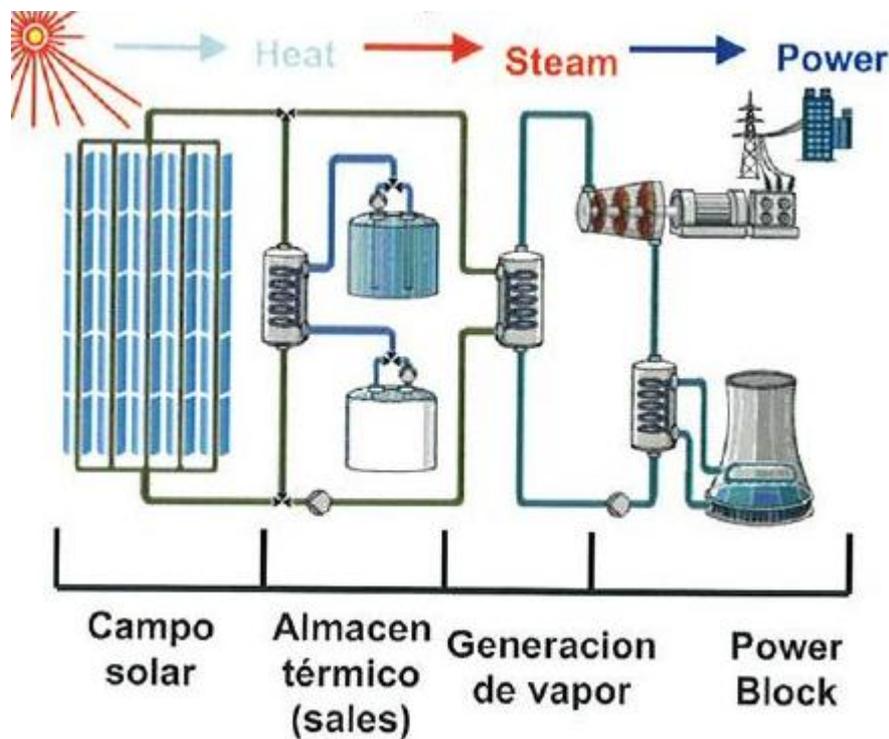


Figura 2.4. Ejemplo de almacenamiento de calor mediante un sistema de 2 depósitos

Se trata de un sistema activo indirecto puesto que es necesario el uso de un intercambiador de calor calentado con el HTF del receptor. El rango de temperaturas de operación suele oscilar entre los 300°C-400°C.

Para aumentar el rendimiento térmico del proceso Rankine, se cambia el aceite térmico que se utilizaba como fluido portador por sales fundidas, permitiendo temperaturas más altas en el proceso. Se han comenzado a desarrollar y utilizar receptores directos de sales fundidas, evitando así el intercambiador entre el medio de almacenamiento y el fluido portador. Gracias al uso directo de sales fundidas, el rango de temperaturas de operación ha pasado a estar entre 300°C-600°C.

### 2.3.2. Acumuladores de vapor

Estos acumuladores funcionan gracias a la capacidad de almacenamiento de calor del agua. Inicialmente, un tanque tiene incorporado vapor y agua saturada, entonces se carga introduciendo vapor a mayor presión. El sistema irá aumentando de temperatura y presión, provocando un cambio en el vapor saturado del que se disponía inicialmente.

Durante el proceso de descarga, se reduce la presión del tanque y, como consecuencia, también la del vapor saturado.



Figura 2.5. Acumulador de vapor

En este caso, la temperatura a la que se trabaja es la de ebullición y la presión que se tiene durante el proceso de descarga es de hasta 100 bares. En dicha operación se libera vapor saturado.

Este tipo de acumuladores es muy demandado para casos en los que haya que cubrir picos de demanda térmica en determinados instantes debido a la rápida disponibilidad de la energía almacenada. En cambio, tiene grandes fluctuaciones de presión y temperatura durante el proceso de descarga. Otra función que tiene es la de separador de fases con el fin de que a la turbina le llegue únicamente vapor saturado a una presión constante.

La densidad de energía almacenada puede llegar a alcanzar los 30 KWh/m<sup>3</sup> que no es un valor muy elevado. Se busca obtener vapor sobrecalentado para conseguir aumentar y mantener constante la temperatura del vapor descargado, combinando la subida de entalpía de vapor saturado por los acumuladores de vapor con unos depósitos sensibles secundarios.

### 2.3.3. Acumuladores sólidos

Los materiales sólidos presentan la ventaja de ser más económicos tanto en costes de inversión como de mantenimiento en el almacenamiento de calor sensible. Sucede que los materiales sólidos tienen una conductividad térmica muy baja, por este motivo se les une un intercambiador térmico para activarlo térmicamente en todo su volumen.

Al aumentar la conductividad térmica del material sólido la superficie del intercambiador de calor se ve reducida.

Hay que dar importancia al coeficiente de expansión térmica debido a la fragilidad de los materiales utilizados y la combinación con el intercambiador. El rango de temperaturas de trabajo oscila entre los 300°C y los 500°C.

Para aquellos sistemas de altas temperaturas con almacenamiento de calor sensible, se tiene una disposición óptima que pasa por la integración de un intercambiador de tubos por un bloque de hormigón. El hormigón se carga a través del fluido a mayor temperatura circulando por los tubos, en cambio, para descargarlo, el fluido circula en sentido contrario, con una temperatura menor que la del sólido, por lo que va aumentando su temperatura al pasar por el hormigón, aumentando su energía en forma de calor.

### 2.3.4. Acumuladores por cambio de fase

Con el fin de aumentar el rendimiento del ciclo de vapor y minimizar los costes, se han desarrollado sistemas con vapor como fluido de transferencia de calor (HTF) en vez del aceite térmico o las sales fundidas, a estos sistemas se les llama de generación directa de vapor.

En las centrales que utilizan estos sistemas, se distinguen tres zonas del campo solar:

- La zona de precalentamiento: donde se calienta el agua hasta alcanzar el punto de ebullición.
- La zona de evaporación: se trata de la zona donde se genera el vapor saturado a una temperatura constante.
- La zona de sobrecalentamiento: donde se aumenta tanto la temperatura como la presión del vapor.

También se divide el almacenamiento de energía térmica se divide en tres segmentos: precalentador, evaporador y sobrecalentador. Esta subdivisión también se realiza ya que cada segmento debe de ser diseñado de manera distinta de acuerdo al rango de temperatura y función de cada zona.



Figura 2.6. Esquema sistema de generación directa de vapor

El lugar donde se produce el cambio de fase del fluido de transferencia de calor es en el evaporador, pasando de estado gaseoso a estado líquido durante el proceso de carga al ceder calor y al contrario, de líquido a vapor, durante el proceso de descarga al recibir el calor liberado. Durante el cambio de fase, se produce el intercambio de calor con el medio de almacenamiento que se efectuará a temperatura constante.

Los medios utilizados en estos sistemas son aquellos materiales de cambio de fase que ceden calor cuando se solidifican y lo absorben al fundirse. Ambos procesos a temperatura constante.

### 2.3.5. Últimos desarrollos tecnológicos

Debidos a los problemas existentes en la transferencia de calor, se ha desarrollado un sistema de almacenamiento basado en el encapsulamiento del medio de almacenamiento, poniendo en contacto directo con el vapor.

Las investigaciones recientes se encuentran enfocadas en el desarrollo de materiales compuestos por una matriz de alta conductividad infiltrando el medio de almacenamiento entre sus poros.

Se están desarrollando últimamente los sistemas combinados para poder aprovechar los beneficios que tienen el almacenamiento por calor sensible y el almacenamiento por calor latente de manera conjunta en un mismo sistema, con la finalidad de almacenar la mayor cantidad de energía térmica posible.

Para cada proceso es deseable utilizar un tipo de almacenamiento u otro:

- Almacenamiento de calor latente: durante los procesos de evaporación y condensación lo más óptimo es utilizar este tipo de almacenamiento ya que se producen a temperatura constante por lo que el intercambio energético sería más eficiente.
- Almacenamiento de calor sensible: en las fases de precalentamiento y sobrecalentamiento del fluido de operación. Ya que son fases para elevar la temperatura del fluido de operación, lo aconsejable es utilizar este tipo de almacenamiento para optimizar el proceso lo máximo posible.

### 3. ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA POR CAMBIO DE FASE O CALOR LATENTE

El almacenamiento de calor latente es realizado mediante el uso de materiales con la capacidad de cambiar de fases dentro de un rango de temperaturas que está marcado por la energía almacenada. Este tipo de almacenamiento es un proceso casi isoterma, es decir, prácticamente a temperatura constante, lo que produce un gran beneficio con respecto al almacenamiento de calor sensible para un mismo rango de temperaturas de operación.

Por ejemplo, el agua en estado líquido tiene un calor específico de  $4.186 \frac{KJ}{^{\circ}C Kg}$  y su calor de solidificación o fusión es de  $334.24 \frac{KJ}{Kg}$ , pudiendo almacenar aproximadamente 80 veces más energía al cambiar de fase que al aumentar la temperatura del líquido en  $1^{\circ}C$ .

La energía que necesita un material para poder cambiar de fase es muy superior a la que necesita para pequeños incrementos de temperatura de la sustancia en el mismo estado. Por este motivo, se empezó a analizar e implementar materiales que cambien de fase para almacenamiento de energía térmica. Al cambiar de fase, la sustancia conserva la energía absorbida en forma de calor latente. Al regresar a su estado original, la sustancia liberará esa energía acumulada.

La cantidad de energía almacenada viene dada por la siguiente fórmula:

$$Q = \int_{T_s}^{T_f} m \cdot c_p \cdot dT + m \cdot a_m \cdot \Delta h_m + \int_{T_f}^{T_l} m \cdot c_p \cdot dT$$

Que de una forma más simplificada queda:

$$Q = m \cdot \left( c_{p_s} \cdot (T_f - T_s) + a_m \cdot \Delta h + c_{p_l} (T_l - T_f) \right)$$

Donde  $Q$  es el calor almacenado,  $m$  es la masa del medio de almacenamiento de calor,  $c_{p_s}$  y  $c_{p_l}$  son los calores específicos medios en las fases sólida y líquida respectivamente,  $T_f$  es la temperatura de fusión,  $T_s$  es la temperatura del sólido y  $T_l$  la temperatura del líquido,  $\Delta h_m$  es el calor de fusión por unidad de masa y  $a_m$  es la fracción fundida.

El primer término de esta ecuación refleja la energía que se almacena en forma de calor sensible desde su temperatura inicial hasta la temperatura donde comienza el cambio de fase. En el segundo término, se refleja la energía total almacenada en forma de calor latente. Y, por último, el tercer término indica la energía almacenada en forma de calor sensible si se sigue aumentando la temperatura del material después de haberse producido el cambio de fase.

Este tipo de sistemas presentan las siguientes ventajas y desventajas:

Ventajas	Desventajas
Almacenamiento de energía térmica a temperatura constante durante todo el proceso de cambio de fase. Esta característica proporciona estabilidad frente a la aleatoriedad de la obtención de energía solar.	Elevado número de estudios con PCM en rangos de temperaturas de operación bajos, pero muy pocos PCM estudiados en rangos de temperaturas de operación elevados.
Para una misma cantidad de material, la capacidad de almacenamiento de sistemas en forma de calor latente es muy superior a la de sistemas en forma de calor sensible.	La mayoría de los materiales estudiados y usados tiene una baja conductividad térmica.
Existe la posibilidad de recuperar el calor sin necesidad de que se produzca una gran variación de temperaturas.	Existen posibles problemas de corrosión según los materiales utilizados con respecto a los depósitos y superficies intercambiadoras de calor.
Elevado número de ciclos de transición de fases sin que exista una elevada degradación.	

Tabla 3.1. Ventajas y desventajas del uso de sistemas de almacenamiento por calor latente

Los cambios de fase con los que se puede trabajar son transiciones de tipo:

- Líquido-vapor: es el menos utilizado debido a que el vapor genera grandes presiones por lo que hay que crear sistemas adaptados para soportar dichas presiones, lo que los hace muy costosos.
- Sólido-sólido: un ejemplo de esta transición puede ser pasar de una estructura cristalina a otra amorfa. Esta transición tampoco es de lo más utilizado ya que presenta un menor calor latente que la de sólido-líquido.
- Sólido-líquido: este último es el más utilizado ya que presenta un bajo índice de expansión volumétrica con respecto a la transición de líquido-vapor y presenta un mayor calor latente que el sólido-sólido. Hay que tener en cuenta que en este caso, debido al cambio de fase también cambia el mecanismo de transporte de calor de convección a conducción.

La elección de los materiales es un punto muy importante ya que, por ejemplo, si se tiene una sustancia con gran capacidad de almacenamiento, se reduce el tamaño de los sistemas de almacenamiento. Además, a la hora de liberar energía, se realiza a una temperatura casi constante.

Una propiedad muy importante de estos materiales es la conductividad térmica. Una baja conductividad térmica puede originar largos tiempos de respuesta en los procesos de descarga, altos gradientes de temperatura y limitaciones en la absorción y liberación del flujo de calor.

Se han desarrollado numerosas investigaciones con el objetivo de desarrollar técnicas que aumenten la conductividad térmica del material hasta encontrarse dentro del intervalo entre  $5 \frac{W}{mK} - 20 \frac{W}{mK}$ .

### 3.1. Calor latente del cambio de fase de sólido-líquido

Este es el método más utilizado y estudiado. Durante el proceso de fusión se transmite el calor por conducción hasta que se comienza a formar una fina película líquida alrededor del sólido, que la transmisión de calor pasa a ser mediante convección natural.

La fusión se encuentra caracterizada por un cambio volumétrico pequeño, usualmente menor a un 10% con respecto al volumen inicial. Cuando se produce la fusión del material, la temperatura permanece prácticamente constante e igual a la temperatura de fusión durante todo el cambio de fase a líquido. Por este motivo, el calor almacenado por el cambio de fase del material no puede ser medido a partir de la temperatura como sucedía con el calor sensible.

Debido a la pequeña variación de volumen entre el sólido y el líquido, se puede obtener el calor almacenado en una primera aproximación como la diferencia de entalpías:

$$\Delta Q = \Delta H = m \cdot \Delta h$$

Donde  $\Delta H$  es la diferencia de entalpía entre la fase sólida y la líquida,  $m$  es la masa del medio de almacenamiento de calor y  $\Delta h$  es el cambio de entalpía durante el cambio de fase.

### 3.2. Calor latente del cambio de fase de líquido-vapor

Se trata del cambio de fase debido a la evaporación o a la condensación del material y presenta una gran entalpía de cambio de fase. El proceso de evaporación depende mucho de una serie de condiciones de contorno.

Si el sistema es cerrado con volumen constante, el proceso de evaporación origina un gran incremento de presión. Por este motivo, este cambio de fase no es comúnmente utilizado para el almacenamiento de calor.

Cuando el sistema está cerrado a una presión constante, ocurre el hecho contrario al explicado anteriormente, se produce un gran cambio del volumen. Este cambio es difícil de conocer y no se aplica para almacenamiento de calor.

Por último, si el sistema es abierto constantemente, significa que se encuentra a presión ambiente evitando así una variación en la temperatura de cambio de fase. Al cargarse, el material se evapora y se mezcla con el ambiente al ser un sistema abierto. Para recuperar el calor almacenado en el material evaporado, es necesario recuperarlo del ambiente, por lo que debe ser parte natural del mismo. Por este motivo, el único material actualmente utilizado para almacenar calor mediante este cambio de fase es el agua.

Sin embargo, el agua no se condensa por sí sola en grandes cantidades, para ello es necesario reducirle la presión de vapor de agua en el almacenamiento usando superficies higroscópicas. Dicha superficie se encarga de absorber el agua a una superficie sólida o líquida.

### 3.3. Calor latente del cambio de fase de sólido-sólido

La principal propiedad de estos sistemas es la capacidad de algunos materiales por cambiar su estructura interna sin dejar de mantener su estado sólido. A altas temperaturas de operación hay pocos materiales que tengan esta propiedad, un ejemplo son algunas aleaciones de acero.

Algunas de las ventajas que presenta esta transición de fase son:

- Se evita encapsular el material puesto que la transición de fase es sólida-sólida, en lugar de sólida-líquida ó líquida-gaseosa. De este modo, se facilita la instalación y mantenimiento del sistema, ahorrando también en costes, y, además, permite una mayor densidad energética del sistema.
- La transición presenta un cambio de volumen prácticamente inexistente.

La única desventaja reseñable es que el calor latente de transición de fase sólido-sólido es bastante inferior al de otras transiciones.

Algunas aplicaciones que permiten el uso de este tipo de cambio de fase son:

- Altos rangos de temperatura: en materiales estructurales con la capacidad de almacenamiento de energía puesto que se trata de un sistema estacionario que aunque posea un menor calor latente por unidad de masa, es más elevado por unidad de volumen.
- Bajos rangos de temperatura: las aplicaciones dentro de este rango son sobretodo utilizadas en en la climatización o en industrias textiles y de automoción.

### 3.4. Materiales de cambio de fase (PCM)

Los materiales de cambio de fase son aquellos que permiten una transición de fase almacenando o liberando así una gran cantidad de energía a temperatura constante, por ejemplo, con la solidificación o fusión.

Al solidificar o fundirse, actúan una serie de mecanismos diferentes como son la transferencia de masa o una absorción o cesión de calor. Las fuerzas de cohesión están siempre presentes tanto en los materiales en fase líquida como en sólida debido a la cercanía existente entre los átomos. En la fase sólida, las moléculas vibran alrededor de posiciones fijas de equilibrio en contacto unas con otras, en cambio, en fase líquida ya no se encuentran en contacto, perdiendo así esas posiciones de equilibrio, aunque las fuerzas de atracción y repulsión a las que se encuentran sometidas se encuentran equilibradas.

Cuando un material está en fase líquida, los átomos son más energéticos que en fase sólida; por este motivo, para que un sólido pueda fundirse es necesario que reciba energía para vencer las fuerzas de cohesión que mantienen la estructura compacta. Esta energía es el calor latente del material, representando la diferencia de energía térmica entre las fases sólidas y líquidas.

Las propiedades deseables para todo PCM son:

- Propiedades térmicas:
  - Estabilidad térmica.
  - Presentar una temperatura de fusión exacta o, al menos, dentro de un pequeño intervalo, para tener definido el momento del cambio de fase.
  - Elevada conductividad térmica en ambas fases.
  - Alto calor latente de cambio de fase.
  - Elevado calor sensible para añadir un porcentaje de energía almacenada en forma de calor sensible.
- Propiedades físicas:
  - Elevada densidad para un mayor almacenamiento de calor por unidad de volumen.

- Baja presión de vapor en la temperatura de operación.
- Baja variación del volumen durante el cambio de fase.
- Propiedades cinéticas:
  - Ratio de cristalización adecuado para que se produzca la solidificación de la sustancia de manera adecuada.
  - Evitar el súper-enfriamiento producido al no ceder calor latente aunque la temperatura se encuentre por debajo de la de solidificación.
- Propiedades químicas:
  - Estabilidad química a largo plazo.
  - Reversibilidad entre la transición de fases.
  - No tóxico ni ignífugo.
  - Compatibilidad con los medios que lo rodean.
  - Mínima degradación después de un alto número de ciclos de cambio de fase.
- Económico:
  - Abundante.
  - Disponible.
  - Económico.
  - Tener un ciclo de vida conforme al coste económico.

No existe un material que recoja todas estas propiedades, la elección del material se produce al realizar un balance de ventajas y desventajas de cada material eligiendo el adecuado de acuerdo a una serie de condiciones de las que se parte y siendo éste el más óptimo para alcanzar los objetivos propuestos.

En la siguiente figura se tiene una primera clasificación de materiales utilizados para cambio de fase, centrándose en la transición de fase más utilizada como es sólido-líquido:

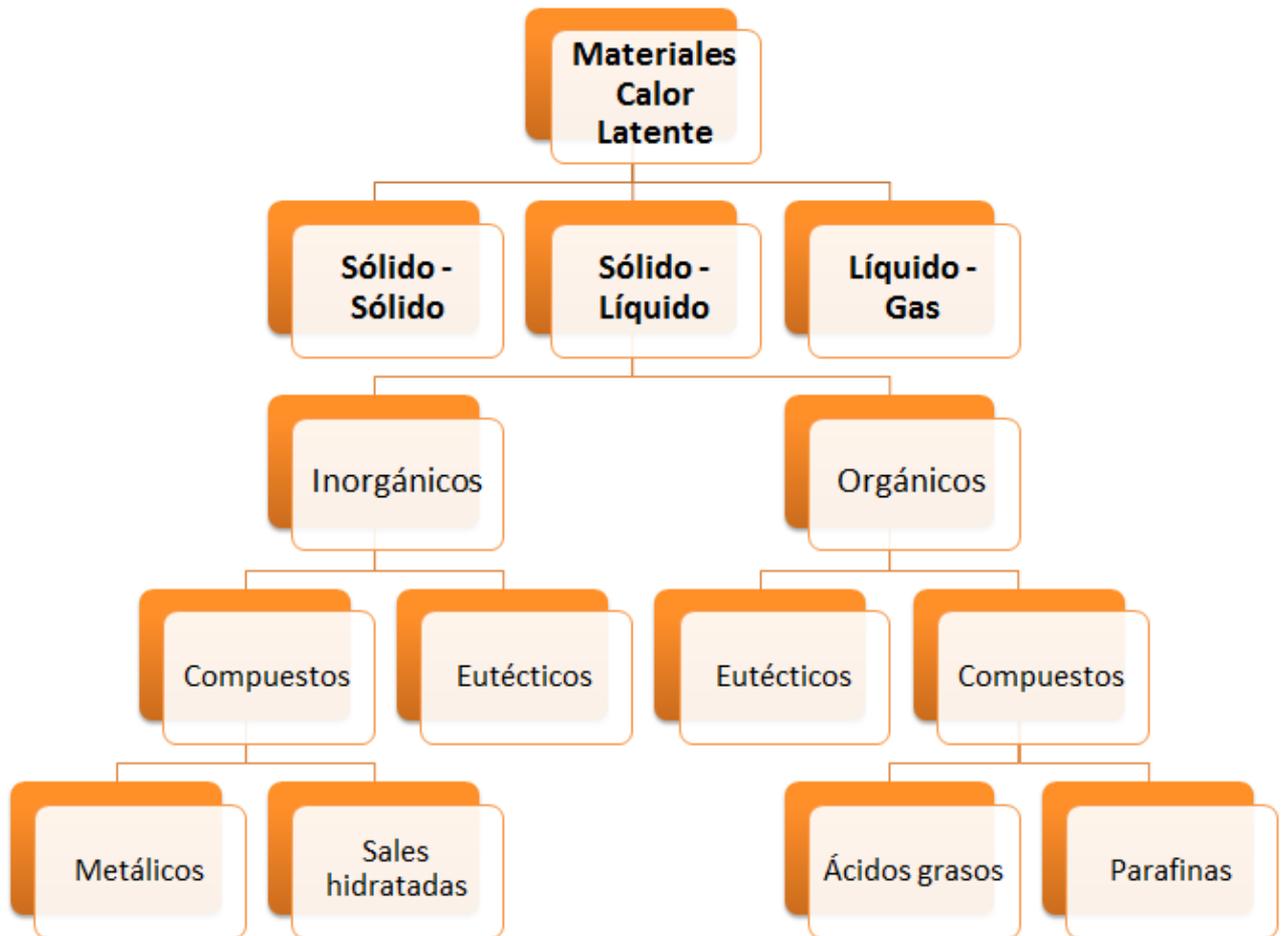


Figura 3.1. Clasificación de materiales de cambio de fase

Dentro de esta transición se tiene que los materiales están clasificados en orgánicos e inorgánicos. Se tienen eutécticos y compuestos de ambos tipos.

Dentro de los materiales utilizados en la transición de sólido-líquido, se tienen los siguientes:

Material	Compuesto	Temperatura de Fusión (°C)	Calor de Fusión (KJ/Kg)
Agua	$H_2O$	0	334.9
Glicol de etileno	$C_2H_6O_3$	-13	146.5
Glicerol	$C_3H_8O_3$	18	200.5
Sodio	$Na$	98	116.3
Nitrato de litio	$LiNO_3$	252	367.5
Perclorato de potasio	$KClO_4$	527	1251.3
Hidróxido de sodio	$NaOH$	300	225.6

<b>Aluminio</b>	<i>Al</i>	660	395.4
<b>Magnesio</b>	<i>Mg</i>	651	239.1
<b>Sulfato de sodio</b>	<i>Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></i>	884	162.8
<b>Cloruro de sodio</b>	<i>NaCl</i>	810	493.1
<b>Hierro</b>	<i>Fe</i>	1533	151.2
<b>Hidruro de litio</b>	<i>LiH</i>	685	3780

Tabla 3.2. Materiales para almacenamiento de calor por cambio de fase de sólido a líquido

Los materiales eutécticos se encuentran presente tanto en la clasificación orgánica como en la inorgánica. Se caracterizan por ser mezclas en las que participan dos componentes y, las cuales, presentan un punto de fusión inferior al que tienen dichos componentes por separado. Esto origina que dicho punto sea el más bajo posible y que ambos compuestos se solidifiquen o fundan a una misma temperatura.

### 3.4.1. Material de Cambio de Fase Orgánico

Se trata de sustancias químicas formadas por hidrógeno, carbono, oxígeno, nitrógeno,... Algunas de sus principales características son: químicamente estables, seguros, no reactivos, elevada entalpía de cambio de fase, elevado punto de fusión y compatibles con los materiales usualmente usados en la construcción.

La mayoría de PCMs que han sido estudiados hasta ahora trabajan dentro de un rango de temperaturas bastante bajo, por lo que no son utilizados en Centrales Solares Termoelectricas (CSP), su principal aplicación es en sistemas de refrigeración/calefacción o en el sector de la construcción.

Uno de los materiales orgánicos más utilizados comercialmente es la parafina que se trata de una mezcla de hidrocarburos saturados con similares propiedades. Su calor específico es de  $2.1 \text{ KJ/KgK}$ . También tiene un elevado calor de fusión por unidad de peso en un rango entre  $180 \text{ KJ/Kg}$  y  $250 \text{ KJ/Kg}$ . Gracias a estos elevados calores, la parafina presenta una elevada densidad de energía acumulada. Por lo que cuando se trabaja a bajos incrementos de temperatura, presenta una densidad de energía varias veces superior a la del agua. Además, no sufren sobreenfriamiento y no son corrosivos, como sucede con los PCMs inorgánicos.

La parafina presenta una viscosidad baja en estado líquido. En dicha fase no es polar, lo que provoca que no se pueda mezclar con otros materiales polares como el agua. Es químicamente estable hasta una temperatura aproximada de  $250^\circ\text{C}$ . La variación volumétrica existente entre su estado sólido y líquido es de aproximadamente un 10%, rango aceptable a la hora de diseñar el sistema. También hay que destacar que no son corrosivas ni se segregan.

Una de sus desventajas, como sucede en la mayoría de sustancias orgánicas, es que presenta una conductividad térmica baja, aunque se puede compensar aumentando la superficie de transferencia de calor. También son materiales inflamables que emiten gases nocivos durante la combustión. Presentan un alto coste económico, de manera que se suelen utilizar mezclados para descender su precio.

Algunas propiedades termofísicas de algunas parafinas utilizadas como PCM son:

Material	Punto de fusión (°C)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad térmica (W/mK)	Calor latente de fusión (KJ/Kg)
<b>Tetradecano</b>	5	771	0.21	231
<b>Pentadecano</b>	10	768	0.17	207
<b>Hexadecano</b>	18.2	774	0.21	238
<b>Heptadecano</b>	22	778	0.21	215
<b>Eicosano</b>	37	912 (sólido) 769 (líquido)	0.21	222

Tabla 3.3. Propiedades de algunos tipos de parafinas

Los materiales orgánicos que no son parafinas se caracterizan por tener una gran variedad de propiedades. Estos materiales también son inflamables, por lo que no deben de estar expuestos a altas temperaturas, llamas o agentes oxidantes. Tienen una baja conductividad térmica aunque presentan un elevado calor de fusión. Algunos ejemplos son: alcoholes, polímeros o poliuretanos.

Los ácidos grasos son un buen ejemplo de este tipo de materiales. Se trata de derivados de productos de animales o vegetales y presentan altos valores de calor latente de fusión como las parafinas, aunque económicamente resultan menos rentables. Presentan la ventaja de que tras varios ciclos de fusión y congelación no se produce subenfriamiento.

### 3.4.2. Material de Cambio de Fase Inorgánico

Estos tipos de materiales están clasificados en sales hidratadas y metálicas. Sus calores de fusión no se ven degradados con el paso de los ciclos de carga y descarga.

Algunas de sus principales características son: alta conductividad térmica, no inflamables, variación de volumen baja, económicos, disponible y gran capacidad volumétrica de almacenaje de calor latente.

Uno de los materiales inorgánicos más utilizados son las sales hidratadas que consisten en la combinación de una sal y agua que se convierten en una matriz cristalina cuando solidifica. Las sales hidratadas presentan una temperatura de fusión dentro del rango entre 15°C – 117°C.

Las sales hidratadas son muy utilizadas debido a su alto calor latente de fusión por unidad de masa y volumen, por su alta conductividad térmica, pequeñas variaciones de volumen al fundirse y, además, son bastante económicas.

También decir que dichas sales han presentado una serie de problemas:

- No solidifican en su punto de congelación, aunque se encuentren a varios grados por debajo del mismo. Por este motivo, presentan un sobreenfriamiento o falla para solidificarse a la temperatura adecuada. Se ha descubierto que con la adición de pequeñas cantidades de otro agente se puede resolver este problema de sobreenfriamiento, un agente que puede paliar este problema puede ser la sal bórax.

- La corrosión puede afectar a los recipientes. Para solucionarlo, se están introduciendo una serie de plásticos en los tanques para evitar la corrosión. Esto provoca que el encapsulamiento sea más complejo.
- Degradación de la sal tras varios ciclos de uso.
- Necesaria gran superficie de contacto entre el material y el fluido que transporta energía.
- Separación de los componentes de la mezcla debido a la gravedad cuando se encuentran en fase líquida, algunos agentes químicos pueden evitar esta segregación.

Algunas sales hidratadas utilizadas como PCMs son:

Material	Temperatura de fusión (KJ/Kg)	Calor latente (KJ/Kg)
$LiNO_3 \cdot 2H_2O$	30	296
$Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$	40	279
$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	32.4	241
$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$	32	267
$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	37	223

Tabla 3.4. Propiedades de algunos tipos de sales hidratadas

Este tipo de materiales se pueden utilizar en sistemas activos o pasivos, tanto en procesos industriales como en acondicionamiento de viviendas.

Otros materiales inorgánicos muy utilizados son los metálicos. Estos materiales no han sido tan estudiados como los anteriores debido a su alto peso y elevado coste. Por estos motivos, únicamente se utiliza este tipo de materiales para aquellas aplicaciones en las que el peso del metal no es tan importante como el volumen, debido al alto calor de fusión por unidad de volumen.

Estos materiales también presentan una alta conductividad térmica, baja corrosión, poca dilatación al cambiar de fase y una presión de vapor relativamente baja. Esto implica grandes ratios de carga y descarga en el almacenamiento de energía térmica, permitiendo así una reducción del área de transferencia de calor.

Por último, se tienen los materiales inorgánicos eutécticos que consisten en dos o más componentes que se congelan y funden de manera congruente formando una mezcla de un componente que cristaliza durante el proceso de cristalización. Los materiales eutécticos se congelan y funden sin segregarse normalmente. Durante el proceso de fundición, ambos componentes se funden a la misma vez sin separarse.

### 3.5. Materiales de cambio de fase utilizados comercialmente

La mayoría de los materiales de cambio de fase están basados en materiales como sales hidratadas, eutécticos o parafinas. Para formar estos materiales, sin embargo, no se mantiene la composición de origen, también se pueden añadir núcleos o variar el espesor.

Son utilizados especialmente dos tipos de PCMs:

- PCM composite: los composite son materiales compuestos por diferentes materiales para mejorar las propiedades de un tipo de material o combinar las propiedades de varios. Existen otras formas de formar un composite; por incrustación de un PCM en una matriz de otro material o por incrustación de otro material en el PCM.
- PCM encapsulados: se clasifican en microencapsulación y macroencapsulación. La macroencapsulación es la más utilizada pero la microencapsulación se está utilizando actualmente en la industria. Se deben tener en cuenta varios aspectos en la encapsulación del PCM: el material del contenedor debe ser compatible con el PCM, por lo que su pared tiene que ser lo suficientemente gruesa para asegurar el correcto funcionamiento del PCM, es decir, para soportar las tensiones que origina el cambio de volumen del PCM al cambiar de fase. Hoy en día, la microencapsulación únicamente es compatible con los materiales de cambio de fase orgánicos, especialmente parafinas.

### 3.6. Aplicaciones del PCM

Durante los últimos años, se han realizado numerosos estudios sobre los PCMs y sus aplicaciones, reuniéndose así bastante información. La localización de esta información es compleja de encontrar y se encuentra de manera dispersa.

En general, los PCMs tienen un gran abanico de usos, tanto electrónicos (para mantener dichos dispositivos en un rango de temperaturas óptimo para su correcta operación), cuidado de la vegetación, transporte de mercancías sensibles a los grandes cambios de temperatura, industria alimentaria y textil,...

Las parafinas suelen ser utilizadas en lugar de sistemas como el aire acondicionado ya que ofrece mayores beneficios tanto económicos como ambientales.

Las sales hidratadas inorgánicas son usadas como almacenamiento de frío, aunque son más complejas de operar.

Algunas de las aplicaciones más comunes son las siguientes:

- Calefacción: presenta usos domésticos, industrial, oficinas, etc. Consiste en la obtención de energía térmica a través del recurso solar, la cual se acumula en mediante sistemas de almacenamiento de calor latente, lo que permite a través de un recurso natural renovable, obtener la climatización óptima desde un punto de vista económico muy positivo. Para el caso de su uso durante el periodo nocturno, se utilizarán bombas de calor aprovechando que la tarifa nocturna es reducida.
- Climatización pasiva: consiste en el uso de materiales de cambio de fase en elementos interiores del edificio, como el suelo o las paredes, e incluso en elementos exteriores como en puertas. Debido al uso de estos materiales, durante las horas diurnas de más calor, dicha energía es almacenada en estos materiales disminuyendo el aumento de temperatura en el interior del edificio y, por el contrario, durante en las horas nocturnas de temperaturas más bajas, la liberación de esta energía ayuda a elevar la temperatura interior, haciendo del lugar un sitio más confortable.

Gracias a esta aplicación, se consigue un gran ahorro económico en sistemas auxiliares de climatización interior, mediante el uso de una energía limpia.

- Industria textil: el principal objetivo del uso de materiales de cambio de fase en este tipo de industria es la búsqueda del máximo confort y la minimización de las condiciones extremas de temperatura del medio ambiente.

Al aumentar la temperatura exterior, el material de cambio de fase incorporado en microcápsulas dentro de las prendas, el PCM aumenta su temperatura hasta fundirse, almacenando energía en su interior y aliviando la sensación de calor.

Por el contrario, cuando la temperatura exterior es baja, la energía almacenada en los PCM se libera aumentando así la temperatura corporal y evitando la sensación de frío existente.

Este tipo de prendas son utilizadas para equipos militares, deportivos, etc.

- Almacenamiento y transporte de alimentos: para aquellos alimentos sensibles a los cambios de temperatura, los PCMs son utilizados para utilizar sus propiedades de absorción y liberación de energía a una temperatura constante, para aislar los alimentos de la temperatura exterior, conservando así los alimentos a su temperatura idónea.
- Refrigeración de componentes electrónicos: sirven especialmente para ayudar a mantener a temperatura constante los instrumentos científicos. Los componentes electrónicos se sobrecalientan debido a su funcionamiento, ese incremento de energía es absorbido por el PCM que cambiará de fase a temperatura constante evitando así que los componentes electrónicos reciban dicha energía y aumenten su temperatura.

# 4. ESTADO DE CARGAS DEL ALMACENAMIENTO TÉRMICO POR CALOR LATENTE

---

El almacenamiento de energía térmica mediante cambio de fase es el método más prometedor de los últimos años, desde el punto de vista tanto ambiental como de la eficiencia. Los PCMs (Material de Cambio de Fase) pueden llegar a almacenar varias veces más energía que otros materiales.

Sin embargo, se ha estado enfrentando a la dificultad existente para determinar de manera exacta el estado de carga debido a la cantidad de variables involucradas y al material utilizado para almacenar energía mediante cambio de fase.

Se ha realizado una revisión bibliográfica de los procesos de carga y descarga de energía térmica, así como de los métodos para obtener el estado de carga.

Primero, se analizarán los procesos de carga/descarga en dos de las aplicaciones más deseadas del uso de PCMs: mediante la macroencapsulación (en el sector de la construcción) y también al sector de la energía térmica para producir energía eléctrica (colector solar).

De ambas aplicaciones se analizan casos prácticos, donde se estudiará de manera analítica y/o experimental la obtención del estado de carga.

Posteriormente, se estudiará en detalle la estimación del estado de carga, una vez conocido el comportamiento de los PCM durante la carga y descarga.

Una vez estudiado, se analiza el error obtenido en esta medición, así se podrá saber si es viable implementarlo o no.

## 4.1. Proceso de carga/descarga de PCM macroencapsulado

En el mundo de la construcción, la introducción de los PCM como medio energético en los hogares, supondría un gran avance, permitiendo así una significativa reducción del uso de energías no renovables y nocivas para el medio ambiente.

Algunos de los beneficios que supondría la introducción de este tipo de almacenamiento de energía serían: reducción de emisión de CO<sub>2</sub>, más económico y menor consumo de energía tanto para calefacción como refrigeración.

Los PCMs pueden ser microencapsulados o macroencapsulados. Cuando son microencapsulados, la mayor parte del material se almacena en cápsulas de pequeños diámetros. En el caso de macroencapsulados, la mayor parte del material es almacenada en contenedores de mayor dimensión y menor número.

Se busca siempre que las cápsulas o contenedores estén fabricados de materiales con un alto valor de conductividad térmica, para así favorecer la carga y descarga del PCM sin altas pérdidas de calor por el camino. Por este motivo, los materiales más utilizados suelen ser los metálicos.

Estos contenedores suelen tener forma rectangular debido a la mayor sencillez en su fabricación y alta posibilidad de almacenamiento del PCM.

Otros factores también son importantes en la elección del contenedor como las condiciones de contorno, la posición (horizontal o vertical), el material de contacto con el mismo,...

#### 4.1.1. Estudio experimental del Proceso de Carga/Descarga: material y procedimiento de medida

A continuación, se va a realizar el estudio experimental del proceso de carga/descarga de un PCM orgánico macroencapsulado en un contenedor rectangular de aluminio.

El PCM se encuentra incrustado en tubos de aluminio de aproximadamente 2mm de espesor. Todo es sellado con un aislamiento térmico de aproximadamente 2.5mm, excepto en la cara donde recibirá el flujo de la fuente de calor. También, para permitir los cambios de volumen propios de los cambios de fase del PCM, se ha abierto un pequeño agujero en una de las esquinas del tubo.

Se van a analizar dos tubos, uno vertical y otro horizontal, para así poder comparar la influencia que tiene la posición del tubo en la transferencia de energía.

El PCM utilizado será Parafina RT35, que presenta los siguientes datos:

- Temperatura de cambio de fase: 35°C
- Capacidad térmica de almacenamiento: 160 KJ/Kg
- Conductividad térmica: 0.2 W/mK

Con el fin de obtener las medidas del Estado de Carga, se han colocado tres termopares de Tipo-K equiespaciados a lo largo de cada tubo. Dichos termopares tienen una exactitud de 0.2°C.



Figura 4.1. Posición de los termopares en el tubo

Otros tres termopares han sido utilizados también, dos de ellos situados en la superficie de aluminio del contenedor, cada uno en una cara situados justo en la mitad de longitud, con el fin de obtener la medida de la temperatura de la superficie. Y, el tercero, se ha utilizado para poder medir la temperatura ambiente.

El ensayo tuvo lugar durante 21 horas, obteniendo valores de temperatura cada 5 minutos.

#### 4.1.2. Estudio experimental del Proceso de Carga/Descarga: análisis de los resultados

Se va a dividir el análisis de los resultados en dos partes que posteriormente serán comparadas: estado de carga del tubo en posición vertical y posición horizontal. Destacar que las condiciones en las que se han realizado ambos experimentos son las mismas.

- **Posición horizontal.**

Se ha realizado un análisis tanto del proceso de carga como del proceso de descarga por separado.

Durante el proceso de carga del PCM dentro del contenedor, se puede apreciar una evolución de su estado como consecuencia del cambio de fase. Partiendo de un estado sólido, conforme comienza a recibir calor se produce un almacenamiento de energía por calor sensible hasta que empieza a fundirse.

Durante la fusión, coexiste material en estado sólido y en estado líquido, por lo que el almacenamiento de calor se produce por calor sensible y por calor latente (en la fracción de PCM que se está fundiendo), hasta que el PCM se funde del todo hasta lograr un completo estado líquido y si se sigue calentando, almacena calor únicamente por calor sensible.

A continuación, en la Figura 4.2., se representa la temperatura medida por los tres termopares situados a lo largo del tubo rectangular en función del tiempo durante el proceso de carga:

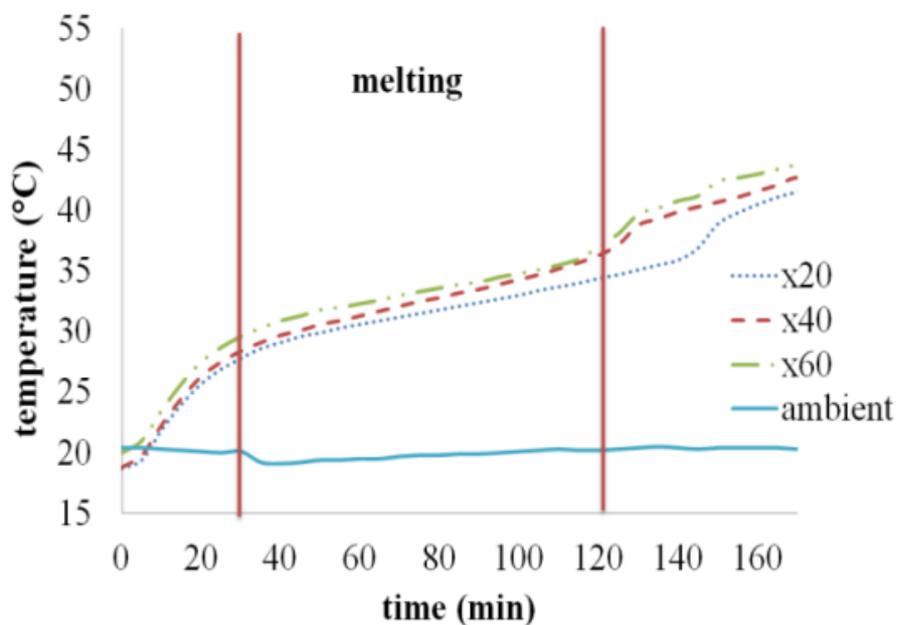


Figura 4.2. Proceso de carga en tubo en posición horizontal

En la Figura 4.2., se puede observar dos líneas verticales justamente en los minutos 30 y 120, esto es debido a que a partir del minuto 30 se puede apreciar cómo el PCM comienza a fundirse, al ir acercándose a su temperatura de fusión (35°C).

Se aprecia que en el intervalo entre el minuto 30 y el 120, el gradiente de temperatura es inferior puesto que el PCM se está fundiendo, por lo que necesita más tiempo (energía) para ir aumentando de temperatura.

En el minuto 120, ya se ha producido la completa fusión del PCM, viéndose cómo el gradiente de temperatura vuelva a subir (almacenamiento de calor sensible), hasta alcanzar su máximo en aproximadamente el minuto 170 en unos 43.6°C.

Se puede deducir de la gráfica que el calor se distribuye muy homogéneamente a largo del tubo con mínimas pérdidas de calor. Esto se aprecia debido a la pequeña diferencia existente de temperatura medida entre los termopares. Esta distribución tan homogénea es gracias a la alta conductividad térmica del aluminio.

También se analiza el proceso de descarga en la Figura 4.3:

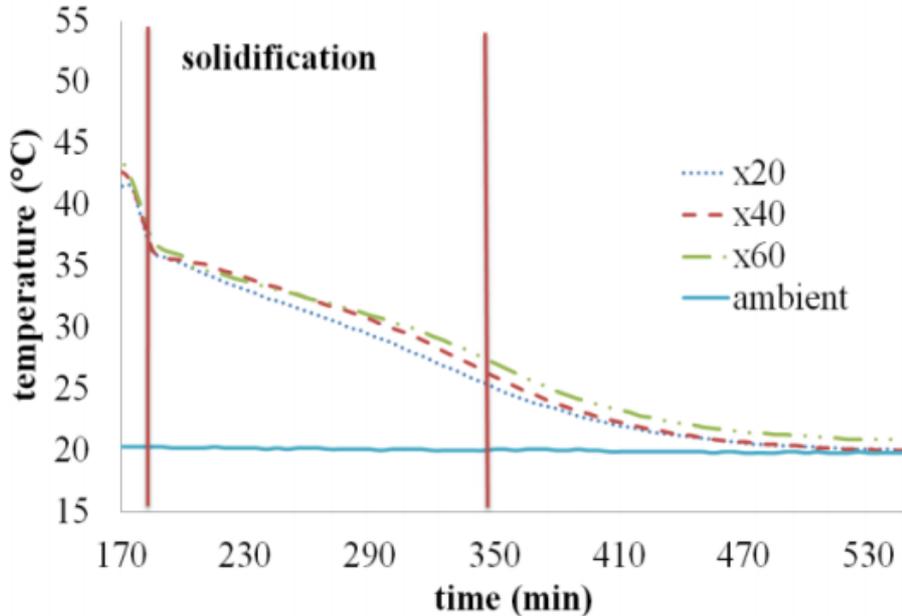


Figura 4.3. Proceso de descarga en tubo en posición horizontal

Se puede observar de nuevo que el PCM pasa por sus tres estados durante el proceso de descarga:

- Estado líquido: comienza en este estado (ya que fue el estado en el que finalizó el proceso de carga) y comienza a perder energía (bajar de temperatura). En este estado libera calor sensible.
- Mezcla: en este estado, el PCM comienza a solidificarse y libera energía por calor sensible y por calor latente en aquellas zonas donde está comenzando a solidificarse.
- Estado sólido: cuando el PCM se ha solidificado completamente y sigue liberando energía, pero esta vez, únicamente mediante calor sensible.

En la Figura 4.3. se pueden apreciar estos tres estados. Se ve como a los 15 min aproximadamente de empezar, el gradiente de temperatura sufre un escalón, en ese momento es cuando comienza a solidificarse.

En aproximadamente 165 minutos, se aprecia una suave diferencia de gradiente de temperatura que es cuando ya el PCM se ha solidificado por completo y, a partir de ahí, comienza a bajar su temperatura hasta que se estabiliza alrededor de la temperatura ambiente.

- **Posición vertical.**

Para este caso, también se ha realizado un análisis tanto del proceso de carga como del proceso de descarga por separado.

Como sucedía en la posición horizontal, durante el proceso de carga, se parte de un estado sólido y, conforme comienza a recibir calor, se produce un almacenamiento de energía por calor sensible hasta que empieza a fundirse.

Durante la fusión, coexiste material en estado sólido y en estado líquido, por lo que el almacenamiento de calor se produce por calor sensible y por calor latente (en la fracción de PCM que se está fundiendo), hasta que el PCM se funde del todo hasta lograr un completo estado líquido y si se sigue calentando, almacena calor únicamente por calor sensible.

A continuación, en la Figura 4.4., se representa la temperatura medida por los tres termopares situados a lo largo del tubo rectangular en función del tiempo durante el proceso de carga:

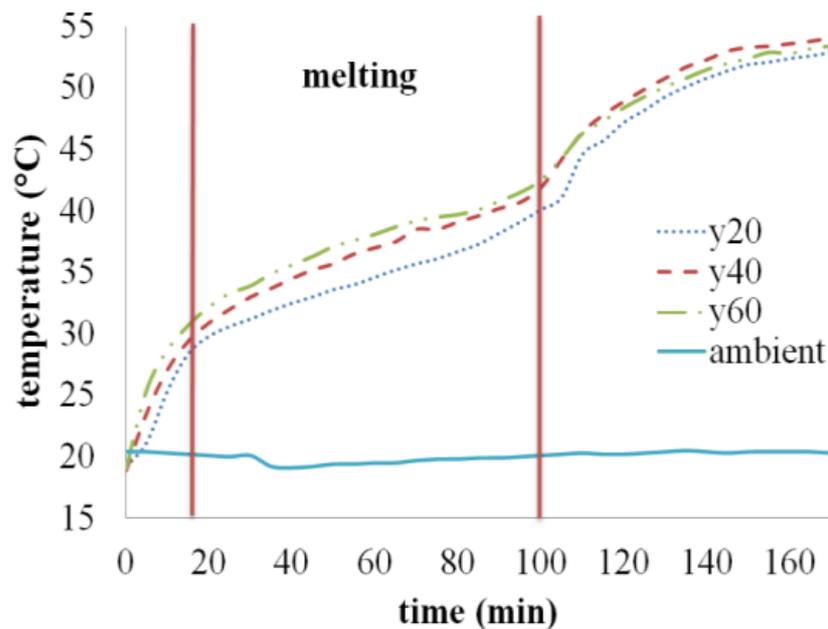


Figura 4.4. Proceso de carga en tubo en posición vertical

En la Figura 4.4., se puede observar dos líneas verticales justamente en los minutos 18 y 98, esto es debido a que a partir del minuto 18 se puede apreciar cómo el PCM comienza a fundirse, al ir acercándose a su temperatura de fusión (35°C). Se observa que en el intervalo entre el minuto 18 y el 98, el gradiente de temperatura es inferior puesto que el PCM se está fundiendo, por lo que necesita más tiempo (energía) para ir aumentando de temperatura. En el minuto 98, ya se ha producido la completa fusión del PCM, viéndose cómo el gradiente de temperatura vuelve a subir (almacenamiento de calor sensible), hasta alcanzar su máximo en aproximadamente el minuto 170 en unos 54.6°C.

Se puede deducir de la gráfica que el calor no es distribuido tan homogéneamente debido a que el PCM comience a fundirse en las zonas más cercanas a la pared del tubo, lo que origina que el PCM en estado líquido se desplace a la zona superior del tubo y en la parte inferior se encuentre el PCM que aún está en estado sólido. Por este motivo, se pueden apreciar diferencias de hasta casi 4°C entre el termopar situado a 200mm y el

situado a 600mm en el tubo vertical. La convección natural juega un importante papel a lo largo de este proceso. Aún así, la transferencia de calor es muy homogénea gracias a la alta conductividad térmica del aluminio.

También el proceso de descarga es analizado en la Figura 4.5:

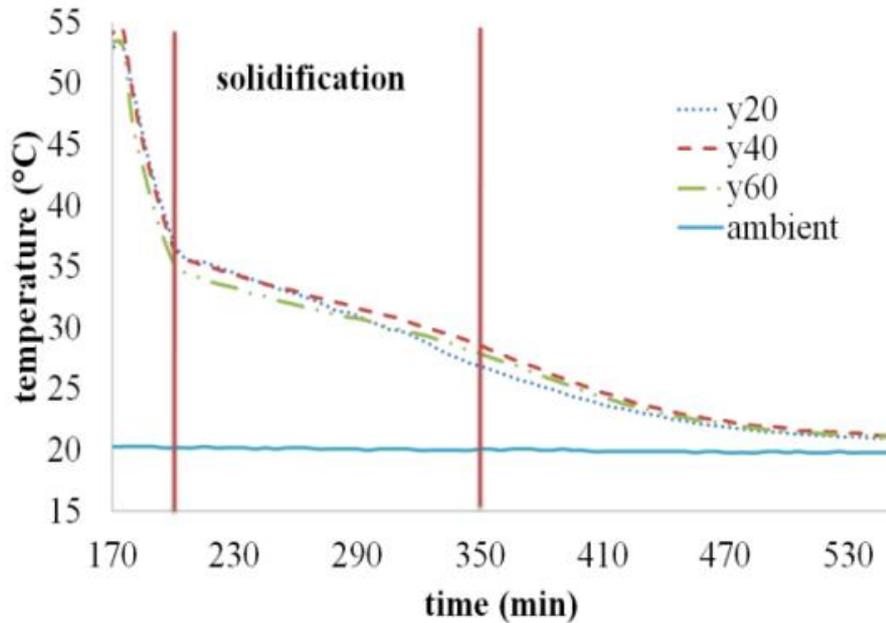


Figura 4.5. Proceso de descarga en tubo en posición vertical

Se puede observar de nuevo que el PCM pasa por sus tres estados durante el proceso de descarga:

- Estado líquido: comienza en este estado (ya que fue el estado en el que finalizó el proceso de carga) y comienza a perder energía (bajar de temperatura). En este estado libera calor sensible.
- Mezcla: en este estado, el PCM comienza a solidificarse y libera energía por calor sensible y por calor latente en aquellas zonas donde está comenzando a solidificarse.
- Estado sólido: cuando el PCM se ha solidificado completamente y sigue liberando energía, pero esta vez, únicamente mediante calor sensible.

En la Figura 4.5. se pueden apreciar estos tres estados. Se ve como a los 30 min aproximadamente de empezar, el gradiente de temperatura sufre un escalón, en ese momento es cuando comienza a solidificarse.

En aproximadamente 150 minutos, se aprecia una suave diferencia de gradiente de temperatura que es cuando ya el PCM se ha solidificado por completo y, a partir de ahí, comienza a bajar su temperatura hasta que se estabiliza alrededor de la temperatura ambiente.

En este caso, la estratificación es menos clara que en el proceso de carga ya que el PCM comienza a solidificarse en las paredes del tubo. De la Figura 4.5., se extrae que a partir, aproximadamente, el minuto 275, el PCM en estado sólido, comienza a desplazarse a la parte inferior del tubo, ya que a partir de ese minuto comienza a verse en la gráfica cómo empieza a aumentar la diferencia de temperatura que marca el termopar situado a 200 mm, con respecto al resto.

- **Comparación de los resultados obtenidos en ambas posiciones.**

Durante el proceso de carga, el PCM comienza a fundirse en el minuto 18 con el tubo en posición vertical, mientras que en posición horizontal comenzaba en el minuto 30 (12 minutos más rápido). Además, en posición vertical solo toma aproximadamente 80 minutos en cambiar el PCM completamente a estado líquido (alrededor del minuto 98), mientras que en posición horizontal tarda 90 minutos (en el minuto 120).

La temperatura más alta que alcanza el PCM en posición horizontal ( $43.6^{\circ}\text{C}$ ) es alcanzada en posición vertical en el minuto 110 (60 minutos antes que en la posición horizontal). Por tanto, cuando se llega al minuto 170, se alcanza una temperatura máxima superior que la lograda en la posición horizontal, aproximadamente  $54.6^{\circ}\text{C}$ .

En el proceso de descarga, tarda más tiempo en liberar calor sensible el PCM en estado líquido y comenzar a solidificarse (minuto 30) en la posición vertical, debido a que parte de una temperatura superior a la que partía durante el mismo proceso el tubo en la posición horizontal. Aunque, aún así, en posición vertical tarda menos tiempo en solidificarse todo el material (150 minutos frente a 165 de la posición horizontal).

Por último, la posición horizontal tarda menos tiempo en alcanzar la estabilidad alrededor de la temperatura ambiente.

En conclusión, se deduce que durante el proceso de carga, la transferencia de calor mejora con el tubo en posición vertical debido a la transferencia convectiva, además de la conductiva que es la dominante en posición horizontal.

Para ambas posiciones, el periodo de descarga es más largo que el de carga como se esperaba.

## 4.2. Proceso de Carga/Descarga de PCM en Colector Solar de Alta Temperatura

El tipo de colector que se ha utilizado es una placa solar junto con un sistema de MGT (Microturbina de Gas). Este sistema consiste en un concentrador parabólico de alta temperatura de recepción solar y una Microturbina de Gas conectada con un generador como se indica en la Figura 4.6.:

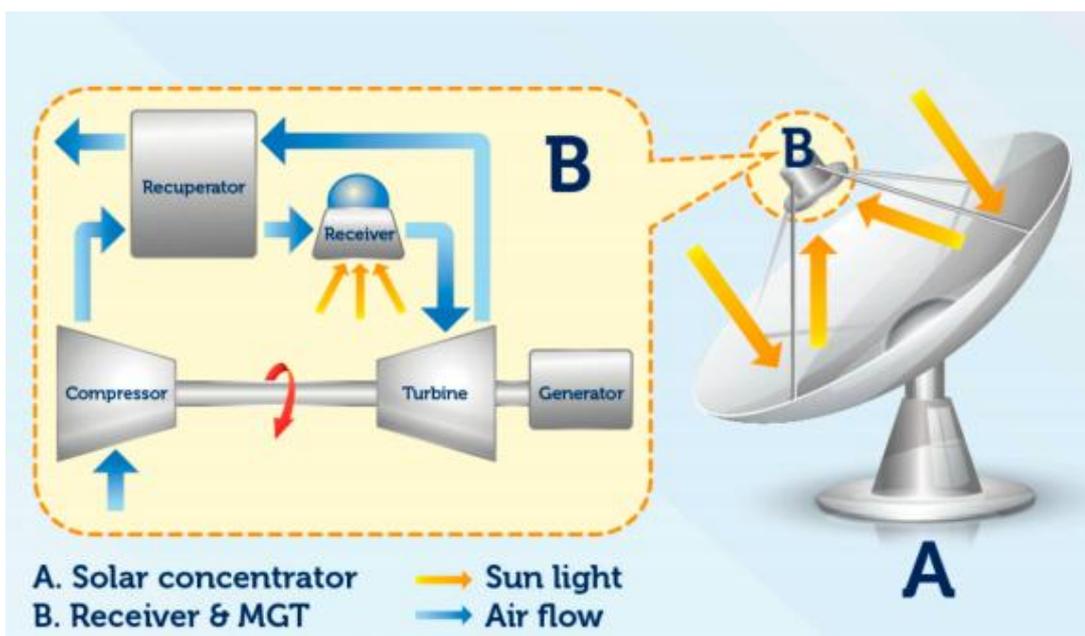


Figura 4.6. Esquema de funcionamiento de colectores solares en plantas de potencia

El mayor desafío en el diseño de estos colectores es que sus componentes puedan soportar altas temperaturas, ya que el aire comprimido puede alcanzar temperaturas alrededor de 900°C.

En la siguiente figura, se representa la estructura del receptor solar:

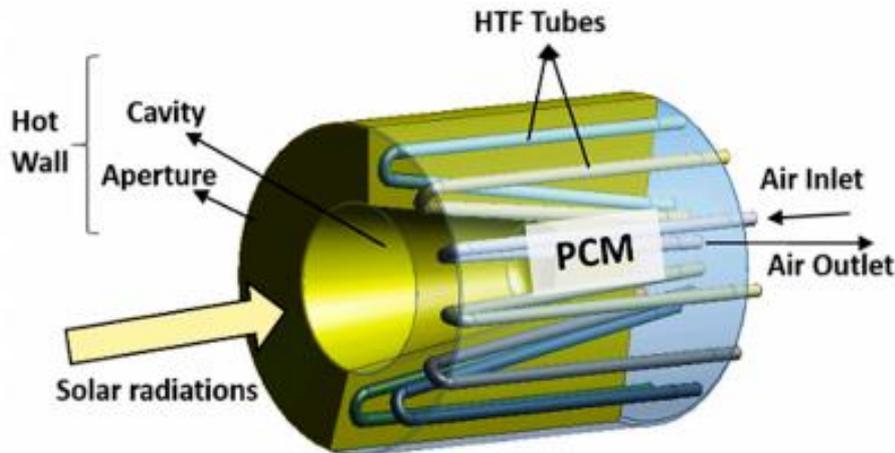


Figura 4.7. Esquema del receptor solar

Se aprecia que el receptor solar es un contenedor cilíndrico que está formado por una estructura tubular de 12 tubos sumergidos en el PCM. Este PCM es un medio intermedio que almacena calor latente y sensible y transfiere parte de este calor como aire comprimido a la turbina.

Como se aprecia en la figura, el receptor tiene una cavidad cónica ya que esta geometría favorece la capacidad de absorción. Se incluye un sistema de almacenamiento térmico para evitar las fluctuaciones existentes en la temperatura de salida del fluido de trabajo por la variación en la recepción de radiación solar.

La selección del PCM es un punto crítico en el almacenamiento de calor latente, debido a que tiene que cumplir ciertos requisitos para ser apto, como por ejemplo, estabilidad química, conductividad térmica, temperatura de fusión, compatibilidad con el resto de materiales del sistema, cambios en el volumen...

Las sales y las aleaciones o componentes metálicos son materiales que presentan buenas propiedades para poder ser potenciales PCMs. Para el caso concreto bajo estudio, el material elegido es una composición eutéctica de Mg56-Si44 wt % que presenta las siguientes propiedades:

- Densidad: 1900 Kg/m<sup>3</sup>
- Conductividad térmica: 70 W/(m K)
- Temperatura de fusión: 1219 K
- Calor específico: 632 J/ (Kg K)

Se aprecian buenas propiedades térmicas y, además, pequeñas variaciones de volumen durante el cambio de fase.

#### 4.2.1. Modelo de análisis

Las simulaciones son estudiadas mediante el programa ANSYS FLUENT 18.0. Se asume que el receptor se encuentra en el interior de un dominio varias veces mayor que el mismo (aproximadamente 4 veces más largo y 3 veces más ancho que la estructura receptora) para así tener en cuenta las pérdidas por convección. En el

análisis computacional se van a tener en cuenta dos dominios sólidos, el material del tubo y el contenedor de cerámica (receptor).

Aparte, también se van a tener en cuenta tres dominios fluidos: el flujo de aire en el interior de los tubos, el PCM y el dominio externo al contenedor de cerámica.

Las ecuaciones aplicadas para el estudio son la de continuidad, momento y de energía. Adoptando el modelo simplificado “solidificación y fusión” para la transición de fase.

Este modelo consiste en la técnica de entalpía-porosidad. Esta técnica consiste en que la coexistencia entre las regiones líquidas y sólidas durante la transición de fase del PCM es considerada como una región porosa o blanda. La fracción de porosidad de esta región se representa a través del siguiente valor de fracción de líquido:

$$\beta = \begin{cases} 0 & \text{si } T < T_{\text{sólido}} \\ \frac{T - T_{\text{sólido}}}{T_{\text{líquido}} - T_{\text{sólido}}} & \text{si } T_{\text{líquido}} > T > T_{\text{sólido}} \\ 1 & \text{si } T > T_{\text{líquido}} \end{cases} \quad (1)$$

Las ecuaciones presentan la siguiente forma:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{u}) + \nabla (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla (\boldsymbol{\tau}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} H) = \nabla (k \nabla T) + S \quad (4)$$

Dentro de la ecuación del momento (3) y la ecuación de la energía (4), los términos utilizados representan lo siguiente:

- $\boldsymbol{\tau}$ : tensor de esfuerzos
- $\rho \mathbf{g}$ : momento debido a fuerza de la gravedad
- $\mathbf{F}$ : momento debido a fuerza externa

Este momento está relacionado con la la porosidad de la zona “blanda” de transición de fases, mediante la siguiente ecuación:

$$\mathbf{F} = \frac{(1 - \beta)^2}{\beta^3 + \epsilon} A_{\text{blanda}} \mathbf{u} \quad (5)$$

El valor de  $\epsilon$  es una constante utilizada para evitar una división entre cero, aproximadamente  $10^{-3}$ .

Se tiene también que  $A_{\text{blanda}}$  es la constante de la región “blanda”. A mayor valor de esta constante, más rápido cambia de fase el PCM de estado líquido a estado sólido. Históricamente, se han usado valores de esta constante entre  $10^3$  y  $10^{10}$ , para este caso de estudio, se usará  $10^5$ .

- $k$ : conductividad térmica
- $H$ : entalpía del PCM
- $S$ : fuente térmica

El valor de la entalpía es igual a la suma del calor latente más el calor sensible, siendo el valor del calor latente

igual a la fracción de líquido por la entalpía en estado líquido del PCM:

$$H = h + \Delta H \quad (6)$$

$$\Delta H = \beta h_{sl} \quad (7)$$

Las ecuaciones de Navier-Stokes son resueltas aplicando el modelo turbulento  $k-\epsilon$  sobre el modelo de solidificación y fusión. Se han tenido en cuenta las pérdidas debidas a la convección y reflexión de la radiación solar. Se ha utilizado un esquema diferencial de segundo orden para la discretización de los términos convectivos de las ecuaciones de la energía y del momento. El criterio de convergencia utilizado en las ecuaciones es de  $10^{-4}$ .

Para alcanzar esta convergencia, se ha tenido que realizar un mallado muy fino de los dominios bajo estudio. A la hora de realizar el mallado, se ha aprovechado la simetría del dominio, cogiendo una sección con dos tubos en su interior, como se refleja en la Figura 4.8.:

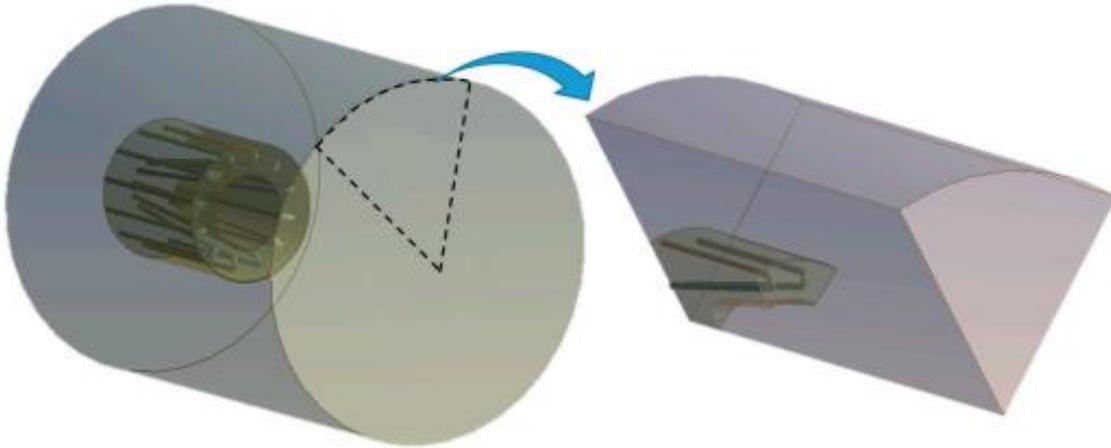


Figura 4.8. Dominio utilizado en el mallado gracias a la simetría

Se ha realizado el mallado de los tres dominios fluidos. Para el fluido de trabajo se ha utilizado un mallado hexaédrico (aprox. 160000 celdas) y, para los dominios del PCM y del fluido exterior al contenedor, dominios tetraédricos (aproximadamente 4 millones de celdas y algo más de 1 millón de celdas, respectivamente). En las Figura 4.9. y Figura 4.10. se muestra el resultado del mallado:



Figura 4.9. Detalle del mallado de la sección simétrica

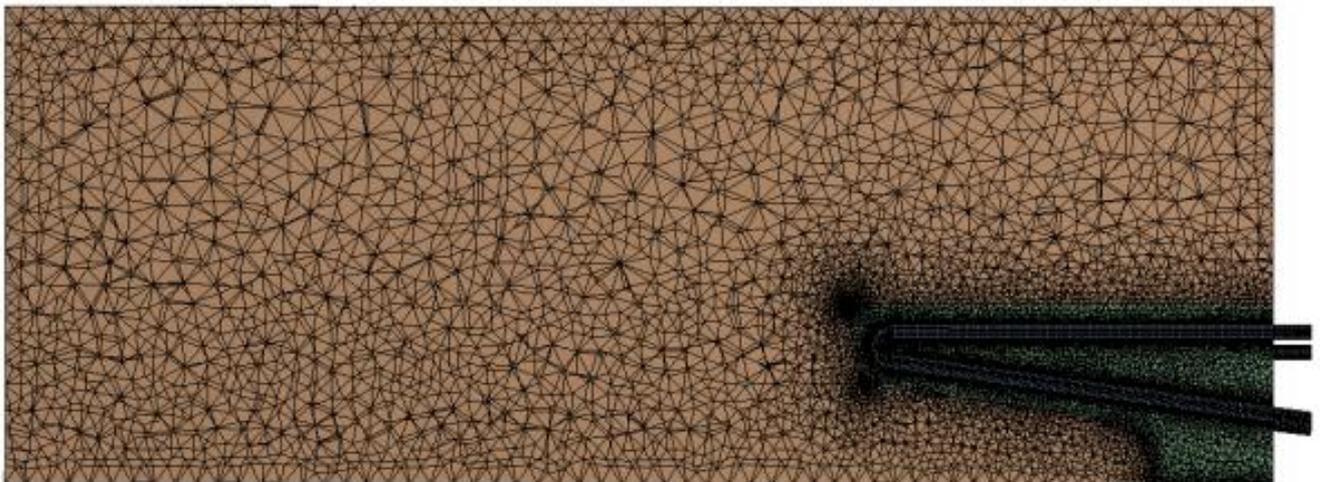


Figura 4.10. Detalle del mallado en todo el dominio computacional

Por último, se definen las condiciones de contorno empleadas:

- Superficie del receptor adiabática.
- Fluido de trabajo en el dominio exterior y en el interior de los tubos: aire modelado como gas ideal.
- Flujo de masa del fluido de trabajo: 0.1 Kg/s
- Temperatura de entrada del fluido de trabajo: 863 K
- Presión de entrada del fluido de trabajo: 200 KPa

#### 4.2.2. Proceso de almacenamiento de energía: carga y descarga

Los procesos de solidificación y fusión han sido simulados por el programa ANSYS FLUENT 18.0. A continuación, se describirán los procesos de descarga y carga del PCM y cómo se va produciendo la transición de fase.

Se analiza primero cómo evoluciona la temperatura de la pared del recipiente, la de salida de los tubos y la fracción líquida de PCM durante los procesos de descarga y carga en la Figura 4.11., a partir de los resultados obtenidos del análisis detallado en el apartado anterior:

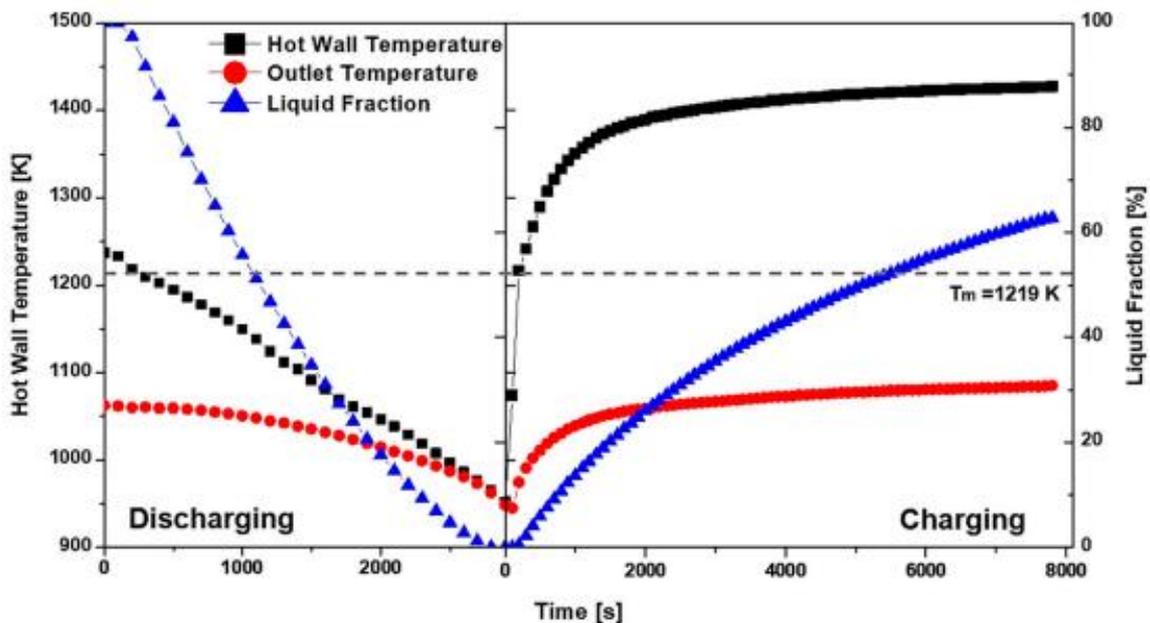


Figura 4.11. Análisis de variables durante la descarga y carga en función del tiempo

Se comienza con el proceso de descarga partiendo del PCM en completo estado líquido. Se observa como la temperatura de las paredes desciende conforme pasa el tiempo. Se puede apreciar que la fracción de líquido es igual a cero, es decir, el PCM está completamente solidificado después de 48 minutos. A partir de ese momento, comienza el proceso de carga, en el que se observa un salto importante en el gradiente de temperatura de las paredes debido a la absorción de radiación solar concentrada. Una vez que se consigue estabilizar la entrada de potencia solar y la absorción térmica de energía solar en la estructura receptora, se aprecia que el gradiente desciende. Una vez han pasado 130 minutos, se ha alcanzado una fracción líquida de PCM de 63%.

Por otro lado, también se han analizado, por separado, mediante un mapa de calor, las zonas en función de su temperatura y fracción de líquido en tres instantes de tiempo.

En la Figura 4.12. se ha analizado el proceso de descarga:

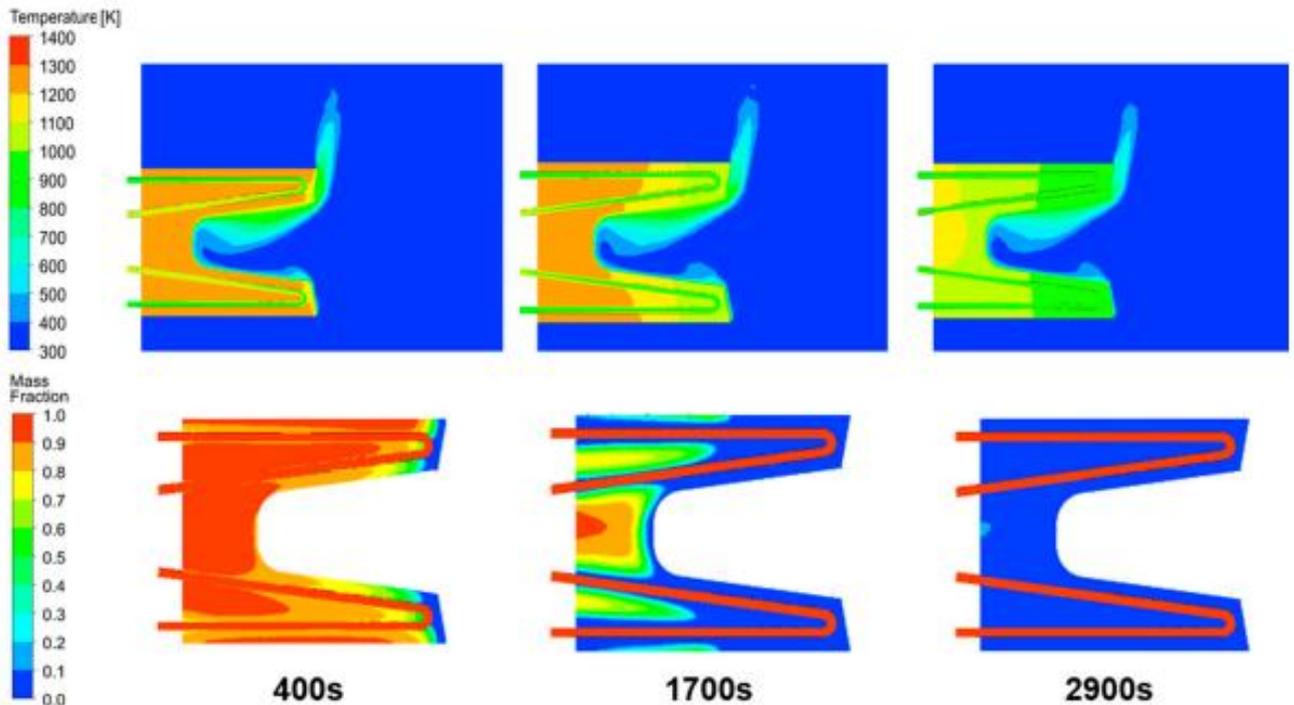


Figura 4.12. Temperatura y fracción de líquido del PCM durante el proceso de descarga

Se puede observar cómo se comienza con el PCM completamente líquido siendo la temperatura del mismo alta y cómo el fluido de trabajo que pasa en el interior de la tubería tiene una temperatura mucho más baja al ser el proceso de descarga.

A los 400 segundos, se comienza a ver cómo la temperatura en toda la sección comienza a descender y en superficie frontal comienza a solidificarse. A los 1700 segundos, se observa cómo el fluido de trabajo en el interior de los tubos sigue absorbiendo calor del PCM y la región “blanda” se comienza a formar a su alrededor.

Por último, se observa cómo a los 2900 segundos prácticamente ya se ha solidificado todo el PCM y la temperatura ha descendido en todo material especialmente en la parte frontal.

A partir del segundo 2900, comienza el proceso de carga (con todo el PCM en estado sólido), obteniendo los resultados mostrados en la Figura 4.13. para tres instantes de tiempo:

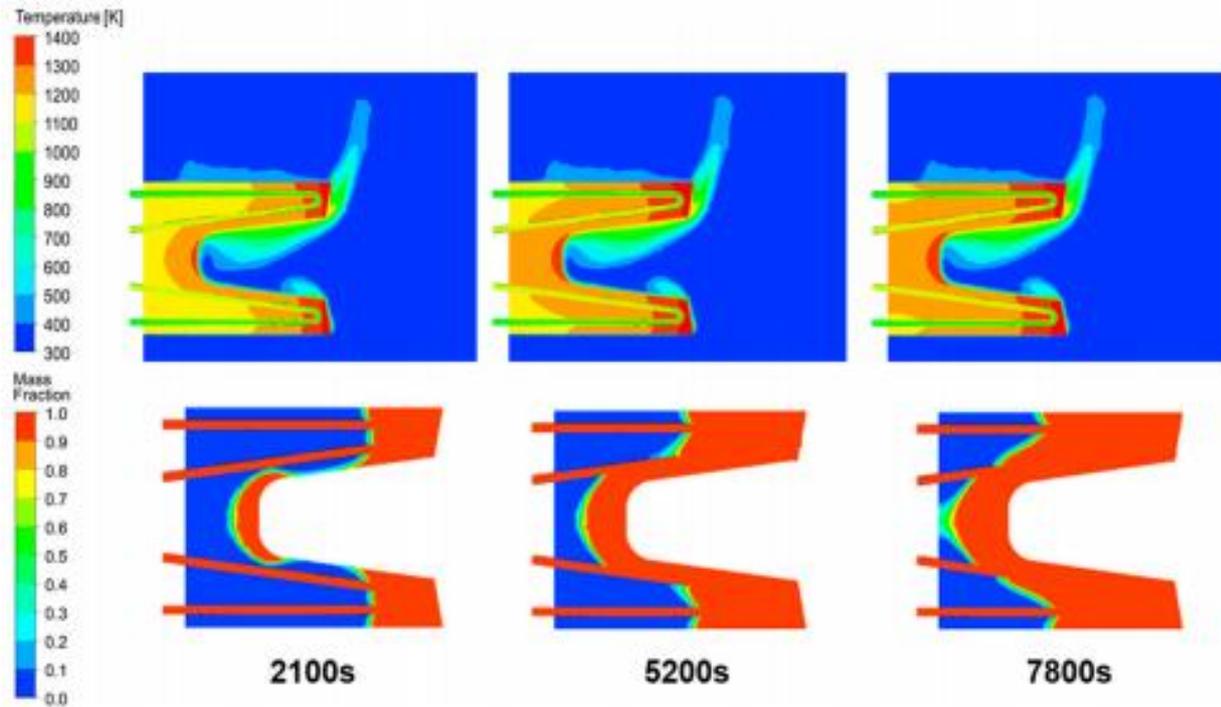


Figura 4.13. Temperatura y fracción de líquido del PCM durante el proceso de carga

En el instante de inicio del proceso de carga, una radiación solar concentrada constante fue aplicada, originando que el PCM del interior absorbiera todo el calor, sobretodo por la cara frontal. Este hecho, derivó en un rápido incremento de temperatura en esta zona, debido a la falta de equilibrio entre el incremento de potencia solar recibida y las pérdidas anteriores de calor durante el proceso de descarga.

En la Figura 4.13. se observa un incremento gradual de temperatura con el paso del tiempo. Las zonas en las caras frontales y en la parte inferior de la cavidad son las que primero alcanzan altas temperaturas y consiguen cambiar a estado líquido. A los 7800 segundos, un 64% de todo el PCM ha cambiado de fase a estado líquido.

También se han obtenido resultados durante el proceso de descarga y carga en 6 secciones a lo largo del cilindro contenedor del PCM, tomando como origen la cara frontal. Toda la cara lateral del contenedor se encuentra perfectamente aislada y únicamente se produce la transferencia de calor a través del fluido de trabajo en el interior de los tubos y por las paredes del recipiente contenedor.

En la Figura 4.14. se representan los resultados obtenidos:

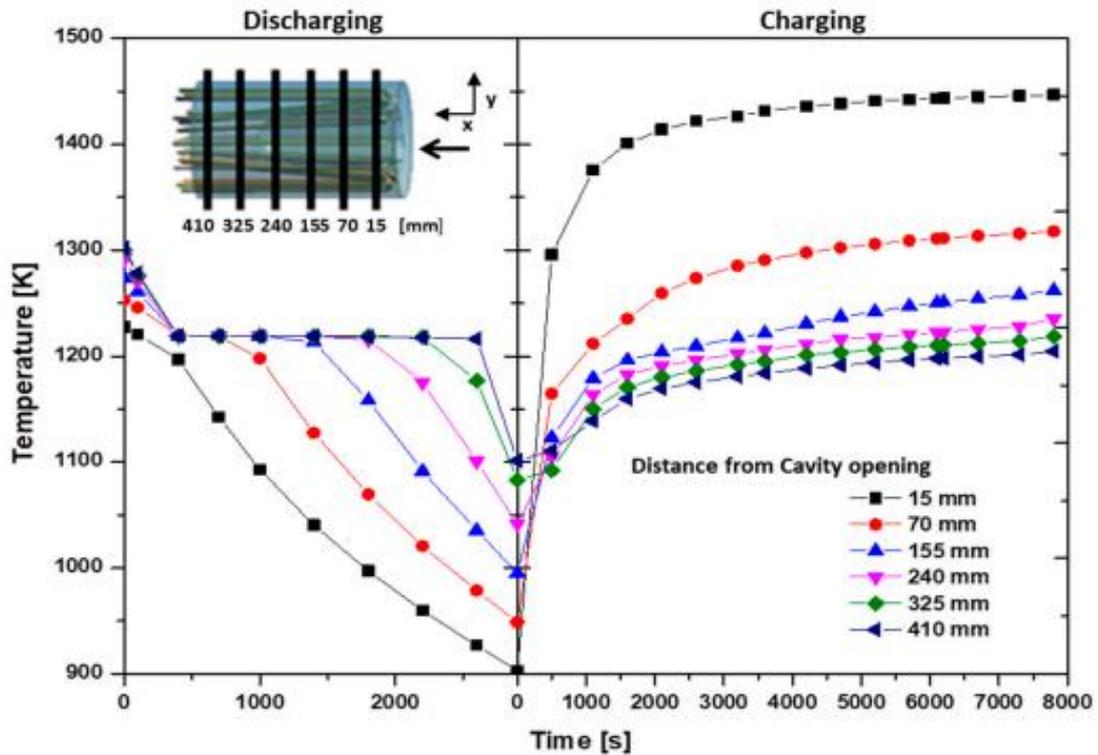


Figura 4.14. Temperatura y fracción de líquido del PCM durante el proceso de carga

Durante el proceso de descarga, se puede apreciar, como se había visto en las anteriores gráficas, la sección más cercana a la cara frontal es la que más energía libera, llegando a solidificarse más rápidamente que el resto. Mientras, que las secciones más lejanas, no llegan a solidificarse, como en el caso de la sección a 410 mm, hasta que no han pasado aproximadamente 2600 segundos.

Por el contrario, durante el proceso de carga, las temperaturas más altas se encuentran localizadas en las secciones más cercanas a la cara frontal es decir, las mayores variaciones de temperatura se producen en la cara frontal.

Por último, en la Figura 4.15. se demuestra todo lo explicado anteriormente con un mapa de temperaturas de 4 secciones del recipiente cilíndrico, partiendo desde la cara frontal:

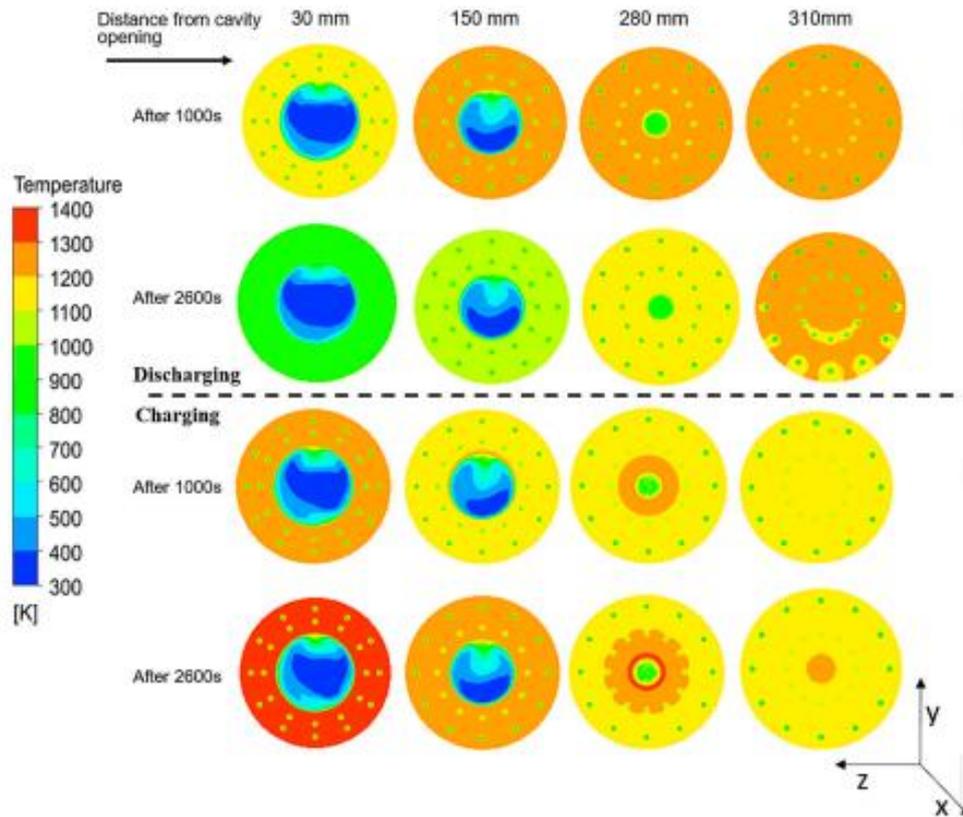


Figura 4.15. Mapa de temperaturas de 4 secciones del recipiente cilíndrico

En conclusión, de los resultados obtenidos, se ha observado que los componentes presentan un buen comportamiento en los procesos de carga y descarga, llegando a estabilizarse con la temperatura ambiente el sistema en poco tiempo. Esto previene una caída en la actuación del sistema de turbina y, además, reduce la posibilidad de daños en los componentes.

### 4.3. Estimación del estado de carga del almacenamiento por calor latente

Monitorizar el Estado de Carga (SOC) de un sistema de almacenamiento de energía térmica por calor latente es el paso más importante para conseguir implementar dicho sistema.

Es razonable asumir que el Estado de Carga pueda depender de la fracción de PCM en estado líquido para aquellos sistemas de almacenamiento de energía por calor latente basados en la transición de fase sólido/líquido de un material.

Conocer el SOC de un PCM es crucial para poder cuantificar durante cuánto tiempo puede seguir supliendo energía este almacenamiento o cuánta energía puede todavía almacenar.

A continuación, se va a buscar definir el SOC de un Sistema de Almacenamiento de Energía por Calor Latente con un PCM que varíe su estado entre sólido y líquido. Se realizará un análisis experimental y analítico de los resultados.

### 4.3.1. Modelo de carcasa y tubo 2D para almacenamiento de energía térmica por calor latente

Los PCMs suelen ser introducidos en contenedores rectangulares o cilíndricos.

Se va a estudiar la configuración de diseño Carcasa y Tubo, con el PCM en la zona de la carcasa y el fluido de transferencia de calor recorriendo el interior de varios tubos. Este diseño no es complejo de fabricar y, además, tiene mejores prestaciones que un diseño con un único tubo.

El material elegido como PCM es el polietileno (Rigidex HD6070EA), cuya temperatura de fusión se encuentra entre 120-135°C. Se va a tratar de un contenedor rectangular con 72 tubos situados en paralelo en filas como un paquete. Cada tubo tiene aproximadamente 2.7m de longitud y un diámetro interior de 13.5mm y un diámetro externo de 16.5mm. La distancia media entre tubos, de centro a centro, es de alrededor 42.8mm. Se asume que no existe transferencia de calor entre tubos. Esta suposición es acertada debido al aislamiento térmico y a la gran cantidad de tubos.

El flujo de transferencia de calor se encuentra en el interior de los tubos y el PCM alrededor de los mismos. Para poder medir los resultados, se disponen 4 sensores de temperatura en el interior del PCM (unidimensionales en la dirección axial), dos sensores externos de temperatura del fluido de transferencia de calor y un sensor del flujo de masa del mismo.

En la Figura 4.16. se muestra esta disposición representada:

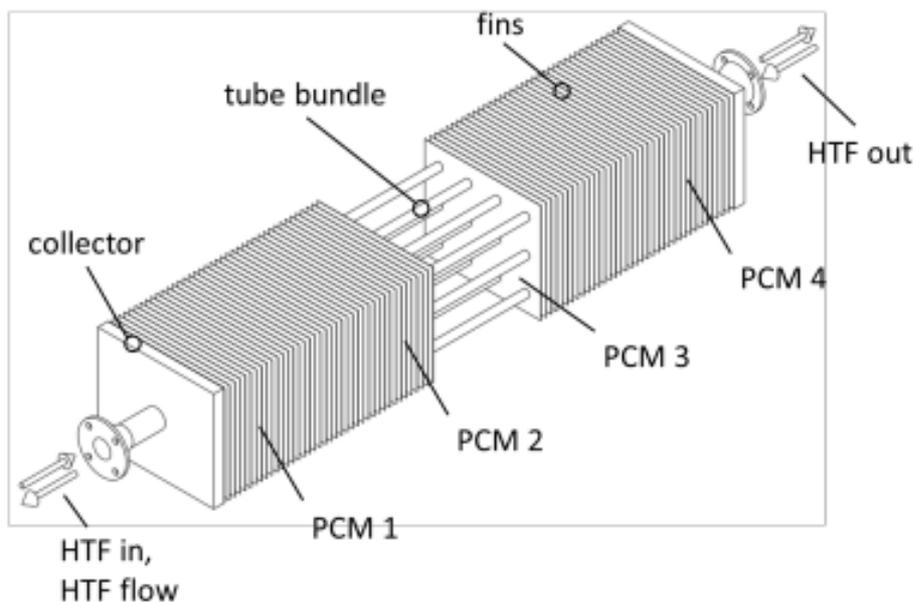


Figura 4.16. Componentes y disposición del diseño de Carcasa y Tubo S&T

Las ecuaciones que se van a utilizar se basan en dos tipos de modelos: modelo detallado (dMod), el cual es necesario realizar el estudio mediante simulaciones por ordenador y el modelo reducido (rMod), que es una simplificación del modelo detallado.

- **Balaceo de energía para modelo detallado con único tubo.**

Va a ser asumido un único tubo con PCM alrededor. La forma hexagonal del PCM es aproximada por un

cilindro, como se indica en la Figura 4.17.:

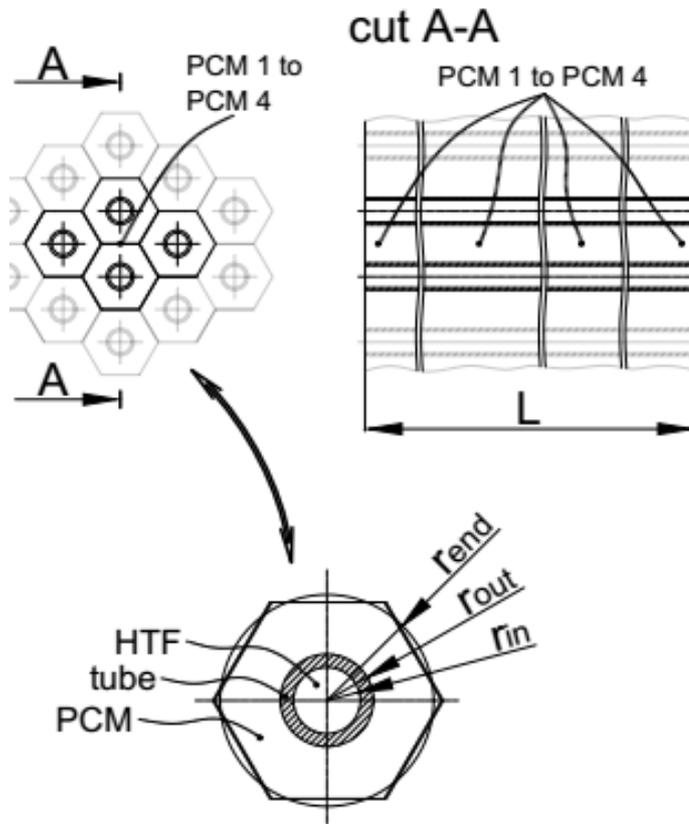


Figura 4.17. Representación del PCM alrededor del tubo

En la anterior figura, se puede ver perfectamente en qué lugar se encuentran los 4 sensores que se encuentran incrustados en el PCM.

El balance de energía es formulado en tres dominios: el fluido de transferencia de calor, la pared del tubo y el PCM. Esto se representa en la Figura 4.18.:

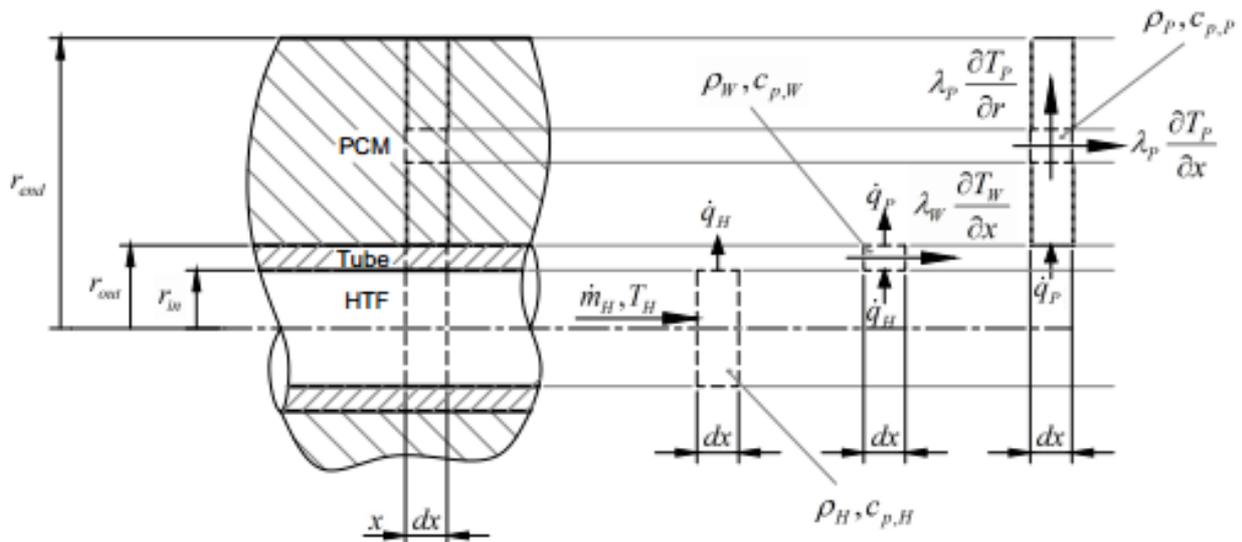


Figura 4.18. Modelado axial y radial de los dominios para un modelo de un solo tubo

El dominio del PCM es modelado en 2D, tanto axial como radial. La pared del tubo es únicamente modelada en 1D, en la dirección axial, con condiciones isotérmicas en la dirección radial. El dominio del fluido de transferencia de calor es modelado como 1D en la dirección axial con un flujo de convección forzada liberando calor por conducción en dirección axial y radial.

Se asume que el fluido de transferencia de calor se distribuye uniformemente por el interior del tubo.

El modelo matemático empleado en la transferencia de calor conductiva en el PCM asume que la ecuación de gobierna el calor es una ecuación de única fase sin llegar a tratar explícitamente la transición de fase.

La zona de transición entre dos fases también será considerada y la capacidad calorífica específica aparente (o entalpía específica aparente) será usada para ello.

Estas aproximaciones, están basadas en la asunción de que cuando el PCM se somete a un cambio de fase, se puede caracterizar por fracción de fase local, es decir, no existe una temperatura exacta en la que se tiene el cambio de fase sino un rango de temperaturas (zona blanda) en el que el cambio de fase sucede.

Consecuentemente, la ecuación de calor puede ser aplicada en todo el dominio donde el cambio de fase tiene lugar. Así, se puede realizar directamente implementaciones numéricas aplicando una discretización en todo el dominio del PCM.

A continuación, se describe el sistema de ecuaciones y condiciones de contorno del modelo detallado para cada uno de los 3 dominios:

- Ecuaciones para el fluido de transferencia de calor.

$$\rho_H c_{p,H} \frac{\partial T_H}{\partial t} = -v_H \rho_H c_{p,H} \frac{\partial T_H}{\partial x} - \frac{2}{r_{in}} \dot{q}_H \quad 0 \leq x \leq L \quad (1a)$$

$$T_H(t, x)|_{t=0} = T_H^0(x), \quad T_H(t, x)|_{x=0} = T_H^{in}(t) \quad (1b)$$

- Ecuaciones para la pared del tubo.

$$\rho_W c_{p,W} \frac{\partial T_W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_W \frac{\partial T_W}{\partial x} \right) + \frac{2(r_{in} \dot{q}_H - r_{out} \dot{q}_P)}{r_{out}^2 - r_{in}^2} \quad 0 \leq x \leq L \quad (2a)$$

$$T_W(t, x)|_{t=0} = T_W^0(x), \quad \left. \frac{\partial T_W(t, x)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial T_W(t, x)}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \quad (2b)$$

- Ecuaciones para PCM.

$$\rho_P \bar{c}_P \frac{\partial T_P}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_P \frac{\partial T_P}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_P \frac{\partial T_P}{\partial x} \right) \quad r_{out} \leq r \leq r_{end}, 0 \leq x \leq L \quad (3a)$$

$$T_P(t, r, x)|_{t=0} = T_P^0(r, x), \quad T_P(t, r, x)|_{r=r_{out}} = T_W(t, x) \quad (3b)$$

$$\left. \frac{\partial T_P(t, r, x)}{\partial r} \right|_{r=r_{end}} = 0, \quad \left. \frac{\partial T_P(t, r, x)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial T_P(t, r, x)}{\partial x} \right|_{x=L} = 0$$

El flujo de calor entre el HTF ( $\dot{q}_H$ ) y la pared del tubo y entre la pared del tubo y el PCM ( $\dot{q}_P$ ):

$$\dot{q}_H(t, x) = \alpha(t, x)(T_H(t, x) - T_W(t, x)) \quad (4a)$$

$$\dot{q}_P(t, x) = -\lambda_P(t, r, x)|_{r=r_{out}} \cdot \left. \frac{\partial T_P(t, r, x)}{\partial r} \right|_{r=r_{out}} \quad (4b)$$

El coeficiente  $\alpha$  de transferencia de calor.

- **Balanceo de energía para modelo reducido con único tubo.**

Como se dijo anteriormente, el modelo reducido es una simplificación del modelo detallado. Se mantienen las mismas ecuaciones para el HTF y para el PCM, pero la ecuación de la pared del tubo es omitida y, en su lugar, se introduce una ecuación de intercambio entre HTF y PCM ( $\dot{q}'_H$ ):

$$\dot{q}'_H(t, x) = \alpha(t, x)(T_H(t, x) - T_P(t, r, x)|_{r=r_{out}}) \quad (5)$$

A partir de esta ecuación, se sustituye de la ecuación (1a) el término  $\dot{q}_H$  por el  $\dot{q}'_H$ . También se sustituye la segunda condición de contorno de la ecuación (3b) por una condición alternativa:

$$\begin{aligned} \dot{q}'_H(t, x) = \dot{q}_P(t, x) &\rightarrow \alpha(t, x)(T_H(t, x) - T_P(t, r, x)|_{r=r_{out}}) = -\lambda_P(t, r, x)|_{r=r_{out}} \cdot \left. \frac{\partial T_P(t, r, x)}{\partial r} \right|_{r=r_{out}} \\ T_P(t, r, x)|_{r=r_{out}} &= \frac{\lambda_P(t, r, x)|_{r=r_{out}}}{\alpha(t, x)} \cdot \left. \frac{\partial T_P(t, r, x)}{\partial r} \right|_{r=r_{out}} + T_H(t, x) \end{aligned} \quad (6)$$

- **Capacidad calorífica y estado de carga**

Se define una capacidad calorífica específica aparente ( $\tilde{c}_P$ ) del PCM a partir de la superposición lineal de la capacidad calorífica líquida ( $c_{p,P}^l$ ) y sólida ( $c_{p,P}^s$ ) y el calor latente ( $\Delta H_f$ ) liberado o almacenado durante el cambio de fase:

$$\tilde{c}_P := \varepsilon c_{p,P}^l + (1 - \varepsilon)c_{p,P}^s + \frac{\partial \varepsilon}{\partial T_P} \Delta H_f \quad (7)$$

$$\text{Calor sensible} \rightarrow \varepsilon c_{p,P}^l + (1 - \varepsilon)c_{p,P}^s$$

$$\text{Calor latente} \rightarrow \frac{\partial \varepsilon}{\partial T_P} \Delta H_f$$

$$\text{siendo } \varepsilon = \frac{m^l}{m^s + m^l}, \text{ la fracción de líquido}$$

Como se explicó anteriormente, para el caso de este PCM, la temperatura de fusión no es exacta sino que se encuentra dentro de un rango. Este comportamiento puede ser descrito por  $\frac{\partial \varepsilon(T_P)}{\partial T_P}$ , mediante una función adaptada de la densidad de Weibull (como aparece en la Figura 4.19.):

$$\frac{\partial \varepsilon(T_P)}{\partial T_P} := \begin{cases} \frac{\gamma}{a} \left( \frac{\mu - T_P}{a} \right)^{\gamma-1} \exp \left( - \left( \frac{\mu - T_P}{a} \right)^\gamma \right), & T_P \leq \mu \\ 0, & T_P > \mu \end{cases} \quad (8)$$

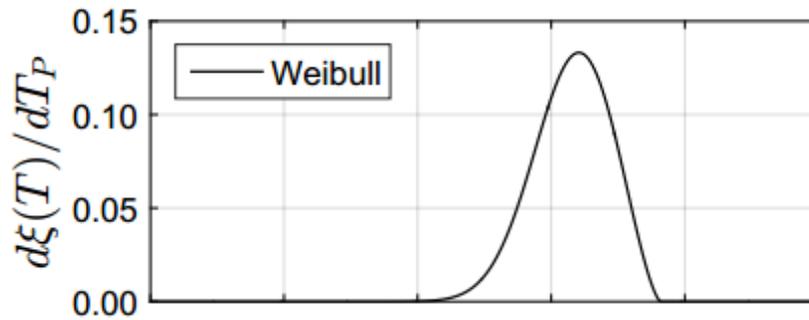


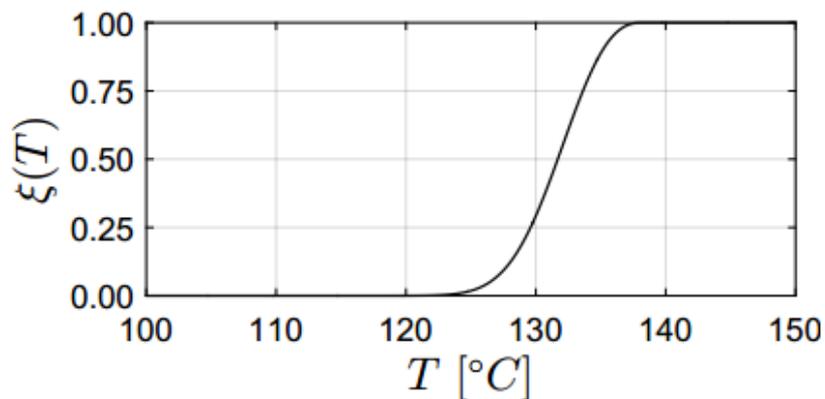
Figura 4.19. Función de la densidad de Weibull

Siendo  $\mu$ ,  $\gamma$ ,  $a$  son localizaciones y parámetros de forma.

El estado de carga  $\Xi$  es calculado en función del campo de fracción local de fase  $\varepsilon(r, x)$ , siendo las variables “r” y “x” coordenadas espaciales del sistema. Primero integramos para obtener el valor  $\xi(r, x)$ :

$$\xi(r, x) = \int_{-\infty}^{T_P(r, x)} \frac{\partial \xi(T)}{\partial T} dT \quad (9)$$

Esta relación puede ser calculada analíticamente, en la Figura 4.20. se ilustra la anterior relación para la función densidad de Weibull:

Figura 4.20. Función de  $\xi(r, x)$ 

Por tanto, la ecuación del estado de carga es la siguiente (tomando una geometría cilíndrica):

$$\Xi = \frac{\int_0^L \int_{r_{out}}^{r_{end}} \xi(r, x) r dr dx}{\int_0^L \int_{r_{out}}^{r_{end}} r dr dx} \quad (10)$$

### 4.3.2. Discretización espacial del modelo reducido para un único tubo

El calor transferido en la ecuación (3) de balance del PCM (tanto en dirección axial como radial) es completamente conductivo, por lo que se van a utilizar técnicas de colocación de puntos para la obtención de la solución numérica, ya que se ha demostrado que esta técnica es muy útil para este tipo de problemas al dar resultados bastante exactos y de menos tiempo computacional de resolución.

Para este tipo de técnica, la elección de los puntos de colocación es importante ya que dependiendo de esta, la exactitud de los resultados puede variar. Con este método, las ecuaciones diferenciales pueden ser reducidas a un sistema de ecuaciones.

En el método de colocación ortogonal (OC), los puntos de colocación son tomados como origen de los polinomios ortogonales para ciertas funciones de peso. Este método cubre todo el dominio  $r_{out} \leq r \leq r_{end}$ ,  $0 \leq x \leq L$ .

Este método permitirá calcular el SOC con unos términos más sencillos que los expuestos en la ecuación (10).

Para poder aplicar el método de colocación, es necesario adimensionalizar las variables espaciales de las ecuaciones de balance (1), (2) y (3) y de la ecuación del SOC (10), para así transformarlas en variables espaciales normalizadas que puedan ser directamente aproximadas por polinomios:

$$R = 1 - \frac{r - r_{out}}{r_{end} - r_{out}}, \quad X = \frac{x}{L}, \quad R, X \in [0,1] \quad (11)$$

El comportamiento de ambas variables se representa en la Figura 4.21.:

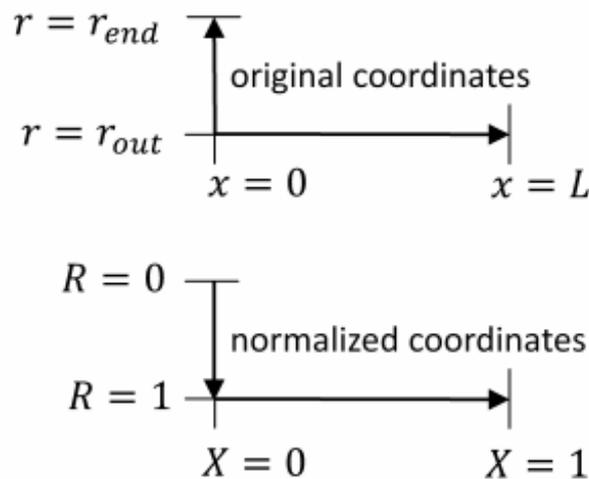


Figura 4.21. Representación gráfica de los valores R y X en función de r y x, respectivamente

Se puede apreciar de la anterior figura, que el comportamiento de R es el simétrico al de “r”, esto es así porque es más útil para la definición de las condiciones de contorno. Antes de la normalización de las variables espaciales, los términos de difusión en “x” en la ecuación (2a) y en “r”, “x” en la ecuación (3a) son transformadas para eliminar la dependencia con la temperatura de  $\lambda_p = \lambda_p(T_p(r, x))$  para aplicar la regla de la cadena y del producto.

Para la ecuación del PCM (3a):

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial r} \right) = \frac{d\lambda_p}{dT_p} \left( \frac{\partial T_p}{\partial r} \right)^2 + \lambda_p \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_p}{\partial r} \right) \quad (12)$$

$$\Phi(r, x) := \frac{d\lambda_p}{dT_p} \left( \frac{\partial T_p}{\partial r} \right)^2$$

$$\Psi(r, x) := \lambda_p \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_p}{\partial r} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial x} \right) = \frac{d\lambda_p}{dT_p} \left( \frac{\partial T_p}{\partial x} \right)^2 + \lambda_p \frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2}$$

$$\Omega(r, x) := \frac{d\lambda_p}{dT_p} \left( \frac{\partial T_p}{\partial x} \right)^2 + \lambda_p \frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2}$$

Las condiciones de contorno para el modelo del PCM requiere que la primera derivada de  $T_p$  es cero en  $R = 0$ ,  $X = 0$  y  $X = 1$ . Los siguientes polinomios que son funciones de  $R^2$  y  $X^2$  son usados:

$$T_p(R^2) = \sum_{i=1}^{N_R+2} d_i R^{2i-2} \quad (13)$$

$$T_p(X^2) = \sum_{k=1}^{N_X+1} \bar{d}_k X^{2k-2} \quad (13)$$

Con  $N_R = 1$  y  $N_X = 4$  se define el número de puntos de colocación como también de pruebas funcionales a ser añadidas y su grado. En la Figura 4.22. se muestran los puntos de colocación como parte de la discretización de los dominios:

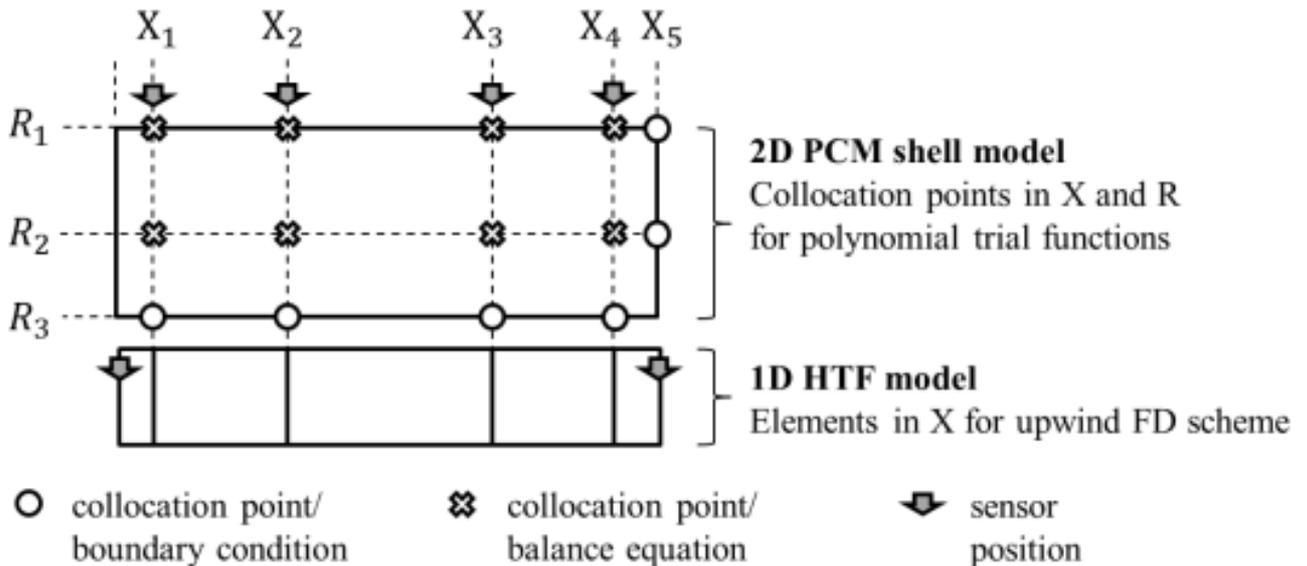


Figura 4.22. Esquema de discretización para el PCM y HTF aplicado al rMod

Los puntos  $(R_i, X_i)$  indican la colocación de los sensores de temperatura del PCM. Son elegidos 4 puntos interiores en  $X$  ( $0 < X_1 < X_2 < X_3 < X_4 < 1$ ) y un punto interior en  $R$  ( $0 < R_2 < 1$ ).

### 4.3.3. Detalles de la implementación numérica para el modelo reducido

Introduciendo las variables normalizadas (11) en la ecuación de balance del HTF y en las condiciones de contorno iniciales:

$$\rho_H c_{p,H} \frac{\partial T_H}{\partial t} = -v_H \rho_H c_{p,H} \frac{1}{L} \frac{\partial T_H}{\partial X} - \frac{2}{r_{in}} \dot{q}'_H \quad \text{en } 0 \leq X \leq 1 \quad (14a)$$

$$T_H(t, X)|_{t=0} = T_H^0(X), \quad T_H(t, X)|_{X=0} = T_H^{in}(t) \quad (14b)$$

También se introducen las variables normalizadas (11), la transformación de la ecuación (12) y  $\delta = r_{end} - r_{out}$ , en la ecuación de balance del PCM (3), se llega a obtener:

$$\begin{aligned} \rho_P \tilde{c}_P \frac{\partial T_P}{\partial t} = & \frac{1}{\delta^2} \frac{d\lambda}{dT_P} \left[ \left( \frac{\partial T_P}{\partial R} \right)^2 \right] + \frac{\lambda_P}{\delta^2} \left( \left[ \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left( R \frac{\partial T_P}{\partial R} \right) \right] - \frac{r_{out} + \delta}{r_{out} + \delta(1-R)} \left[ \frac{1}{R} \frac{\partial T_P}{\partial R} \right] \right) + \frac{1}{L^2} \frac{d\lambda_P}{dT_P} \left[ \left( \frac{\partial T_P}{\partial X} \right)^2 \right] \\ & + \frac{\lambda_P}{L^2} \left[ \frac{\partial^2 T_P}{\partial X^2} \right] \quad \text{en } 0 \leq R \leq 1, \quad 0 \leq X \leq 1 \quad (15a) \end{aligned}$$

$$T_P(t, R, X)|_{t=0} = T_P^0(R, X)$$

$$\left. \frac{\partial T_P(t, R, X)}{\partial R} \right|_{R=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial T_P(t, R, X)}{\partial X} \right|_{X=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial T_P(t, R, X)}{\partial X} \right|_{X=1} = 0$$

Siendo cada componente de la anterior ecuación:

$$\Phi(R, X) := \frac{1}{\delta^2} \frac{d\lambda}{dT_P} \left[ \left( \frac{\partial T_P}{\partial R} \right)^2 \right]$$

$$\Psi(R, X) := \frac{\lambda_P}{\delta^2} \left( \left[ \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left( R \frac{\partial T_P}{\partial R} \right) \right] - \frac{r_{out} + \delta}{r_{out} + \delta(1-R)} \left[ \frac{1}{R} \frac{\partial T_P}{\partial R} \right] \right)$$

$$\Omega(R, X) := \frac{1}{L^2} \frac{d\lambda_P}{dT_P} \left[ \left( \frac{\partial T_P}{\partial X} \right)^2 \right] + \frac{\lambda_P}{L^2} \left[ \frac{\partial^2 T_P}{\partial X^2} \right]$$

Para la ecuación (5) del flujo de calor ( $\dot{q}'_H$ ), utilizado para el rMod:

$$\dot{q}'_H(t, X) = \alpha(t, X) (T_H(t, X) - T_P(t, R, X)|_{R=1}) \quad (16)$$

Y, en la ecuación (6) de las condiciones de contorno del modelo rMod:

$$T_P(t, R, X)|_{R=1} = \frac{\lambda_P(t, R, X)|_{R=1}}{\alpha(t, X)(r_{end} - r_{out})} \cdot \left. \frac{\partial T_P(t, R, X)}{\partial R} \right|_{R=1} + T_H(t, X) \quad (17)$$

La normalización del numerador del término integral de la ecuación (10) del SOC queda:

$$\Xi = \frac{L \int_0^1 \Gamma(X) dX}{L(r_{end}^2 - r_{out}^2)/2} \quad (18a)$$

Siendo:

$$\Gamma(X) = (\delta^2 + \delta r_{out}) \int_0^1 \xi(R, X) dR - \delta^2 \int_0^1 \xi(R, X) R dR \quad (18b)$$

$$\xi(R, X) = \int_{-\infty}^{T_P(R, X)} \frac{\xi(T)}{dT} dT \quad (18c)$$

El esquema de colocación de los puntos en el PCM (ecuación (15a)) da lugar a 8 ecuaciones discretizadas con  $N_R = 1$  y  $N_X = 4$ :

$$\rho_P \tilde{c}_P \left. \frac{\partial T_P}{\partial t} \right|_{R_j, X_l} = \Phi(R_j, X_l) + \Psi(R_j, X_l) + \Omega(R_j, X_l) \quad (19)$$

$$j = 1, N_R + 1; \quad l = 1, \dots, N_X$$

Por último, para la evaluación de las integrales, fracciones de fase locales en la ecuación (18c) se computan por la función de densidad acumulativa de Weibull. Las integrales en la ecuación (18b) puede ser reemplazada por:

$$\int_0^1 \xi(R, X) R dR = \sum_{j=1}^{N_R+2} w_j^{(2)} \xi(R_j, X) \quad (20)$$

$$\int_0^1 \xi(R, X) dR = \sum_{j=1}^{N_R+2} \tilde{w}_j^{(2)} \xi(R_j, X)$$

Donde el vector  $\mathbf{w}^{(2)}$  y el vector adaptado  $\tilde{\mathbf{w}}^{(2)}$  son dados por la geometría cilíndrica, entonces para la integral en función de X en la ecuación (18a) es evaluado usando vector  $\mathbf{w}^{(1)}$  para la geometría planar.

#### 4.3.4. Comparación entre el modelo detallado (dMod) y el modelo reducido (rMod) para un único tubo

En este apartado se pretende estudiar si el modelo reducido presenta un comportamiento tan bueno como el del modelo detallado, para ello las predicciones de ambos modelos son comparadas.

Se han obtenido los resultados del modelo detallado (mediante análisis computacional de un sistema de 450 ODEs) y se ha comprobado que da resultados muy buenos comparados con los obtenidos de manera experimental, demostrando que dicho modelo verdaderamente puede tener una única relación entre la temperatura y fracción de fase.

Por otro lado, se tiene el modelo reducido que presenta 12 ecuaciones continuas en el tiempo y no lineales y 5 ecuaciones discretizadas en el tiempo:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{p}) & (21) \\ \mathbf{y}(t_k) &= \mathbf{h}(\mathbf{x}(t_k))\end{aligned}$$

Se omite en las siguientes ecuaciones la dependencia explícita con el tiempo. Los vectores anteriores presentan las siguientes variables:

$$\begin{aligned}\mathbf{x} &= [T_H(X_1), T_H(X_2), T_H(X_3), T_H(X_4), T_P(R_1, X_1), T_P(R_1, X_2), T_P(R_1, X_3), T_P(R_1, X_4), T_P(R_2, X_1), T_P(R_2, X_2), \\ &T_P(R_2, X_3), T_P(R_2, X_4)]^T\end{aligned}$$

$$\mathbf{u} = [T_H^{in}, \dot{m}_{H,total}]^T$$

$$\mathbf{y} = [T_P(R_1, X_1), T_P(R_1, X_2), T_P(R_1, X_3), T_P(R_1, X_4), T_H(X_4)]^T \quad (22)$$

Los primeros 4 componentes de  $\mathbf{x}$  en la ecuación (22), muestra la temperatura del HTF en diferentes puntos de la dirección axial. El resto de componentes se encuentran recogidos en la Figura 4.23.:

notation in figures	variable element	symbol in rMod	meaning
HTF in	$u_1$	$T_H^{in}$	HTF temperature at storage inlet
HTF flow	$u_2$	$\dot{m}_{H,total}$	total HTF mass flow through storage
HTF out	$y_5$	$T_H(X_4)$	HTF temperature at storage outlet
PCM 1-4	$y_1, \dots, y_4$	$T_P(R_1, X_1)$	temperatures at the <i>outer edge</i> of the PCM shell
		$\vdots$	at four different axial positions
		$T_P(R_1, X_4)$	(positions match the installed PCM temperature sensors)
PCM 5-8	$x_9, \dots, x_{12}$	$T_P(R_2, X_1)$	temperatures <i>inside</i> the PCM shell
		$\vdots$	at four different axial positions
		$T_P(R_2, X_4)$	(no measurements available)

Figura 4.23. Definición de los componentes utilizados en la ecuación (22)

Destacar que el flujo de masa total del HTF del vector  $\mathbf{u}$  se calcula como:

$$\dot{m}_{H,total} = n_T v_H \pi (r_{in})^2 \rho_H \quad (23)$$

siendo  $n_T$ :  $N^\circ$  de tubos

El vector “ $\mathbf{u}$ ” muestra las variables de entrada, mientras que el vector “ $\mathbf{y}$ ” muestra los valores predictivos que serán comparados con las medidas reales.

Una vez obtenidos los valores predictivos tanto para el modelo detallado como para el reducido, se muestra en la Figura 4.24. una comparación entre los mismos (la primera gráfica compara  $y_5$ , la segunda muestra los valores  $y_1, \dots, y_4$ ). Estos ensayos experimentales se han realizado para distintas variaciones de las variables de entrada  $u_1$  y  $u_2$  (HTF in y flujo de masa del HTF).

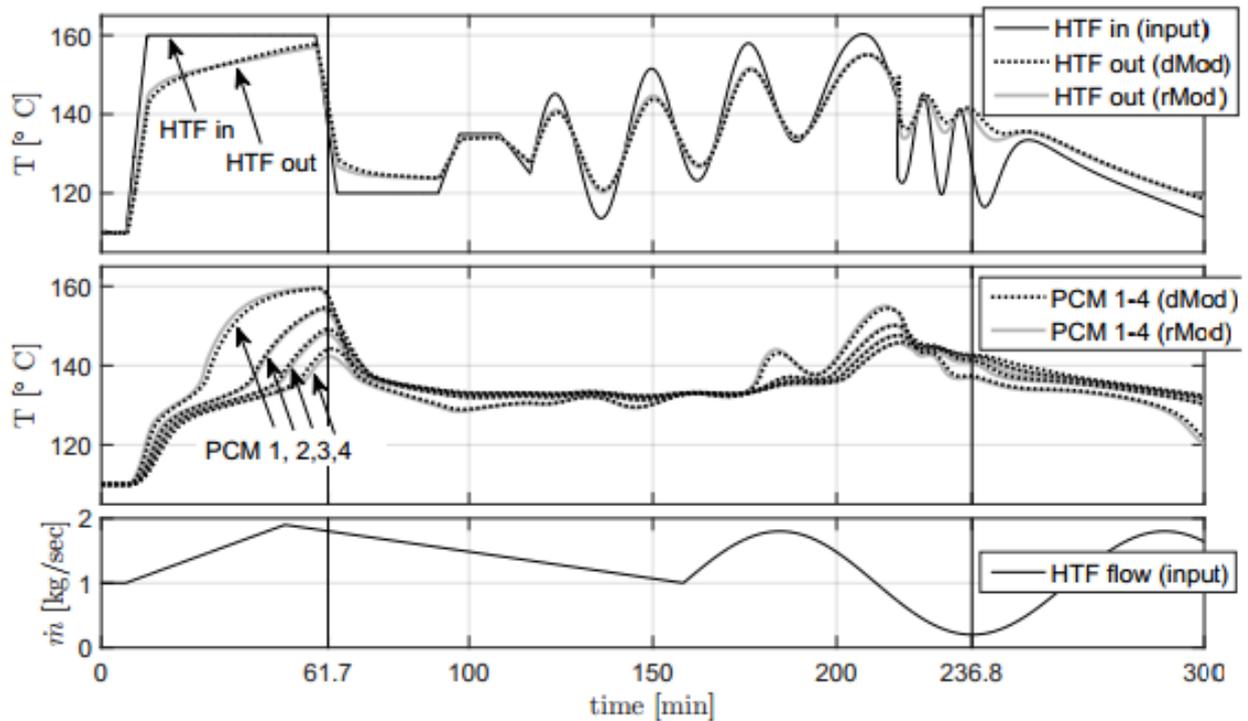


Figura 4.24. Predicción de los modelos dMod y rMod simulados

Se puede apreciar que el modelo reducido se ajusta muy bien al modelo detallado en ambas gráficas, las mayores variaciones entre ellos se encuentran en los rápidos cambios de gradiente del HTF out.

Cuantificando las diferencias entre ambos modelos, se tiene:

$$1^{\circ} \text{ Gráfica: HTF out } \begin{cases} \text{Diferencia media: } 0.6K \\ \text{Diferencia mayor: } 3.1K \end{cases}$$

$$2^{\circ} \text{ Gráfica: Temp. PCM 1 - 4 } \begin{cases} \text{Diferencia media: } 0.4K \\ \text{Diferencia mayor: } 4.2K \end{cases}$$

Demostrando así, que se ajusta muy bien un modelo al otro.

#### 4.3.5. Aplicación del método del Observador para el estado

Se busca mejorar la estimación de los sistemas no lineales del modelo reducido mediante el método del Observador, con el objetivo de usar un control de realimentación en las medidas de temperatura del PCM y el HTF, para obtener el estado estimado no medido del almacenamiento interno del PCM y mejorar las predicciones generadas por rMod.

El modelo reducido utiliza un sistema de ecuaciones continuo en el tiempo y con medidas discretizadas, con este nuevo método de estimación se busca aplicar el filtro de Kalman (también llamado EKF), para estimar el estado en las medidas que presenten mayor “ruido”.

Se va a comparar los resultados que se obtienen con el rMod y, aplicando el filtro EKF, con el EKF-rMod. Para ello, todos los cálculos computacionales han sido realizados con MATLAB. La actuación del filtro ha sido examinada con las medidas generadas en estudios computacionales con el modelo detallado (dMod) y

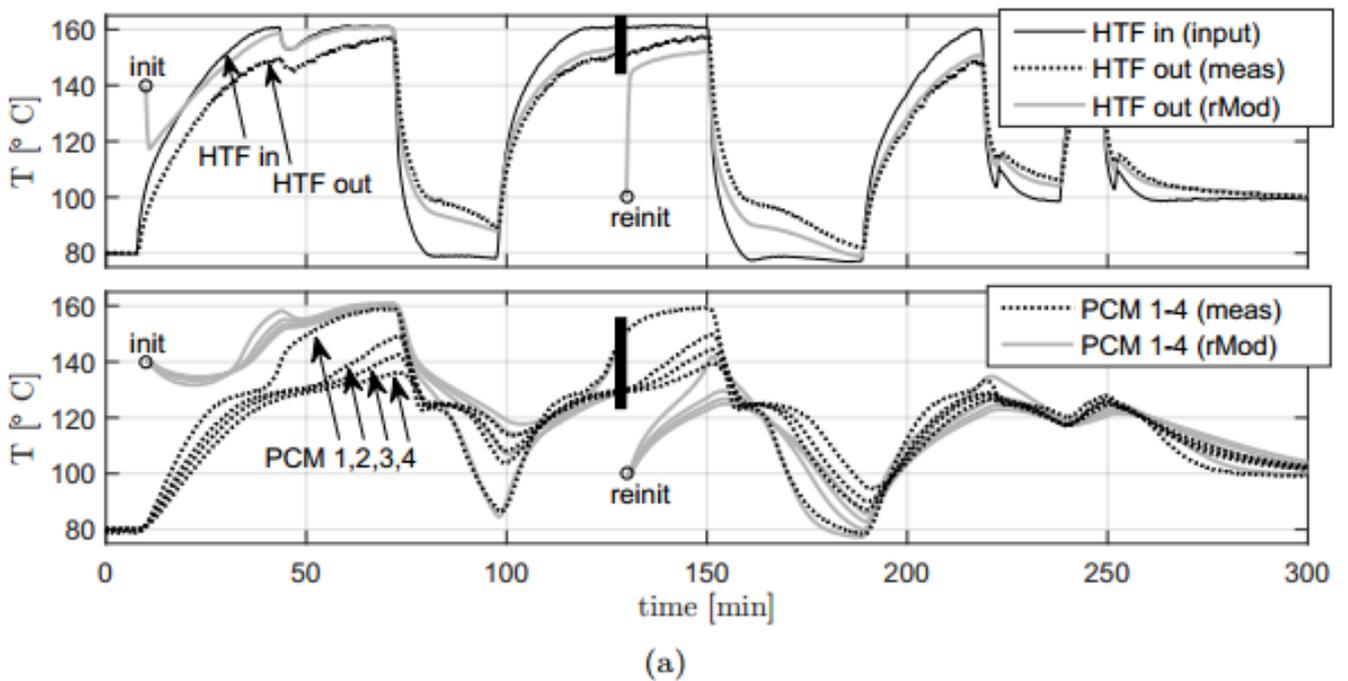
con estudios experimentales realizados en el laboratorio. Todas las medidas son almacenadas en distintos instantes de tiempo según  $t_k = k\Delta t$  con  $\Delta t = 25$  s.

La selección de este intervalo de tiempo se ha realizado para poder recoger los importantes cambios en la dinámica del estado. La dinámica de las temperaturas del PCM es afectada por grandes cambios, alrededor de un factor de 10, en la capacidad calorífica específica debido a la transición de fase. Para el filtro, se utilizará un intervalo de tiempo de 22 s, para un experimento típico de 300 min con  $k = 720$  instantes de tiempo. Por lo que el tiempo de computación del filtro está por debajo del de la muestra.

Una vez, realizado los análisis experimentales, los resultados obtenidos se distinguen en dos notaciones diferentes:

- rMod: predicciones generadas por la simulación con el modelo reducido.
- EKF-rMod: estimaciones de estado generadas por el Observador.

En las Figura 4.25. (flujo de masa del HTF constante) y Figura 4.26. (flujo de masa del HTF variable), se puede ver la comparación del rMod y EKF-rMod, con los resultados experimentales obtenidos (MEAS):



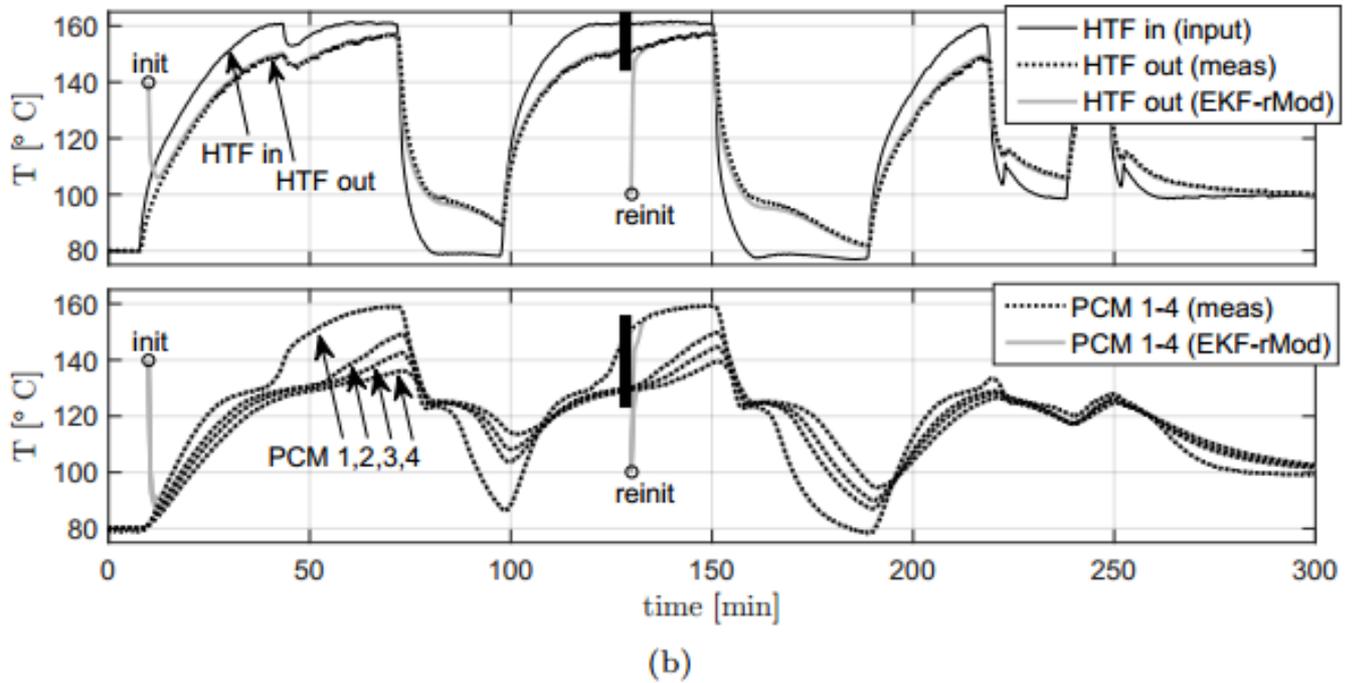
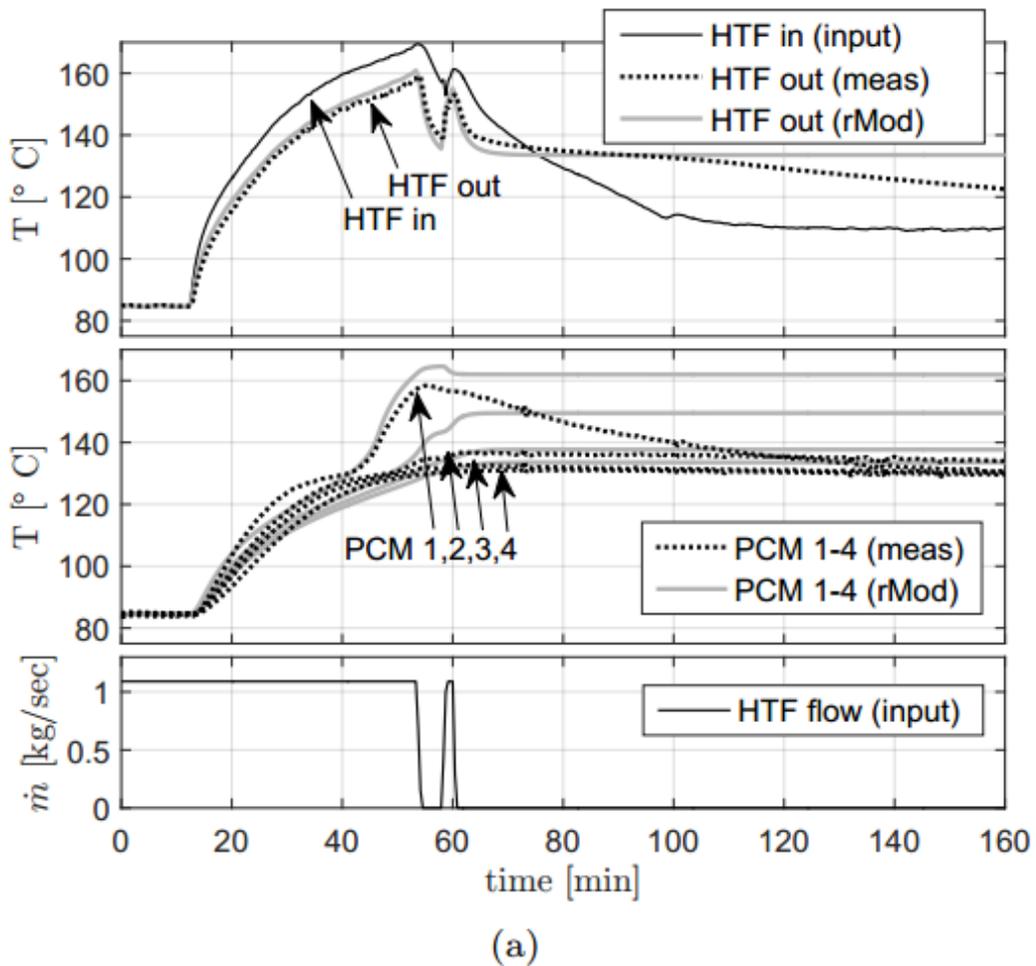


Figura 4.25. (a) Predicción generada por simulaciones en rMod, (b) estimaciones generadas por el Observador (EKF-rMod) y resultados experimentales (meas) para las entradas HTF inlet y un flujo de masa constante del HTF de  $\dot{m}_{H,total} = 1.09 \text{ kg/s}$



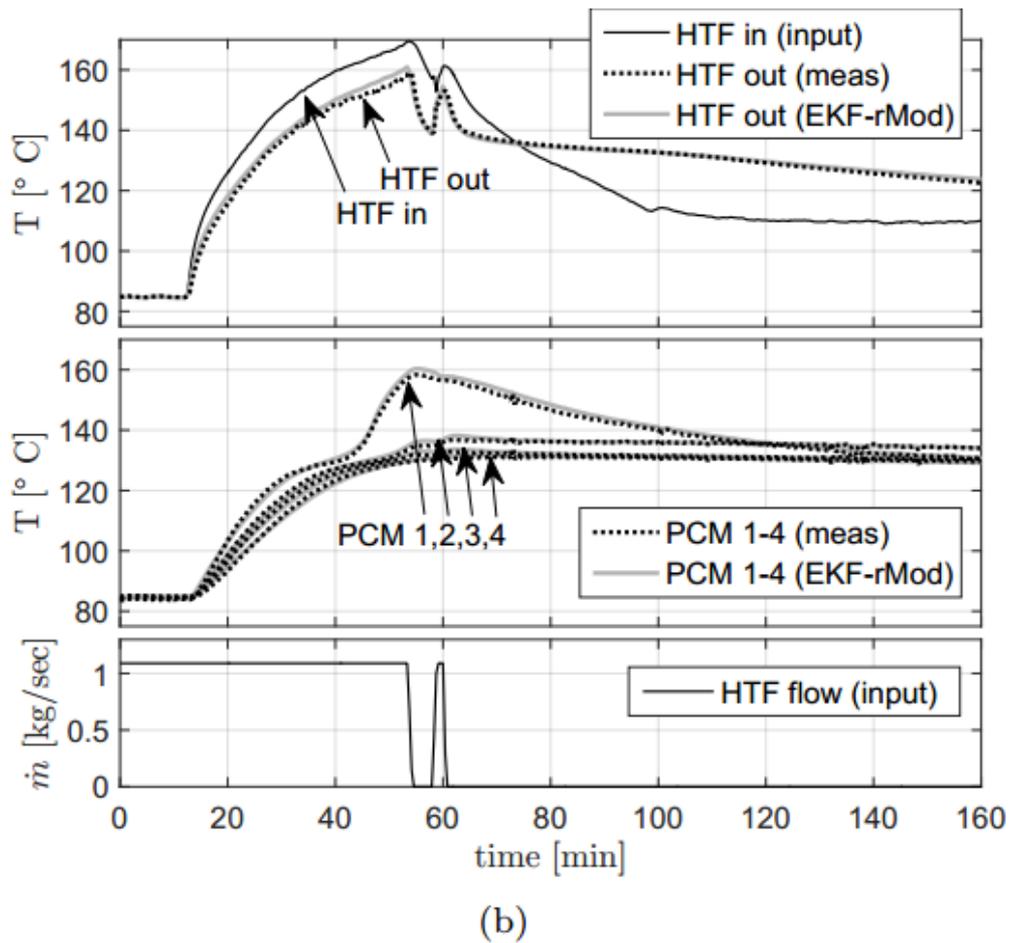


Figura 4.26. (a) Predicción generada por simulaciones en rMod, (b) estimaciones generadas por el Observador (EKF-rMod) y resultados experimentales (meas) para las entradas HTF inlet y flujo de masa total

En la Figura 4.25. se puede observar que el reinicio realizado en los minutos 10 y 125 con pocos datos de entrada, el rMod no es capaz de adaptarse ni rápido ni bien a los constantes cambios de calentamiento y enfriamiento, mientras que el EKF-rMod converge rápidamente al estado actual. Las medidas del PCM para ambos modelos presentan el mismo comportamiento.

Este mismo comportamiento puede ser visto en la Figura 4.26., la simulación es iniciada en los primeros 15 minutos con una temperatura de 85°C. En cambio, en esta figura, se aprecia cómo el flujo de HTF se anula en el minuto 50.

Se puede ver cómo las medidas de HTF in y HTF out comienza a decrecer en el intervalo hasta los 100 minutos, esto se debe a las pérdidas de calor. Se aprecia que la medida de temperatura del sensor PCM 1 sigue a la del HTF in, debido a su localización.

A partir del minuto 100, las temperaturas del HTF y el PCM comienzan a decrecer más lentamente debido a que sus temperaturas se están acercando al rango de temperaturas de fusión del PCM, por lo que el calor latente está comenzando a liberarse. Es importante destacar que las pérdidas de calor no se encuentran recogidas en el rMod, por ese motivo se mantiene constante al detener el flujo. En cambio, se aprecia cómo el EKF-rMod se converge mucho mejor y más rápido cuando el flujo es detenido.

Puede concluirse que el modelo observado tiene un comportamiento mucho más robusto y similar al del proceso real para escenarios más complejos.

### 4.3.6. Predicción del Estado de Carga (SOC)

El Estado de Carga  $\Xi$  del almacenamiento se calcula en función de la geometría con la fracción de fase  $\xi(r, x)$  en un PCM cilíndrico según ecuación (10). En la Figura 4.27. se representa un ejemplo de campo de temperatura  $T_p(r, x)$  y su correspondiente fracción de fase local calculado a partir de la ecuación (9):

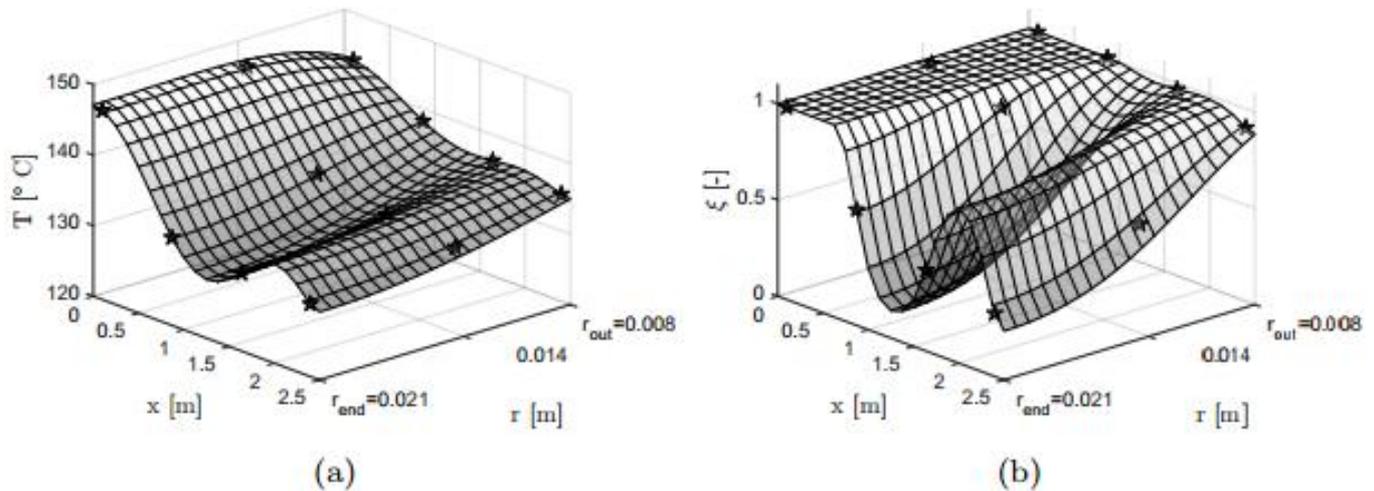


Figura 4.27. (a) Ejemplo de campo de temperaturas local en el PCM, (b) Correspondiente fracción de fase local. Ambos a raíz de la colocación de puntos indicada en apartados anteriores

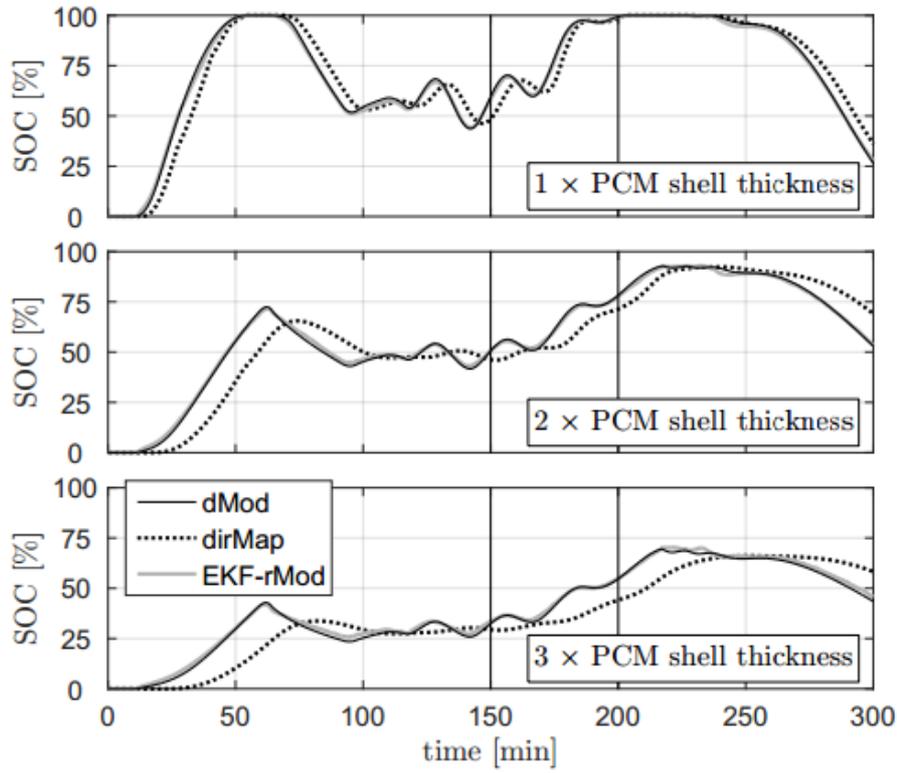
No se puede comprobar la exactitud de la estimación del SOC del EKF-rMod puesto que el SOC es imposible que pueda ser medido con total exactitud. Pero, mediante análisis y simulaciones computacionales, el proceso real puede ser simulado con dMod y el SOC puede ser calculado de las simulaciones con dMod.

Se estudiarán dos aproximaciones al anterior SOC calculado a raíz de dMod. La primera aproximación a partir de datos de medidas disponibles (dirMap) y la segunda aproximación generada por el observador EKF-rMod.

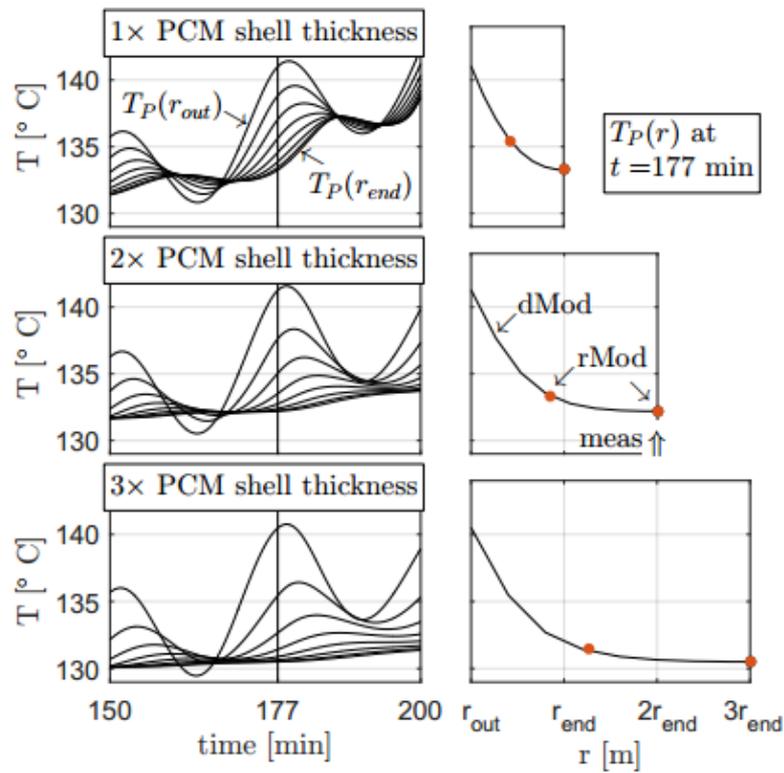
Los siguientes métodos serán utilizados para obtener el SOC:

- dMod: usa la completa información de temperatura de dMod. En función de la fracción de fase y su geometría tras obtener el campo de temperaturas local.
- dirMap: utilizando los datos de temperatura de los sensores situados en el PCM. Calculando 4 fracciones de fase correspondientes a las 4 temperaturas aportadas por los sensores.
- EKF-rMod: usando la información de temperaturas generadas por el observador, calculando a partir de ellas, las fracciones de fase y la estimación del campo de temperaturas local.

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4.28.:



(a)



(b)

Figura 4.28. (a) Resultados del SOC, (b, izquierda) Temperatura del PCM obtenida en el sensor 2 según dMod, (b, derecha) Instantánea del perfil de temperatura radial para  $r_{end}$ ,  $2r_{end}$ ,  $3r_{end}$

En la anterior figura, se muestran los resultados incrementando el espesor del PCM y representado con rMod.

De la anterior figura se puede apreciar que el enfoque con resultados peores es el de dirMap. El error se va incrementando conforme va aumentando el espesor. Se aprecia un retraso en los resultados de aproximadamente 4-5 minutos entre dMod y dirMap (1x PCM Shell thickness) que se va incrementando con el espesor hasta unos 15-20 minutos para el último caso (3x PCM Shell thickness).

Este hecho era esperado puesto que el volumen del PCM incrementa considerablemente con el incremento del espesor debido a la geometría cilíndrica del contenedor y las medidas de la temperatura aportadas por los sensores situados en el contorno del PCM no representa el campo de temperaturas radial en el interior del PCM que varía significativamente como se aprecia en la Figura 4.28. (b).

Como resultado, dirMap no refleja adecuadamente el SOC debido al retraso existente, sin embargo, se ha demostrado que el EKF-rMod, si obtiene muy buenos resultados similares a los obtenidos en el dMod.

A continuación, se muestra en la Figura 4.29., el SOC calculado para los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio en las Figura 4.25. y Figura 4.26.:

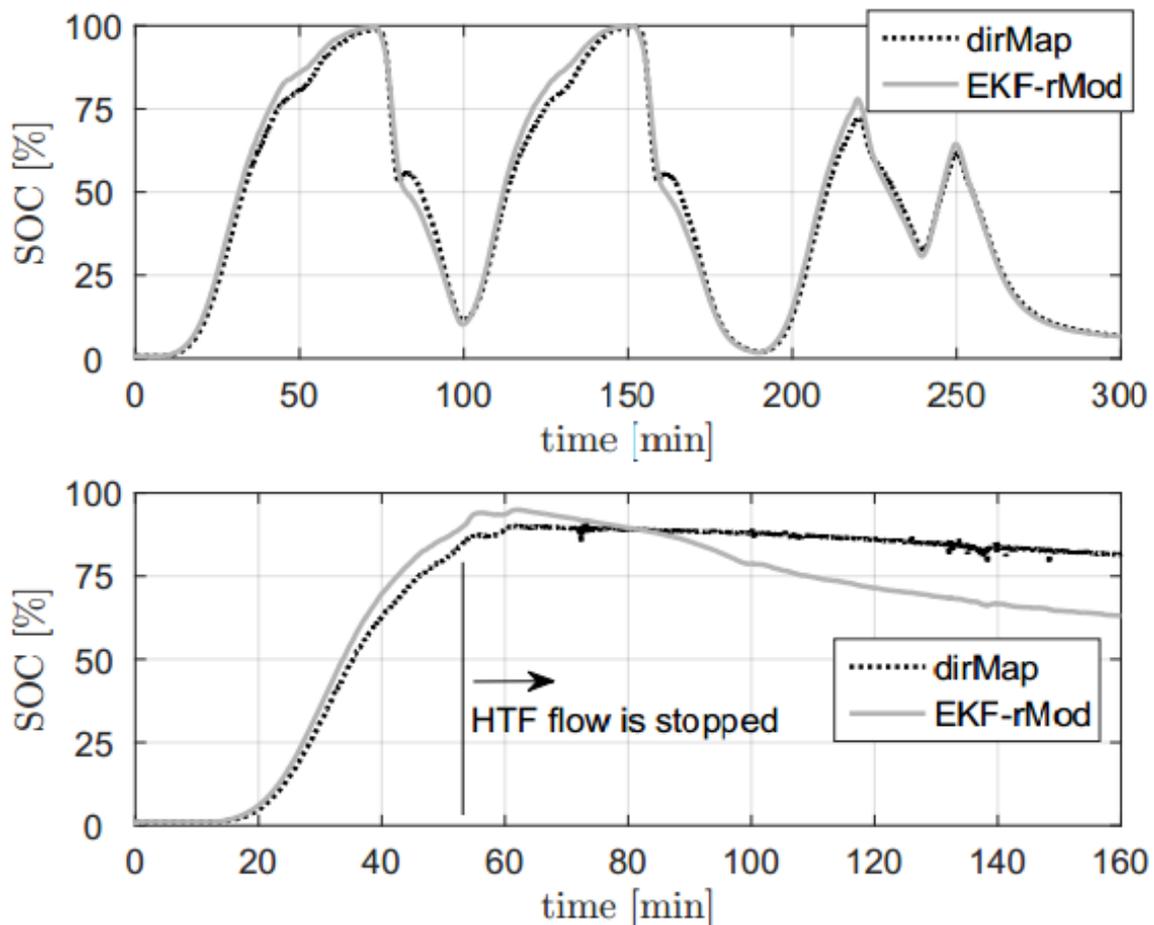


Figura 4.29. Obtención del SOC para el almacenamiento de los ensayos experimentales realizados en la Figura 4.25. (superior) y en la Figura 4.26. (inferior)

También se aprecia aquí el pequeño retraso existente entre el modelo dirMap y EKF-rMod (Figura 4.29. superior). Otra diferencia existente se aprecia en la gráfica inferior de la anterior figura, donde se puede ver una gran diferencia existente entre ambos SOC ya que el flujo es parado a partir del minuto 50 y, como

sucedía anteriormente, el almacenamiento desciende debido a que el PCM se enfría por a las pérdidas de calor.

Los sensores detectan esta pérdida de calor una vez pasado bastante tiempo, es decir, el SOC acaba teniendo un gran retraso entre ambos modelos. Por este motivo, a partir del minuto 60, el SOC calculado por el dirMap apenas desciende.

En contraste, el EKF-rMod detecta estas pérdidas de calor de manera indirecta a partir de la información obtenida de las medidas de temperatura externa al almacenamiento en la entrada (HTF in) y salida (HTF out). El valor interno de la temperatura del PCM es corregido por el observador y el SOC decrece.

En conclusión, tiene una actuación mucho mejor el model EKF-rMod para monitorizar el SOC comparado con el basado en los sensores de temperatura (dirMap).

## 5. CONCLUSIONES

El objetivo de trabajo es realizar una revisión bibliográfica de los métodos existentes para poder determinar el estado de carga de un sistema de almacenamiento de energía térmica por calor latente o cambio de fase.

Tras un análisis inicial de todos los modos de almacenamiento de energía térmica y aplicaciones de los mismos, se ha focalizado el estudio en el almacenamiento por calor latente, así como todas sus posibles aplicaciones.

Primero se detallado un análisis de los procesos de carga y descarga de energía térmica para dos aplicaciones comunes como son los macroencapsulados (para construcción y hogar) y los relacionados con los colectores solares de altas temperaturas.

En estos procesos se ha estudiado cómo evolucionan los perfiles de temperatura en función de la zona del PCM y también, como consecuencia, cómo va produciéndose la transición de fase, siempre comenzando a solidificarse o fundirse en las zonas más cercanas al tubo o de donde el calor sea recibido.

Para el estudio del Estado de Carga, se ha desarrollado un modelo dinámico 2D de un almacenamiento con un material con cambio de fase. Para desarrollar este modelo se ha seguido un diseño S&T, con el PCM en el interior de un contenedor y el HTF fluyendo a través de tubos en el interior.

Se han obtenido muy buenos resultados en cuanto a la exactitud del modelo utilizado basado en observadores y métodos de control.

El modelo de ecuación de balance de energía utilizado ha consistido en dos ecuaciones parciales diferenciales, una para el HTF y otra para el PCM. Se ha discretizado el espacio con el fin de obtener un sistema de 12 ODEs para resolverlo mediante métodos clásicos.

El diseño y la aplicación del estado basado en el modelo del observador, permite reconstruir el campo de temperatura transitorio para el almacenamiento.

El esquema de colocación de puntos ha permitido obtener una solución numérica a la ecuación de conducción de calor 2D del PCM cilíndrico. El método de colocación da grandes predicciones para aproximaciones de polinomio de bajo orden de los estados y derivado de esto también a partir de las propiedades integrales de los perfiles del estado.

La red de discretización elegida correspondiente a las variables discretas de estado ha estado basada en la posición de los sensores de temperatura instalados en el PCM. Una posible mejora futura en el proceso, podría ser una más óptima selección del número y localización de los sensores de temperatura.

En definitiva, se ha conseguido desarrollar un modelo (EKF-rMod) que no requiere un excesivo análisis computacional para obtener resultados y que, además, se ajusta muy bien a los resultados que aporta el modelo detallado. Además, se ha comprobado que con cada reinicio, converge muy rápidamente a la curva del modelo detallado, obteniendo los resultados esperados.



## BIBLIOGRAFÍA

- Almagro Cabrera, David (2012). *Almacenamiento térmico en aplicaciones solares de concentración de alta temperatura*. Proyecto Fin de Carrera.
- Barz, Tilman (2018). *State and state of charge estimation for a latent heat storage*. Artículo
- Bauer, Thomas (2012). *Feasibility of the new PCM measurement system based on the “electric resistance approach” in lab scale demonstrated*.
- Bejan, Andrei-Stelian (2018). *Experimental investigation of the charge/discharge process for an organic PCM macroencapsulated in an aluminium rectangular cavity*. Artículo
- Bellan, Selvan (2014). *Numerical analysis of charging and discharging performance of a thermal energy storage system with encapsulated phase change material*
- Fernández Rodríguez, William (2012). *Análisis del comportamiento del perfil de temperatura de material de cambio de fase (PCM) en el almacenamiento de energía solar utilizando herramientas computacionales*. Trabajo Fin de Grado.
- Giménez Gavarrel, Pau (2016). *Thermal Energy Storage for High Temperature Applications*. Tesis Doctoral.
- Giovannelli, Ambra y Anser Bashir, Muhammad (2017). *Charge and discharge Analyses of a PCM Storage System Integrated in a High-Temperature Solar Receiver*. Artículo
- Grande Ruiz, Alfonso (2016). *Estado del arte de sistemas de almacenamiento de energía térmica mediante cambio de fase, a media y alta temperatura*. Proyecto Fin de Máster
- Hübner, Stefan. *Techno-economic heat transfer optimization of large scale latent heat energy storage systems in solar thermal power plants*. Artículo
- Juárez, David (2012). *Estudio de materiales con cambio de fase (PCM) y análisis SEM de micro (PCM)*.
- Kohnen, Oliver (2016). *Development and validation of a numerical latent heat thermal energy storage model with application in a CSP-biomass system*.
- Macía Gómez, Andrés Felipe (2007). *Almacenamiento de energía solar térmica usando cloruro de magnesio hexahidratado*.
- Madrid solar (2012). *Guía técnica de la energía Solar Termoeléctrica*.
- Milisic, Edina (2013). *Modelling of energy storage using phase-change materials (PCM materials)*. Tesis Máster.
- Oliver, Alice (2010). *Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica*.
- Paberit, Robert (2016). *Detecting State of Charge in PCMs*.
- Rivas Ramos, Esther (2011). *Prediseño de un módulo de almacenamiento térmico para plantas termosolares con generación directa de vapor*. Trabajo Fin de Máster.
- Ruano San José, María Almudena. *Análisis térmico de la aplicación de materiales de cambio de fase en climatización*. Proyecto Fin de Carrera.
- Steinmaurer, Gerald (2014). *Development of Sensors for Measuring the Enthalpy of PCM Storage Systems*. Artículo.

Vaca Jiménez, Santiago David (2013). *Model to determine the state of charge of water as a phase change material integrated in a household refrigerator.*