



## Trabajo Fin de Grado

Estudio del potencial de  
aprovechamiento de energía solar  
térmica en un cerramiento compuesto de  
ladrillo con material de cambio de fase

Autor

Adrián Lacueva Palacín

Directora/s

Ana Lázaro Fernández

Silvia Guillén Lambea

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2020



# Estudio del potencial de aprovechamiento de energía solar térmica en un cerramiento compuesto de ladrillo con material de cambio de fase

## Resumen

Con el aumento de las necesidades energéticas mundiales y la necesidad de cambiar el modelo energético actual por uno basado en las energías renovables, se hace patente la importancia de la eficiencia energética en todo tipo de procesos y, especialmente, en el sector doméstico a través de soluciones que reduzcan el consumo de energía en sistemas de climatización, refrigeración o calefacción.

Este estudio se centra en la implementación de materiales de cambio de fase (PCM) en paredes portantes de tubos de agua con la intención de almacenar energía térmica durante el día y ceder durante la noche el calor almacenado para calentar agua sanitaria. El objetivo principal es comprender el comportamiento térmico del PCM, cloruro de calcio hexahidratado ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), a través de la simulación numérica del sistema detallado. Además, dado que se requiere de una validación experimental para la ratificación de los resultados numéricos, se diseña el banco de ensayos que sirva para tal efecto, teniendo en cuenta la selección de los materiales y componentes necesarios para su construcción, el proceso de montaje y construcción y la selección de la instrumentación, monitorización y control de forma que permitan reproducir las condiciones ambientales deseadas.

Para la consecución de los resultados, se realiza una colaboración con el Dr. Lamine a través de la cual se fijan las condiciones de contorno y la irradiancia solar incidente,  $350\text{W}/\text{m}^2$ . Además, se parte de un modelo numérico existente en el Grupo de Investigación GITSE del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza que incluye la carga térmica del sistema a estudiar. Tras una recopilación bibliográfica sobre los PCMs y los antecedentes de estudios en cerramientos activos, se realiza la simulación de la descarga térmica del sistema junto a un análisis del efecto del caudal en el tiempo de descarga y de la variación de la temperatura del agua circulada.

En cuanto a la estructura del trabajo, se encuentra dividido en cinco capítulos. En el primero, se presentan los antecedentes de estudios en cerramientos activos y se plantea las condiciones del estudio. En el segundo de los capítulos, se presentan los objetivos a satisfacer a lo largo del escrito. En el tercer capítulo, se presenta el modelo numérico, se simula la descarga térmica del modelo y se analizan los resultados obtenidos y el efecto del caudal en el tiempo de descarga y la variación de la temperatura del agua circulada. En el cuarto capítulo, se detalla el diseño del banco de ensayos en el que se realizarán los ensayos experimentales que permitirán la validación del modelo numérico. Finalmente, en el quinto capítulo, se ofrecen las conclusiones obtenidas y las líneas futuras del TFG. Además, se incluye un anexo con el marco teórico del almacenamiento energético térmico y de los PCMs junto a sus aplicaciones.



# Tabla de contenidos

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>9</b>
Antecedentes de estudios del uso de PCM en cerramientos activos .....	10
Presentación del estudio .....	16
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>19</b>
<b>SIMULACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO</b> .....	<b>20</b>
Modelo numérico .....	21
Resultados de la simulación de la carga térmica .....	23
Resultados de la simulación de la descarga térmica .....	25
<b>DISEÑO DEL BANCO DE ENSAYOS</b> .....	<b>32</b>
Elección de los materiales .....	34
Elección de la resistencia simuladora de irradiancia solar .....	35
<b>Instrumentación</b> .....	<b>36</b>
Medición de temperatura .....	36
Medición y control del caudal .....	37
<b>Componentes auxiliares</b> .....	<b>39</b>
<b>Protocolo de ensayos</b> .....	<b>39</b>
<b>CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS</b> .....	<b>41</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>42</b>
<b>ANEXO 1 - ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICO</b> .....	<b>¡ERROR!</b>
<b>MARCADOR NO DEFINIDO.</b>	



## Lista de nomenclatura

- Q: Caudal,  $\text{m}^3/\text{s}$
- Vol: Volumen,  $\text{m}^3$
- m: Masa, kg
- c: Calor específico,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
- T: Temperatura, K
- $c_L$ : Calor latente,  $\text{J}/\text{kg}$
- $\rho$ : Densidad,  $\text{m}^3/\text{kg}$
- v: Velocidad,  $\text{m}/\text{s}$
- D: Diámetro, m
- $\mu$ : Coeficiente de viscosidad dinámica,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$
- Re: Número de Reynolds
- e: Espesor, m
- $\lambda$ : Coeficiente de conductividad térmica,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
- A: Área,  $\text{m}^2$
- L: Longitud, m
- r: Radio, m
- h: Coeficiente de convección,  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
- Nu: Número de Nusselt
- Pr: Número de Prandtl
- V: Voltaje, V
- t: Tiempo, s
- P: Potencia, W
- I: Intensidad, A
- E: Diferencia de potencial, V
- S: Coeficiente de Seebeck entre los dos materiales,  $\text{V}/\text{K}$
- f: Factor de fricción de Darcy- Weisbach
- $H_p$ : Pérdida de carga, m.c.a.



## Introducción

Desde la Antigüedad la eficiencia energética no era considerada relevante y el consumo de combustibles fósiles era muy reducido. Fue necesaria la llegada de la revolución industrial y el dominio de la tecnología para que apareciera el aislamiento térmico. En 1898, surge el “*cavity wall*” una pared dividida en dos capas de ladrillo separadas por un espacio de aire. No fue hasta el período de entreguerras cuando se introdujo en este espacio de aire un aislante, la fibra de vidrio. Hacia el final de siglo XX, con el aumento de la población mundial y la demanda de la energía, la eficiencia térmica y el ahorro energético en las viviendas se convirtieron en dos de los pilares de la construcción y se comenzó a legislar sobre el aislamiento térmico de las viviendas. No obstante, las capas aislantes reducen el flujo calorífico en ambas direcciones, es decir, impiden la regulación térmica de la vivienda con el exterior, produciendo situaciones en las que la temperatura de las viviendas requiere de climatización, con su consecuente gasto energético y económico. [1]

Actualmente, ya en un mundo cada vez más industrializado y con necesidades energéticas exponencialmente crecientes, se han ratificado diversos acuerdos internacionales como el Tratado de Kioto (1997) o el Acuerdo de París (2016) que limitan las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera. Se hace patente cada vez más que, junto a un cambio del sistema de generación de la energía, es imperiosa la optimización de la energía en todas sus formas. También es de importancia la Directiva Europea 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética en los edificios. En ella se estableció la creación por parte de los estados miembros de requisitos mínimos de eficiencia energética de los nuevos edificios construidos, se instauró la certificación energética en edificios, la inspección periódica de instalaciones de calefacción y aire acondicionado y la meta a largo plazo de construir edificios con gasto energético cero.

Por todo ello, es necesario encontrar soluciones técnicas a la regulación térmica de las viviendas sin incurrir en grandes gastos energéticos o económicos producidos por sistemas de calefacción o de enfriamiento, que generalmente requieren de la obtención y combustión de combustibles fósiles. Por consiguiente, se debe apostar por el uso responsable de la energía, impulsando la explotación de las energías renovables, especialmente la solar, en el sector doméstico y teniendo en cuenta la arquitectura bioclimática en viviendas. En esta dirección va este estudio, en el que se valorará la inclusión de materiales de cambio de fase (PCM) en edificios con el fin de acumular la energía solar incidente durante el día y utilizar esta por la noche para el calentamiento de agua sanitaria.

Los PCMs son materiales que poseen alto potencial de almacenamiento térmico gracias a sus cambios de fase sólido-líquido en los que interviene el calor latente, energía térmica necesaria que requiere el material para cambiar de fase. Algunas otras propiedades importantes en ellos, dependientes de su aplicación, son la conductividad térmica o su punto de fusión. Por otro lado, su comercialización es variada desde la venta como sustancias puras a encapsulados o en disoluciones o emulsiones. Para más detalle, puede visitarse el Anexo 1.

## Antecedentes de estudios del uso de PCM en cerramientos activos

Una de las principales propiedades de los PCMs es su calor latente y su punto de fusión. A lo largo de los siguientes tres estudios se desarrolla la importancia de la temperatura de fusión en los PCMs, el efecto de la masa y la posición en la pared en la transferencia de calor.

**Alawadhi (2008) [2]:** en este trabajo se desarrolló un análisis térmico numérico en dos dimensiones de un ladrillo de construcción con agujeros cilíndricos dentro de los cuales había material de cambio de fase. El interés del estudio era estudiar la capacidad del PCM de reducir el flujo de calor transferido durante el día a través de la pared. Durante la noche la energía almacenada se transfería tanto al exterior como al interior de la vivienda. A lo largo del estudio, se plantearon diversas cuestiones relativas a la eficiencia del sistema: el efecto del tipo de PCM escogido, el efecto de la cantidad de PCM introducida o el efecto de la localización del PCM dentro del ladrillo.

Para la primera cuestión, se estudiaron tres tipos de PCMs: un eutéctico (P116, compuesto por parafinas) y dos parafinas (n-icosano ( $C_{20}H_{42}$ ) y n-octadecano ( $CH_3(CH_2)_{16}CH_3$ )). El estudio previo del ladrillo sin material de cambio en su interior mostraba una distribución de temperaturas durante el día de entre  $25.7^{\circ}C$  y  $55.6^{\circ}C$ . La temperatura de fusión del eutéctico se encuentra cerca del límite superior de la temperatura de operación, el n-octadecano, por el contrario, se encuentra cercano al límite inferior y el n-icosano tiene una temperatura de fusión cercana a la media de los límites. Por esta propiedad, ni el n-octadecano ni el P116 eran adecuados. El primero debido a su baja temperatura de fusión se encontraba en estado líquido durante todo el proceso, mientras que el segundo se encontraba en estado sólido durante todo el proceso, por lo que el alto calor latente de fusión de los materiales no era aprovechado de manera óptima. Por lo tanto, se escogió el n-icosano cuya temperatura de fusión permitía el aprovechamiento de su alto calor latente de forma íntegra.

Para el segundo aspecto, se estudiaron tres bloques de ladrillo con uno, dos o tres de sus agujeros cilíndricos rellenos con PCM. Todos los agujeros llenados se encontraban en la zona central del ladrillo. Se observó que con un solo cilindro el flujo calorífico se reducía en un 11,5%, con dos 17,9% y con tres 24.2%.

Para el tercer punto, se valoraron tres posiciones con tres cilindros llenos: zona central del ladrillo ( $L/2$ ), cercanos a la cara exterior ( $2L/3$ ) y cercanos a la cara interior ( $L/3$ ). Se observó que de la reducción porcentual del flujo calorífico hacia el interior más favorable era en la posición central, 17,55%. Siendo ligeramente inferior la reducción en el caso de la posición exterior con un 17,49% y muy desfavorable la interior con un 10,16% de reducción.

En el mismo sentido de la investigación, **Hichem et al. (2013) [3]** estudiaron los mismos aspectos: tipo, localización y cantidad del PCM pero desde la perspectiva numérica y además también desde la experimental con el fin de validar el modelo numérico.

Para ello, se construyó una instalación compuesta por un ladrillo con PCM en su interior, un ventilador que producía un flujo convectivo de aire y una resistencia controlada por un ordenador como símil de la irradiación solar. [Figura 1]

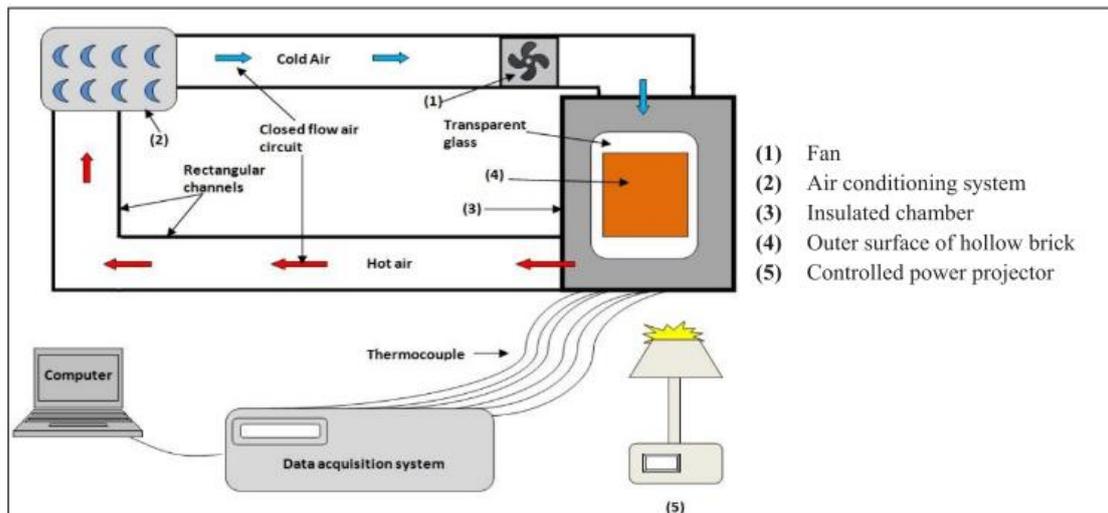


Figura 1. Banco de ensayos de *Hichem et al. (2013)*

En el primer aspecto, **Hichem et al.** se basaron en el estudio de **Alawadhi** y consideraron en su estudio el n-icosano, el n-octadecano y el eutéctico P116 añadiendo un grupo de parafinas de propiedades similares, la 52, 53 y 54, y una sal hidratada (Cloruro de calcio hexahidratado ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )). En el segundo aspecto, volvieron a escoger las mismas posiciones que **Alawadhi** (posición exterior, interior y central). Se diferenciaron del anterior estudio mediante el ensayo de los cinco compuestos en las tres posiciones, es decir, 15 ensayos experimentales. Concluyeron que el material que mejor desempeño prestaba era el cloruro de calcio hexahidratado y la mejor posición era la central.

En el tercer aspecto, se realizó una comparativa entre una fila solo de agujeros llenada con PCM y dos filas de PCM llenadas, es decir, se duplicó la masa. No obstante, el ladrillo tenía tres filas por lo que el segundo caso se subdividió en dos posibilidades que fueron estudiadas: filas central e interior llenadas o filas central y exterior llenadas. Los resultados arrojaron que la mayor reducción del flujo calorífico se producía en el caso de la fila central y exterior ocupadas por el PCM, aunque comparativamente, con solo la fila central ocupada la reducción del flujo no era muy grande, 90,02% contra 82,1%. También se concluyó que el caso de las filas central e interior ocupadas era el más desfavorable, logrando reducir el flujo solo un 60%.

Y finalmente como muestra de la elección errónea del material, **Li et al. (2017)** [4] estudiaron experimentalmente el comportamiento de la familia 20 de glucósido hidrolasas, PCM orgánico, añadidas y mezcladas en cemento. La temperatura de fusión de este grupo de enzimas es de entre 15.8°C y 22.3°C. Para el estudio, se construyó un pequeño cubículo de 3 m<sup>2</sup> para monitorizar el comportamiento del sistema durante el final de la primavera y todo el verano.

A lo largo del periodo estudiado, se observó que el material de cambio de fase se mantenía en estado líquido durante la mayoría del ensayo, a excepción de los días primaverales, y se desaprovechaba el calor latente de fusión del material. Además, se advirtió que la inexistencia del cambio de fase aumentaba el flujo entrante en el cubículo en comparación con un cubículo sin PCM.

En consecuencia, a lo largo de los estudios presentados se contempla la importancia de la elección del material según la temperatura de fusión. Además, cabe reseñar que el PCM debe ser escogido según la estación en la que se desee que trabaje, puesto que no es posible trabajar en estaciones opuestas, por ejemplo, invierno y verano, pues se corre el riesgo, como ocurre en el estudio de **Li et al. (2017)**, de obtener resultados contrarios a los que se desean. Por otro lado, como cabría esperar, un aumento en la masa integrada y, por lo tanto, de la inercia térmica del sistema produce una reducción del flujo calorífico a través del sistema. No obstante, hay que encontrar el equilibrio entre economía y resultados a fin de maximizar su aplicación y venta. Finalmente, se advierte con los diferentes trabajos que la mejor posición para la ubicación del PCM es en los orificios centrales donde el sistema se aprovecha de las altas resistencias de conducción del aire en los orificios vacíos.

En la misma dirección que los anteriores trabajos, **Saxena et al. (2019)** [5] realizaron un estudio de comparación entre un ladrillo sin PCM en su interior y otros dos con dos diferentes PCMs en su interior, icosano y OM35, con un espesor de 1.2 cm y 1.3 cm, respectivamente. El trabajo resultante fue una continuación del estudio numérico realizado por parte de **Saxena et al.** en **2018** [6] en busca de la temperatura de fusión óptima para el clima de Delhi, donde se concluyó que la temperatura óptima de fusión era de 34°C. Por ello, se escogieron los PCMs citados ya que poseen como temperaturas de fusión el icosano y el OM35, respectivamente, 36-38°C y 35°C. Los ladrillos fueron expuestos directamente a la temperatura y luz solar estivales de la ciudad de Delhi.

En los resultados se apreció una reducción de un 8% y un 12% del flujo calorífico, respectivamente, en el ladrillo del icosano y del OM35 en comparación con el ladrillo sin PCM. Aunque el icosano posee un calor latente superior al del OM35 (247.3 kJ/kg contra 197 kJ/kg), el OM35 detenta un calor sensible ligeramente superior, tanto en el estado líquido como en el sólido, que el icosano. Por lo tanto, se puede concluir que, aunque el calor latente de fusión es una de las propiedades más importantes a comparar y considerar, no debe ser despreciado el calor sensible que, por ejemplo, en este caso se erige al OM35 como mejor material a utilizar en la construcción de una ciudad con las temperaturas estivales de Delhi.

Posteriormente a este estudio, **Saxena et al.** continuaron la investigación quedando reflejados los resultados en **Saxena et al. (2020)**[7]. El estudio recuerda la conclusión del anterior trabajo, es decir, que el OM35 posee mejores propiedades que el icosano. A partir de ello, se crearon dos nuevos ensayos. En el primero compararon un ladrillo sin PCM, un ladrillo con dos capas de PCM, una de espesor 1.1 cm de icosano y otra de 0.9 cm de OM35, y un tercer ladrillo con una capa de espesor de 1.1 cm de OM35 [Figura 2]. En el segundo ensayo compararon un ladrillo sin PCM, un ladrillo con aletas de longitud 1.9 cm de OM35, un ladrillo con una capa de OM35 con espesor de 2 cm y un ladrillo con una capa de espesor de 1.1 cm de OM35. [Figura 3]

En el primer conjunto de ensayos, el objetivo era observar el comportamiento térmico con múltiples capas de PCM. Los resultados indicaron que se producía una reducción en el flujo calorífico durante el día en comparación con el ladrillo sin PCM de un 60% en el ladrillo con doble capa y un 40% en el ladrillo con solo una capa. A nivel global, es decir, tras un ciclo de 24 horas, la reducción del flujo era de un 16 y 20%.

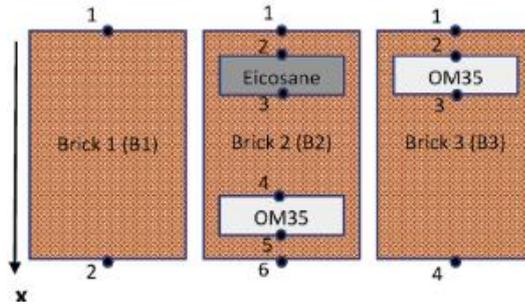


Figura 2. Representación de la posición de los PCMs en los ladrillos del ensayo nº1 Saxena et al. (2020)

En el segundo conjunto de ensayos, el objetivo era estudiar el impacto del espesor en la transmisión del calor y estudiar el rendimiento del método aleteado. Se concluyó que el método de integración del segundo ladrillo en forma de aletas no favorecía la reducción del flujo calorífico. Además, se advirtió que el aumento de espesor y, por consiguiente, de masa no presentaba efectos positivos en el comportamiento térmico puesto que era infrutilizado y requería de mayor tiempo para descargarse térmicamente. Sin embargo, se contempló que el tercer ladrillo ensayado detentaba el mejor desempeño, con un 40% de reducción del flujo calorífico durante el día.

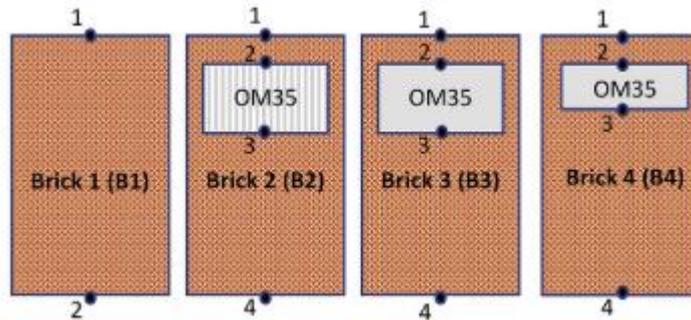


Figura 3. Representación de la posición de los PCMs en los ladrillos del ensayo nº2 Saxena et al. (2020)

En el campo de la simulación numérica, es de vital importancia introducir condiciones de contorno que sean cercanas a la realidad y puedan ser reproducidas de forma experimental para la validación de los resultados numéricos. En **Samanta et al. (2015)** retomaron el trabajo de **Hichem et al.**, continuando el estudio en el ámbito de las sales hidratadas y más específicamente, en el cloruro de calcio hexahidratado. A lo largo de su trabajo, crearon un modelo numérico, realizaron una simulación numérica de la solidificación de la sal y validaron el modelo mediante pruebas experimentales.

El modelo numérico fue realizado en 2D y amplió las condiciones de contorno de anteriores estudios. La modelización del sistema incluyó la consideración de que las paredes superior, inferior y una de las laterales eran adiabáticas, mientras que la pared lateral restante se suponía isoterma y recibía un flujo calorífico constante, acercándose más fidedignamente al comportamiento de un ladrillo perteneciente a la pared de un edificio radiada por luz solar.

Los resultados numéricos, que incluían el estudio de la temperatura y la fracción líquida en el modelo a lo largo del ciclo, ratificaron los resultados experimentales, permitiendo la validación del modelo numérico de solidificación del cloruro de calcio hexahidratado.

En **Rucevskis et al. (2019)** [8] presentaron un sistema de almacenamiento térmico activo en el techo de unas oficinas compuesto por un espacio creado con cemento dentro del que se introdujo el PCM que se encontraba recorrido por un sistema de tuberías que enfriaban el material durante la noche. [Figura 4] El estudio tenía como objetivo comparar el efecto en la temperatura dependiendo de la existencia o no del sistema de almacenamiento térmico y si era activo o pasivo.

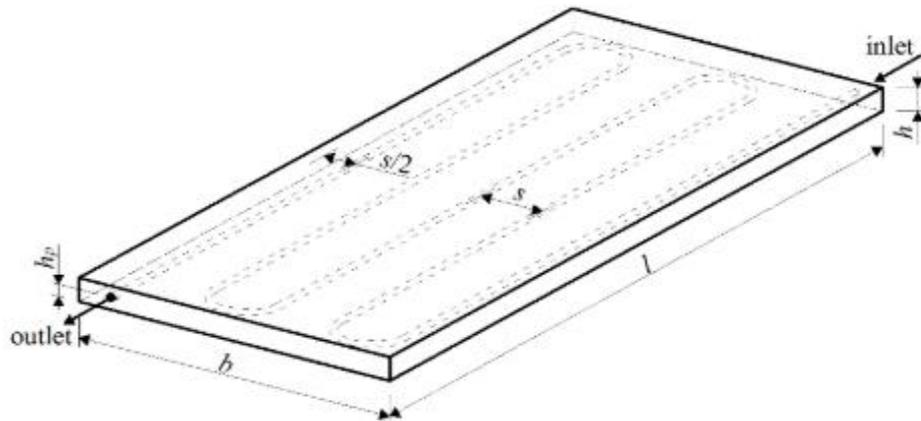


Figura 4. Esquema de la instalación con las tuberías punteadas **Rucevskis et al. (2019)**

Los resultados pueden observarse en [Figura 5]. Se puede apreciar que la opción de incluir, pero no hacer circular el agua (sistema pasivo) redujo 1-2°C la temperatura en comparación con el sistema sin PCM. No obstante, se advierte una reducción notable en el caso del sistema con PCM y circulación del agua (sistema activo). También, se contempla que la fracción de PCM que se encuentra en estado líquido se acerca continuamente a 1 en el caso del sistema pasivo, mientras que el sistema activo fluctúa diariamente sin superar 0.5.

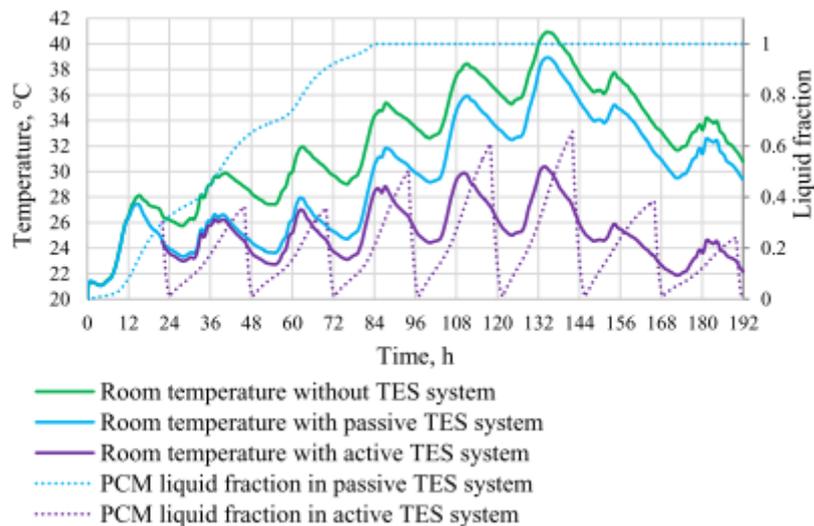


Figura 5. Comparación (descendente) entre sin PCM, con PCM pasivo y con PCM activo **Rucevskis et al. (2019)**

Por lo tanto, se puede concluir que un sistema sin capacidad para retornar cíclicamente a sus condiciones iniciales (pasivo) no tiene la misma eficiencia que un sistema activo que puede cíclicamente repetir el ciclo térmico con las mismas prestaciones. Por ello, siempre que sea posible y económicamente viable es preferible la implementación de un sistema activo en detrimento de uno pasivo.

**Morovat et al.** (2019) [9] realizaron un estudio numérico de un sistema de almacenamiento térmico activo instalado en el techo de una sala (16m<sup>2</sup>). El sistema estaba compuesto por varios paneles de PCM entre los cuales había canales a través de los cuales un ventilador hacía circular aire. [Figura 6] La primera parte del estudio se centraba en el diseño de la instalación: dimensiones, número de canales y caudales de aire. También se realizó una validación del modelo numérico mediante ensayos experimentales. En la segunda parte del estudio, se evaluaron diferentes estrategias de control para reducir el pico de demanda del sistema de climatización.

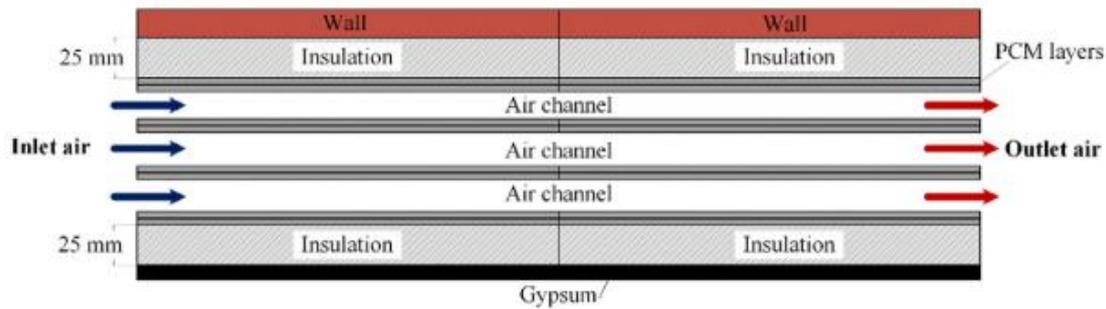


Figura 6. Esquema del sistema de almacenamiento térmico activo **Morovat et al.** (2019)

El sistema tenía tres modos de funcionamiento: [Figura 7]

- La carga térmica, durante la cual el ventilador estaba encendido y las compuertas de la habitación cerradas. Una bobina eléctrica, previa al ventilador, calentaba el aire entrante y transfería calor a los paneles del PCM para posteriormente ser expulsado al exterior.
- La descarga térmica, durante la cual el ventilador estaba encendido y las compuertas de la habitación abiertas. El aire era desplazado por el ventilador desde la habitación, pasando a través de los paneles de PCM que le transferían calor, y volvía a la habitación.
- El modo standby, durante el cual el ventilador estaba apagado y las compuertas cerradas.

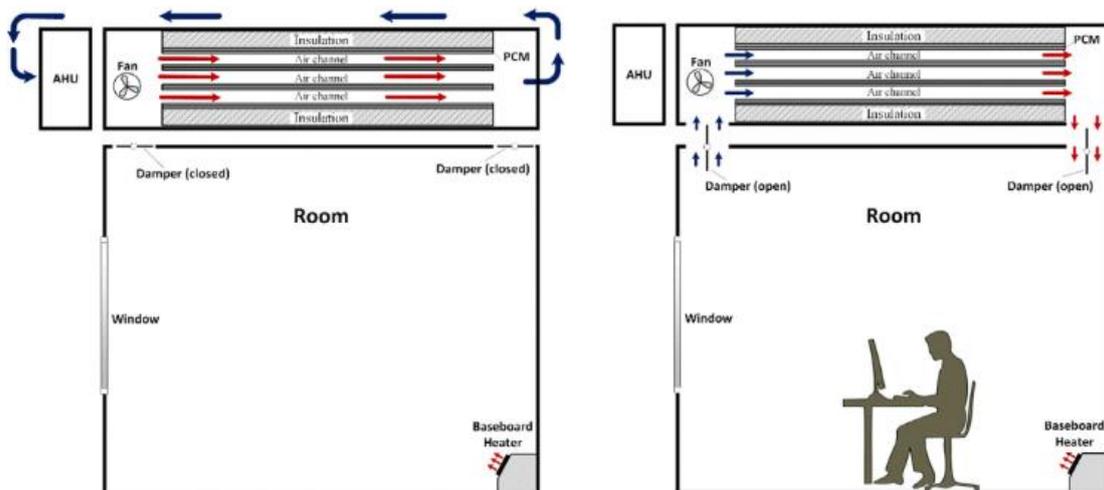


Figura 7. Modos de carga térmica (derecha) y descarga térmica (izquierda) **Morovat et al.** (2019)

En la primera parte del estudio, se evaluó el efecto del caudal de aire circulado en un canal. Se consideraron cuatro valores: 200, 300, 400 y 500 kg/h. Se observó que el aumento del caudal, disminuía la diferencia de temperatura entre entrada y salida. También, se advirtió que la descarga térmica se aceleraba con el incremento del caudal. Durante el estudio, también se

examinó el efecto del grosor de los paneles de PCM, ensayándose espesores de 3, 5.2, 7 y 10 mm. Los resultados del segundo ensayo mostraban que el incremento del espesor suponía aumentar la energía térmica almacenada, pero se requerían de tiempos superiores para ello. Un tercer ensayo fue realizado donde se analizaba el efecto de la longitud del canal. Se tomaron 4 longitudes: 1.2, 2.4, 3.6 y 4.8 m. Se concluyó que un aumento de la longitud produce cargas y descargas más cortas, pero la caída de la presión obligaba en las longitudes mayores a aumentar la potencia del ventilador. Finalmente, una última simulación fue llevada a cabo, reflexionando sobre el número de canales de aire del sistema entre 1, 2, 3 y 6. Se constató que, a un mayor número de canales, la carga y descarga se producían con mayor celeridad.

En la segunda parte del estudio, se valoraron diferentes estrategias de control para reducir el gasto energético de los sistemas de climatización. Se confirmó que la inclusión de sistemas de almacenamiento térmico activos disminuye la demanda energética y, por ende, los gastos y ofrece flexibilidad energética, es decir, el sistema actúa como generador de energía, como medio de almacenamiento energético y como controlador de la demanda.

## **Presentación del estudio**

Este estudio nace de la colaboración del Grupo de Investigación GITSE del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza con el Doctor Mohamed Lamine Benlekkam del Centro Universitario de Tissemsilt, Argelia. El Dr. Lamine investiga numéricamente la inclusión de materiales de cambio de fase en paredes de ladrillo con tubos portantes de agua con el fin de avanzar en el uso sostenible de la energía doméstica en su país. Fruto de este estudio, junto a la colaboración del Departamento de Ingeniería Mecánica, se llevó a cabo una investigación en busca de un material de cambio de fase cuyas propiedades fueran adecuadas al clima argelino y a las especificaciones requeridas. Debido a las temperaturas de operación deseadas (20-40°C) y su alta capacidad de almacenamiento térmico se apostó por el cloruro de calcio hexahidratado ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ).

Como continuación del anterior estudio nace esta nueva colaboración, a través de la que se busca la modelización y simulación de la descarga térmica de una pared de ladrillo con materiales de cambio de fase y tubos portantes de agua con el fin de que en el futuro sea posible realizar ensayos experimentales sobre un banco de ensayos que permitan validar el modelo numérico. Además, se realiza un análisis numérico del efecto del caudal en el tiempo de descarga y la variación de la temperatura del agua.

Por todo lo anteriormente citado, el estudio se centra en las condiciones climáticas de Argelia. Debido a su emplazamiento entre el Desierto del Sáhara y el Mar Mediterráneo, Argelia presenta diferentes climas, produciéndose una transición entre el clima desértico cálido con altas temperaturas y escasas precipitaciones a un clima mediterráneo cálido con temperaturas moderadas y lluvias regulares. [Figura 8]

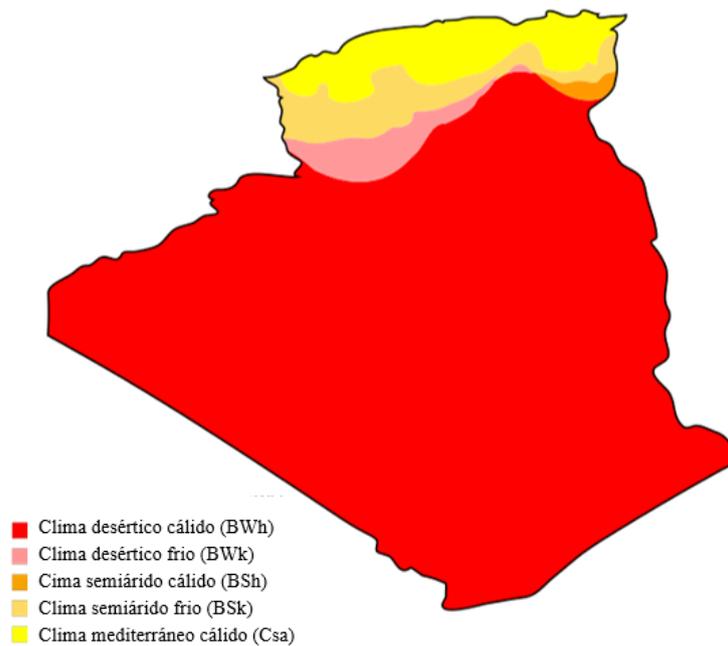


Figura 8. Mapa de Argelia según la clasificación Köppen [10]

Aunque la mayor parte de la población vive cerca de la costa, se va a estudiar el clima semiárido, un clima de transición entre el árido y el mediterráneo, con el fin de que sirva como punto de referencia y de extrapolación para el resto del territorio.

Las temperaturas diurnas y nocturnas medias durante el año en la ciudad de Méchria, cuyo clima es semiárido frío, son las dispuestas en la [Tabla 1]

Mes	En.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Temperatura media diurna °C	11.1	13.0	16.4	20.5	23.8	29.9	<b>34.9</b>	34.3	29.3	21.9	15.1	10.7	21.7
Temperatura media nocturna °C	1.7	2.5	4.7	7.6	11.2	16.2	<b>20.4</b>	20.4	15.2	10.4	5.3	2.6	9.9

Tabla 1. Temperaturas mensuales mínimas y máximas en la ciudad de Méchria *Climate Data* [11]

Durante el estudio, las temperaturas consideradas durante el día y la noche van a ser tomadas del mes con mayor variación térmica, Julio.

- Temperatura ambiente exterior media diurna: 35°C
- Temperatura ambiente exterior media nocturna: 20°C

A continuación, en la [Figura 9] se presenta la irradiación anual media en el territorio argelino.

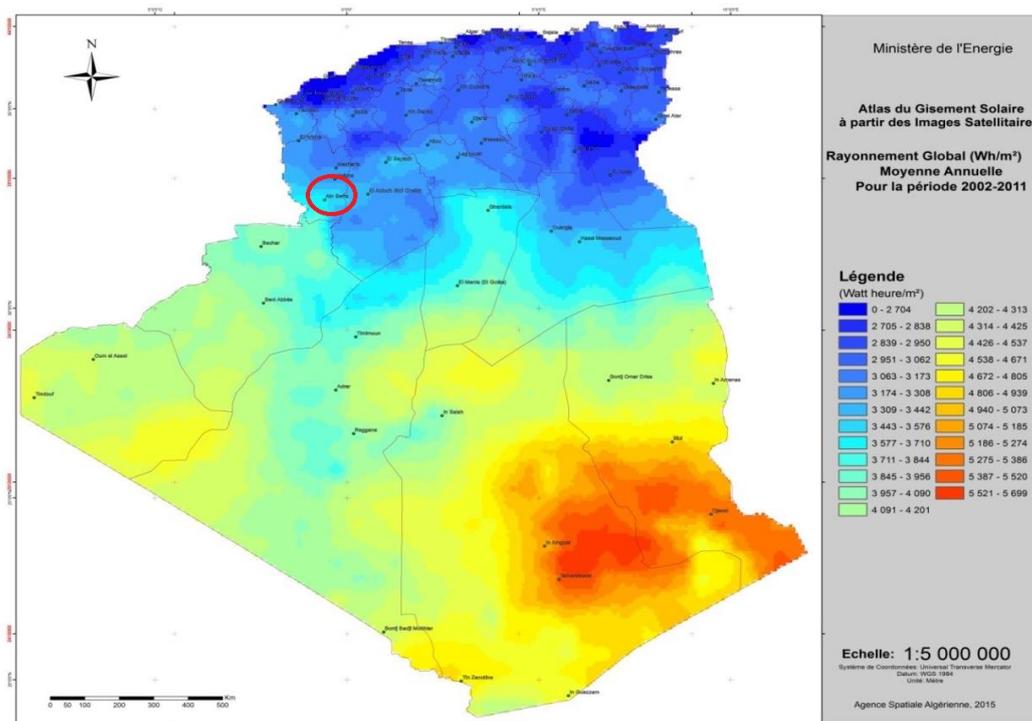


Figura 9. Mapa de la irradiación solar media anual en un día en Argelia [12]

Como se puede observar, la irradiación anual media en la ciudad de Méchria es de aproximadamente  $3500 \text{ Wh/m}^2$ . Suponiendo 10 horas de luz solar completa al día, la irradiancia solar resulta ser  $350 \text{ W/ m}^2$ .

A falta de normativa, legislación o estadísticas argelinas se toman los datos de organismos españoles.

Según el **Documento Básico HS 4 de Salubridad del Código Técnico de la Edificación** la velocidad de las tuberías metálicas y termoplásticas debe ser, respectivamente, entre  $0.5\text{-}2 \text{ m/s}$  y  $0.5\text{-}3.5 \text{ m/s}$ . Este intervalo de velocidades está ideado para evitar el ruido del agua y la pérdida de carga en los conductos.

Además, según el **Instituto Nacional de Estadística (INE)** el consumo medio de agua sanitaria caliente en los hogares en 2016 fue de 60 litros por día y habitante.

## Objetivos

- Estudio del uso de PCMs en cerramientos activos para el aprovechamiento de energía solar para agua sanitaria caliente (ACS). Para ello se realiza un búsqueda y recopilación bibliográfica del estado del avance técnico en el campo. Los antecedentes de usos del PCM en cerramientos activos pueden observarse en la **Introducción**. El trabajo bibliográfico previo con el fin de obtener una base teórica necesaria para la realización del estudio se encuentra en el **Anexo 1**.
- Obtención de un modelo numérico que describa el comportamiento térmico de la solución propuesta tanto en el proceso de carga como de descarga térmica. Partiendo de un modelo disponible en Grupo de Investigación GITSE en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza con la geometría y la carga térmica desarrolladas, se modeliza la descarga térmica y se estudia el efecto del caudal en el tiempo de descarga y en la variación de la temperatura del agua. Su desarrollo puede ser observado en el capítulo: **Simulación del caso de estudio**.
- Diseño de un banco de ensayos que permita la validación del modelo numérico que describe el comportamiento térmico de la solución estudiada: selección de los materiales y componentes necesarios para su construcción, proceso de montaje y construcción y selección la instrumentación, monitorización y control de forma que permitan reproducir las condiciones ambientales deseadas. Su desarrollo puede ser observado en el capítulo: **Diseño del banco de ensayos**.
- Creación de un protocolo de ensayos a realizar, incluido en el capítulo: **Diseño del banco de ensayos**.
- Análisis y conclusiones acerca de la viabilidad técnica de la solución con los resultados obtenidos en las simulaciones numéricas de carga y descarga térmica. Su desarrollo puede ser observado en los capítulos: Simulación del caso de estudio y **Conclusiones y líneas futuras**.

## Simulación del caso de estudio

El estudio nace del interés de integrar PCMs en materiales de construcción con el fin de obtener un sistema de almacenamiento activo gracias a la circulación de agua en el interior de las paredes. El caso de estudio versará sobre un ladrillo [Figura 10]. Debido a la alta carga computacional y el interés de estudiar inicialmente y exclusivamente el comportamiento del PCM, se reduce el modelo a un orificio de dimensiones de 36.7x40x300 mm con solo como componentes el PCM, el tubo y el agua.

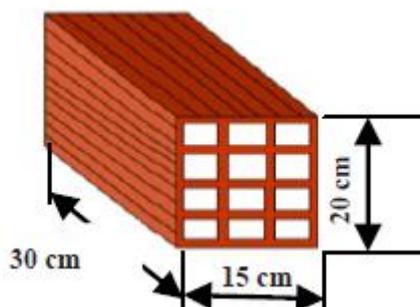


Figura 10. Ladrillo a estudiar

A través de la simulación de la unidad mencionada, se persigue el entendimiento del comportamiento térmico del material de cambio de fase durante la carga y la descarga térmica, así como, la transferencia de calor.

La simulación numérica abarcará dos modos de operación: diurno y nocturno.

Durante las condiciones diurnas, la carga térmica, la temperatura inicial de todo el modelo se inicializa a 25°C. Se simula la irradiación solar incidente en la cara exterior como un flujo calorífico constante de 350W/m<sup>2</sup>. Además, se indica que las paredes superior e inferior son adiabáticas y la pared interior tiene un coeficiente de convección de 10W/m<sup>2</sup>·K. La temperatura interior de la vivienda se fija en 25°C. No se indica coeficiente de convección ni temperatura exterior por estarse simulando en la pared exterior el flujo calorífico entrante de irradiación solar. Se realiza una simulación en pasos de 10 minutos durante un ciclo de 10 horas. El tiempo de paso es escogido en base a la intención de observar los resultados tras 30 minutos y una hora y evitar altas cargas computacionales.

Durante las condiciones nocturnas, la descarga térmica, la temperatura inicial de todo el modelo se inicializa a 35°C, a excepción del agua a 25°C. Se indica que las paredes superior e inferior son adiabáticas, la pared interior tiene un coeficiente de convección de 10 W/m<sup>2</sup>·K y la exterior 20 W/m<sup>2</sup>·K. La temperatura exterior es de 20°C y la interior de 25°C. Se realiza una simulación en pasos de 10 minutos durante un ciclo de 2 horas.

Se realizan cuatro simulaciones: una sin circulación de agua y tres con circulación de agua con diferentes caudales, 4.6 l/min (0.5 m/s), 6.5 l/min (0.7 m/s) y 9.2 l/min (1 m/s) con el fin de observar el efecto del caudal en el tiempo de descarga y en la variación de la temperatura del agua circulante.

## Modelo numérico

ANSYS es un grupo de programas CAE (Computer Aided Engineering) para el diseño, análisis y simulación de partes por elementos finitos. En nuestro caso, el programa específico utilizado es Fluent, programa de cálculo numérico para la modelización de flujos, turbulencia, intercambio de calor o reacciones para aplicaciones industriales.

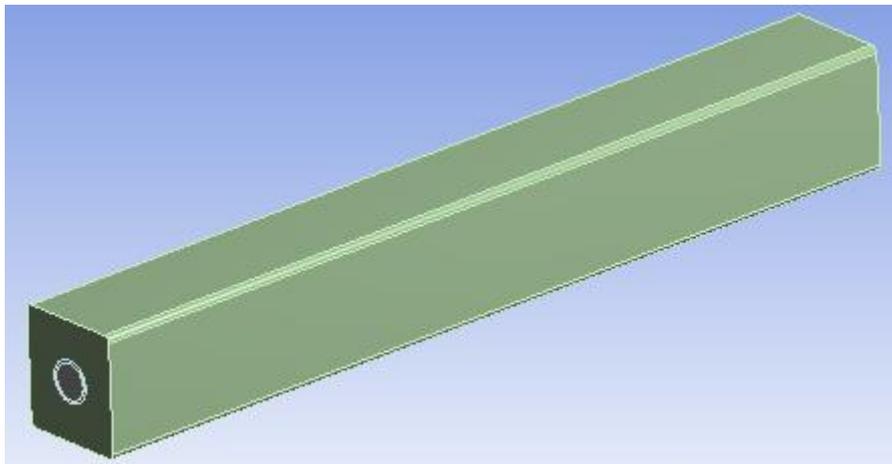
Las etapas necesarias para la realización del cálculo en Ansys Fluent son las siguientes:

1. Realización del modelo 3D
2. Generación de la malla
3. Definición de las condiciones físicos-químicas del modelo
4. Asignación de propiedades de las sustancias
5. Propiedades de contorno
6. Cálculo y Resultados

Se procede a desarrollar el proceso y consideraciones de mayor interés de cada una de las primeras cuatro etapas. Las dos últimas etapas serán desarrolladas en profundidad a lo largo del resto del capítulo.

### 1.Realización del modelo 3D

El estudio numérico parte de un modelo ya existente en el Grupo de Investigación GITSE del Departamento de Ingeniería Mecánica que incluye la simulación de la carga térmica, siendo la descarga modelizada por el autor del presente escrito. El tamaño del modelo es de 36.7x40x300 mm con un tubo portante de agua de diámetro 14 mm. [Figura 11]



*Figura 11. Vista del modelo completo*

En la [Figura 12] se puede observar que el modelo está compuesto por el PCM (amarillo), un tubo de cobre (verde) y agua (azul).

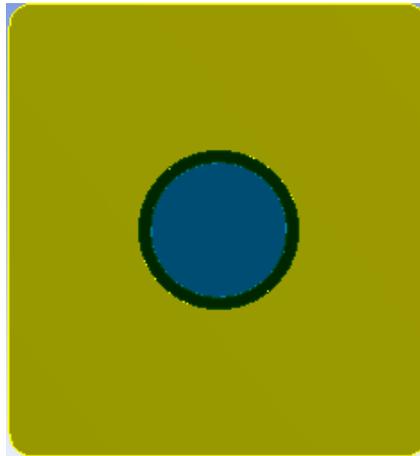


Figura 12. Vista frontal del modelo

## 2. Generación de la malla

La resolución del sistema mediante el método de elementos finitos se basa en la discretización del modelo en elementos de menor tamaño, llamados celdas, con el fin de calcular cada una de ellas “por separado”. A la creación de estas celdas, se le conoce como “*meshing*”. Para la realización de este proceso, es necesario considerar dos datos: tamaño del elemento y tipo de interpolación, lineal o cuadrática.

El primer dato está relacionado con el rendimiento y la precisión del sistema deseados. Un tamaño de elemento muy pequeño favorecerá la obtención de resultados muy aproximados a la realidad, pero exigirá un tiempo computacional superior. Por lo contrario, un tamaño de elemento muy grande generará resultados rápidamente, pero con baja fidelidad.

Relativo al segundo dato, la interpolación cuadrática es de gran interés cuando el sistema a simular va a verse deformado bajo cargas mecánicas y/o térmicas. La interpolación lineal es más versátil y converge más rápidamente, no obstante, es menos precisa que la cuadrática. Por lo tanto, la interpolación lineal es preferible por su rapidez y por no aportar la cuadrática ninguna ventaja destacable.

Por lo tanto, se realiza una aut discretización con interpolación lineal que discretiza el sistema de manera congruente e incluye correcciones en puntos singulares como esquinas o segmentos curvos, obteniéndose 156 149 nodos y 131 903 elementos.

## 3. Condiciones físico-químicas del modelo

Es necesario marcar la condición de *Energía*, ya que el objetivo es estudiar un comportamiento térmico y, por ende, existe transferencia de calor; la condición de fluido *Laminar* y la condición de *Solidificación y Fusión*, ya que se desea estudiar el calor latente y el cambio de fase del PCM escogido.

Para la descarga, se calcula el número de Reynolds con una velocidad de 0.5 m/s, a fin de saber cómo será el régimen dentro del tubo.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \cdot 0.5 \cdot 0.014}{0.001} = 7000$$

Debido a que el número de Reynolds es superior a 4000, se puede concluir que el régimen será turbulento. Esta condición es incluida mediante la elección de *Turbulento k-epsilon* en la sección de condiciones físico-químicas del modelo durante la simulación de la descarga térmica.

#### 4. Propiedades sustancias

El modelo está compuesto por 3 sustancias: PCM (Cloruro de calcio hexahidratado), cobre y agua. Sus propiedades están recogidas en [Tabla 2]

<i>Propiedades</i>	<i>PCM</i>	<i>Cobre</i>	<i>Agua</i>
<i>Conductividad térmica, W/m·K</i>	0.81	387.6	0.6
<i>Densidad, kg·m<sup>-3</sup></i>	1620	8978	998
<i>Calor latente de fusión, kJ/kg</i>	187	/	/
<i>Calor específico, J /K·kg</i>	1800	381	4182
<i>Temperatura de fusión, °C</i>	29.9	1085	0
<i>Coefficiente de expansión, térmica, 1/K</i>	0.0005	/	/
<i>Viscosidad, kg/m·s</i>	2.98	/	0.001

Tabla 2. Propiedades destacables de los componentes del modelo

## Resultados de la simulación de la carga térmica

Las temperaturas a lo largo del tiempo y ancho del segmento estudiado se encuentran en [Figura 13].

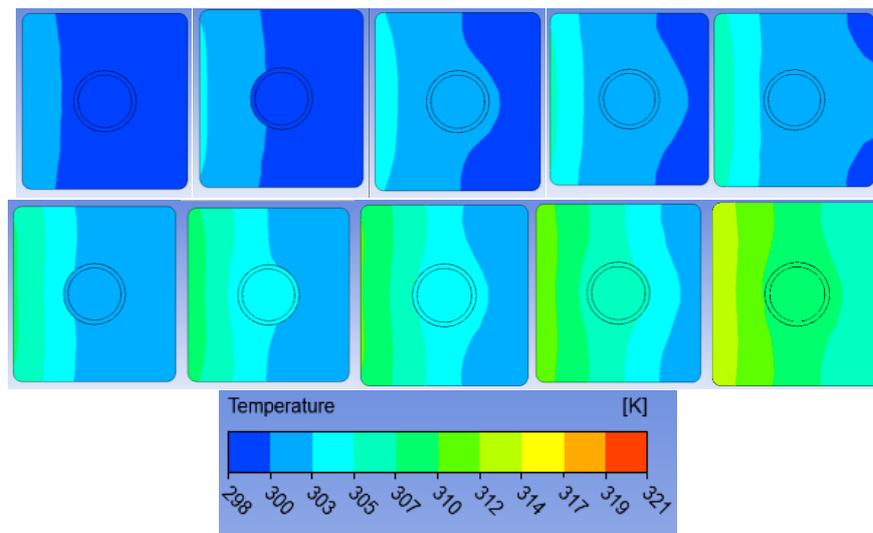


Figura 13. Temperaturas del ancho de la unidad en intervalos de una hora en la sección de entrada

Se observa que el flujo calorífico se transmite mediante conducción térmica de la pared irradiada hacia el otro extremo. Tras diez horas de irradiación todo el cloruro de calcio hexahidratado se encuentra por encima del punto de fusión, 302.7 K. Se observa que la diferencia de temperaturas entre la pared lateral irradiada y la otra pared lateral es de 12°C.

La fracción de líquido-sólido a lo largo del tiempo y ancho del segmento estudiado se observa en [Figura 14].

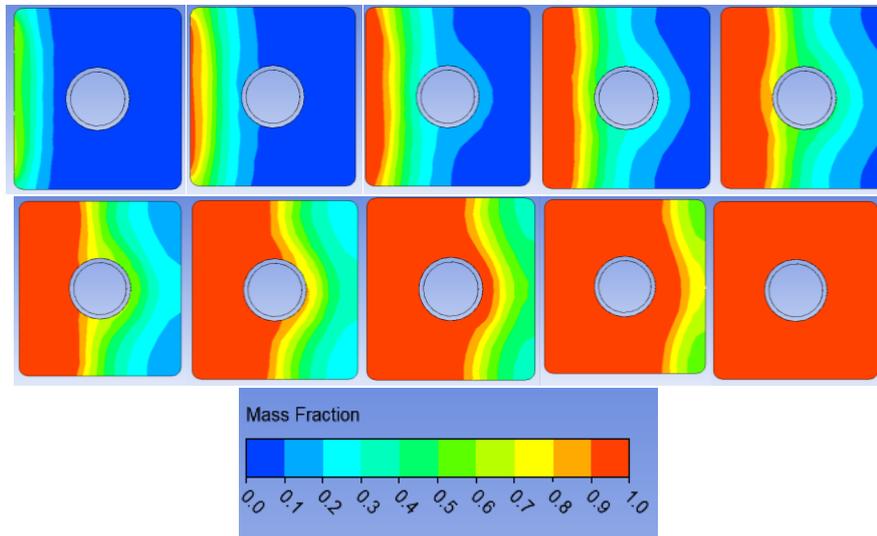


Figura 14. Fracción de masa líquida en intervalos de una hora en la sección de entrada

La energía almacenada en el PCM puede ser calculada mediante:

$$E = 350 \frac{W}{m^2} \cdot 10h = 3500 \frac{Wh}{m^2}$$

$$A = 0.04 \cdot 0.3 = 0.012 m^2 \rightarrow E = 3500 \frac{Wh}{m^2} \cdot 0.012m^2 = 42 Wh$$

$$1 Wh = 3.6 kJ \rightarrow E = 42 Wh = 151.2 kJ$$

En [Figura 15] pueden advertirse las pérdidas desde la pared interior en forma de flujos convectivos. La energía transferida desde la pared se obtiene de las figuras citadas siendo sus valores por hora los dispuestos en la suma detallada.

$$E = 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 6 + 7 + 12 + 21 + 58 = 104 \frac{kWh}{m^2}$$

$$A = 0.04 \cdot 0.3 = 0.012$$

$$m^2 \rightarrow E = 104 \frac{Wh}{m^2} \cdot 0.012m^2 = 1.25 Wh$$

$$1 Wh = 3.6 kJ \rightarrow E = 1.25 Wh = 4.5 kJ$$

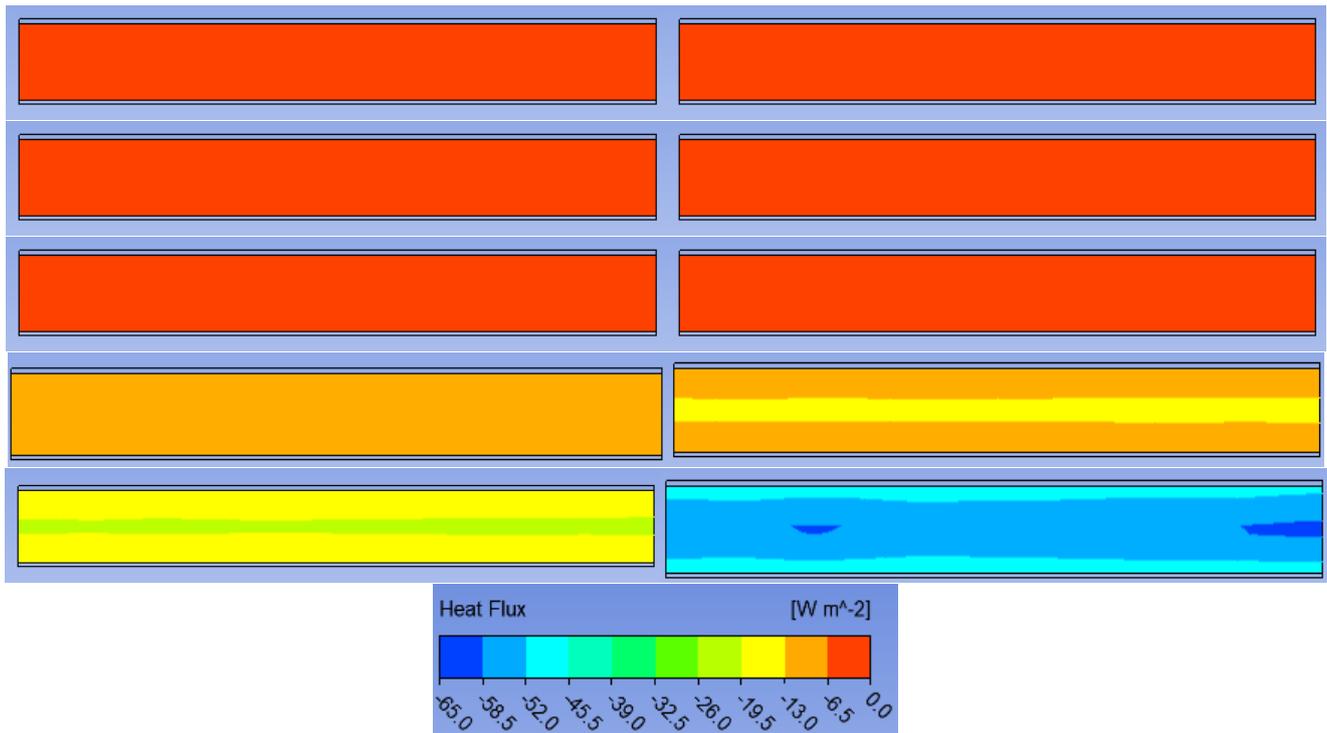


Figura 15. Flujos convectivos en la pared interior durante la carga térmica en intervalos de una hora a lo largo de la pared interior

Por lo tanto, el porcentaje de energía almacenada por el PCM es:

$$\% = \frac{151.2 - 4.5}{151.2} = 97\%$$

## Resultados de la simulación de la descarga térmica

Primero se simula la descarga térmica en forma de sistema pasivo, es decir, sin circulación de agua por el interior del tubo, durante 10 horas. La simulación se realiza con la intención de obtener una primera simulación del tiempo de descarga. La unidad completa se inicializa a 35°C.

La temperatura a lo largo del tiempo y ancho del segmento estudiado se observa en [Figura 16]. La fracción de líquido-sólido a lo largo del tiempo y ancho del segmento estudiado se observa en [Figura 17].

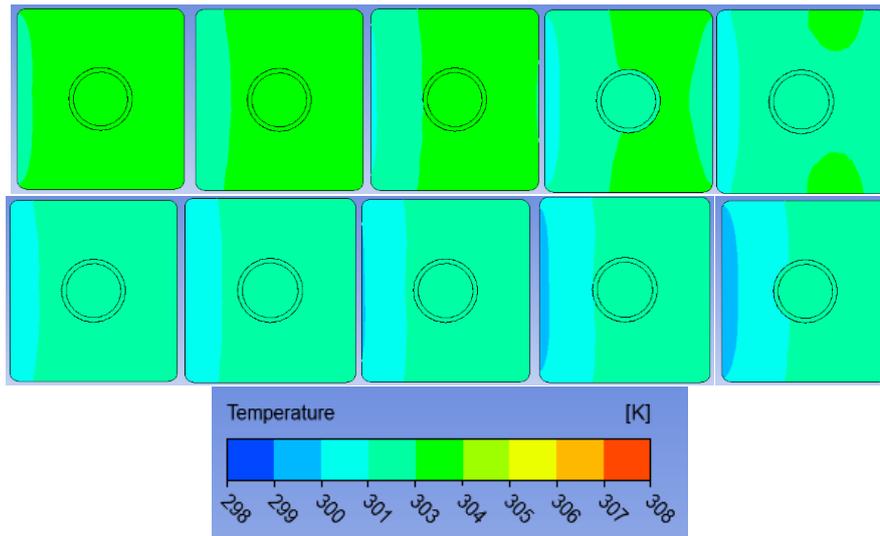


Figura 16. Temperaturas del ancho de la unidad en intervalos de una hora en la sección de entrada

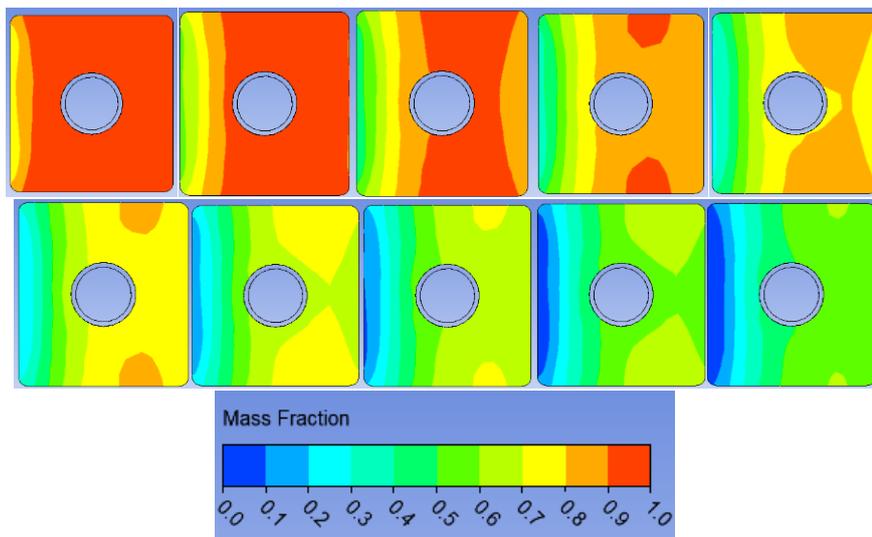


Figura 17. Fracción de masa líquida en intervalos de una hora en la sección de entrada

Se puede observar que en [Figura 17] tras 10 horas, el PCM no ha solidificado totalmente y por lo tanto no trabajará de forma óptima en futuros ciclos térmicos. La temperatura final de agua dentro del tubo es de 28.5°C. Se requiere adaptar el sistema pasivo a un sistema activo, haciendo circular agua por el tubo para que el PCM solidifique durante la noche.

Para un caudal de 4.6 l/min y una temperatura de entrada del agua de 25°C, la temperatura a lo largo del tiempo y ancho del segmento estudiado se observa en [Figura 18]. La fracción de líquido-sólido a lo largo del tiempo y ancho del segmento estudiado se observa en [Figura 19].

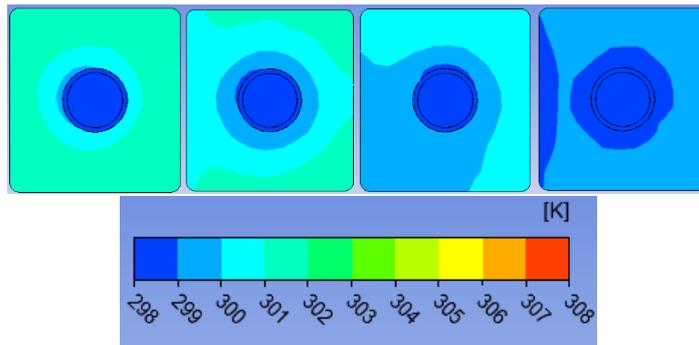


Figura 18. Temperaturas del ancho de la unidad en intervalos de 30 minutos en la sección de entrada

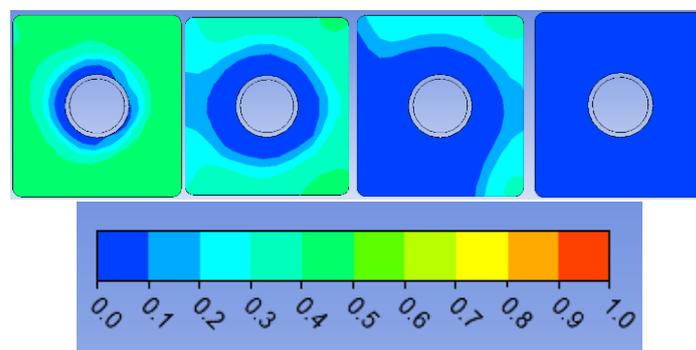


Figura 19. Fracción de masa líquida en intervalos de 30 minutos en la sección de entrada

Para un caudal de 6.5 l/min y una temperatura de entrada del agua de 25°C, la temperatura a lo largo del tiempo y ancho del segmento estudiado se observa en [Figura 20]. La fracción de líquido-sólido a lo largo del tiempo y ancho del segmento estudiado se observa en [Figura 21].

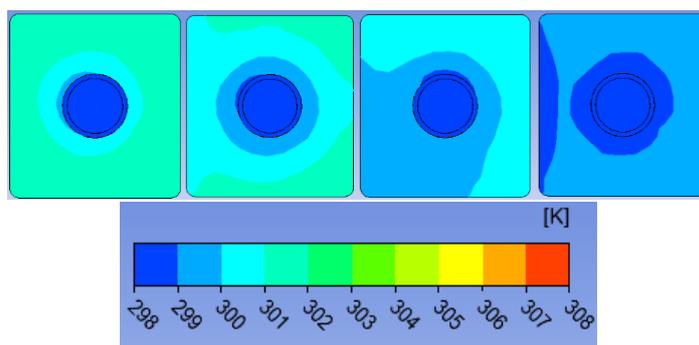


Figura 20. Temperaturas del ancho de la unidad en intervalos de 30 minutos en la sección de entrada

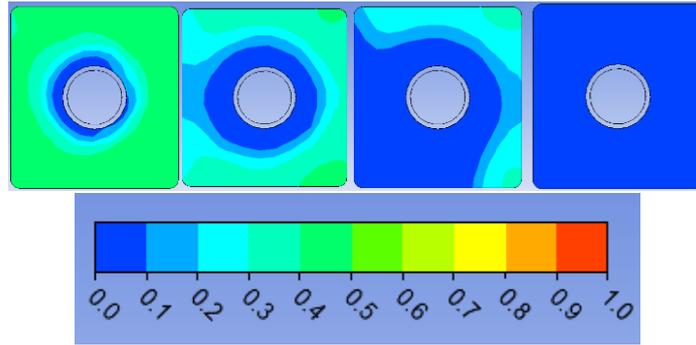


Figura 21. Fracción de masa líquida en intervalos de 30 minutos en la sección de entrada

Para un caudal de 9.2 l/min y una temperatura de entrada del agua de 25°C, la temperatura a lo largo del tiempo y ancho del segmento estudiado se observa en [Figura 22]. La fracción de líquido-sólido a lo largo del tiempo y ancho del segmento estudiado se observa en [Figura 23].

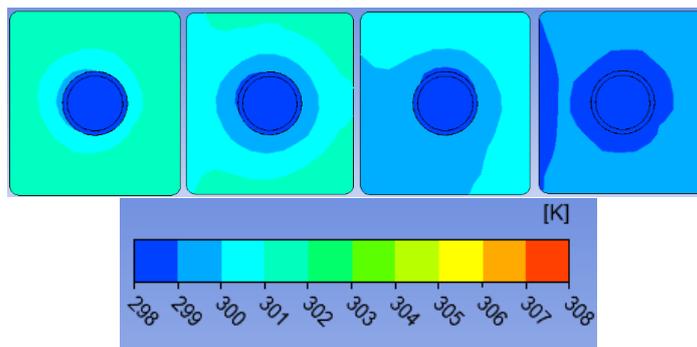


Figura 22. Temperaturas del ancho de la unidad en intervalos de 30 minutos en la sección de entrada

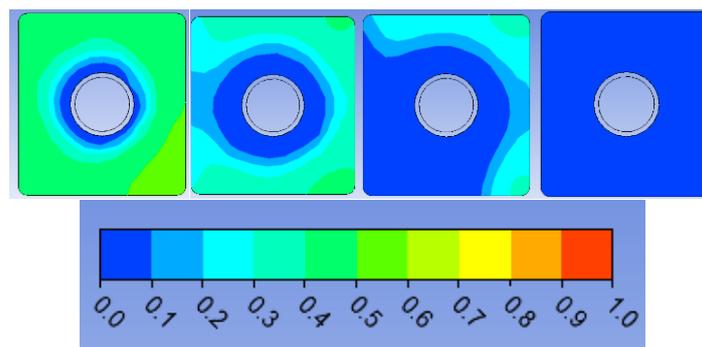


Figura 23. Fracción de masa líquida en intervalos de 30 minutos

Se observa que tras 2 horas el PCM ha solidificado completamente. Este mismo tiempo de descarga térmica es igual con los otros caudales simulados, 6.5 l/min y 9.2 l/min. Se observa que la temperatura y la fracción líquida son casi idénticas para los tres casos.

Esta coincidencia se produce debido a la dominancia de la resistencia térmica de conducción del PCM sobre la resistencia térmica de conducción del tubo de cobre y la resistencia térmica de convección del agua. A continuación, se realiza el cálculo de las diferentes resistencias térmicas obtenidas de la referencia [13].

$$R_{PCM} = \frac{e}{\lambda_{PCM} \cdot A} \cdot \text{Factor de forma} = \frac{0.018}{0.81 \cdot 0.3 \cdot 0.04} \cdot \frac{2\pi \cdot 0.3}{\ln\left(\frac{1.08 \cdot 0.04}{0.014}\right)} = 3.1 \frac{K}{W}$$

$$R_{tubo} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi \cdot L \cdot \lambda_{cobre}} = \frac{\ln\left(\frac{0.016}{0.014}\right)}{2\pi \cdot 0.3 \cdot 387.6} = 1.8 \cdot 10^{-4} \frac{K}{W}$$

$$R_{agua} = \frac{1}{h \cdot A} = \frac{1}{372.4 \cdot \pi \cdot 0.014 \cdot 0.3} = 0.2 \frac{K}{W}$$

Siendo  $h$ ,

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda_{agua}}{L} = \frac{186.2 \cdot 0.6}{0.3} = 372.4 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Siendo  $Nu$  para flujo turbulento en convección forzada interna,

$$Nu = (-3.08 + 3.075 \cdot 10^{-3} \cdot Re + 0.32597 \cdot 10^{-6} \cdot Re^2 - 0.02185 \cdot 10^{-9} \cdot Re^3) \cdot \left(120 \cdot \frac{D}{L}\right)^{(1-10^{-4} \cdot Re)^{0.256}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} = 186.2$$

$$Pr_{agua} = 7$$

Por lo tanto, se puede constatar que la resistencia térmica de conducción a través del cloruro de sodio hexahidratado domina la transferencia del flujo de calor y, por lo tanto, el aumento del caudal no supone ningún beneficio o perjuicio al tiempo de descarga térmica.

La energía cedida al agua, al interior o al exterior, en el caso de caudal 4.6 l/min, se puede estimar como:

$$E = (\Delta T \cdot c + c_l) \cdot m$$

$$E = (9 \cdot 1.8 + 187) \cdot 0.638 = 129.65 \text{ kJ}$$

Donde la variación de temperatura es 35°C-26°C (temperatura resultante de la descarga) y la masa

$$m = Vol \cdot \rho = \left(0.0367 \cdot 0.04 \cdot 0.3 - \frac{0.014^2 \cdot \pi}{4} \cdot 0.3\right) m^3 \cdot 1620 \frac{kg}{m^3} = 0.638 \text{ kg}$$

En [Figura 24] puede observarse las pérdidas desde la pared interior en forma de flujos convectivos. La energía transferida desde la pared se obtiene de las figuras citadas siendo sus valores por cada media hora los dispuestos en la suma detallada

$$E = \frac{34 + 30 + 25 + 6}{2} = 47.5 \frac{kWh}{m^2}$$

$$A = 0.04 \cdot 0.3 = 0.012 m^2 \rightarrow E = 47.5 \frac{Wh}{m^2} \cdot 0.012 m^2 = 0.57 Wh$$

$$1 Wh = 3.6 kJ \rightarrow E = 0.57 Wh = 2.05 kJ$$

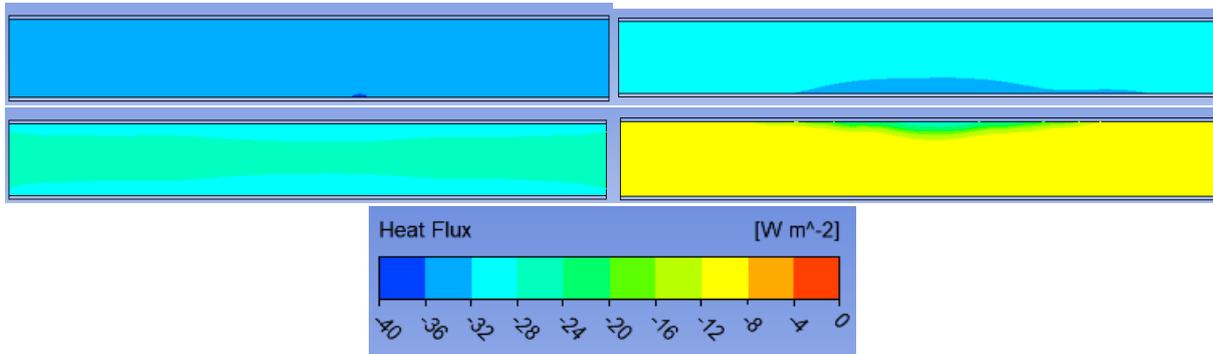


Figura 24. Flujos convectivos en la pared interior durante la carga térmica en intervalos de 30 minutos a lo largo de la pared interior

En [Figura 25] puede observarse las pérdidas desde la pared exterior en forma de flujos convectivos. La energía transferida desde la pared se obtiene de las figuras citadas siendo sus valores por cada media hora los dispuestos en la suma detallada

$$E = \frac{162 + 149 + 130 + 110}{2} = 275.5 \frac{kWh}{m^2}$$

$$A = 0.04 \cdot 0.3 = 0.012 m^2 \rightarrow E = 275.5 \frac{Wh}{m^2} \cdot 0.012 m^2 = 3.3 Wh$$

$$1 Wh = 3.6 kJ \rightarrow E = 3.3 Wh = 11.9 kJ$$

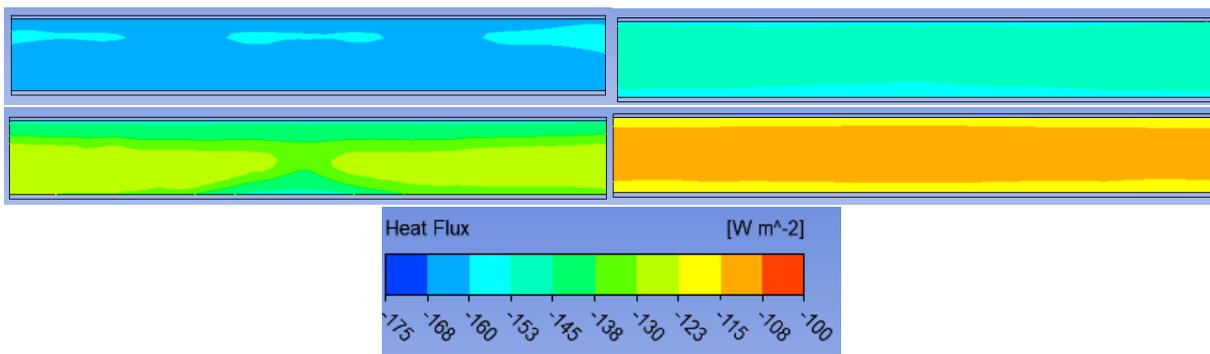


Figura 25. Flujos convectivos en la pared exterior durante la carga térmica en intervalos de una hora a lo largo de la pared exterior

Siendo el total de energía de flujos convectivos cedido al exterior o al interior.

$$E = 13.95 kJ$$

Por lo tanto, el porcentaje de energía cedida al agua es:

$$\% = \frac{129.65 - 13.95}{129.65} \cdot 100 = 89.2\%$$

El consumo de agua de la instalación teniendo en cuenta que con los caudales de agua estudiados y las temperaturas supuestas para el inicio de la descarga térmica, esta se realiza en dos horas:

$$Vol = Q \cdot t = 4.6 \frac{l}{min} \cdot 60 \cdot 2 = 552 l$$

Considerándose un hogar de 4 personas, junto al dato del INE anteriormente citado, el volumen de agua sanitaria necesaria durante un día sería 240 litros.

Las variaciones de temperatura entre la entrada y la salida para diferentes tiempos y caudales pueden observarse en [Tabla 3].

Caudal (l/min)	$\Delta$ Temperatura 10 min (°C)	$\Delta$ Temperatura 30 min (°C)	$\Delta$ Temperatura 1 hora (°C)	$\Delta$ Temperatura 2 horas (°C)
4.6	0.19	0.12	0.03	0.01
6.5	0.15	0.09	0.02	0.01
9.2	0.1	0.06	0.015	0.01

Tabla 3. Variación de la temperatura dependiendo del caudal y el tiempo

La temperatura del punto medio del tubo a lo largo de su longitud a los 30 minutos del inicio de la descarga térmica y con un caudal de 4.6 l/min puede observarse en [Figura 26].

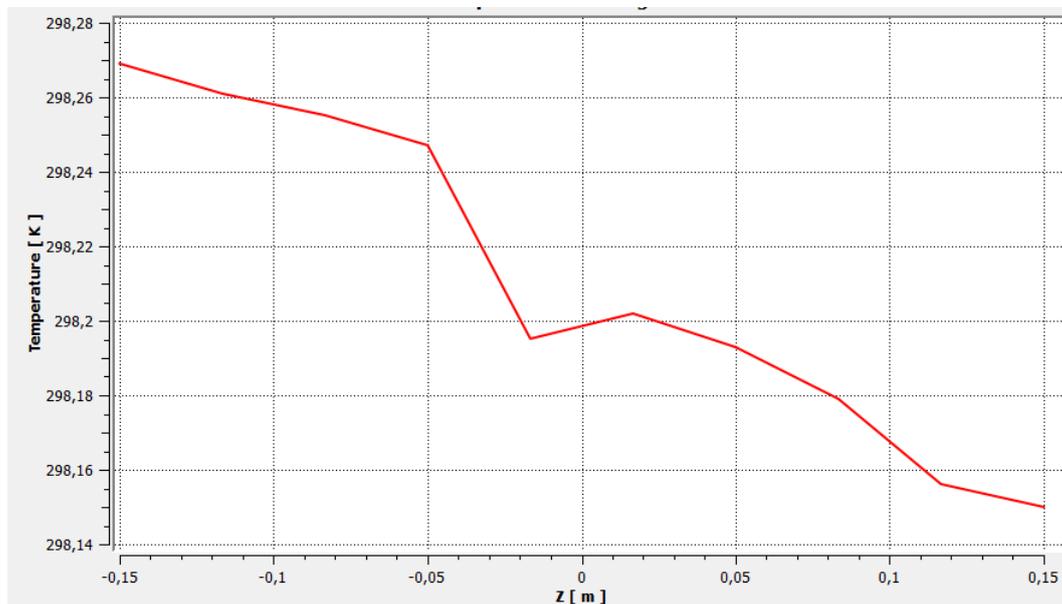


Figura 26. Temperatura del agua a lo largo del tubo tras 30 minutos de descarga

Como se contempla, desde el punto de entrada en  $Z = 0.15$  m la temperatura crece de forma cuasi lineal hasta alcanzar el máximo en la sección de salida en  $Z = -0.15$  m.

## Diseño del banco de ensayos

Como continuación a la simulación numérica y con el fin de validar de forma experimental los resultados obtenidos en el modelo numérico, se lleva a cabo un diseño del banco de ensayos, teniendo en cuenta las prestaciones, instrumentación y condiciones requeridas para la realización de los ensayos experimentales. Además, la experimentación permite observar de forma empírica el comportamiento del sistema y percatarse de posibles desviaciones que pudieran no haber sido advertidas en el modelo numérico y de tal manera, realizar correcciones y ajustes.

Para dicha validación, se construirá una unidad formada por un segmento del ladrillo, uno de sus orificios, de dimensiones 20x40x300 mm en cuyo interior se introducirá un tubo de 15 mm, que portará el agua, y el resto del espacio será ocupado por el PCM, cloruro de calcio hexahidratado. Para la comparación y posterior validación del modelo numérico, la carga se realizará con un flujo calorífico constante sobre la superficie del ladrillo y la descarga será realizada a caudal y temperatura de inicio constantes.

Se simulará la irradiación solar incidente, durante las condiciones diurnas, mediante un flujo de calor constante suministrado mediante una resistencia eléctrica adhesiva flexible de superficie sobre una de las caras laterales. Se supondrá que la transferencia de calor en la pared será predominantemente en la dirección transversal a la pared. Además, se considerará la existencia de simetría en la parte superior e inferior de la unidad y, por consiguiente, en los ensayos dicha simetría se implementará con el suficiente aislamiento para garantizar un comportamiento similar a las condiciones adiabáticas. Además, la otra pared lateral será aislada de forma análoga que las paredes superior e inferior. Por lo tanto, se desprejará la convección en todas las paredes de la unidad. La temperatura del laboratorio se mantendrá constante a 25°C y la temperatura del agua circulada durante la descarga térmica se mantendrá y será suministrada a 25°C.

Los ensayos experimentales se desarrollarán bajo condiciones diferentes para la carga (día) y la descarga térmica (noche).

Durante las condiciones de carga térmica, el agua no se hará circular. Además, la pared que se comporte como pared exterior recibirá un flujo calorífico constante de 350 W/m<sup>2</sup>, simulando la irradiación solar, generado por una resistencia eléctrica flexible adhesiva de superficie. El ensayo finalizará cuando la temperatura del PCM supere 2°C la temperatura de fusión del PCM (29.7°C), con el fin de asegurar que todo el PCM se encuentre en fase líquida.

Durante las condiciones de descarga térmica, el agua será circulada a caudal constante. La resistencia eléctrica flexible adhesiva de superficie estará apagada y no transferirá ningún flujo calorífico. El ensayo finalizará cuando la temperatura del PCM decaiga 2°C de la temperatura de fusión del PCM (29.7°C), con el fin de asegurar que todo el PCM se encuentre en fase sólida.

Para la validación del sistema, se tomarán las temperaturas en 6 puntos de la unidad a ensayar, junto a la temperatura de entrada y salida del agua durante la descarga térmica. Su posición en la unidad puede ser observada en [Figura 27] y [Figura 28]. Además, se controlará el tiempo de carga y descarga térmica.

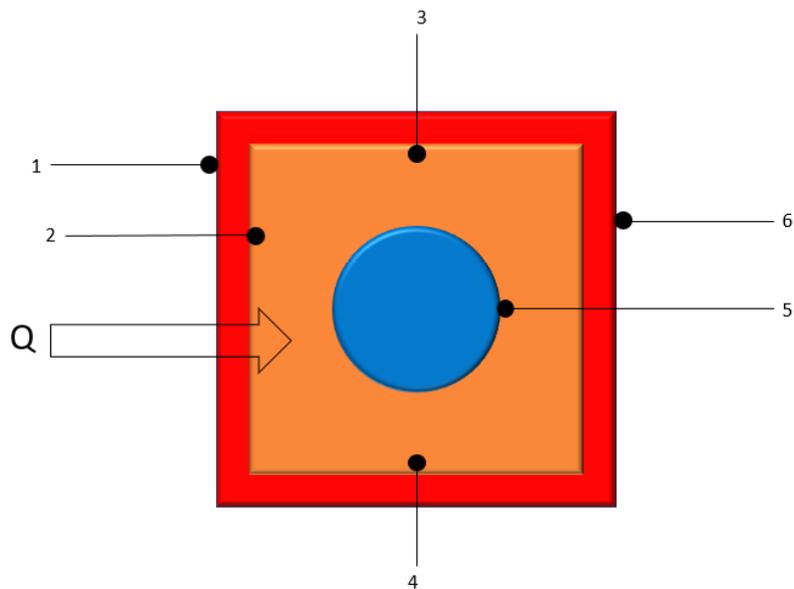


Figura 27. Vista frontal del segmento estudiado con seis de los termopares en sus posiciones

Los puntos 2,3,4 y 5 permitirán la validación del modelo, mientras que los puntos 1, 2 y 6 permitirán conocer cómo es la transferencia del calor hacia la cara interior de la unidad.



Figura 28. Vista de perfil del segmento estudiado con 2 de los termopares en sus posiciones

Los puntos 7 y 8 permitirán obtener la variación de la temperatura del agua entre la entrada y la salida de la unidad ensayada.

El banco de ensayos puede ser observado en [Figura 29]. Los cuadrados de color azul representan los racores de compresión, el trapecio de color azul representa el adaptador de 12 mm a 15 mm con racor de compresión en ambos extremos, los trapecios de color verde representan las espigas de diámetro 8 mm y el elemento de color amarillo representa el codo reductor de 15 mm a 12 mm con racor de compresión en el extremo de diámetro 15 mm.

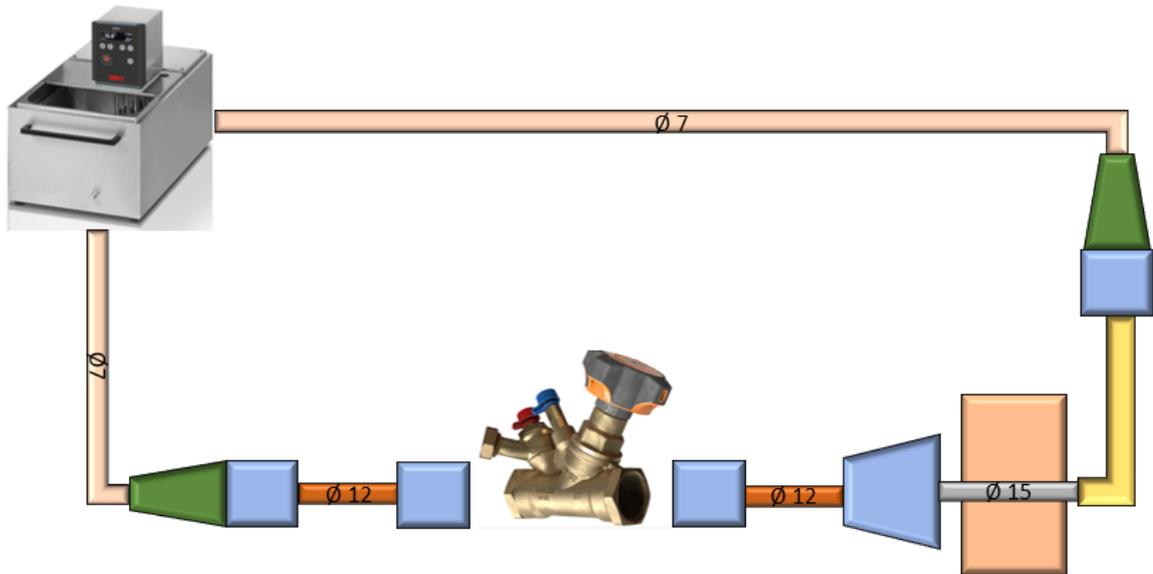


Figura 29. Esquema del banco de ensayos

## Elección de los materiales

La unidad a ensayar del banco de ensayos estará compuesta por: ladrillo, PCM y tubo portante del agua.

La elección del primero de ellos se basa en el estudio de **Hichem et al. (2013)** en el que las dimensiones del orificio del segmento de ladrillo son de 36.7x40x300 mm. No obstante, el ladrillo del estudio, realizado en Argelia, no es común en España, por lo que se escoge un segmento de ladrillo con un orificio de dimensiones 20x40x300 mm.

El PCM escogido es el mismo que en la simulación numérica para poder obtener la validación de los resultados numéricos. Destaca añadir que debido a la porosidad del ladrillo será necesario evitar su migración, es decir, encapsularlo durante la fase líquida con un recubrimiento de una fina capa de plástico transparente.

Finalmente, la elección del tercer elemento está basada en la corrosividad del PCM escogido. **Höhlein et al. (2018)** [14] realizaron un estudio bibliográfico sobre la macroencapsulación metálica de materiales de cambio de fase inorgánicos. Se cita el trabajo de **Brüggemann et al. (2017)** sobre la resistencia a la corrosión de diferentes metales utilizados en la encapsulación de cloruro de magnesio hexahidratado ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ). Se estudiaron el latón, un cobre, un aluminio, un acero inoxidable y un acero dulce. Los resultados obtenidos permitieron concluir que las aleaciones de aluminio y el acero inoxidable eran la mejor opción, mientras que el cobre y el latón se veían seriamente dañados. Por esta razón, se escoge como material para el tubo el acero inoxidable.

## Elección de la resistencia simuladora de irradiancia solar

Siendo las dimensiones de la cara del ladrillo de 50x300 mm, es decir, un área de 0.015 m<sup>2</sup> y conociendo que la irradiancia solar a simular es 350W/m<sup>2</sup>. La potencia requerida será:

$$P = 0.015 \text{ m}^2 \cdot 350 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 5.25 \text{ W}$$

Debido a la baja potencia requerida, se debe optar por resistencias de corriente continua. A continuación, en [Figura 30] se muestran la gama de resistencias eléctricas flexibles adhesivas de superficie de corriente continua ofertadas por la empresa **BrotoTermic**. Se realiza la compra de dos unidades del modelo BSA12V-50x150 con una potencia unitaria de 7.5 W y unas dimensiones de 50x150mm.

Código	Voltios	Wattios	Dimensiones en mm
BSA12V-25x50	12 Vcc	1,25	25x50
BSA12V-50x50	12 Vcc	2,5	50x50
BSA12V-50x75	12 Vcc	3,75	50x75
BSA12V-50x100	12 Vcc	5	50x100
<b>BSA12V-50x150</b>	<b>12 Vcc</b>	<b>7,5</b>	<b>50x150</b>
BSA12V-75x100	12 Vcc	7,5	75x100
BSA12V-75x200	12 Vcc	15	75x200
BSA12V-100x100	12 Vcc	10	100x100
BSA12V-100x150	12 Vcc	15	100x150
BSA12V-150x200	12 Vcc	30	150x200
BSA12V-200x300	12 Vcc	60	200x300
BSA12V-200x400	12 Vcc	80	200x400
BSA12V-D50	12 Vcc	2	Ø 50
BSA12V-D75	12 Vcc	4	Ø 75
BSA12V-D100	12 Vcc	8	Ø 100

Figura 30. Resistencias flexibles adhesivas eléctricas de superficie de corriente continua **BrotoTermic**

Dado que la potencia total resultante es de 15 W, tres veces superior a la deseada, se deberá realizar un ajuste de la corriente con una fuente de alimentación de corriente continua. Los parámetros necesarios para modelizar correctamente la potencia a disipar serán:

$$V = 12 \text{ Vcc}$$
$$I = \frac{P}{V} = \frac{5.25}{12} = 0.44 \text{ A}$$

## Instrumentación

### Medición de temperatura

Para la medición de la temperatura, debido a su precisión se emplearán termopares. Un termopar es un transductor formado por la unión soldada de dos metales distintos por uno de sus extremos, dejando sus otros extremos libres. Permiten convertir diferencias de temperaturas en diferencias de voltaje debido al efecto Seebeck.

El efecto Seebeck, efecto termoeléctrico descubierto por Thomas Johann Seebeck en 1821, es un voltaje, FEM termoeléctrica, generado por la diferencia de temperatura entre los dos extremos de dos metales o semiconductores diferentes que forman un circuito cerrado.

$$E_{Seebeck} = -S \cdot \nabla T$$

El coeficiente de Seebeck entre dos materiales distintos se calcula mediante el cociente entre la diferencia de potencial eléctrico ( $\Delta V$ ) entre la unión y la diferencia de temperatura ( $\Delta T$ ). Se mide en V /K.

Existen diversos tipos de termopares de los cuales en [Tabla 4][15] se recogen algunos de los más utilizados, especificando su nombre, composición y rango de uso.

	<i>Composición</i>	<i>Rango de uso</i>
<i>Tipo B</i>	+Platino-30% Rodio -Platino-6% Rodio	0÷1700°C
<i>Tipo C</i>	+Tungsteno-5% Renio -Tungsteno-26% Renio	0÷2320°C
<i>Tipo E</i>	+Níquel-Cromo -Cobre-Níquel	-200÷900°C
<i>Tipo J</i>	+Hierro -Cobre-Níquel	0÷750°C
<i>Tipo K</i>	+Níquel-Cromo -Níquel-Aluminio	-200÷1250°C
<i>Tipo N</i>	+Níquel-14.2% Cromo-1.4% Silicio -Níquel-4.4% Silicio-0.1% Magnesio	-270÷1300°C
<i>Tipo R</i>	+Platino-13% Rodio -Platino	0÷1450°C
<i>Tipo S</i>	+Platino-10% Rodio -Platino	0÷1450°C
<i>Tipo T</i>	+Cobre -Cobre-Níquel	-200÷350°C

Tabla 4. Tipos de termopares, su composición y rango de uso

Se escogen los termopares de tipo T por su rango de temperatura, ya que las temperaturas a obtener oscilarán entre los 20°C y los 35°C.



Con el fin de hacer circular y controlar el caudal de agua a temperatura constante y evitar la utilización de grandes cantidades de agua durante la realización de los ensayos en condiciones nocturnas, se empleará un baño termostático modelo Huber KISS K15.[Figura 33][16]

Este componente está compuesto por una cuba de 15 L que incluye un sistema electrónico de control de la temperatura a través del cual, con resistencias eléctricas o un sistema refrigerador, modula la temperatura, de forma que la temperatura del fluido interior se mantiene constante.



Figura 33. Baño termostático Huber KISS K15

Son de interés dos de sus características relativas a la bomba que incluye. La bomba, de aspiración, tiene capacidad para bombear hasta 10.5 l/min y suministrar un salto de presión de 0.17 bar (1.7 m.c.a.).

Se considera una velocidad de 0.5 m/s según lo dispuesto en el **Documento Básico HS 4 de Salubridad del Código Técnico de la Edificación**, es decir, un caudal aproximado de 5.3 l/min en la tubería de 15 mm. Con estos datos se procede a comprobar que las pérdidas de carga son inferiores al incremento de presión suministrado por la bomba.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \cdot 0.5 \cdot 0.015}{0.001} = 7500$$

Se puede concluir que el régimen será turbulento. Aunque existen varios números de Reynolds, debido a la existencia de múltiples diámetros de tubería en el banco de ensayos, siendo el más desfavorable es el calculado. Por lo tanto, el factor de fricción de Darcy-Weisbach (f) deberá ser calculado con la primera ecuación de Karmann-Prandtl. Se considera que la rugosidad es despreciable.

$$\frac{1}{f^{\frac{1}{2}}} = 2 \cdot \log_{10} \left( Re \cdot f^{\frac{1}{2}} \right) - 0.8 \rightarrow f = 0.033$$

Finalmente, para calcular las pérdidas se supone que la longitud recorrida por el agua será: 0.5 m de tubo de acero inoxidable, 0.2 m de tubos de cobre y 3 metros de mangueras de silicona. No se consideran las pérdidas de carga singulares debidas a cambios de sección, la válvula de equilibrado STAD u otras.

$$H_p = f \cdot \frac{L \cdot V^2}{D \cdot 2g} = 0.033 \cdot \frac{3.7 \cdot 0.5^2}{0.015 \cdot 19.6} = 0.1 \text{ m}$$

Por lo tanto, se puede concluir que la bomba podrá suministrar la presión necesaria para hacer circular el agua por todo el circuito.

## **Componentes auxiliares**

Las conexiones entre el baño termostático y la válvula de equilibrado STAD y entre el fin del tubo de la pared y el baño termostático se realizarán mediante mangueras de silicona de diámetro 7 mm.

La unión entre la manguera de silicona y el tubo anterior a la válvula de equilibrado STAD se realizará a través de una espiga de diámetro 8 mm y macho G 3/8 junto a un racor de compresión G 3/8 hembra-12 mm.

La unión entre la válvula de equilibrado STAD y los tubos anterior y posterior se realizará a través de un racor de compresión 12 mm - G 3/8 macho y G 3/8 macho-12 mm.

La unión entre el tubo posterior a la válvula de equilibrado STAD y la entrada del tubo de acero inoxidable se realizará a través de un adaptador con racores de compresión en ambos extremos que permita adaptar el flujo de un diámetro de 12 mm a 15 mm.

La unión entre la salida del tubo de acero inoxidable y la manguera de silicona se realizará a través de un codo con racor de compresión en el diámetro 15 mm acoplado a un racor de compresión G 3/8 macho- G 3/8 hembra y una espiga de diámetro 8 mm G 3/8 macho-12 mm.

El tubo de acero inoxidable será mantenido en su posición inicial, evitando su desplazamiento durante el período del ensayo en el que el PCM se encuentra en estado líquido, con la ayuda de pinzas de laboratorio.

## **Protocolo de ensayos**

Con el fin de validar el modelo numérico anteriormente detallado será necesario realizar ensayos experimentales a diferente caudal y potencia de la resistencia eléctrica adhesiva flexible de superficie.

Los caudales sugeridos a ensayar serán ligeramente diferentes debido a la variación del diámetro el tubo, siendo ligeramente superiores, a fin de mantener la velocidad del agua igual que en la simulación numérica. Por lo tanto, estos serán 5.3 l/min, 7.5 l/min y 10.6 l/min.

Mientras que la potencia de la resistencia podrá ser variada entre 300 W/m<sup>2</sup>, 350 W/m<sup>2</sup> y 400 W/m<sup>2</sup> con la consiguiente variación de la intensidad con la fuente de alimentación de corriente continua.

A fin de obtener resultados consistentes será necesario realizar cada ensayo por duplicado con el fin de comparar los resultados y evitar errores.

El protocolo a seguir será:

1. Bomba apagada (agua parada). Resistencia de superficie apagada.
2. Toma de datos de la temperatura del agua y el PCM (temperatura de laboratorio)
3. Se enciende la resistencia de superficie.
4. Toma de datos de la temperatura del agua. Toma de datos de la variación en la temperatura en los puntos a estudiar del PCM y del ladrillo.
5. La resistencia de superficie se apaga tras superar 2°C la temperatura de fusión del PCM.
6. La bomba se enciende (agua circulando).
7. Toma de datos de la temperatura del agua de entrada y salida. Toma de datos de la variación de la temperatura en los puntos a estudiar del PCM y del ladrillo.
8. Cuando la temperatura del PCM decae 2°C de la temperatura de fusión, fin del ensayo.
9. Se apaga la bomba.

En la hoja de ensayos se anotará: la temperatura del laboratorio, la potencia fijada en la resistencia, el caudal de agua y el nombre del fichero donde se guardan los datos registrados de temperatura-tiempo. Además, se registrará la evolución de las temperaturas.

## Conclusiones y líneas futuras

A lo largo de las simulaciones realizadas de la descarga térmica, se observa que el cloruro de calcio hexahidratado solidifica tras 2 horas con un caudal circulante de 4.6 l/min. Además, se constata que un aumento del caudal circulante no disminuye el tiempo de descarga térmica. Por otro lado, se obtiene de los cálculos realizados que el 89.2% de la energía térmica almacenada en el PCM es transferida al agua, siendo el resto pérdidas por las paredes interior y exterior del ladrillo. En cuanto a la variación de la temperatura del agua, se comprueba que el salto es pequeño pero su aplicación a gran escala, una pared, podría revertir de gran interés.

No obstante, dichos resultados deben ser validados mediante pruebas experimentales en un banco de ensayos como el diseñado en el cuarto capítulo, **Diseño del banco de ensayos**. Además, este mismo documento puede servir como guía durante el proceso de construcción y montaje del banco de ensayos, puesto que todo componente, material o instrumentación citado, a excepción del adaptador de 12 mm a 15 mm, se encuentra disponible para su utilización en el laboratorio del departamento.

Por lo tanto, el presente Trabajo de Fin de Grado podría ser continuado, a corto plazo, mediante la realización de los ensayos requeridos para la validación del modelo numérico. A largo plazo y si los resultados permitieran validar el modelo numérico desarrollado en el presente documento, se podría continuar la línea de investigación con la modelización y simulación de una pared completa y su posterior validación experimental.

## Bibliografía

- [1] A. Stepien y L. Barnó, «Breve historia del aislamiento térmico», 2014. <http://aislamientoysostenibilidad.es/del-homo-habilis-al-homo-sapiens-breve-historia-del-aislamiento-termico/> (accedido may 19, 2020).
- [2] E. M. Alawadhi, «Thermal analysis of a building brick containing phase change material», *Energy Build.*, vol. 40, n.º 3, pp. 351-357, 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2007.03.001.
- [3] N. Hichem, S. Noureddine, S. Nadia, y D. Djamila, «Experimental and numerical study of a usual brick filled with PCM to improve the thermal inertia of buildings», *Energy Procedia*, vol. 36, pp. 766-775, 2013, doi: 10.1016/j.egypro.2013.07.089.
- [4] L. Li, H. Yu, y R. Liu, «Research on composite-phase change materials (PCMs)-bricks in the west wall of room-scale cubicle: Mid-season and summer day cases», *Build. Environ.*, vol. 123, pp. 494-503, 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.07.019.
- [5] R. Saxena, D. Rakshit, y S. C. Kaushik, «Phase change material (PCM) incorporated bricks for energy conservation in composite climate: A sustainable building solution», *Sol. Energy*, vol. 183, n.º March, pp. 276-284, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.03.035.
- [6] R. Saxena, K. Biplab, y D. Rakshit, «Quantitative Assessment of Phase Change Material Utilization for Building Cooling Load Abatement in Composite Climatic Condition», *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME*, vol. 140, n.º 1, pp. 1-15, 2018, doi: 10.1115/1.4038047.
- [7] R. Saxena, D. Rakshit, y S. C. Kaushik, «Experimental assessment of Phase Change Material (PCM) embedded bricks for passive conditioning in buildings», *Renew. Energy*, vol. 149, pp. 587-599, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.12.081.
- [8] S. Rucevskis, P. Akishin, y A. Korjakins, «Performance Evaluation of an Active PCM Thermal Energy Storage System for Space Cooling in Residential Buildings», *Environ. Clim. Technol.*, vol. 23, n.º 2, pp. 74-89, 2019, doi: 10.2478/rtuct-2019-0056.
- [9] N. Morovat, A. K. Athienitis, J. A. Candanedo, y V. Dermardiros, «Simulation and performance analysis of an active PCM-heat exchanger intended for building operation optimization», *Energy Build.*, vol. 199, pp. 47-61, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.06.022.
- [10] M. C. Peel, B. L. Finlayson, y T. A. McMahon, «Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification», *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 11, pp. 1633-1644, 2007, doi: doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007.
- [11] Climate Data, «Climate Tissemsilt». <https://en.climate-data.org/afrika/algeria/tissemsilt/tissemsilt-45067/?amp=true> (accedido jun. 08, 2020).
- [12] Ministère de la l'Énergie de la République Algérienne Démocratique et Populaire, «Energies Nouvelles, Renouvelables et Maitrise de l'Énergie», 2019. <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>.
- [13] J. M. Marín, C. Monné, y J. Uche, *Transferencia de calor*. Zaragoza, 2007.
- [14] S. Höhle, A. König-Haagen, y D. Brüggemann, «Macro-encapsulation of inorganic phase-change materials (PCM) in metal capsules», *Materials (Basel)*, vol. 11, n.º 9, 2018,

doi: 10.3390/ma11091752.

- [15] OMEGA, «Termopar», 2020. <https://es.omega.com/prodinfo/termopares.html> (accedido jun. 01, 2020).
- [16] Huber, «Huber KISS K15». [https://www.huber-online.com/es/product\\_datasheet.aspx?no=2010.0017.98](https://www.huber-online.com/es/product_datasheet.aspx?no=2010.0017.98) (accedido jun. 01, 2020).