



Universidad
Zaragoza



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

Trabajo de Fin de Grado

Diseño, construcción y puesta en marcha de un banco de ensayos de intercambiadores de calor de suspensiones de PCM – agua

-

Design, construction and commissioning of a test bench for PCM slurries – water heat exchangers

Autor/es

Guillermo Sanz Sanchez

Director/es

Mónica Delgado Gracia

José María Marín Herrero

Diseño, construcción y puesta en marcha de un banco de ensayos de intercambiadores de calor de suspensiones de PCM – agua

RESUMEN

En este Trabajo de Fin de Grado, se continúa con la labor realizada por el alumno de la Universidad de Zaragoza, Jorge Torrubia, dentro del marco del proyecto de I+D del Ministerio de Economía y Empresa “HYBRITES”. El objetivo de este estudio es el diseño, construcción y puesta a punto de un banco de ensayos con el que determinar las condiciones en las que una suspensión con un fluido de cambio de fase (PCM) intercambia calor con agua en diferentes configuraciones de intercambio de calor.

En primera instancia se llevó a cabo una revisión bibliográfica, tanto de los materiales de cambio de fase, como del Trabajo de Fin de Grado anterior. Una vez concluida la revisión, se ha juzgado conveniente realizar una serie de cambios en la instalación inicial. Se ha diseñado y añadido un intercambiador de calor secundario para garantizar el calentamiento del PCM sin dañarlo, se ha elegido la configuración y los materiales más favorables para la instalación de fontanería, se ha realizado la lista de componentes y finalmente se ha lanzado su compra. En segunda instancia se ha construido el banco de ensayos y se han realizado las pruebas de caudal, dejando el banco de ensayos listo para empezar a ensayar la transmisión de calor.

Nomenclatura:

Variable	Nombre de la variable	Unidades
Q	Calor	[J]
m	Masa	[kg]
c_p	Calor específico	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
h_{sl}	Calor latente específico	[J·kg ⁻¹]
T	Temperatura	[K]
A	Área	[m ²]
L	Longitud	[m]
W	Anchura	[m]
N_p	Numero de placas	[-]
Φ	Factor de ampliación de superficie	[-]
ΔT_{ml}	Diferencia de temperatura media logarítmica	[K]
h_f	Coeficiente de transferencia de calor del fluido frio	[W·K ⁻¹ ·m ⁻²]
h_c	Coeficiente de transferencia de calor del fluido caliente	[W·K ⁻¹ ·m ⁻²]
U	Coeficiente de transferencia de calor global	[W·K ⁻¹ ·m ⁻²]
\dot{W}	Potencia	[W]
ρ	Densidad	[kg·m ⁻³]
Nu	Número de Nusselt	[-]
Re	Número de Reynolds	[-]
Pr	Número de Prandtl	[-]
f	Coeficiente de fricción	[-]
μ	Viscosidad dinámica	[kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹]
μ_s	Viscosidad dinámica en la superficie	[kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹]
D	Diámetro	[m]
λ	Conductividad térmica	[W·K ⁻¹ ·m ⁻¹]
ν	Viscosidad cinemática	[m ² ·s ⁻¹]
g	Aceleración de la gravedad	[m·s ⁻²]
Δp_{ff}	Pérdida de carga	[Pa]
D_h	Diámetro hidráulico	[m]
k_i	Constante de pérdidas localizadas	[-]
β	Angulo de Chevron	[°]
Δp_{acc}	Pérdidas de carga en accesorios	[kPa]
Δp_{cond}	Pérdidas de carga en conductos	[kPa]
Δp_g	Perdidas de carga asociadas a la diferencia de altura	[kPa]

Contenido

RESUMEN	1
Nomenclatura:	2
1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. Antecedentes y contexto del TFG	4
1.2. Objetivos y alcance.....	5
2. REVISION BIBLIOGRAFICA	6
2.1. Revisión bibliográfica de los PCMs.....	6
2.1.1. Introducción a las suspensiones de materiales de cambio de fase	6
2.1.2. Clasificación de los diferentes PCMs.....	7
2.1.3. Características de la suspensión de parafina a ensayar.	8
2.2. Revisión de los intercambiadores de calor.	9
2.2.1. Intercambiadores de calor de placas.	10
2.2.2. Método MLDT.	10
2.2.3. Convección forzada interior.	11
2.3. Revisión de instalaciones de fluidos.....	12
2.3.1. Pérdidas de carga en conductos	12
2.3.2. Pérdidas de carga en accesorios	13
2.4. Revisión de la última instalación propuesta	14
3. REDISEÑO DE LA INSTALACIÓN ANTERIOR	14
3.1. Identificación de los problemas presentes	15
3.2. Análisis de soluciones.....	15
3.3. Diseño de la instalación.....	15
3.3.1. Funcionamiento de la instalación	15
3.3.2. Diseño de los nuevos circuitos	16
3.3.3. Elección y diseño del intercambiador secundario.....	17
3.3.4. Elección de los componentes de la instalación.....	21
4. MONTAJE DE LA INSTALACIÓN	26
4.1. Elaboración de la lista de componentes	26
4.2. Elaboración del plano de montaje	27
4.3. Montaje de la instalación.....	28
5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES	29
BIBLIOGRAFIA	30

1. INTRODUCCIÓN

Desde que empezó la revolución industrial en el siglo XVIII en Gran Bretaña, la humanidad no ha parado de incrementar el consumo de combustibles fósiles y de emitir una cantidad cada vez mayor de gases de efecto invernadero, como el CO₂ y el CH₄. Estos gases son los principales causantes del cambio climático que ya ha aumentado la temperatura media del planeta un grado y amenaza con aumentarlo hasta los 3 grados si no se toman medidas para mitigarlo. Esto llevaría a la sociedad actual a una crisis sin precedentes.

Por ello, recientemente se está volviendo a potenciar la instalación de los sistemas de generación de energía renovables, que no dependen de la combustión de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo o el gas natural. Desafortunadamente, estas nuevas fuentes de energía renovables son inherentemente de carácter intermitente, pues dependen de condicionantes externos. En el caso de la energía solar fotovoltaica, esta depende de la cantidad de radiación solar que incide en la superficie con captadores fotovoltaicos y en el caso de los sistemas de generación eólicos, de la intensidad del viento. Por esta razón es necesario desarrollar e implementar métodos de acumulación de energía para la gestión de una demanda variable de la energía eléctrica.

En este contexto se desarrollan instalaciones de acumulación de energía como la generación de hidrógeno con la potencia eléctrica sobrante de la red para su posterior quemado, el cual no genera CO₂, las baterías electroquímicas como las baterías de ion-litio o la acumulación de energía térmica. Dentro de este último método para acumular energía, existen tres formas de acumulación de calor diferentes. La primera consiste en calentar un material de forma que la energía se acumule en forma de calor sensible, la segunda mediante cambios en la composición química del material y la tercera en calentar un material como en el primer caso, pero esta vez aprovechando el cambio de fase que permite aumentar la cantidad de energía almacenada. A un material que posee una temperatura de cambio de fase adecuada para una aplicación determinada, se le llama material de cambio de fase.

A su vez, dentro del almacenamiento de energía térmica por calor latente, existen aplicaciones que van desde las bajas temperaturas de cambio de fase hasta varios cientos de grados. Estos materiales de cambio de fase de alta temperatura, se utilizan por ejemplo en las centrales solares térmicas de sales fundidas, que como su nombre indica, utilizan la energía solar para fundir determinadas sales y utilizar estas en intercambiadores de calor con agua, para generar vapor. Por otra parte, existen los sistemas de baja temperatura que son susceptibles de ser integrados en los hogares, para almacenar, o bien calor o bien frío para ser utilizado cuando convenga. En la bibliografía científica se designan a los materiales de cambio de fase por sus iniciales en inglés (*Phase Change Materials*, PCM)

1.1. Antecedentes y contexto del TFG

El presente TFG se ha desarrollado en el marco de un proyecto de investigación del Ministerio de Economía y Competitividad con título: “Integración de almacenamiento térmico en la hibridación de la generación en sistemas de calefacción y refrigeración de distrito con bombas de calor, energía solar y biomasa” con referencia: ENE2017-87711-R. Este proyecto tiene como uno de sus objetivos analizar de forma experimental sistemas de almacenamiento de energía

térmica latente a corto plazo con suspensiones de materiales de cambio de fase con el fin último de maximizar la producción renovable en estas plantas de calefacción y refrigeración de distrito.

El presente TFG es fruto de los resultados de un estudio numérico en el que se simuló la integración de un sistema de almacenamiento latente con suspensiones de materiales de cambio de fase como un sistema acumulador descentralizado en una red de distrito de calefacción. Los resultados mostraron que su integración lograba reducir el pico de demanda, permitiendo la conexión así de más bloques de edificios a la red de distrito saturada. Si bien en el modelo numérico se contaba con ensayos experimentales del depósito a menor escala, para la simulación de los intercambiadores de placas no existían ensayos, teniendo que realizar diversas hipótesis. Ello ha motivado el diseño de la instalación contemplada en este TFG.

1.2. Objetivos y alcance

El principal objetivo de este TFG es ensayar una suspensión de material de cambio de fase (PCM) en agua, para determinar su comportamiento con distintas configuraciones de intercambio de calor para posteriormente ser aplicado a sistemas de calefacción de distrito. Se ha diseñado, construido y puesto en marcha un banco de ensayos de intercambiadores de calor suspensiones de PCM-agua con este fin.

Las tareas que se han llevado a cabo para cumplir con el objetivo de construir el banco de pruebas han sido:

1. Revisión bibliográfica de las suspensiones de PCM, de un primer diseño de la instalación (Torrubia 2018) y determinación de los elementos a completar/modificar.
2. Integración de un nuevo sistema para la calefacción del PCM, consistente en un intercambiador secundario de placas, necesario para el correcto ensayo en la instalación. Cálculo y diseño del nuevo intercambiador.
3. Adaptación de la instalación de fontanería, para incorporar el nuevo intercambiador de calor.
4. Selección de los componentes necesarios para construir dicha instalación, teniendo en cuenta los costes, la fiabilidad y las características del PCM, para un correcto funcionamiento.
5. Compra y montaje de la instalación.
6. Realización de ensayos de caudal y de operación.

2. REVISION BIBLIOGRAFICA

2.1. Revisión bibliográfica de los PCMs.

2.1.1. Introducción a las suspensiones de materiales de cambio de fase

En los últimos años, se ha propuesto una nueva técnica para utilizar los materiales de cambio de fase en sistemas de almacenamiento de energía, intercambiadores de calor y sistemas de control térmico. Esta nueva técnica consiste en formar un fluido bifásico, a partir de la mezcla de un fluido, como es el agua, y un PCM, como es la parafina, dando lugar a un fluido de almacenamiento de energía térmica latente.

Estos nuevos fluidos ofrecen muchas ventajas y pueden ser usados como material de almacenamiento térmico como fluido caloportador (Royon and Guiffant 2008) ya que presentan las siguientes características:

1. Alta capacidad de almacenamiento durante el cambio de fase
2. Posibilidad de usar el mismo medio tanto para transportar como para almacenar energía, puesto que estas suspensiones son bombeables (reduciendo así las pérdidas de calor)
3. Transferencia de calor a una temperatura aproximadamente constante
4. Elevado índice de transferencia de calor, debido al elevado ratio superficie / volumen
5. Menores potencias de bombeo, como consecuencia de la reducción del caudal másico debido a la mayor capacidad calorífica
6. Mejor capacidad de enfriamiento que con fluidos caloportadores convencionales, como consecuencia de la disminución de la temperatura del fluido por la mayor capacidad calorífica.

Como ventajas adicionales, estos novedosos fluidos presentan una densidad de almacenamiento de energía térmica mayor, haciéndolos ventajosos frente a los sistemas convencionales de almacenamiento de tipo sensible en agua. Además, pueden resultar competitivos frente a los depósitos con el PCM macroencapsulado. De acuerdo a la literatura consultada, los depósitos con el PCM macroencapsulado presentan valores de porosidad de 0.37 a 0.47 (Bédécarrats et al. 1996). Esto significa que el volumen de PCM junto con su recipiente contenedor representa aproximadamente el 53-63% del volumen del sistema de almacenamiento térmico. Por lo tanto, suspensiones con una concentración volumétrica de PCM de aproximadamente del 30-40% podrían ser competitivas para su uso como sistemas de almacenamiento de energía térmica. Además, los tiempos de respuesta podrían ser más pequeños usando estas emulsiones de PCM o suspensiones de PCM microencapsulado, que en el caso de PCM macroencapsulado. Los depósitos serán más simples, ya que no existe la necesidad de macroencapsular, y se podrían usar depósitos convencionales (Chen et al. 2000; Cho and Choi 2000).

2.1.2. Clasificación de los diferentes PCMs.

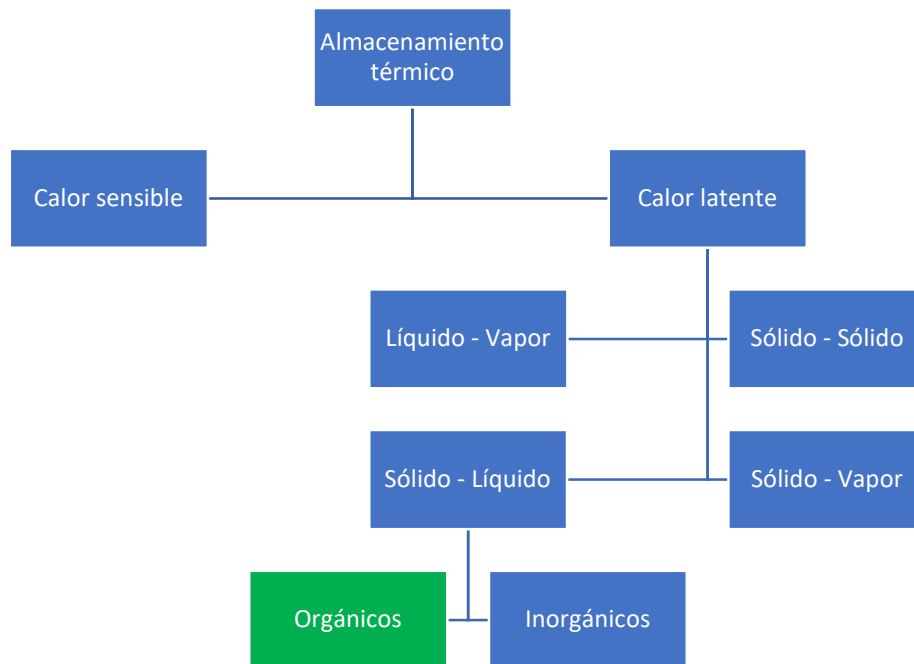


ILUSTRACIÓN 1 Clasificación de materiales de cambio de fase

Como se puede observar en la Ilustración 1, existen diferentes tipos de cambio de fase que diferentes materiales experimentan y que se encuentran en la Ilustración 1. Estos son los cambios de fase líquido – vapor, sólido – sólido, sólido – líquido y sólido – vapor. De estos cambios de fase, el más conveniente para ser implementado en el almacenamiento de energía es el cambio de líquido a sólido y viceversa, debido a la poca variación volumétrica en el cambio de fase (Dolado, Medrano, and Cabeza 2007).

Continuando con la Ilustración 1 se puede observar que dentro de los PCMs que cambian de un estado sólido a otro líquido, existen los orgánicos y los inorgánicos. Los inorgánicos están compuestos en su mayoría por sales hidratadas como pueden ser la $\text{KF} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, la $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ o la $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Entre sus ventajas se encuentra su bajo coste, su elevada conductividad térmica, su alta capacidad de almacenamiento térmica, una temperatura de cambio de fase bien definida, que no son inflamables y que son biodegradables. Por el contrario, son susceptibles de sufrir subenfriamiento, necesitan aditivos y pueden ser corrosivos.

Por otra parte, están los PCMs orgánicos. Estos son mayoritariamente parafinas y sus ventajas radican en ser más fáciles de manipular, son más estables, no presentan subenfriamiento, no son corrosivos, son reciclables y poco nocivos para el medio ambiente. Sin embargo, sus inconvenientes son su menor entalpía de cambio de fase, su baja conductividad térmica, su mayor cambio en el volumen al cambiar de fase y su inflamabilidad (Oliver, Neila, and García-Santos 2012).

La ilustración 3 recoge los distintos tipos de PCM relacionando su temperatura de cambio de fase y su entalpía de cambio de fase en kJ/l.

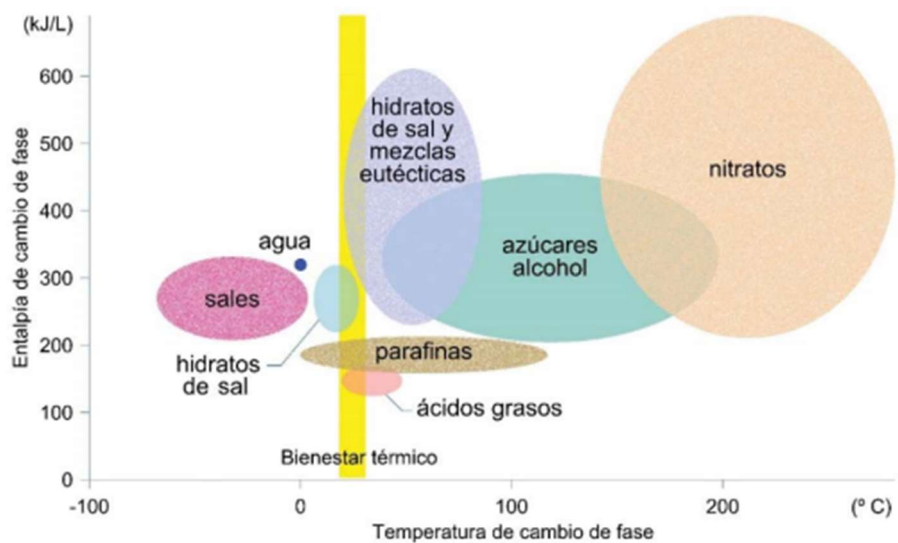


ILUSTRACIÓN 2 Clasificación de distintos PCM (Rodríguez Ubiñas 2015)

2.1.3. Características de la suspensión de parafina a ensayar.

Una suspensión de PCM es un fluido compuesto por una fase continua, usualmente agua, que se encarga de transportar suspendidas las partículas de la fase dispersa compuesta por PCM. Es común la adición de un surfactante para influir positivamente en el tamaño de las partículas en suspensión; sus efectos serán explicados a continuación. Las suspensiones con PCMs son necesarias cuando se quiere que el PCM circule por la instalación, en lugar de quedarse almacenado en un depósito.

La suspensión de PCM que va a ser ensayada en la instalación a diseñar es una emulsión de parafina en agua. La adición a la mezcla de un elemento surfactante previene la unión de las partículas de parafina en gotas cada vez mayores, para así mantener una distribución homogénea de gotas de parafina por todo el volumen del agua. En la figura 4 se muestra la diferencia entre no añadir un surfactante a la mezcla o hacerlo.

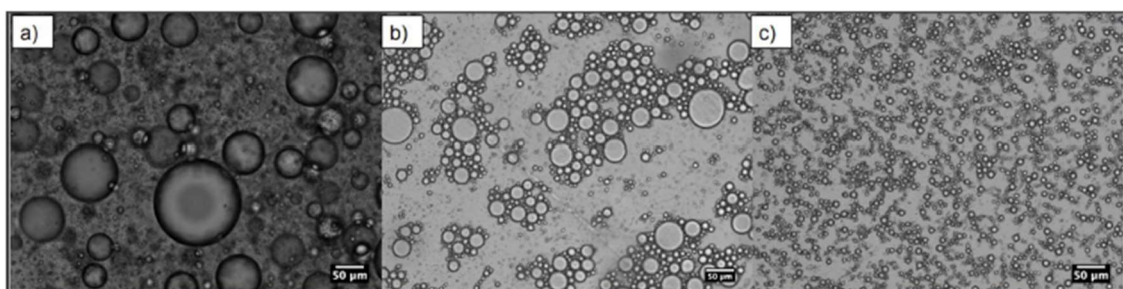


ILUSTRACIÓN 3 Una emulsion con a) nada, b) poca y c) adecuada cantidad de surfactante (Yegya Raman and Aichele 2019)

Como se puede observar, en la ilustración 4 a) no hay ningún surfactante añadido a una mezcla de agua en aceite, mientras que en la ilustración 4 b) y c) se han añadido surfactantes. La diferencia entre b) y c) radica en la cantidad de surfactante, siendo el escenario c) el de mayor concentración de surfactante. Como se puede observar, existe un efecto significativo en el

tamaño de las gotas de agua en función de la cantidad de surfactante, si las gotas han sido estabilizadas por un agente parcialmente hidrofóbico (Yegya Raman and Aichele 2019).

El funcionamiento del surfactante consiste en aprovechar que las partículas del mismo están formadas por un lado hidrofóbico y por otro hidrofílico. Esto causa que el lado hidrofóbico se adhiera a la partícula de parafina dejando el lado hidrofílico hacia el lado del agua. Esto crea una capa que con su tensión superficial mantiene las gotas de parafina separadas entre si y con un tamaño que viene definido por la propia tensión superficial que el surfactante sea capaz de proveer.

La fracción másica que representa la parafina en el agua es del 60%. Por otra parte, las características termo-físicas de esta emulsión varían con su temperatura y son recogidas en la memoria del Trabajo de fin de grado de Jorge Torrubia, puesto que una de sus labores consistió en caracterizar las propiedades termo-físicas y reológicas de la emulsión de PCM. Las temperaturas de interés para este proyecto son aquellas próximas a la temperatura de fusión, las próximas a la temperatura de solidificación y la media de las propiedades registradas durante el cambio de fase. Estos dominios de temperatura de interés son:

1. PCM en estado sólido. Temperatura de 30 a 35°C.
2. PCM en transición. Temperatura de 35 a 50°C.
3. PCM en estado líquido. Temperatura de 50 a 55°C.

Las propiedades medidas para estos rangos de temperatura se muestran a continuación en la Tabla 1(Torrubia 2018).

Regiones	Viscosidad, μ (Pa·s)	Densidad, ρ (kg/m ³)	c_p (J/(kg·K))	Conductividad, λ (W/(m·k))	Prandtl (-)
Fase sólida	0,0405	920	4129,8	0,34	489
30-35 °C					
Cambio fase	0,0439	912	7461,9	0,29	1122
35-50 °C					
Fase líquida	0,1421	885	3046,7	0,24	1784
50-60 °C					

TABLA 1. Propiedades termofísicas y reologías de la emulsión de parafina a ensayar (Torrubia 2018)

2.2. Revisión de los intercambiadores de calor.

En los intercambiadores de calor existen diferentes configuraciones que tienen que ver con su geometría, la dirección de los flujos y la existencia o ausencia de mezcla de cada fluido consigo mismo entre pasos. (Marín and Guillén 2013).

2.2.1. Intercambiadores de calor de placas.

En este trabajo se utilizan dos intercambiadores de calor. Ambos son intercambiadores LPIC-01 proporcionados por la empresa Lapesa. Se trata de dos intercambiadores de placas y se usarán con flujos a contra corriente. Ambos flujos están separados por placas que pueden o no estar corrugadas para maximizar el área de intercambio y disponen de 4 perforaciones. Dependiendo de donde se coloquen las juntas de estanqueidad, se dirige al flujo por unos canales u otros. A continuación, se muestra un esquema del funcionamiento de un intercambiador de placas.

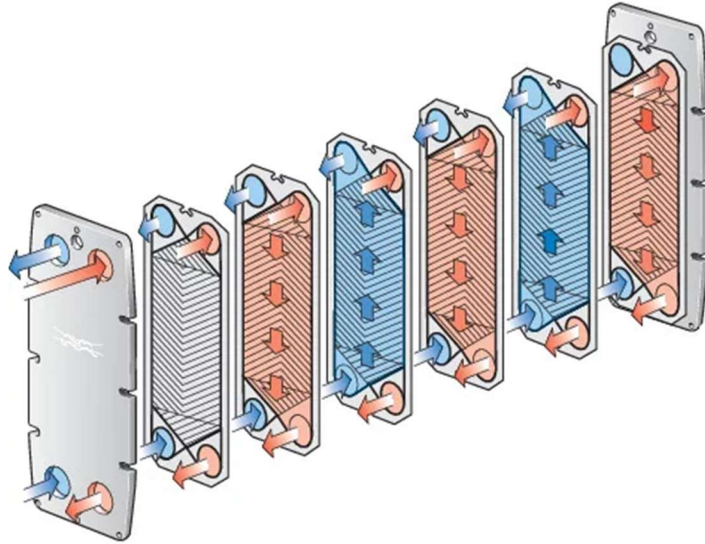


ILUSTRACIÓN 4 Funcionamiento de un intercambiador de placas

El área de intercambio expresada en la ecuación(1), es función de la longitud L y anchura W de las placas, del número de placas N_p y del factor de ampliación de la superficie Φ (Marín and Guillén 2013).

$$A = L W N_p \Phi \quad (1)$$

Otros parámetros geométricos de interés son la separación entre placas, el ángulo de Chevron θ , que indica la inclinación respecto de la vertical de la placa del patrón de ondulaciones de la corrugación y la distancia entre corrugaciones Λ (Táboas Touceda 2007).

2.2.2. Método MLDT.

A la hora de dimensionar un intercambiador de calor existen varios métodos de cálculo en función de las necesidades del calculista. En este caso se dispone de la diferencia de temperaturas que se quiere conseguir y, por lo tanto, las propiedades de ambos fluidos como

datos de entrada. De salida se desea obtener el área de intercambio de calor. Esto es un problema cerrado y la metodología está bien definida en el libro antes mencionado.

Esta tipología de cálculo se corresponde con el método MLTD (Media Logarítmica de la Diferencia de Temperaturas) de dimensionado de intercambiadores, el cual proporciona el área de intercambio.

Como se menciona, este método consiste en hallar la media logarítmica de la diferencia de temperaturas que se da en el intercambiador de calor con la ecuación (2). Luego, mediante el cálculo del coeficiente de transmisión global de la ecuación (3) y el calor intercambiado de la ecuación (4), se halla el área de intercambio con la ecuación (5).

$$\Delta T_{ml} = \frac{t_{c,s} - t_{f,e} - (t_{c,e} - t_{f,s})}{\ln \left(\frac{t_{c,s} - t_{f,e}}{t_{c,e} - t_{f,s}} \right)} \quad (2)$$

$$U = \left(\frac{1}{h_f} + \frac{1}{h_c} \right)^{-1} \quad (3)$$

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p (t_2 - t_1) \quad (4)$$

$$A = \frac{\dot{Q}}{U \Delta T_{ml}} \quad (5)$$

2.2.3. Convección forzada interior.

La ecuación (3) del apartado anterior exigen el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor convectivos para ambos fluidos y para ello debe conocerse el diámetro hidráulico de los canales por los que circulan ambos.

$$D_h = \frac{S}{P_m} \quad (6)$$

Para la determinación de la conductividad térmica de la emulsión de parafina se han realizado una serie de ensayos propios cuyos resultados se recogen en la tabla 1. Los coeficientes de convección se determinaron través de correlaciones empíricas apropiadas.

Las variables necesarias para determinar el número de Nusselt no tienen por qué ser las mismas en todas las correlaciones debido a que existe un numero apreciable de correlaciones distintas, cada una pensada para ser usada en distintas condiciones del flujo o para obtener distintas precisiones. Distintos autores han desarrollado sus propias correlaciones. Algunas de las más conocidas son: La correlación de Gnielinski, la correlación de Colburn o la correlación de Sieder-Tate.

Sin embargo, debido al carácter especial de la emulsión de parafina que se va a usar como fluido de cambio de fase y debido a que el caso de convección forzada interior presente en este estudio no se da dentro de una geometría simple, sino que se da en el seno de un intercambiador de calor de placas corrugadas, habrá que buscar correlaciones para obtener el número de Nusselt, con la mayor precisión posible para este caso. Mas adelante, en el apartado 3.3.3, se explicará que correlaciones han sido usadas y el porqué de su elección.

2.3. Revisión de instalaciones de fluidos

Para poder elegir la bomba que vaya a impulsar el fluido a través de la instalación con el rango de caudales deseados, es necesario calcular las pérdidas de carga que va sufrir.

2.3.1. Pérdidas de carga en conductos

Es posible calcular el factor de fricción utilizando correlaciones tal y como se hace para calcular los coeficientes de convección explicados anteriormente. Para un flujo laminar en un conducto circular, la fórmula para obtener el factor de fricción es simple:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (7)$$

Sin embargo, cuando se trata de un flujo turbulento, existen varias correlaciones que son susceptibles de ser usadas en función del dominio en el cual se sitúa el número de Reynolds o la rugosidad del conducto. Una de estas correlaciones, ampliamente usada, es la ecuación de Karmann-Prandtl (8):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (8)$$

Una vez hallado el factor de fricción, la fórmula de Darcy-Weisbach (9) permite calcular las pérdidas de carga (José 2002).

$$\Delta p_f = f \frac{L}{D} \rho \frac{v^2}{2} \quad (9)$$

2.3.2. Pérdidas de carga en accesorios

Las pérdidas de carga que experimenta el flujo en los accesorios, como válvulas, caudalímetros, derivaciones, codos o curvas se denominan singulares y habitualmente se calculan mediante coeficientes obtenidos experimentalmente.

Accesorio	Coeficiente de perdidas k_i
Válvulas de cierre 3/4"	0,29
T compresión 3/4" divergente	0,2
T compresión 3/4" directa	0,29
T compresión 3/4" derivación	3
Codos	0,63

TABLA 2 Coeficientes de perdidas de los distintos accesorios

En la tabla 2 se muestran los coeficientes de pérdidas singulares para los distintos accesorios presentes en la instalación, que permiten calcular dichas pérdidas mediante la ecuación (10), (José 2002).

$$\Delta p_i = k_i \frac{v^2}{2g} \quad (10)$$

En los componentes de la instalación como los caudalímetros o grupos calefactores, los fabricantes adjuntan expresiones o gráficas con las cuales es posible hallar sus pérdidas de carga, normalmente en función del caudal que circule por ellos.

Para concluir, las pérdidas de carga en los intercambiadores de calor de placas corrugadas presentan un caso concreto a la hora de ser calculadas. Lo primero a tener en cuenta es que, en un intercambiador de este tipo, el flujo se reparte uniformemente entre el número de canales que compongan el intercambiador. Esto quiere decir que, a mayor número de placas, habrá un mayor número de canales entre los cuales el flujo será dividido. Al aumentar el número de canales, aumenta el área transversal total, que es la suma de las áreas transversales de los canales y con esto disminuye la velocidad a la cual circula el fluido. Por una parte, esto aumenta el área de intercambio y, por otra, disminuye considerablemente las pérdidas de carga ya que estas son función de la velocidad del fluido al cuadrado. Esta propiedad es útil ya que permite adaptar el intercambiador a las capacidades de la bomba disponible.

Dicho esto, de la bibliografía se obtienen las siguientes expresiones para calcular las pérdidas de carga de los intercambiadores de placas (Marín and Guillén 2013).

$$\Delta p_{HX} = f \frac{L}{D_h} \frac{v^2 \rho}{2} \quad (11)$$

$$\frac{1}{f} = \frac{\cos \beta}{\sqrt{b \tan \beta + c \sin \beta + \frac{f_0}{\cos \beta}}} + \frac{1 - \cos \beta}{\sqrt{f_1}} \quad (12)$$

Como se puede observar en la fórmula (11) y en la fórmula (12), la pérdida de carga en estos intercambiadores es función de una serie de constantes, del diámetro hidráulico de los canales del intercambiador y del ángulo de Chevron. Más adelante, en el apartado de cálculo de pérdidas de carga de la instalación se explicará cómo se obtienen dichas constantes y los distintos sub factores de fricción.

2.4. Revisión de la última instalación propuesta

En su trabajo de fin de grado Jorge Torrubia (Torrubia 2018) diseñó la que sería la primera versión del banco de ensayos pensado para analizar la transferencia de calor entre el agua y una suspensión de PCM con distintas configuraciones de intercambiadores de calor. Se trata de una instalación que consta de dos circuitos. Uno para el lado del agua y otro para el lado del material del cambio de fase. La función de esta instalación es la de asegurar las condiciones de temperatura y caudal necesarias para que se dé el cambio de fase en el PCM en suspensión. Además, la instalación deberá servir tanto para ensayar la fusión del PCM como la solidificación del mismo.

El primer diseño, usaba baños termostáticos de 4 kW y acumuladores, para lograr las temperaturas deseadas para los fluidos de servicio y operación. Luego contaba con un solo intercambiador, el de ensayo, para observar el intercambio. Este intercambiador sería un intercambiador de placas corrugadas de 30 cm de longitud, 7 cm de anchura, 1 mm de espesor de placa y 6 placas. Con estas dimensiones se lograría la potencia deseada con un área de intercambio de 0.16 m^2 y una pérdida de carga de 0.6 bar para el agua y 2 bar para el PCM. En términos de caudal, esta instalación haría circular 6 l/min de agua y PCM. Por otra parte, se toma la rosca gas de 3/4 de pulgada como diámetro nominal para toda la instalación debido a las dimensiones de las tomas de los baños termostáticos.

Posteriormente el personal del área de Máquinas y Motores Térmicos, vio pertinente la sustitución del método anterior por el cual se calentaba tanto el agua como el PCM, por una resistencia calefactora. Este cambio se debió a que la resistencia calefactora proporcionaba una mayor potencia y una respuesta más rápida a la hora de modificar la temperatura de consigna deseada. Esta sería la segunda versión de la instalación y presentaba de nuevo una serie de inconvenientes que pretenden ser solventados en este trabajo de fin de grado.

3. REDISEÑO DE LA INSTALACIÓN ANTERIOR

Como se comenta en el apartado anterior, la última versión de la instalación de ensayo de PCMs utilizaba una resistencia calefactora para aumentar la temperatura tanto del PCM como del agua. Pero esto presenta un problema. La suspensión de parafina empleada en la instalación de ensayo realiza el cambio de fase entre los $35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y los $55 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Por lo tanto, es necesario alcanzar temperaturas ligeramente superiores a los $55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ con la finalidad de asegurar la completa fusión de la suspensión.

3.1. Identificación de los problemas presentes

La resistencia calefactora es una buena solución para acabar con los problemas de baja potencia térmica que presentaban los acumuladores con serpentín que se proponían anteriormente. Los acumuladores con serpentín, estaban limitados por la convección natural del medio acumulador a la hora de transmitir el calor, por lo que se hubiese necesitado un mayor volumen de acumulación, lo que no era práctico. Sin embargo, la resistencia que se proponía era la Electricfor GCP-TR-INOX-II0120, capaz de suministrar 12kW de potencia a un fluido similar al agua, que circula por su interior por lo que se espera que la superficie de la resistencia eléctrica esté a varios cientos de grados Celsius.

Por lo tanto, como la suspensión de parafina se trata de un fluido de investigación del cual se desconoce su comportamiento químico y estabilidad, para evitar posibles deterioros de la resistencia y dado que el suministrador solo asegura las condiciones de operación al trabajar con agua o aceite térmico, se prefiere buscar un método alternativo para aumentar la temperatura del PCM.

3.2. Análisis de soluciones

Tras analizar el problema anteriormente comentado, fueron propuestas nuevas alternativas para aumentar la temperatura del PCM que ni tuviese los problemas de potencia térmica que presentaban los baños termostáticos ni fuesen tan agresivos como la resistencia calefactora.

Una de las nuevas propuestas consistía en transformar la instalación para que, en vez de estar formada por dos circuitos, uno para el agua y otro para el PCM, se emplearan tres. Dos para agua y uno para el PCM. En esta nueva instalación se emplearían a su vez, dos intercambiadores. Un intercambiador serviría para ensayar el intercambio de calor entre el agua y la suspensión de parafina y el otro sería un intercambiador que se encargaría de deshacer los cambios en el PCM provocados por el primero. Dicho de otra manera, habría un intercambiador de calor secundario que se encargaría de calentar el PCM en el ensayo de solidificación y de enfriarlo en el ensayo de fusión.

3.3. Diseño de la instalación

3.3.1. Funcionamiento de la instalación

El nuevo diseño está pensado para funcionar de la siguiente manera: En primer lugar, hay un sector de la instalación pensado para realizar el ensayo de intercambio de calor en un intercambiador primario o de ensayo. Este sector se encarga de suministrar al intercambiador de ensayo agua a 10 °C, la suspensión con el PCM a 50 °C y de retirar ambos a la salida del intercambiador para ser enviados al otro sector, en el caso del ensayo de solidificación y

viceversa en el ensayo de fusión. En segundo lugar, está el sector de servicio. En esta parte de la instalación se tratan los flujos de salida del sector de ensayo para devolver estos flujos al estado inicial, anterior al ensayo en el sector de ensayo. Esto es, calefactar el agua y refrigerar el PCM cuando se ensaya la fusión y calefactar el PCM en el ensayo de solidificación.

3.3.2. Diseño de los nuevos circuitos

Como se comenta en la introducción de este apartado, la solución al problema de la calefacción del PCM pasaba por la inclusión de un nuevo circuito. Con este nuevo circuito se pretende, a diferencia de en diseños anteriores, utilizar el agua como fluido de servicio para tratar el PCM en un intercambiador secundario. A continuación, en la ilustración 6 se muestra un esquema de la instalación pensado para visualizar con facilidad el modo de operación de la instalación.

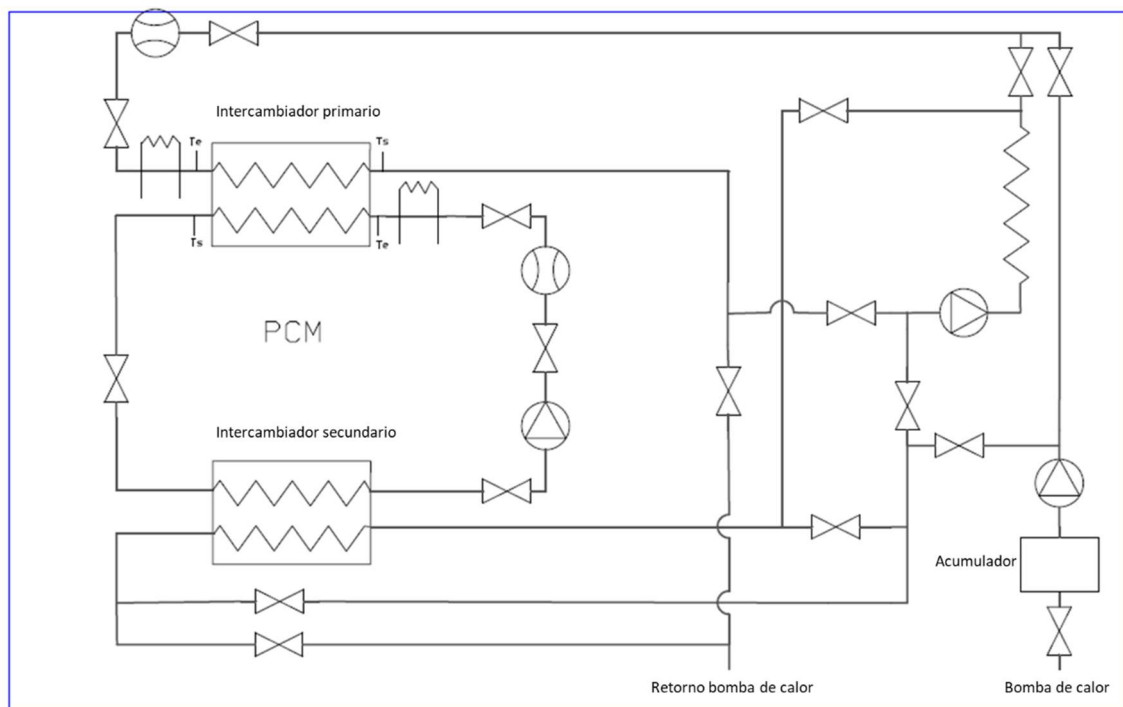


ILUSTRACIÓN 5 Esquema de la instalación

En el esquema, se pueden apreciar los dos intercambiadores de calor, la resistencia calefactora, los 2 caudalímetros, 3 bombas, los sensores de temperatura y presión, las válvulas de paso y de regulación de caudal y las pequeñas resistencias calefactoras situadas en las entradas de los intercambiadores. A continuación, se muestran dos planos más indicando el itinerario recorrido por cada uno de los fluidos para mejorar la comprensión del banco de ensayos. En la primera

imagen, se muestran los distintos fluidos para la configuración del ensayo de solidificación del PCM y en la segunda imagen se muestra la configuración para el ensayo de fusión.

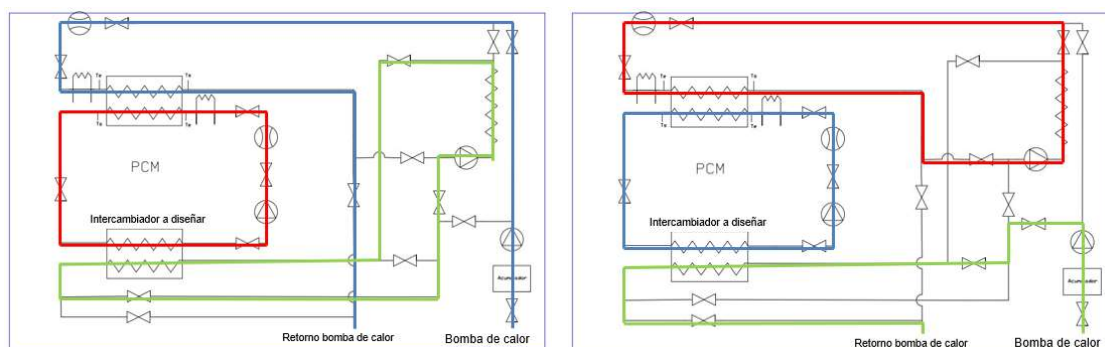


ILUSTRACIÓN 6 Configuraciones de la instalación

Como se puede comprobar en las ilustraciones, el circuito del PCM no varía en función del caso de ensayo. Son los dos circuitos de agua los que sí que modifican su itinerario para cumplir con las funciones deseadas. Por otra parte, también se puede deducir que siempre hay tres circuitos separados unos de otros y, por lo tanto, son necesarias 3 bombas. Además, cabe indicar que solo en dos de los circuitos es necesario la implantación de sensores. Existen sensores de presión y temperatura tanto a la entrada como a la salida de ambos flujos del intercambiador de ensayo pues en este intercambiador interesa saber que está ocurriendo con exactitud y poder determinar el coeficiente global de transferencia de calor en un intercambiador de placas cuando circulan estos tipos de fluidos. Por esto hay dos resistencias calefactoras de menor tamaño en las dos entradas del intercambiador. Estas pequeñas resistencias, se encargarán de hacer un ajuste más preciso de la temperatura justo a la entrada del intercambiador y serán controladas por un PID. También la resistencia calefactora de mayor tamaño será controlada por un PID. Por último, dos caudalímetros se encargarán de medir el caudal circulante por ambos lados del intercambiador siendo esta la última variable que se desea conocer.

Con el diseño de los nuevos itinerarios completado se continúa con la siguiente fase. Ahora es necesario elegir y dimensionar un intercambiador de calor secundario.

3.3.3. Elección y diseño del intercambiador secundario

El intercambiador de calor secundario, debe ser capaz de transmitir la potencia suficiente para devolver al PCM al estado anterior al paso por el intercambiador de ensayo, sin crear demasiadas pérdidas de carga. Por lo tanto, se debe elegir un intercambiador adecuado en función de la potencia y las pérdidas de carga en él.

Para el intercambiador secundario se pensó, en primera instancia, en utilizar un intercambiador de carcasa y tubos, pero los cálculos preliminares arrojaban dimensiones difícilmente aplicables en la práctica. En segunda instancia se optó por calcular un intercambiador de tubos concéntricos pues era conocida su baja pérdida de carga y buen funcionamiento en aplicaciones agro-alimentarias. Sin embargo, este intercambiador de tubos concéntricos necesitaba demasiada longitud de tubería para cumplir con las especificaciones debido a que no posee

suficiente densidad de área de contacto. Así que, tras haber rechazado el montaje de dos intercambiadores de placas gemelos por sus altas pérdidas de carga, se retoma esta idea.

Como se menciona, el principal problema de un intercambiador de placas corrugadas es su pérdida de carga. Pero es posible bajar dicha pérdida de presión añadiendo más placas más pequeñas.

Utilizando el software EES (Engineering Equation Solver) se procede al cálculo de un intercambiador de placas corrugadas para determinar si es válido. Se toma como posible candidato el intercambiador de Lapesa LPIC-01 que se muestra a continuación en la ilustración 8 junto con sus especificaciones en la ilustración 9 y se implementan las ecuaciones de mecánica de fluidos y termodinámica pertinentes para hallar todos los valores representativos. Se utilizan gran parte de las fórmulas expuestas en el apartado 2 de esta memoria, referente a la revisión bibliográfica, pero con algunas modificaciones que serán explicadas posteriormente, en lo referente a cálculos de coeficientes fricción o correlaciones que necesiten de mayor precisión.

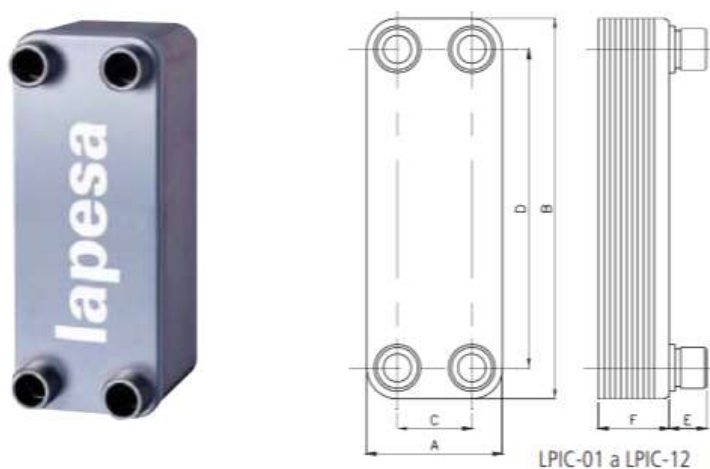


ILUSTRACIÓN 7 Intercambiador Lapesa

INTERCAMBIADORES DE PLACAS COMPACTOS		Ref.	Nº de placas	Caudal (l/h) 50°C	Potencia (kW) ⁽³⁾	Pérdidas de carga m.c.a.	A x B x F	E	C	D	Conexiones
Temperatura máx. de trabajo	135 / 155°C ⁽¹⁾	LPIC-01	20	1.000	45	< 3	73 x 192 x 42,32	20,1	40	154	3/4"
Presión máx. de trabajo	16 / 25 bar ⁽²⁾	LPIC-02	20	2.000	90	< 6	73 x 315 x 42,32	20,1	40	278	3/4"
Aplicaciones	Líquido/Líquido	LPIC-03	20	3.000	140	< 6	119 x 289 x 48,8	45	72	243	1"
Chasis	AISI 316	LPIC-04	30	4.000	185	< 6	119 x 289 x 71,2	45	72	243	1"
Placas	AISI 316	LPIC-05	40	5.000	235	< 6	119 x 289 x 93,6	45	72	243	1"
		LPIC-07	40	7.000	325	< 8	119 x 376 x 93,6	45	63	320	1-1/4"
Conexiones	AISI 316	LPIC-10	60	10.000	465	< 8	119 x 376 x 136,4	45	63	320	1-1/4"
Complemento	Aislamiento térmico	LPIC-12	70	12.000	560	< 8	119 x 376 x 160,8	45	63	320	1-1/4"

ILUSTRACIÓN 8 Especificaciones de los intercambiadores Lapesa

Como se puede observar en la ilustración 9, el LPIC-01, consta de 20 placas. El número de placas ha sido uno de los criterios de elección de este intercambiador para rebajar las pérdidas de carga. Volviendo a las dimensiones, el LPIC-01 mide 73 mm de anchura por 192 mm de longitud. Estas medidas no solo son las del intercambiador, sino que son también las dimensiones de cada placa.

Por otra parte, son conocidas las temperaturas de entrada y salida del PCM. Además, sabemos que el caudal de agua es de 12 l/min y el caudal de PCM es de 6 l/min. Estos caudales quedaron

fijados en estos valores en diseños anteriores de la instalación de ensayo por motivos de pérdida de carga y se decidió mantenerlos. También es sabido que la resistencia calefactora es capaz de suministrar agua a 75 °C para el caudal de agua fijado.

Con estos datos disponibles, es posible el cálculo de la temperatura de entrada y salida del agua y del PCM en el intercambiador. Y una vez calculadas las temperaturas, también es posible obtener el calor intercambiado. Con un balance de energía sobre el agua, se obtiene que su temperatura de salida será de 62 °C y el calor intercambiado por unidad de tiempo de 10208 W.

Con estos primeros valores de magnitudes básicas en el intercambiador se procede al cálculo de las propiedades de los fluidos en los distintos estados termodinámicos presentes. De esta forma el código del EES se centra en primera instancia en determinar las propiedades de los fluidos. El código podrá encontrarse en los anexos.

Posteriormente en el cálculo de los números de Nusselt y la determinación de los coeficientes de transferencia de calor con las siguientes formulas a destacar:

$$Nu_{agua} = 0,122 \cdot Pr_{agua}^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu_{agua}}{\mu_{p,agua}} \right)^{1/6} \cdot (f_{agua} \cdot Re^2 \cdot \sin 2\beta)^{0.374} \quad (13)$$

$$Nu_{PCM} = 0,2987 \cdot Re_{PCM}^{0,5276} \cdot Pr_{PCM}^{1/3} \quad (14)$$

La ecuación (13) fue hallada en el libro de diseño de intercambiadores de calor que puede encontrarse en la bibliografía y es una correlación para obtener el número de Nusselt, pensada para ser aplicada en cálculos de intercambiadores de calor de placas, con gran precisión (Marín and Guillén 2013). La ecuación (14) sin embargo, es una correlación hallada empíricamente por Jorge Torrubia en su proyecto y es usada para hallar el número de Nusselt para la emulsión de parafina a través de un intercambiador de calor de placas (Torrubia 2018).

Tras obtener los coeficientes de transferencia de calor, tal y como se indica en el subapartado 2.2.2, se procede con el dimensionado mediante el método MLDT. Por supuesto, el área de intercambio obtenida mediante el método MLDT debe ser inferior al área del intercambiador LPIC-01. Para terminar, se determina la pérdida de carga para el intercambiador para comprobar si es válido con el uso de las ecuaciones (15), (16) y (17).

$$\frac{1}{f} = \frac{\cos \beta}{\sqrt{b \cdot \tan \beta + c \cdot \sin \beta + \frac{f_0}{\cos \beta}}} + \frac{1 - \cos \beta}{\sqrt{f_1}} \quad (15)$$

Siendo f_0 y f_1 :

$$f_0 = \frac{B_0}{Re} \quad (16)$$

$$f_1 = a \cdot \left(\frac{597}{Re} + 3,85 \right) \quad (17)$$

Cabe destacar que a , b , c y B_0 son constantes que vienen definidas por el tipo de flujo que en este caso es laminar y son obtenidas de nuevo del Libro “*Diseño y Cálculo de Intercambiadores de Calor Monofásicos*” (Marín and Guillén 2013). Es una correlación para hallar el factor de fricción para un fluido que pasa por un intercambiador de calor de placas corrugadas con flujo a contracorriente.

Luego mediante la ecuación de Darcy-Weisbach (ecuación 14), son obtenidas las pérdidas de carga.

A continuación, se muestran los resultados clave obtenidos:

<i>Area LPIC – 01</i>	0,342 m ²
<i>Area MLTD</i>	0,3372 m ²
<i>T_{agua,entrada}</i>	74 °C
<i>T_{agua,salida}</i>	61,51 °C
<i>T_{PCM,entrada}</i>	35 °C
<i>T_{PCM,salida}</i>	50 °C
<i>Δ_{p,agua}</i>	7,479 kPa
<i>Δ_{p,PCM}</i>	13,53 kPa

TABLA 3 Resultados clave

Como se observa, el área necesaria para cumplir con las temperaturas necesarias es de 0.3372 m² y el área de transferencia de calor del LPIC-01 es de 0.342 m². Esto quiere decir que el intercambiador cumpliría con la transmisión de calor necesaria. Por otra parte, se puede observar que para el agua habría una pérdida de carga de 7.5 kPa de agua y 14 para el lado del PCM. Es menos de lo que se obtenía con el intercambiador provisto de menos placas de mayor tamaño, como estaba previsto. Cabe destacar que se hicieron los mismos cálculos tanto para el ensayo de fusión como para el ensayo de solidificación. El código referido es posible encontrarlo en los anexos.

En resumen. La idea de implementar dos intercambiadores LPIC-01, uno primario y otro secundario, resulta técnicamente posible para las bombas hidráulicas disponibles y tomadas en cuenta como primer borrador.

3.3.4. Elección de los componentes de la instalación

Una vez dimensionado y elegido el intercambiador secundario, se procede a la elección del resto de componentes de la instalación. Esto es los caudalímetros, elementos de racorería, conexiones y tuberías.

3.3.4.1. Elección de caudalímetros

Respecto al circuito de la emulsión de parafina, debido a la complejidad de este fluido se decide el uso de un caudalímetro de Coriolis. La complejidad del fluido reside en que está compuesto por dos fases. La fase portadora, que es agua, y la parte puramente de cambio de fase. Esto es la parafina. Al estar compuesto por dos fases, es de mayor dificultad calcular el flujo másico con precisión, de manera indirecta usando el flujo volumétrico. Es por esto que se decide usar un caudalímetro basado en la aceleración de Coriolis que da con gran precisión y directamente el flujo másico.

El caudalímetro de Coriolis elegido es el Krohne OPTIMMAS 1300 que se muestra en la ilustración 12.



ILUSTRACIÓN 9 Caudalímetro OPTIMMAS 1300

Por otra parte, en la ilustración 13 se muestra el error y la repetibilidad del caudalímetro para líquidos.

Measuring accuracy

Mass	
Liquid	$\pm 0.15\%$ of actual measured flow rate + zero stability
Gas	$\pm 0.5\%$ of actual measured flow rate + zero stability
Repeatability	Better than 0.05% plus zero stability (includes the combined effects of repeatability, linearity and hysteresis)

ILUSTRACIÓN 10 Características del OPTIMMAS 1300

Para el circuito del agua, se valoraron distintas posibilidades. Los criterios de elección eran que no ofreciese demasiadas pérdidas de carga y que tuviese salida analógica de 4 a 20 mA, aunque posteriormente, debido a que la medición del caudal de agua era de menor importancia que la medición del caudal de PCM, puesto que era más sencillo calcular indirectamente su caudal al tratarse de agua, que ofreciese pocas pérdidas de carga cobró más relevancia que la salida analógica.

En primer lugar, se valoró la instalación de un caudalímetro de tipo Vortex. Este caudalímetro era el Liquiview LVB-06-AB. Presentaba un precio muy competitivo, pero ofrecía demasiadas pérdidas de carga. Unos 500 mbar para 12 l/min, por lo que se acabó descartando.

Como segunda opción se contempló la compra de un caudalímetro esta vez basado en la medición del caudal a través de campos magnéticos. Se trata del Magview MVM-030-PA. Este caudalímetro a diferencia del anterior proporcionaba unas pérdidas de carga mínimas. Diez veces menores que el anterior, de 50 mbar para 12 l/min. Pero su elevado precio hizo más razonable la última de las opciones.

Finalmente se optó por utilizar una válvula de equilibrado TA, la cual ya estaba presente en el laboratorio y que, aunque presenta unas pérdidas de carga similares a las de una válvula de paso, mayores que las que el MVM-030-PA presentaba, sirve como válvula reguladora de caudal y como caudalímetro (ya que se cuenta con el medidor de presión diferencial) ahorrando un elemento con sus pérdidas de carga asociadas.

La válvula TA disponible es una STAD – PN 25 como la que se muestra en la ilustración 14.



ILUSTRACIÓN 11 Válvula TA con los tapones rojo y azul para calcular la presión diferencial

3.3.4.2. Elección de las conexiones y elementos de racorería

Las conducciones y conexiones de la instalación deberían de cumplir los siguientes requisitos: que su montaje no necesite de costosas herramientas, que sea fiable y que su montaje se lo más sencillo posible. Existe una gran variedad de conducciones disponibles en el mercado que van desde tubos flexibles de distintos polímeros a conductos de distintos metales, pasando por polímeros rígidos.

En un análisis preliminar se descartaron las opciones de utilizar tubos de cobre con uniones soldadas por estaño debido a que en caso de error en una conexión se perdía ese racor o elemento de unión. Además, el hecho de tener que soldar sumaba dificultad al montaje.

También se propuso utilizar racores de espiga y tubo flexible para toda la instalación, pero fue rechazado por la menor fiabilidad y durabilidad que presentaban estos frente a los tubos de metal o polímeros rígidos como el PVC. A esto hay que añadir que al alcanzar altas temperaturas los fluidos circulantes por la instalación en determinadas zonas y no conociendo con exactitud cuál iba a ser el comportamiento químico de la suspensión de parafina, el único tubo flexible que se podía usar en esas zonas críticas de la instalación era la manguera de silicona. Estas mangueras de silicona son comercializadas en grandes packs y con un elevado coste por lo que la idea de los tubos flexibles acabó descartándose.

Posteriormente se propuso la utilización de un novedoso sistema de conducto y conexiones de PVC con compresión como método de unión. Este sistema se llama Pushfit y puede observarse en la ilustración 15.



ILUSTRACIÓN 12 Sistema Pushfit

Este sistema resultaba atractivo por la posibilidad de utilizar conducciones semiflexibles de un material resistente a la corrosión como el PVC. Por otra parte, solo requería de una pequeña herramienta incluida en el pack para realizar las conexiones. Sin embargo, nuevamente el elevado coste de este sistema y la inflexibilidad en la elección de las cantidades de componentes por separado supuso su descarte.

Por último, se propuso utilizar tubos de cobre y racores de compresión de latón. Como ventajas, este sistema de conducción presentaba un bajo coste frente al resto de alternativas, unos materiales resistentes a la corrosión como el cobre y el latón, una enorme flexibilidad a la hora de comprar componentes por unidades para evitar la compra de materiales sobrantes y un método de unión similar al Pushfit que utiliza anillos de latón para realizar una unión hermética entre la tubería y el racor. Además, estas uniones se realizan con la ayuda de dos llaves comunes por lo que evita la compra de herramientas adicionales. Como contrapartidas, al tratarse de tubos rígidos metálicos, todos los giros deben hacerse con conexiones de 90° o codos. No obstante, la compra de estos codos no generaba un coste mayor que la compra de otros sistemas como el Pushfit. A continuación, se muestra una imagen de este tipo de racores de compresión.



ILUSTRACIÓN 13 Codo de compresion – H3/4"

El funcionamiento de este tipo de racores es el siguiente: La conexión esta prevista de un orificio liso interior en el cual se introduce el tubo de cobre. Posteriormente, se introduce un pequeño anillo de latón en el hueco que queda entre el cubo y el tubo de cobre. Este anillo es el que, al roscar la pieza exterior que puede observarse en la ilustración 16 en el extremo izquierdo del racor, es introducido a presión entre el cubo y la tubería de cobre, formando una unión hermética al deformarse.

Por último, cabe mencionar que también se adquirieron latiguillos de medio metro para unir con mayor facilidad la red de circuitos con algunos componentes de la instalación como la resistencia calefactora.

3.3.4.3 Elección de las bombas

Utilizando las ecuaciones relativas al análisis de pérdidas hidráulicas, mencionadas en capítulos anteriores como el 2.3 de la revisión bibliográfica, se calcula la perdida de presión para cada circuito presente en la instalación con la intención, de elegir las bombas hidráulicas adecuadas a comprar e instalar. El criterio de elección de estas bombas es la disponibilidad, el coste y por encima de todo, que sean capaces de proporcionar los caudales exigidos para el correcto funcionamiento del banco de ensayos.

Utilizando nuevamente el software de resolución de sistemas de ecuaciones EES, son implementadas las ecuaciones presentes en el apartado 2.3 de análisis de instalaciones de fluidos, para los casos más desfavorables. Debido a que, como se explica en el apartado 3.3.2 "Diseño de los nuevos circuitos", los itinerarios que sigue el agua varían en función de la configuración del banco de ensayos, los casos más desfavorables serán los que determinen el dimensionado de las bombas.

Los casos más desfavorables son hallados comparando los circuitos por la cantidad y tipo de accesorios los cuales atraviesa el fluido y por la longitud de tubería que compone dichos circuitos. Como se indica en el apartado 2.3 y más concretamente en la tabla 2, en función del accesorio, hay una pérdida de carga asociada que es mayor o menor. El circuito que reúne la mayor cantidad de accesorios con altas perdidas de carga y con más metros de circuito es el circuito que sigue el agua fría en la configuración del ensayo de solidificación. Este circuito puede verse en la ilustración 7.

Por otra parte, para el circuito de la emulsión de PCM se puede estimar la pérdida de carga, pero con una menor precisión que para los circuitos de agua. Esto es debido al desconocimiento del comportamiento de este novedoso fluido el cual va a sufrir cambios por el mismo hecho de ser ensayado. Las pérdidas de carga de este circuito tienen su origen mayoritariamente en los dos intercambiadores de calor que la emulsión de parafina tiene que atravesar, ya que el caudalímetro de Coriolis apenas ofrece resistencia y es el circuito de menor tamaño. Las pérdidas en el intercambiador para la emulsión de PCM ya fueron estimadas en el apartado 3.3.3 y arrojaron el resultado de $\approx 1,4$ metros. Teniendo en cuenta que son dos pasos por intercambiador los que la emulsión de PCM realiza, las pérdidas por intercambiadores se estiman alrededor de 2,8 metros. Ahora, teniendo en cuenta la diferencia de altura entre la parte más baja y la parte más alta del circuito, que es aproximadamente 1,6 metros, da unas pérdidas estimadas en 4,4 metros de columna de agua.

Para el circuito del agua fría, el más desfavorable, se obtienen mediante los cálculos con EES los siguientes resultados:

$$\Delta_{p,acc} = 16,7 \text{ kPa}$$

$$\Delta_{p,cond} = 1,1 \text{ kPa}$$

$$\Delta_{p,g} = 17 \text{ kPa}$$

$$\Delta_p = \Delta_{p,acc} + \Delta_{p,cond} + \Delta_{p,g} = 34,8 \text{ kPa}$$

Conociendo las pérdidas de carga para ambos circuitos y tomando un sobredimensionamiento de un 50% más de presión de impulsión para prevenir posibles complicaciones en el futuro, como un rediseño de los circuitos o un cambio de la emulsión de PCM, se elige la bomba Iwaki MD-30 RZ como la bomba adecuada para impulsar tanto el PCM como el agua por los dos circuitos presentes. A continuación, se muestra la bomba y sus especificaciones.

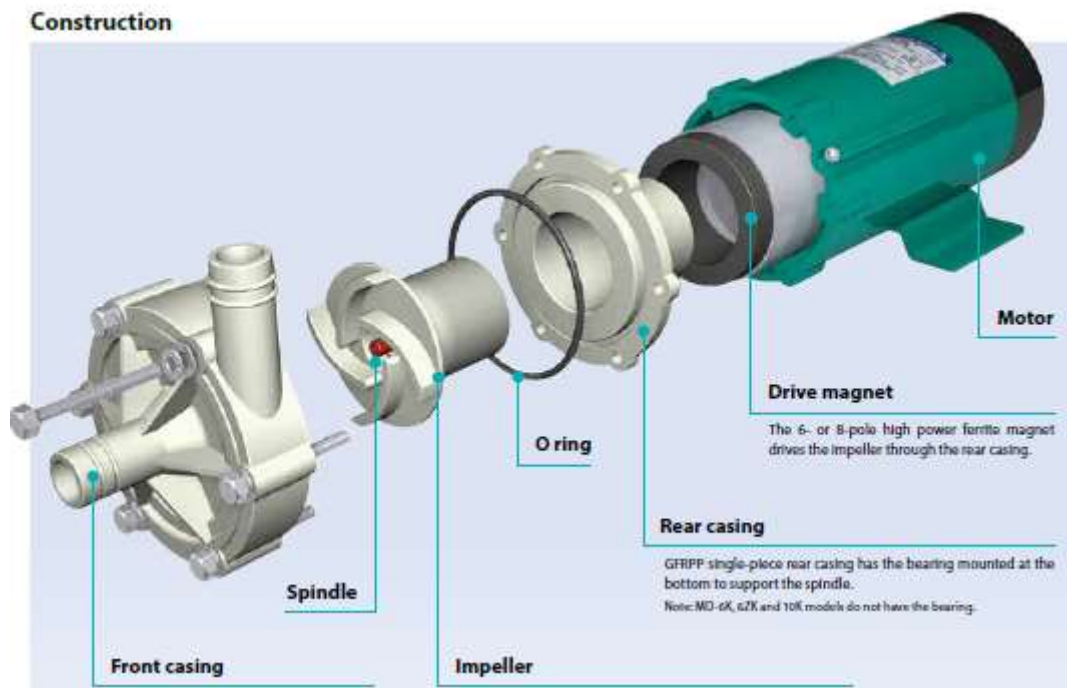


ILUSTRACIÓN 14 Iwaki MD-30RZ

Models	Max. discharge capacity (L/min)							Max. discharge head (m)				Limit of specific gravity
	20	40	60	80	100	120	140	5	10	15	20	
MD-6K	50Hz	8.0						1.0				1.2
Standard type	60Hz	9.0						1.4				
MD-6ZK	50Hz	5.5						2.1				1.1
High head type	60Hz	6.0						2.7				
MD-10K	50Hz	11						1.5				1.1
Standard type	60Hz	12						2.1				
MD-15R	50Hz	16						2.4				1.3
Standard type	60Hz	19						3.4				
MD-20R	50Hz	27						3.1				1.1
Standard type	60Hz	31						4.3				
MD-20RX	50Hz	46						1.8				1.3
Large capacity type	60Hz	52						2.5				
MD-20RZ	50Hz	10						4.6				1.1
High head type	60Hz	11						6.9				
MD-30R	50Hz	32						3.8				1.3
Standard type	60Hz	38						5.4				
MD-30RX	50Hz	62						2.9				1.1
Large capacity type	60Hz	72						4.1				
MD-30RZ	50Hz	15						8.0				1.0
High head type	60Hz	17						11				

ILUSTRACIÓN 15 Especificaciones

4. MONTAJE DE LA INSTALACIÓN

En este apartado se procede a explicar cómo se realizó la compra de los materiales elegidos en apartados anteriores y como se realizó su montaje.

4.1. Elaboración de la lista de componentes

Una vez definidos todos los aspectos referentes al diseño del banco de ensayos se procede a elaborar la lista de componentes de los elementos que no están ya presentes en el laboratorio, puesto que algunos como los materiales de fijación y la estructura de aluminio, el caudalímetro de Coriolis y el acumulador se reutilizaran de proyectos anteriores. Por lo tanto, se elabora una lista de componentes para los elementos de conducción y racorería y utilizando una tabla de Excel se calculan las diferentes configuraciones de compra. Estas configuraciones tienen en cuenta la cantidad de elementos que se deben comprar por pack y el precio de estos, para evitar sobrecostos por la compra de elementos sobrantes pero que vengan incluidos en los packs. Además, con el Excel también se tiene en cuenta las diferentes combinaciones de racores que cumplen un mismo cometido para una vez más, abaratar el coste de la compra. Este Excel estará presente en los Anexos.

Debido al precio calculado para la compra en RS y en Salvador Escoda, se llega a la conclusión de que la mejor estrategia de compra es obtener la racorería de compresión y codos en la web de RS y los machones, Tes y válvulas, en Salvador Escoda. Por último, comprar en Leroy Merlín los tubos de cobre. La lista de componentes se encuentra abajo en la Tabla 4.

Producto	Cantidad	Referencia
Válvulas de cierre 3/4"	17	AA 03 802
Racor compresión macho 3/4"	52	285-8693
Racor compresión hembra 3/4"	11	369-1592
T compresión 3/4"	10	369-1665
Machón 1/2"-3/4"	2	AA 25 013
Machón 1"-3/4"	2	AA 25 014
Machón 3/4"	9	AA 25 004
T hembra 3/4"	8	AA 25 123
Tubo de cobre 22mm** * *	8	19303004
Codos	16	369-1643
Racores de espiga h1/2" - 14mm	2	82109518
Adaptador de H3/4 a npt 1/2?	2	
Racor h1/2 – m3/4	2	
Racor espiga m3/4 – 14mm	2	



Las unidades necesarias para conseguir 8 metros de tubo (1m por unidad).

TABLA 4 Lista de componentes de racorería

Además de lo presente en la Tabla 3, se compran la resistencia calefactora GCP-TR-INOX-II0120, la válvula TA, 12 hilos calefactores de 2,5W VFF 2,5 suministrados por Brototermic que conformarán las pequeñas resistencias de ajuste, los intercambiadores LPIC-01, las bombas, 4 sensores de presión de Honeywell Heavy Duty Pressure Transducers PX3 Series y 4 sondas Pt100 de clase 1/3 con conexión de 4 hilos. Vaina de acero inoxidable de 3 mm de diámetro. Dos de las sondas tienen una longitud de 60 mm y las otras dos de 180 mm para que la medida se realice justo en los puntos de entrada y salida del intercambiador. Se mide en el seno del fluido gracias a la utilización de racores deslizantes. Para el control PID sobre la temperatura a la entrada del primario y del secundario del intercambiador, se han comprado dos termopares tipo T con vaina de acero inoxidable de 3 mm de diámetro. Todas estas sondas se han adquirido en TC Direct.

4.2. Elaboración del plano de montaje

Una vez obtenidos los materiales se necesita de un plano menos esquemático y más adecuado a la disposición real que tendrán los componentes en la estructura de montaje.

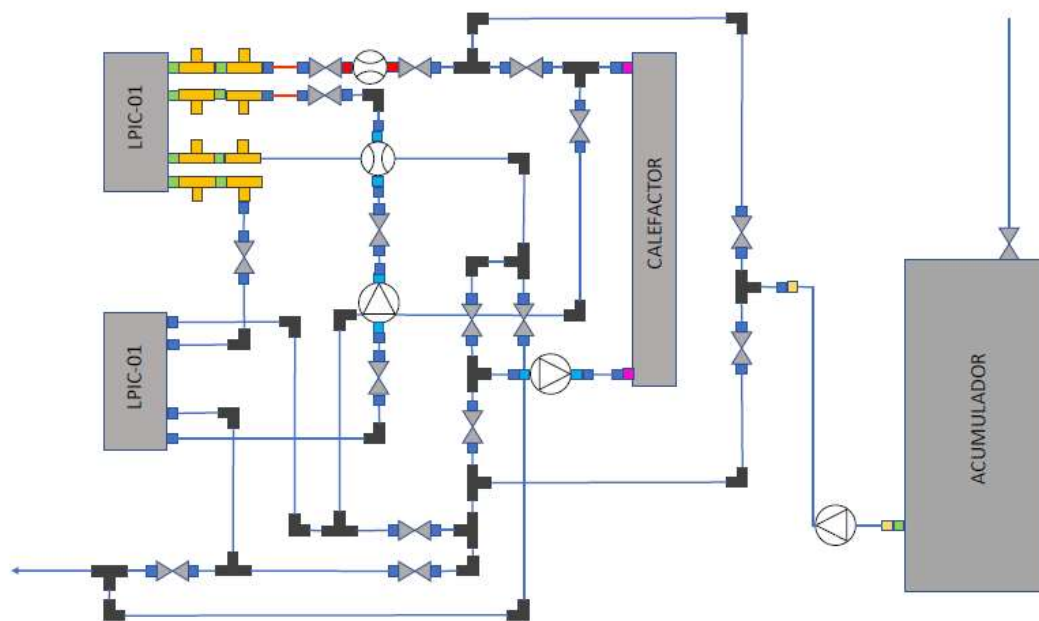


ILUSTRACIÓN 16 Plano de montaje

Racor Espiga-Hembra 3/4	
Machón 3/4	
Adaptador 3/4 - 1	
Adaptador 1/2 - 3/4	
Racor M3/4 - compresión	
Racor H3/4 - compresión	
T Hembra 3/4	
T de compresión	

TABLA 4 Leyenda del plano de montaje

4.3. Montaje de la instalación

El montaje se realiza en el primer piso de la nave 2 del edificio Agustín de Betancourt en el Campus Río Ebro. En primer lugar, se desmontó y trasladó a esa ubicación el marco de aluminio para comenzar el montaje. Este tipo de estructura de aluminio con rieles es común entre los montajes de bancos de ensayos y se le han añadido 6 pequeñas ruedas también presentes en el laboratorio, para poder desplazar el banco de ensayos si así se requiere. Una vez instalada la estructura y utilizando tuercas de martillo y abrazaderas con varilla roscada de métrica 6, se van fijando los elementos. Debido a que los intercambiadores de calor puestos con las dos entradas y dos salidas apuntando hacia la derecha del marco, se producen dos niveles en el eje z. Esto quiere decir que disponiendo la instalación en un marco vertical y con el eje vertical siendo y y

el eje horizontal x , el eje z indicara la profundidad y el circuito del PCM quedara en un nivel superior en el eje z respecto del nivel del circuito del agua. Por otra parte, debido al gran número de cruces entre unas conducciones y otras, se decide crear un nivel adicional en el eje z que estaría fijado en la parte posterior de la estructura de aluminio y sería el nivel -1. Estos niveles 0 y -1 se conectan mediante el uso de latiguillos de medio metro.

Tras determinar los distintos niveles se comienza con el montaje de la instalación acoplando los tubos de cobre medidos y cortados con un corta tubos a los racores de compresión con ayuda de dos llaves. Luego añadiendo teflón a las roscas se van acoplando los componentes roscados una vez pasados a 3/4 de pulgada con los adaptadores pertinentes indicados en la tabla 4. Por otra parte, las bombas, como disponen de salidas y entradas de espiga, se conectan con manguera, racores de espiga y abrazaderas.

Las dos resistencias de menor tamaño que se usaran para hacer un último ajuste de la temperatura a las entradas del intercambiador de ensayo, consisten en 6 hilos calefactores de 2,5W cada uno. Se enrollan alrededor del tubo de cobre, se cubre con cinta que le provee aislamiento térmico para asegurar que la mayor cantidad posible de calor pase al fluido y se conectan en paralelo para no afectar a la resistencia total de los hilos.

Se construye una pequeña plataforma que sea capaz de sujetar con seguridad el pesado caudalímetro de Coriolis y se asegura con dos abrazaderas de gran tamaño.

Tras el montaje de los componentes de la instalación se procede a la colocación de tanto los sensores de temperatura y presión que se encargaran de recoger los datos de ensayo como los que se encargaran de regular el funcionamiento de la instalación mandando datos a un controlador PID desarrollado por el SAI de Instrumentación Electrónica de la Universidad de Zaragoza.

Se incorporan 2 vasos de expansión que consisten en pequeños contenedores de plástico con rosca de 3/4 de pulgada. Uno en la cota más alta de los dos circuitos del agua y otra en la cota más alta del circuito de emulsión de parafina.

Por último, queda la instalación de un cuadro eléctrico, sistema de adquisición de datos y controladores PID y realizar las primeras pruebas de caudal para comprobar que no haya fugas y que las bombas proporcionan el caudal requerido para cumplir con las necesidades de ensayo.

5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

A raíz de los acontecimientos relacionados con la Covid-19 en invierno y primavera de 2020, el montaje descrito en el apartado 4.3 tuvo que detenerse a falta de realizar las últimas conexiones con tubo flexible de las bombas de la instalación y los sistemas de control. Esto supone la imposibilidad legal de realizar la prueba de caudal de la instalación. Esta situación conlleva que, aunque los cálculos sugieren que no debería haber problemas relacionados con la impulsión o calefacción de los fluidos que circulan por ella, debido a la naturaleza compleja de la emulsión de parafina, podría revelar alguna inconveniencia que los cálculos no hayan contemplado.

A la fecha de redacción de este apartado, la instalación luce como puede observarse en la siguiente ilustración.

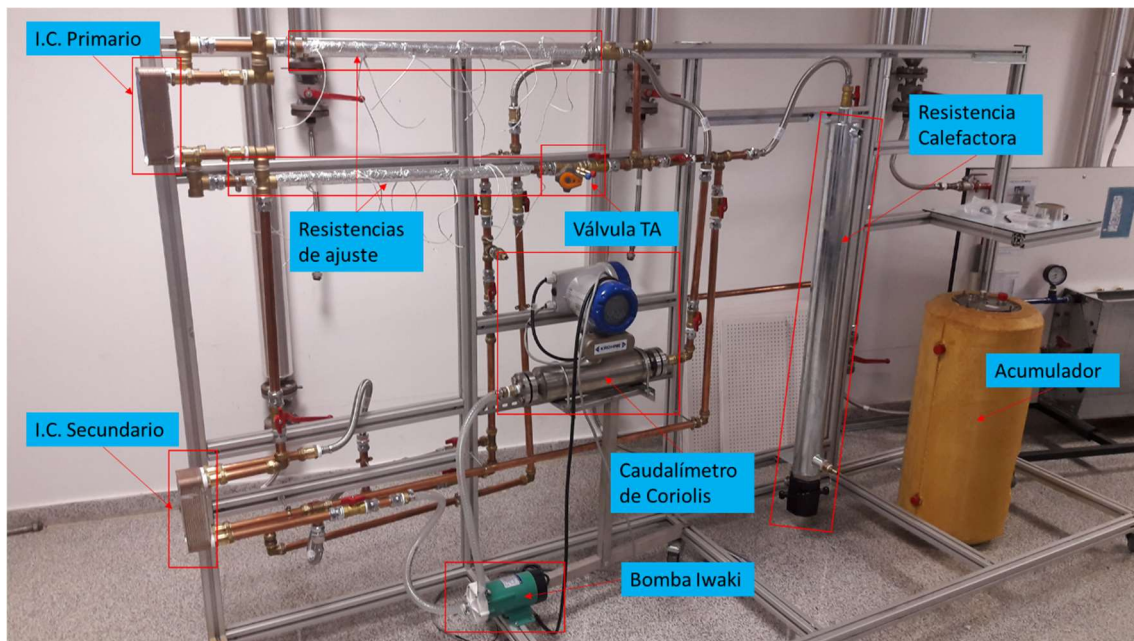


ILUSTRACIÓN 17 Instalación actual

A modo de conclusión, apenas se han hallado problemas a la hora de realizar el montaje y se consideran acertadas todas las decisiones tomadas a la hora de elegir los materiales de construcción. Se estima que un 90% de la instalación se haya montada y en menos de una semana de montaje sería susceptible ser acabada y hallarse lista para comenzar con las pruebas y ajustes pertinentes. Por otra parte, realizando el montaje de la instalación de manera independiente, el coste final ha sido de 6258,72€ mientras que el coste por encargar la instalación a una compañía externa, se sitúa en un rango entre los 8617,71€ y los 26801,5€. Teniendo en cuenta el coste que se observa, se concluye que la opción tomada en este trabajo de fin de grado, es la opción mas viable en términos económicos.

BIBLIOGRAFIA

- Bédécarrats, J. P., F. Strub, B. Falcon, and J. P. Dumas. 1996. "Phase-Change Thermal Energy Storage Using Spherical Capsules: Performance of a Test Plant." *International Journal of Refrigeration*.
- Chen, Sih Li et al. 2000. "Experimental Investigation of Cold Storage in an Encapsulated Thermal Storage Tank." *Experimental Thermal and Fluid Science*.
- Cho, Keumnam, and S. H. Choi. 2000. "Thermal Characteristics of Paraffin in a Spherical Capsule during Freezing and Melting Processes." *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
- Dolado, Pablo, Marc Medrano, and Luisa F Cabeza. 2007. "Investigación y Desarrollo de Aplicaciones Del Almacenamiento Térmico de Energía Con Materiales de Cambio de Fase."
- José, Agüera. 2002. *Mecánica de Fluidos Incompresibles y Turbomáquinas Hidráulicas*. Editorial Ciencia 3, S.L.

- Kakaç, Sadik, and Hongtan Liu. 2002. Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design, Second Edition *Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design, Second Edition*.
- Marín, J M, and S Guillén. 2013. *Diseño y Cálculo de Intercambiadores de Calor Monofásicos*.
- Oliver, A., F. J. Neila, and A. García-Santos. 2012. "Nota Técnica: Clasificación y Selección de Materiales de Cambio de Fase Según Sus Características Para Su Aplicación En Sistemas de Almacenamiento de Energía Térmica." *Materiales de Construcción* 62(305): 131–40.
- Rodríguez Ubiñas, Edwin Israel. 2015. "Almacenamiento de Energía Térmica Por Calor Latente En Los Edificios: Bases Para La Optimización de Aplicaciones Pasivas, Opacas y Traslúcidas." *Tesis Doctoral*: 1–422. <http://oa.upm.es/41729/>.
- Royon, Laurent, and Gérard Guiffant. 2008. "Forced Convection Heat Transfer with Slurry of Phase Change Material in Circular Ducts: A Phenomenological Approach." *Energy Conversion and Management*.
- Táboas Touceda, Francisco. 2007. "Doctoral Thesis. 'Estudio Del Proceso de Ebullición Forzada de La Mezcla Amoniaco/Agua En Intercambiadores de Placas Para Equipos de Refrigeración Por Absorción'. Universitat Rovira i Virgili. ISBN: 978-84-690-7588-3."
- Torrubia, Jorge. 2018. "Diseño de Una Instalación Experimental Para El Análisis de Intercambiadores de Calor Agua-Emulsión de Materiales de Cambio de Fase." *Zaguan.Unizar.Es*.
- Yegya Raman, Ashwin Kumar, and Clint P. Aichele. 2019. "Influence of Non-Ionic Surfactant Addition on the Stability and Rheology of Particle-Stabilized Emulsions." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 585(October 2019): 124084. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.124084>.