

Trabajo Fin de Grado

Rediseño, puesta en marcha y análisis de un banco de ensayos de intercambiadores de calor entre materiales de cambio de fase (PCM)-agua

-

Redesign, commissioning and analysis of a test bench for PCM slurries-water heat exchangers

Autor

Eduardo Valencia Díez

Director/es

José María Marín Herrero
Ana Lázaro Fernández



INDICE

RESUMEN / ABSTRACT	5
NOMENCLATURA.....	7
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1 ANTECEDENTES Y CONTEXTO DEL TFG.....	9
1.2 OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TFG	10
1.3 SUSPENSIONES DE MATERIALES DE CAMBIO DE FASE	10
1.4 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL	12
2. MODELO TEÓRICO	15
2.1 REVISIÓN BIBLOGRÁFICA	15
2.1.2 FACTOR DE FRICCIÓN	15
2.1.3 INTERCAMBIO DE CALOR	19
2.2 CALCULOS TEÓRICOS AGUA - AGUA	21
2.3 PÉRDIDAS DE CARGA EN LA INSTALACIÓN	25
3. RE – DISEÑO DE LA INSTALACIÓN.....	27
3.1 COMPONENTES AÑADIDOS	27
3.2 PLANOS DE LA INSTALACIÓN	30
3.2.1 FUSIÓN DE LA EMULSIÓN	31
3.2.2 SOLIDIFICACIÓN DE LA EMULSIÓN	32
3.3 BOMBAS.....	32
4. PUESTA EN MARCHA.....	34
4.1 ENSAYO DE ENFRIADO DEL ACUMULADOR	34
4.2 ENSAYO DE BOMBAS	35
4.3 CALIBRACIÓN VÁLVULAS TA	35
4.4 MEDICIONES DE CAUDAL.....	38
4.5 VERIFICACIÓN DE RESISTENCIAS Y CALEFACTOR	38
5. INSTALACIÓN AGUA – AGUA.....	39
5.1 ENSAYOS DE SOLIDIFICACIÓN.....	39
5.1.1 ENSAYO SOLIDIFICACIÓN PARA $V = V_{max}$	40
5.1.2 ENSAYO SOLIDIFICACIÓN PARA $V = 0.75 \cdot V_{max}$	41
5.1.3 ENSAYO SOLIDIFICACIÓN PARA $V = 0.5 \cdot V_{max}$	42
5.1.4 ENSAYO SOLIDIFICACIÓN PARA $V = 0.25 \cdot V_{max}$	43
5.1.5 CONCLUSIONES ENSAYOS DE SOLIDIFICACIÓN.....	44
5.2 ENSAYOS DE FUSIÓN	44



5.2.1 ENSAYO FUSIÓN PARA $V = V_{max}$	45
5.2.2 ENSAYO FUSIÓN PARA $V = 0.75 \cdot V_{max}$	46
5.2.3 ENSAYO FUSIÓN PARA $V = 0.5 \cdot V_{max}$	47
5.2.4 ENSAYO FUSIÓN PARA $V = 0.25 \cdot V_{max}$	48
5.1.5 CONCLUSIONES ENSAYOS DE FUSIÓN	49
6. COMPARATIVA TEÓRICA - EXPERIMENTAL	50
7. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS	52
BIBLIOGRAFÍA	53
LISTA DE FIGURAS	54
LISTA DE TABLAS	56

RESUMEN / ABSTRACT

El presente TFG se desarrolla en el marco del trabajo de investigación del grupo GITSE, perteneciente al Instituto Universitario de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A), y los resultados forman parte del proyecto TRIGENSOL (proyecto de I+D+i PID2020-115500RB-I00), financiado por MCIN/ AEI/10.13039/501100011033. Consiste en estudiar el comportamiento de las emulsiones de materiales de cambio de fase con pequeños tamaños de partícula, del orden de las micras (mPCM), como fluido caloportador. Este TFG es continuación de los trabajos previos realizados por los estudiantes Guillermo Sanz y Jorge Torrubia.

El trabajo de investigación quedó paralizado por la pandemia de la Covid-19 y el objetivo general de este TFG es retomar la investigación que quedó aparcada hace dos años, empezando por rediseñar la instalación experimental donde se pueda ensayar el intercambio de calor experimentado entre una emulsión de materiales de cambio de fase (PCM) y agua en distintos modos de operación que se organizan en diferentes circuitos, como se explica más adelante en la presente memoria.

El objetivo general que se persigue es dejar la instalación rediseñada, montada y validada con una sustancia de propiedades bien conocidas, como el agua, y dejarla totalmente preparada para, en el futuro, poder ensayar con distintas emulsiones de mPCM que se consideren de interés. Un elemento de especial relevancia del trabajo es comprobar el comportamiento de una estructura tan compacta como son los intercambiadores de calor de placas corrugadas. Por ello se ha hecho un esfuerzo particular en el estudio teórico de su comportamiento, para cotejarlo con los ensayos que se han realizado en la instalación.

-

This TFG is developed in the framework of the research work of the GITSE group, belonging to the Aragon University Institute for Engineering Research (I3A), and the results are part of the TRIGENSOL project (R+D+i project PID2020-115500RB-I00), funded by MCIN/ AEI/10.13039/501100011033. It consists of studying the behaviour of emulsions of phase change materials with small particle sizes, of the order of microns (mPCM), as a heat transfer fluid. This TFG is a continuation of previous work carried out by the students Guillermo Sanz and Jorge Torrubia.

The research work was paralysed by the Covid-19 pandemic and the general objective of this TFG is to resume the research that was put on hold two years ago, starting by redesigning the experimental installation where the heat exchange experienced between an emulsion of phase change materials (mPCM) and water can be tested in different modes of operation organised in different circuits, as explained later in this report.



The overall objective is to leave the installation redesigned, assembled and validated with a substance of well known properties, such as water, and to leave it fully prepared for future testing with different mPCM emulsions of interest. A particularly important element of the work is to test the behaviour of such a compact structure as corrugated plate heat exchangers. For this reason, a particular effort has been made in the theoretical study of their behaviour, in order to compare it with the tests carried out in the installation.

NOMENCLATURA

Variable	Nombre de la variable	Unidades
g	Aceleración de la gravedad	$[m \cdot s^{-2}]$
φ	Ángulo de inclinación de las corrugaciones	$[^\circ]$
\hat{a}	Amplitud sinusoidal de la corrugación	$[m]$
A	Área	$[m^2]$
A_I	Área de placas del intercambiador	$[m^2]$
\dot{Q}	Calor	$[W]$
c_p	Calor específico	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
\dot{V}	Caudal volumétrico	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
h^*	Coeficiente de convección relativo al del PHE con $\varphi = 45^\circ$	$[-]$
ξ	Coeficiente de fricción	$[-]$
$\xi_{crossing}$	Coeficiente de fricción debido a flujo cruzado en el PHE	$[-]$
ξ_0	Coeficiente de fricción en el PHE en la hipótesis $\varphi = 0^\circ$	$[-]$
$\xi_{1,0}$	Coeficiente de fricción en el PHE en la hipótesis $\varphi = 90^\circ$	$[-]$
h	Coeficiente de transferencia de calor	$[W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}]$
h_c	Coeficiente de transferencia de calor del fluido caliente	$[W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}]$
h_f	Coeficiente de transferencia de calor del fluido frío	$[W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}]$
U	Coeficiente global de transmisión de calor	$[W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}]$
λ	Conductividad térmica	$[W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}]$
k_i	Coeficiente de pérdidas localizadas	$[-]$
B_1	Constante en Focke	$[-]$
C_1	Constante en Focke	$[-]$
K_1	Constante en Focke	$[-]$
n	Constante en Focke	$[-]$
B_0	Constante de Poiseuille	$[-]$
ρ	Densidad	$[kg \cdot m^{-3}]$
D	Diámetro	$[m]$
D_h	Diámetro hidráulico	$[m]$
ε	Eficiencia del intercambiador	$[-]$
Φ	Factor de ampliación de superficie	$[-]$
L	Longitud	$[m]$
m	Masa	$[kg]$
\dot{Q}_{max}	Máximo calor intercambiado	$[W]$
Nu	Número de Nusselt	$[-]$
N_p	Numero de placas	$[-]$
Pr	Número de Prandtl	$[-]$
Re	Número de Reynolds	$[-]$
NTU	Número de unidades de transferencia térmica	$[-]$



ΔP	Pérdida de carga	[Pa]
X	Relación geométrica de las corrugaciones	[-]
Λ	Periodo de las corrugaciones	[m]
T	Temperatura	[K]
T_{ce}	Temperatura del flujo caliente a la entrada	[°C]
T_{cs}	Temperatura del flujo caliente a la salida	[°C]
T_{fe}	Temperatura del flujo frío a la entrada	[°C]
T_{fs}	Temperatura del flujo frío a la salida	[°C]
u	Velocidad de flujo	[m·s ⁻¹]
μ	Viscosidad dinámica	[kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹]

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, el ser humano ha realizado numerosos avances en el campo de la ingeniería y la ciencia. La mayoría de ellos son consecuencia de los retos que en aquellas épocas se presentaban.

La revolución industrial del siglo XIX tuvo como pilar principal, entre otros, un destacable disparo en el consumo de energía. El rendimiento y la eficiencia de las máquinas térmicas era algo fundamental. Durante el desarrollo del siglo XX se observaron mejoras con el fin de maximizar los resultados obtenidos. Una mejor elección de los materiales, del diseño y de la producción de energía hicieron esto posible. Pero no fue hasta los años 70 del siglo pasado cuando se empezaron a notar dos efectos imposibles de ser ignorados:

1. La finitud de las energías fósiles.
2. El cambio climático.

La posibilidad de mantener un sistema de producción de bienes y servicios similar al alcanzado hasta ese momento, con el requisito adicional de conseguir una situación sostenible, pasaba inevitablemente por el uso de energías renovables. Con ellas han llegado nuevos problemas, consistentes principalmente en su naturaleza variable y en la necesidad de su almacenamiento. En el caso particular del almacenamiento térmico, se han buscado diversas soluciones y una de las más empleadas es el uso del calor de cambio de fase sólido-líquido. Para que estas sustancias puedan, no solo almacenar, sino también transportar el calor, deben ser dispersadas en una fase continua móvil. Por todo ello, en este TFG se quiere estudiar el comportamiento de una emulsión con materiales de cambio de fase (PCM)¹ en un intercambiador y sus cambios de fase.

1.1 ANTECEDENTES Y CONTEXTO DEL TFG

El presente TFG se ha desarrollado en el marco de un proyecto colaborativo que contribuye con la subtask E del grupo de trabajo de investigación de la Agencia Internacional de la Energía, dentro de la Task 67-Annex40. Tiene el objetivo de buscar procedimientos comunes de ensayos de sistemas de almacenamiento de energía térmica empleando materiales de cambio de fase (PCM), debido a la necesidad de su estudio experimental por la ausencia de correlaciones para emulsiones.

Durante el trabajo previo realizado por los estudiantes Guillermo Sanz y Jorge Torrubia, se comenzó realizando un estudio teórico de los conceptos fundamentales de los materiales de cambio de fase, para seguir caracterizando la emulsión que va a ser ensayada con las diferentes propiedades termo-físicas y reológicas. Con esta información se realizó un primer diseño de la instalación para realizar ensayos de enfriamiento y calentamiento de la emulsión PCM, sin embargo, nunca llegó a finalizarse esta fase.

¹ PCM = Phase change material.



1.2 OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TFG

El principal objetivo de este TFG es llegar a construir una instalación en la cual sea posible ensayar una suspensión de PCM para diversas condiciones de ensayo, como caudal variable, diferente rango de temperaturas y para enfriamiento y calentamiento de la emulsión PCM. Aunque la instalación esté diseñada para poder ensayar diferentes geometrías de intercambiadores de calor, en este trabajo se emplearán intercambiadores de placas corrugadas para los que se desea validar las correlaciones que permiten estimar los coeficientes de convección. Las tareas llevadas a cabo a lo largo de todo este trabajo han sido:

1. Revisión bibliográfica de las suspensiones de PCM y de los intercambiadores de calor de placas corrugadas. En particular, se ha realizado un estudio teórico profundo de este tipo de intercambiadores, de comportamiento complejo, para predecir sus magnitudes térmicas e hidráulicas y poder compararlas con las medidas de los ensayos experimentales.
2. Rediseño de la instalación, aportando al diseño realizado previamente modificaciones y añadidos con el fin de conseguir un mejor diseño.
3. Montaje de toda la instalación y, por ende, de todo el trabajo que conlleva: selección de componentes empleados, compra de materiales y trabajo manual de montaje.
4. Realizar las conexiones eléctricas pertinentes, que conecten los dispositivos empleados en la instalación y los sensores y medidores para la recopilación de datos y su posterior análisis.
5. Con el montaje acabado y las conexiones realizadas, se prueba cada uno de los componentes. En este trabajo se va a emplear agua como fluido conocido, en sustitución de la emulsión PCM, pues se pretende comprobar el buen funcionamiento de cada componente en particular y de toda la instalación en general. Siguiendo la terminología industrial, a esta agua se le puede llamar de proceso para distinguirla de la otra corriente de agua, que será la de servicio.
6. Por último, se realizan ensayos con agua como sustancia de proceso. Los resultados obtenidos de los ensayos experimentales se comparan con los cálculos del análisis teórico para poder sacar conclusiones y dejar validada la instalación.

1.3 SUSPENSIONES DE MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

El almacenamiento de energía térmica latente es una de las formas de almacenamiento de energía posibles, y consiste en el almacenamiento de energía en los cambios de fase realizados por los materiales PCM. La energía es acumulada en la entalpía de cambio de fase, y es interesante ya que permite almacenar una gran cantidad de energía en pequeños saltos de temperatura. Por lo tanto, se obtiene una mayor densidad de almacenamiento de energía por unidad de volumen en intervalos de temperatura

reducidos. Se pueden clasificar según la entalpía de cambio de fase y su temperatura de cambio de fase.

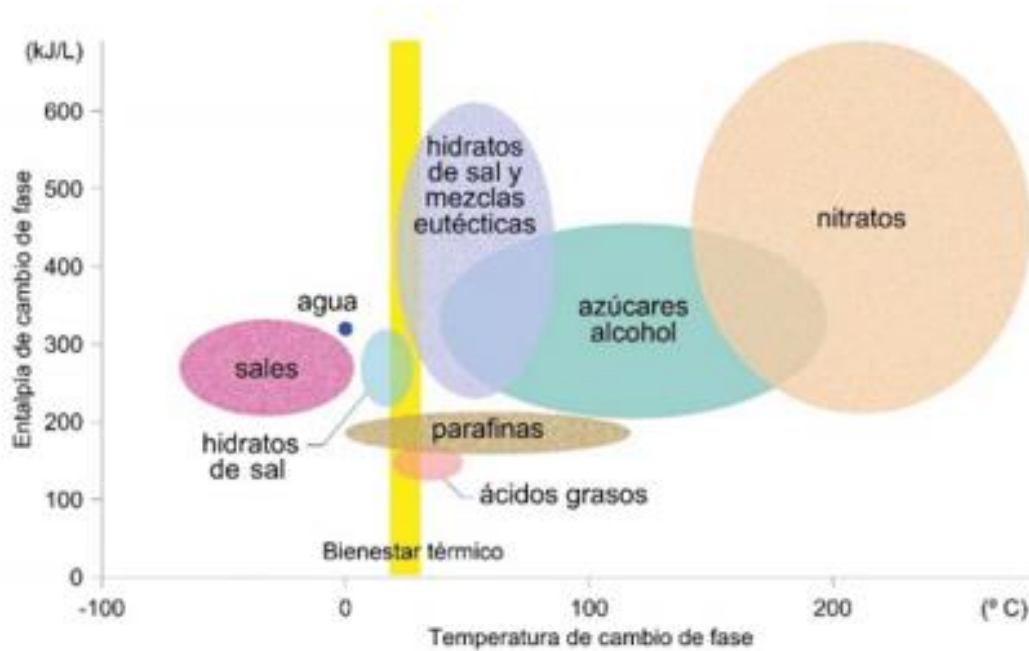


Figura 1.1 Clasificación de distintos PCM según sus propiedades. (Rodríguez Ubiñas, 2015)

En los últimos años ha surgido una nueva técnica de aprovechamiento de los materiales de cambio de fase en sistemas para almacenamiento de energía, control térmico e intercambiadores de calor. Esta nueva técnica consiste en la formación de un fluido bifásico, a partir de un fluido, como podría ser agua, y un PCM, dando lugar a un fluido de almacenamiento de energía térmica latente. (A.Heinz, 2005)

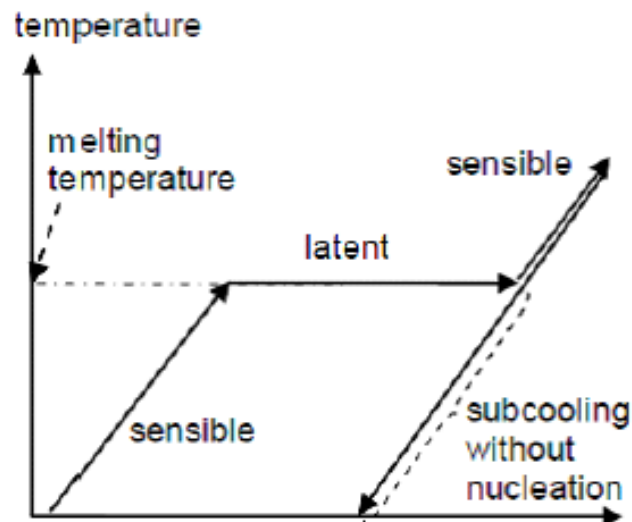


Figura 1.2 Almacenamiento de energía mediante calor latente. (L.Cabeza, 2008)

Una de las posibles aplicaciones de los PCM es en el campo de la construcción, concretamente, en el interior de paredes y particiones, con el fin de buscar el aprovechamiento energético del calor acumulado de forma renovable y generando un beneficio económico a largo plazo.

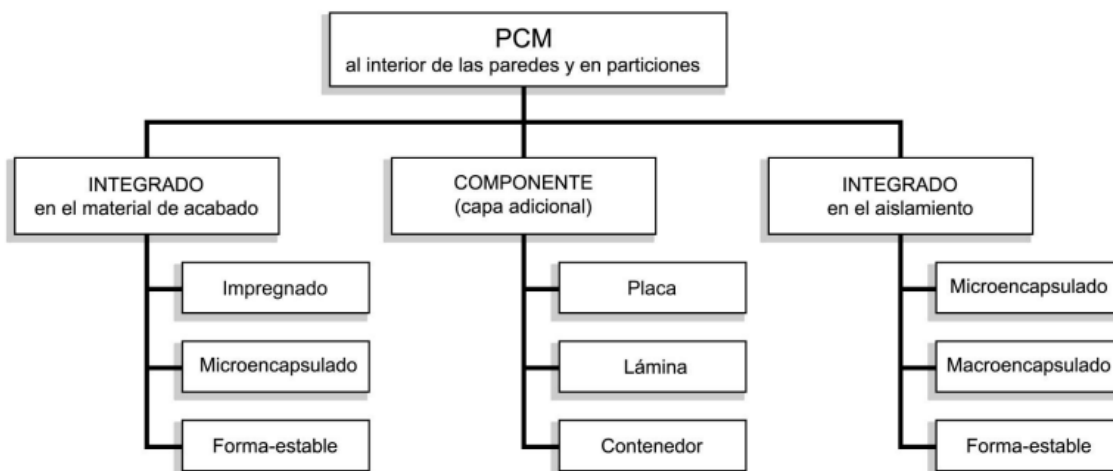


Figura 1.3 Aplicaciones de materiales PCM. (Ubiñas, 2014)

1.4 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Como ya se ha comentado previamente, el objetivo de la instalación es poder llegar a realizar ensayos de emulsiones de PCM para el análisis de su comportamiento en un intercambiador de calor.

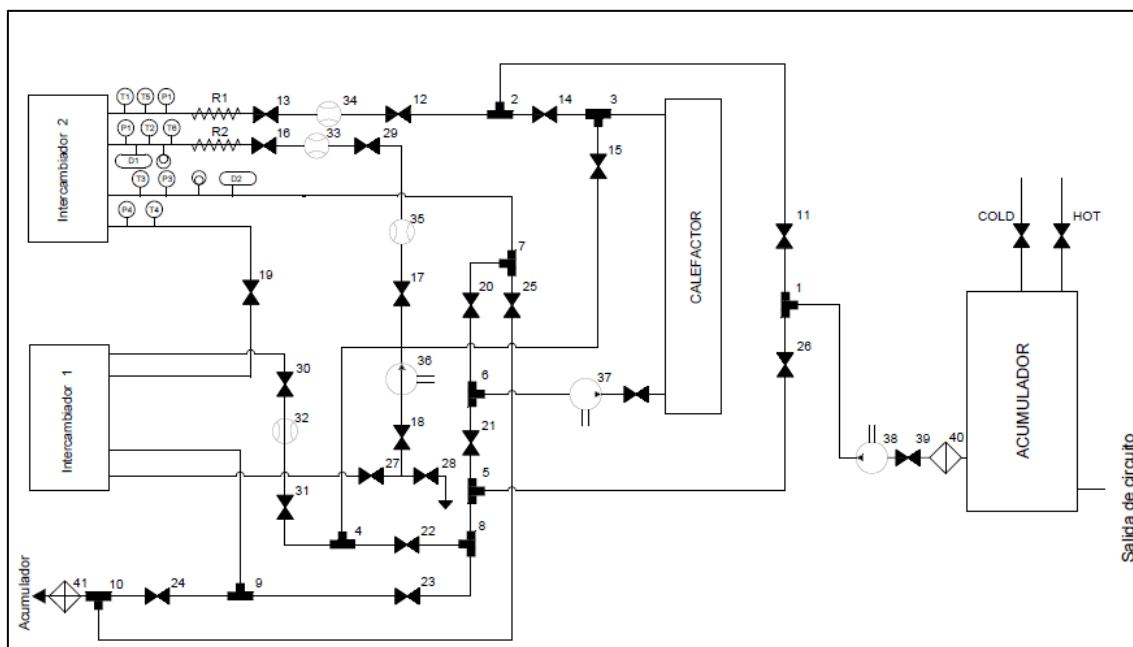


Figura 1.4 Plano de la instalación.

En este sentido, la instalación va a estar compuesta por 3 lazos diferentes:

- El primer lazo se va a encontrar la emulsión de PCM circulando. En nuestro trabajo se sustituye por agua de proceso.
- El segundo lazo es el que se va a encargar de calentar el PCM/agua de proceso mediante el calefactor y resistencias calefactoras, para poder intercambiarlo más adelante en el intercambiador de calor. En él va a circular agua de servicio.
- El tercer lazo es el que se encuentra conectado con el acumulador, en el cual va a circular un serpentín helicoidal conectado con una bomba de calor funcionando en modo refrigeración situada en la nave 2 del edificio A. Betanocurt de la EINA, Zaragoza. Su objetivo es mantener bajas las temperaturas del acumulador, donde se tiene acumulado el agua de servicio.

Sin embargo, la instalación va a ser más compleja, ya que para realizar un análisis completo de una emulsión de PCM se va a querer evaluar su comportamiento en los dos procesos inversos de a) solidificación/enfriamiento del agua de proceso y b) fusión/calentamiento del agua de proceso. Como los sensores de temperatura solo van a estar en uno de los dos intercambiadores, se va a necesitar emplear válvulas de cierre para modificar el recorrido de los lazos. A las diferentes modificaciones en las válvulas se les va a llamar configuraciones. Con la configuración de fusión se van a realizar los ensayos de fusión y viceversa.

Dentro de cada configuración, a cada lazo se le denominará circuito. Es decir, en la configuración de fusión hay tres circuitos, cada uno relacionado con cada lazo. Coincide que, para ambas configuraciones, el primer lazo de la emulsión se mantiene constante, por lo que se puede afirmar la existencia de 5 circuitos en la instalación: 1 para la emulsión de PCM, 2 correspondientes al lazo encargado de calentar el agua y otros 2 correspondientes al lazo conectado con el acumulador. Cada uno de estas configuraciones son diferentes.

Todo esto queda mejor explicado en los siguientes esquemas. Para la configuración de fusión:

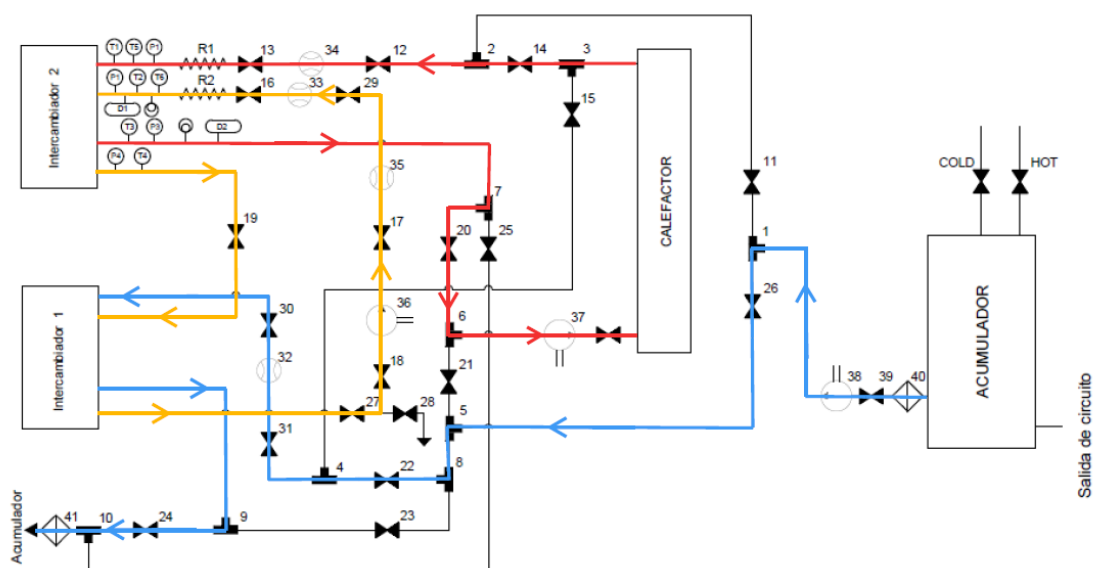


Figura 1.5 Esquema de la instalación para su configuración en fusión.

Primer circuito (**ROJO**) conectado al calefactor, que está impulsado por una bomba conectada previamente y que tras calentar el fluido se dirige al intercambiador 2, donde se volverá a enfriar para poder fundir la fase dispersa de la emulsión y, por último, regresa al calefactor para repetir el ciclo.

Segundo circuito (**AZUL**) conectado al acumulador, cuyo fluido sale impulsado por la bomba que está conectada a la salida de éste hacia el intercambiador 1, donde enfría y solidifica la fase dispersa de la emulsión (circuito amarillo). Producido el intercambio de calor, el fluido regresa hasta el acumulador donde se repite el proceso.

Tercer circuito (**AMARILLO**) conecta ambos intercambiadores, por los que circulará la emulsión. La bomba realiza la labor de impulsión para que primero vaya al intercambiador 2 y después, al intercambiador 1. Al salir del intercambiador 1, el fluido avanza hacia la bomba para repetir el ciclo.

Y para la configuración de solidificación:

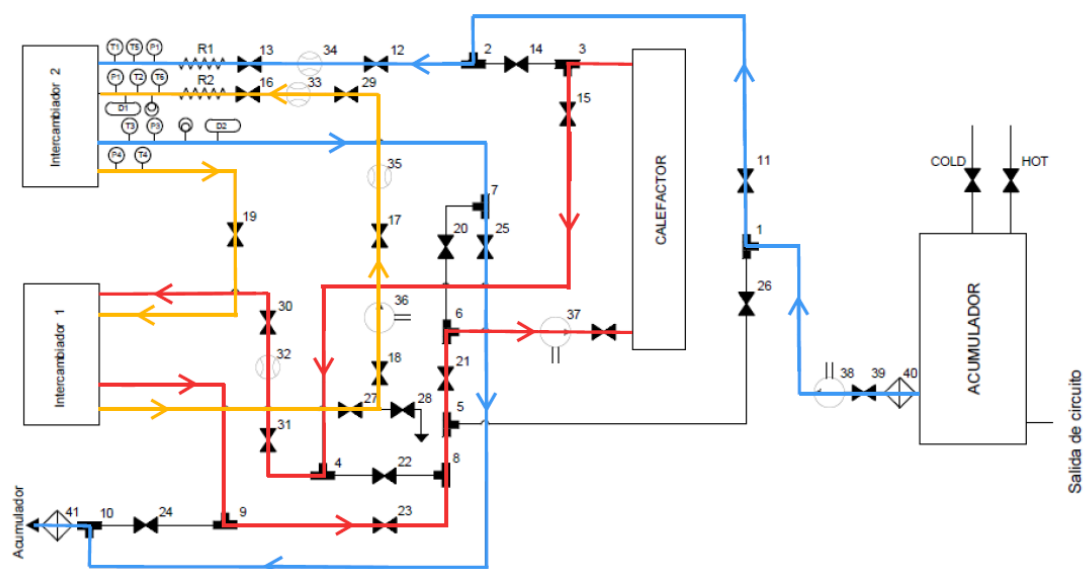


Figura 1.6 Esquema de la instalación para su configuración en solidificación.

Primer circuito (**ROJO**) conectado al calefactor, que está impulsado por una bomba conectada previamente y que tras calentar el fluido se dirige al intercambiador 1, donde se volverá a enfriar para poder fundir la fase dispersa de la emulsión y regresando al calefactor y repetir el ciclo.

Segundo circuito (**AZUL**) conectado al acumulador, cuyo fluido sale impulsado por la bomba que está situada a la salida de este, hacia el intercambiador 2 donde enfría y solidifica la fase dispersa de la emulsión (circuito amarillo) Producido el intercambio de calor, el fluido circula hasta el acumulador donde se repite el proceso.

Tercer circuito (**AMARILLO**) conecta ambos intercambiadores, por los cuales circulará la emulsión. La bomba realiza la labor de impulsión para que primero vaya al intercambiador 2 y después, al intercambiador 1. Al salir del intercambiador 1, el fluido avanza hacia la bomba para repetir el ciclo.

2. MODELO TEÓRICO

2.1 REVISIÓN BIBLOGRÁFICA

En la instalación de este trabajo, los intercambiadores son un aspecto fundamental. Las variables que son totalmente determinantes² en el funcionamiento de la instalación van a estar ligadas directamente al intercambiador. Por ello, la importancia de realizar un buen análisis conllevará la obtención de resultados más precisos.

El análisis se va a realizar sobre intercambiadores de placas corrugadas, que es el que se emplea en la instalación. Las diferentes configuraciones que se pueden llevar a cabo, tienen como consecuencia la gran cantidad de variables que influyen en su comportamiento, como la geometría de las placas, la dirección de los flujos, propiedades del fluido y una serie de constantes calculadas empíricamente.

2.1.2 FACTOR DE FRICCIÓN

Como todo elemento de una instalación, tiene pérdidas de carga. Se determinan mediante la fórmula de Darcy-Weisbach:

$$\Delta P = \frac{\xi \cdot \rho \cdot u^2 \cdot L_P}{d_h \cdot 2} \quad (1)$$

Holger Martin en su artículo sobre placas corrugadas utiliza la letra acentuada \hat{a} para denominar la amplitud sinusoidal de la corrugación y Λ a su periodo (ver Fig. 2.1). El valor del diámetro hidráulico de los canales que limitan las pacas depende de ellos según las siguientes expresiones:

$$X = \frac{2 \cdot \pi \cdot \hat{a}}{\Lambda} \quad (2)$$

$$\Phi(X) \approx \frac{1}{6} \cdot (1 + \sqrt{1 + X^2} + 4 \cdot \sqrt{1 + \frac{X^2}{2}}) \quad (3)$$

$$d_h = \frac{4 \cdot \hat{a}}{\Phi} \quad (4)$$

² Temperatura, presión y caudal

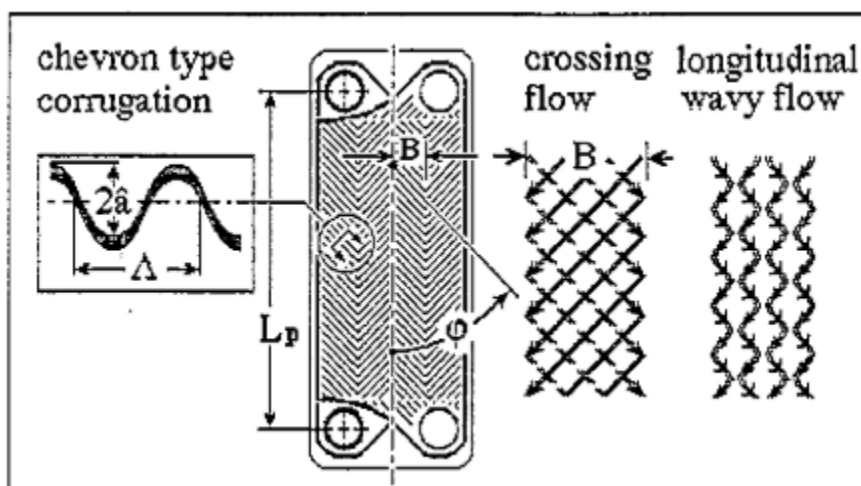


Figura 2.1 Esquema de placas corrugadas. (Martin, 1995)

Por último, el ángulo de inclinación de las corrugaciones φ es otro valor geométrico muy determinante en el cálculo del coeficiente de fricción del intercambiador. Para analizarlo, Holger Martin plantea las tres situaciones siguientes:

Primera situación límite ($\varphi = 0^\circ$).- La circulación del fluido entre placas corresponde a un flujo que cruza longitudinalmente los canales paralelos de sección sinusoidal. El flujo recorre desde la entrada a la salida en línea recta. Este hecho hace que las pérdidas de carga por longitud recorrida³ sean mínimas. Tampoco habrá giros del flujo y puntos de cruce⁴ del flujo por lo que tampoco generarán pérdidas estas acciones del flujo. Según la fase en la que se encuentren las placas, habría dos tipos de perfiles transversales:

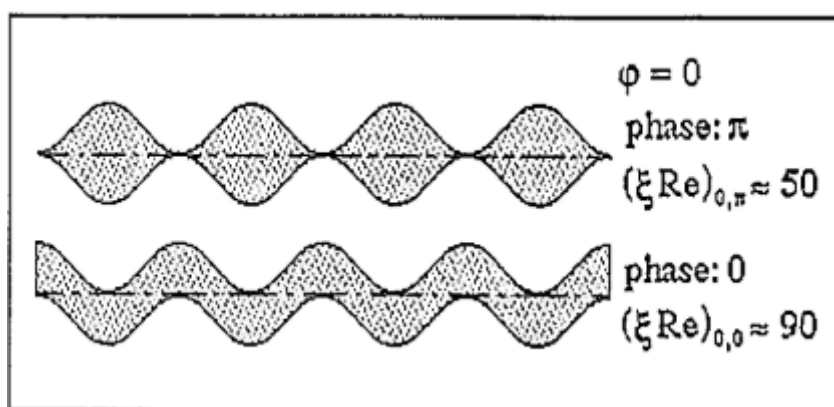


Figura 2.2 Perfiles del hueco entre placas según la fase entre placas. (Martin, 1995)

El cálculo del coeficiente de fricción depende de si el flujo es laminar o turbulento. En caso de ser laminar, se usa la ley teórica de Poiseuille y, en el caso de ser turbulento se utiliza la ecuación de Konakovs, que es una de las mejores aproximaciones de la ley semi - empírica de Prandtl,

³ Cuanto mayor es la distancia recorrida, mayor son las pérdidas. En la hipótesis 1 se recorre la distancia mínima posible, por lo que las pérdidas serán mínimas.

⁴ Los giros y puntos de cruce del flujo generan pérdidas en el sistema que aparecen en la hipótesis 3, cuando $0^\circ < \varphi < 90^\circ$.

Poiseuille, $Re < 2000$

$$\xi_0 = \frac{B_0}{Re} \quad (5)$$

Konakov, $Re \geq 2000$

$$\xi_0 = (1,8 \cdot \lg(Re) - 1,5)^{-2} \quad (6)$$

La constante B_0 depende de la sección transversal entre placas. Los cálculos realizados en un artículo en el que se estudian las propiedades de las placas corrugadas (Focke, 1985), determina que el valor de B_0 depende de la relación entre $\hat{\alpha}$ y Λ . Según el texto, se pueden esperar valores⁵ del orden de 90.

Segunda situación límite ($\varphi = 90^\circ$).- Los fluidos circulan según un flujo ondulatorio longitudinal que atraviesa una sección rectangular. Es la situación contraria a la primera hipótesis. En este caso, las formas mostradas como secciones transversales (Fig. 2.2) ahora son las secciones longitudinales. Es conocido que si el fluido circula a un $Re > 20$, se generan vórtices en los extremos del radio de giro, generando un movimiento de menor amplitud para una misma longitud de onda.

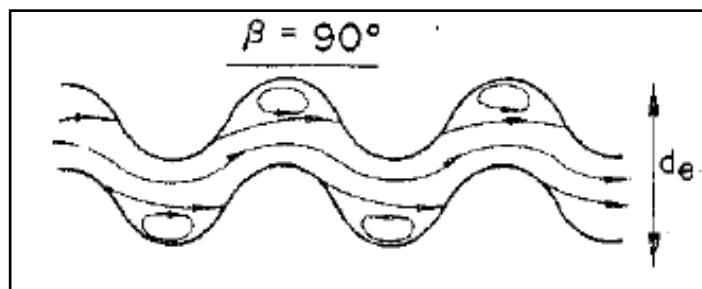


Figura 2.3 Dirección de flujo y vórtices en la hipótesis 2. (Focke, 1985)

Las correlaciones experimentales (Focke, 1985) obtenidas para estos casos, donde se tienen en cuenta la generación de los vórtices son:

$$Re < 2000 \quad \xi_{1,0} = \frac{B_1}{Re} + C_1 \quad (7)$$

$$Re \geq 2000 \quad \xi_{1,0} = \frac{K_1}{Re^n} \quad (8)$$

Las constantes de estas ecuaciones son determinadas en el mismo artículo a partir de los experimentos de Focke. Este obtiene los siguientes valores $B_{1e} = 1280$, $C_{1e} = 5.63$,

⁵ Se emplea de manera arbitraria el valor $B_0=93$ dentro del rango entre 90 y 96 en caso flujo laminar.

$K_{1e} = 63.8$, $n = 0.289$, referidos al diámetro equivalente, $d_e = 4\hat{a}$ Como Martin utiliza el diámetro hidráulico, $d_h = d_e/\Phi$, las constantes de ajuste pasan a valer $B_1 = B_{1e}/\Phi^2 = 597$, $C_1 = C_{1e}/\Phi = 3.85$, $K_1 = K_{1e}/\Phi^{1+n} = 39$.

La tercera situación es la habitual y es una intermedia entre ambos extremos ($0^\circ < \varphi < 90^\circ$), abarcando todo el rango de ángulos de inclinación. En casos reales, esta es la que se emplea, pues calcula el factor de fricción mediante una media ponderada de su valor en las dos situaciones límite 1 y 2. No obstante, esta situación es apreciablemente más compleja que las anteriores. Desde el momento en el que el fluido entra por el canal libre entra dos placas del intercambiador, lo atraviesa mediante dos tipos de corrientes distintas y paralelas (ver Fig. 2.1) que se denominan, respectivamente, de flujo cruzado y de flujo ondulado.

La corriente de flujo cruzado se produce en los surcos que existen entre las cimas y los valles de cada corrugación. La fricción de esta corriente se debe a tres factores:

a) La primera causa es consecuencia de que el recorrido longitudinal del flujo aumenta según el ángulo de inclinación, proporcionalmente a $1/\cos(\varphi)$. Por ello, su factor de fricción ξ_0 pasa a ser $\xi_0(Re)/\cos(\varphi)$.

b) La segunda causa de la fricción se debe a que, cada vez que el flujo cruzado llega al borde izquierdo o derecho de la placa, la corriente no puede seguir más allá y continua por el surco que tiene encima o debajo de él. Estos giros provocan una fricción proporcional a su número que es a la vez proporcional a $\tan(\varphi)$, por lo que esta contribución se expresa mediante el término $b \tan(\varphi)$.

c) La tercera causa de fricción es debida al contacto ente las corrientes que circulan por los surcos inferiores y superiores. El número de puntos de cruce es proporcional al $\sin(\varphi)$ y la expresión que le corresponde a este factor de fricción es $c \sin(\varphi)$ El valor de los coeficientes b y c los determina Martin mediante ajustes experimentales. La expresión completa del factor de fricción de esta primera corriente es la siguiente:

$$\xi_{crossing} = b \cdot \tan(\varphi) + c \cdot \sin(\varphi) + \frac{\xi_0(Re)}{\cos(\varphi)} \quad (9)$$

La segunda corriente mostrada en la figura es la de flujo ondulado y en ella el fluido atraviesa el canal directamente desde el orificio de entrada hasta el de salida, siguiendo las ondulaciones de las corrugaciones. El valor que puede tomar el factor de fricción se encuentra entre $\xi_{1,0}(Re)$ calculado en las Ecs. (7,8) y $\xi_{1,\pi} = \infty$. Se toma, por tanto, como $\xi_1 = a \cdot \xi_{1,0}(Re)$, siendo $a \geq 1$ y a pasa a ser un tercer coeficiente de ajuste. Los valores que se recomiendan para los tres son $a = 3.8$, $b = 0.18$ y $c = 0.36$.

Los caudales de cada una de las dos corrientes van a ser proporcionales a las fracciones de sección transversal que atraviesan, $\cos(\varphi)$ para el flujo cruzado y $1 - \cos(\varphi)$ para el flujo ondulatorio, respectivamente, y a sus velocidades da paso, que son a su vez inversamente proporcionales a la raíz cuadrada de sus factores de fricción. De todo ello

resulta que la expresión que da el factor de fricción global para cada uno de los fluidos que circula por el interior de un intercambiador de placas corrugadas viene dado por:

$$\frac{1}{\sqrt{\xi}} = \frac{\cos(\varphi)}{\sqrt{b \cdot \tan(\varphi) + c \cdot \sin(\varphi) + \frac{\xi_0(Re)}{\cos(\varphi)}}} + \frac{1 - \cos(\varphi)}{\sqrt{\xi_1(Re)}} \quad (10)$$

2.1.3 INTERCAMBIO DE CALOR

Una vez calculadas las pérdidas de carga, lo siguiente es obtener la transferencia de calor del intercambiador. La correlación que se emplea parte de una analogía entre los transportes de calor y de momento que se debe al investigador L ev eque, se aplica a la geometría del intercambiador de placas y se corrigen algunos coeficientes de ajuste con base en la evidencia empírica más reciente. El resultado es la ecuación siguiente:

$$Nu = 0.122 \cdot Pr^{1/3} \cdot (\mu/\mu_w)^{1/6} \cdot [\xi \cdot Re^2 \cdot \sin(2\varphi)]^{0,374} \quad (11)$$

$$h = Nu \cdot \lambda/D_h \quad (12)$$

Es necesario conocer el valor del número de Prandtl, de la conductividad térmica y de la viscosidad que dependen del fluido utilizado y de su temperatura. Este proceso se realiza para el flujo caliente y para el flujo frío del intercambiador de calor. Se obtienen dos números de Nusselt (Nu_f y Nu_c) y dos coeficientes de convección (h_f y h_c).

El cálculo del calor intercambiado se realiza mediante el método NTU- ϵ , cuyos pasos principales son los siguientes: (Gil, Apuntes intercambiadores de calor, 2021)

$$U_{teo} = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_f} + \frac{e_{placa}}{\lambda_{placa}} + \frac{1}{h_c}\right)} \quad (13)$$

$$A_I = (n^o \text{ placas} - 2) \cdot \Phi \cdot (Anchura_I \cdot L_p) \quad (14)$$

Donde A_I es el área de transmisión de calor de todo el intercambiador, $Anchura_I$ la anchura de cada una de sus placas, L_p la longitud de la placa del intercambiador (ver Fig. 2.1) y ambas caras est n corrugadas idénticamente.

Los caudales de ambos flujos no coinciden en general, y, al estar a distintas temperaturas, el valor de su calor específico también varía. Se determina la capacidad calorífica mínima entre las de los dos fluidos, C_{min} , como el menor de los siguientes valores:

$$C_f = \dot{m}_f \cdot c_{pf} \quad (15)$$

$$C_c = \dot{m}_c \cdot c_{pc} \quad (16)$$

A partir de los valores obtenidos, se puede determinar los parámetros de número de unidades de transferencia, NTU y el cociente de capacidades caloríficas, C_r de la siguiente manera:

$$NTU = \frac{U \cdot A_I}{C_{min}} \quad (17)$$

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (18)$$

La expresión que da la eficiencia del intercambiador para flujos a contracorriente en intercambiadores de calor es la siguiente (Gil, Anexo intercambiadores de calor, 2021):

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-NTU \cdot (1 - C_r)}}{1 - C_r \cdot e^{-NTU \cdot (1 - C_r)}} \quad (19)$$

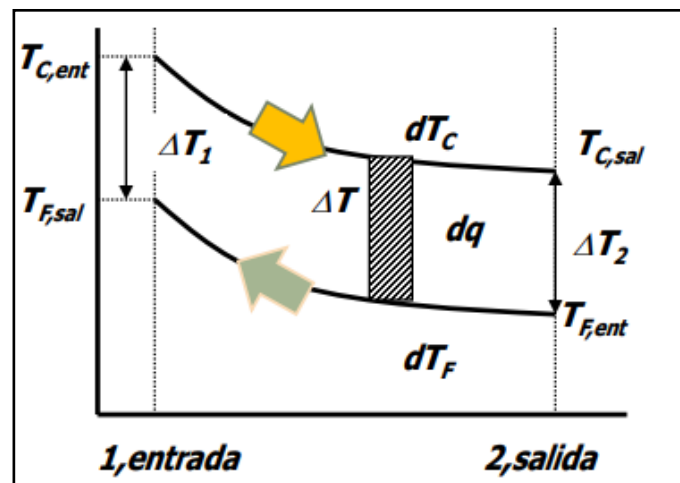


Figura 2.4 Gráfica de temperaturas en un intercambiador a contracorriente. (Gil, 2021)

Cuando ninguna de las dos corrientes cambia de fase, el cociente entre el calor intercambiado y el calor máximo que se podría intercambiar se calcula:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}} \quad (20)$$

$$\dot{Q}_{max} = C_{min} \cdot \Delta T_{max} = C_{min} \cdot (T_{ce} - T_{fe}) \quad (21)$$

Se obtiene el valor real de calor intercambiado y, con ese valor, se realizan los balances de energía para el flujo frío y el flujo caliente:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_f = C_f \cdot (T_{fs} - T_{fe}) \quad (22)$$

$$\dot{Q} = \dot{Q}_c = C_c \cdot (T_{ce} - T_{cs}) \quad (23)$$

Obteniendo como resultado las temperaturas de salida del intercambiador para cada uno de los flujos.

2.2 CALCULOS TEÓRICOS AGUA - AGUA

A partir del procedimiento anterior, es posible analizar el comportamiento de un intercambiador de unas determinadas características para ángulos de inclinación variables. Tomando los valores geométricos del intercambiador de la instalación y variando el ángulo de inclinación, se obtienen⁸ los valores recogidos en la tabla 2.1 y mostrados en las figuras 2.5 y 2.6.

Observando las gráficas, se puede determinar que el ángulo de inclinación tiene una importancia muy relevante sobre su influencia en la instalación. Según va aumentando el ángulo, el coeficiente de fricción aumenta, por lo tanto, también lo hace el número de Nusselt y, por tanto, el coeficiente de convección según indica las Ecs. (11) y (12).

Cuanto mayor sea el coeficiente de convección en un intercambiador, mejores resultados se verán en el intercambio de calor. Sin embargo, se debe encontrar el equilibrio entre los intereses de la instalación, ya que maximizar el intercambio de calor también genera unas mayores pérdidas por fricción.

⁸ Las operaciones realizadas para obtener estos resultados gráficos se encuentran en el anexo E.

Evaluamos el comportamiento teórico del intercambiador⁹ en función del ángulo de inclinación de las corrugaciones para el circuito por donde circula la emulsión, pero con agua.

Angulo	Re	f	h	h*
5	629,5	0,1968	1471	0,269859
15	629,5	0,3131	2599	0,476793
25	629,5	0,4737	3559	0,652908
35	629,5	0,7192	4491	0,823886
45	629,5	1,135	5451	1
55	629,5	1,924	6489	1,190424
65	629,5	3,656	7643	1,402128
75	629,5	8,158	8797	1,613832
85	629,5	20,4	8344	1,530728

Tabla 2.1 Valores obtenidos en el modelo teórico en función del ángulo.

Se comprueba que se cumple el comportamiento esperado comentado anteriormente. Representando las gráficas, se observa su similitud con las del artículo de (Martin, 1995):

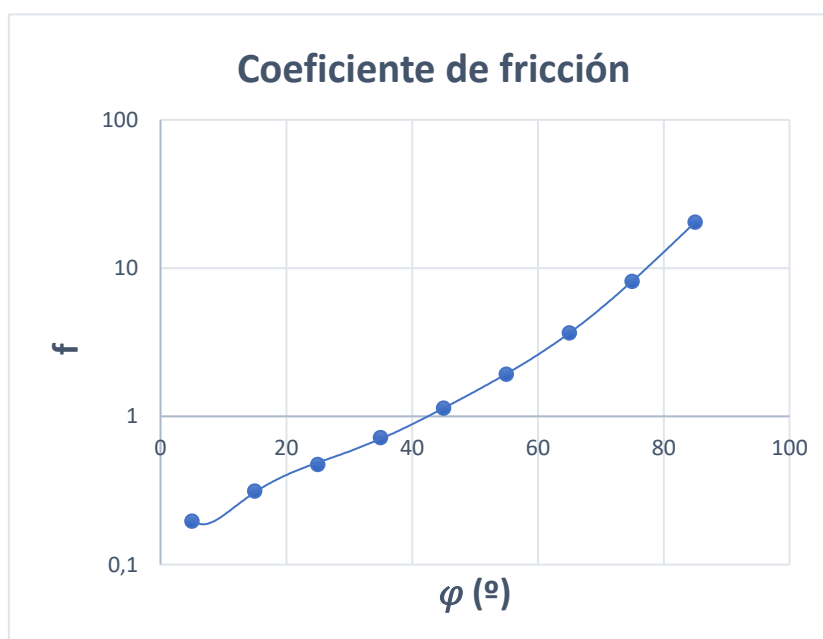


Figura 2.5 Factor de fricción en función del ángulo de inclinación de las corrugaciones.

⁹ Valores calculados según las condiciones de los ensayos de fusión para caudal máximo.

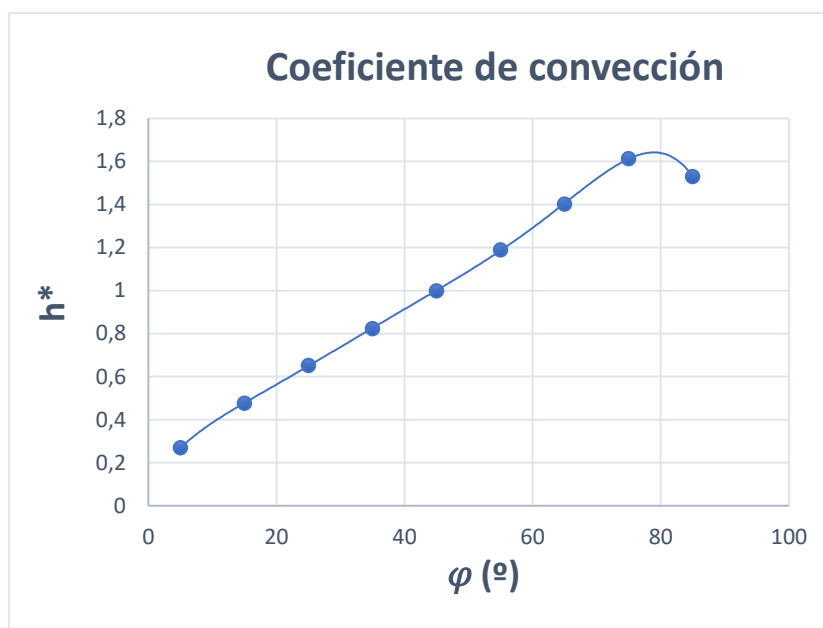


Figura 2.6 Factor de convección en función del ángulo de inclinación de las corrugaciones.

Como se ve en la tabla 2.1 y las figuras 2.5 y 2.6 el máximo del coeficiente de convección se obtiene para $\varphi \cong 80^\circ$, pero el coeficiente de fricción aumenta bruscamente a partir de $\varphi = 65^\circ$, por ello la mayoría de los intercambiadores de calor de placas corrugadas se fabrican con en este último ángulo. En la instalación, las placas empleadas en los intercambiadores de calor tienen un ángulo de inclinación de las corrugaciones de $\varphi = 65^\circ$.

Los parámetros geométricos son una constante de todo el análisis, sin embargo, van a existir variables que van a cambiar según la configuración con la que se opere, empezando por el caudal del agua. Al tener diferentes caudales y misma área de paso, las velocidades a la que circula son diferentes. Lo que tiene una influencia directa sobre el Reynolds en cada circuito.

El caudal de la emulsión es la primera variable que va a variar. Para realizar diferentes ensayos es interesante conocer el comportamiento para distintas situaciones, es por ello, por lo que se analizarán los resultados para cada configuración con diferentes caudales de la emulsión. Si se reduce el caudal, se reduce la velocidad y, por tanto, el coeficiente de convección disminuye.

La segunda variable que va a ir cambiando según el ensayo que se realice son las temperaturas. El calor intercambiado máximo es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas en la instalación, y por tanto dependerá de las condiciones estacionarias que fijemos en cada ensayo. Cuanto mayor sea la diferencia de temperaturas de entrada de ambos fluidos, mayor será el intercambio de calor.

Y la tercera variable es la pérdida de carga, que va a variar según el circuito en el que se encuentre. Dependerá directamente del caudal de circulación, el número de veces que pasa por un intercambiador en un ciclo, la longitud y el número de elementos singulares en ese circuito.

Para unos parámetros geométricos en el intercambiador, ($\hat{a} = 8,637 \cdot 10^{-4} m$; $\Lambda = 7,8 \cdot 10^{-3} m$), se obtiene los siguientes resultados¹⁰:

	\dot{V}/\dot{V}_{max}	Reynolds	ξ_0	$\xi_{1,0}$	ξ	ΔP (kPa)
Solidificación	1	626,1	0,1485	26,21	3,662	2,943
	0,75	472,4	0,1969	28,48	4,039	1,848
	0,5	311,3	0,2987	33,27	4,833	0,9602
	0,25	152,5	0,609	47,89	7,25	0,3459
Fusión	1	629,5	0,1477	26,17	3,656	2,97
	0,75	467,9	0,1988	28,57	4,054	1,819
	0,5	310,2	0,2998	33,32	4,842	0,9549
	0,25	150,8	0,6166	48,21	7,306	0,3407

Tabla 2.2 Factor de fricción en función del caudal.

Los resultados que se obtienen coinciden con el comportamiento esperado. Un mayor caudal, con el resto de variables constantes, aumenta el número de Reynolds. En consecuencia, el factor de fricción que es inversamente proporcional a este valor, disminuye. La pérdida de carga es directamente proporcional al término de la velocidad al cuadrado, por lo que aumentará si aumenta el caudal.

Obtenido el factor de fricción, se puede calcular los parámetros térmicos del intercambio¹¹.

	\dot{V}/\dot{V}_{max}	Nu	h (W/K*m ²)	U (W/K*m ²)	ΔT_{MAX} (K)	ϵ	\dot{Q} (W)
Solidificación	1	39,21	7617	3394	3,91	0,5791	1729
	0,75	32,95	6400	3129	3,53	0,6704	1363
	0,5	25,8	5010	2756	3,14	0,7956	948,5
	0,25	17,61	3420	2194	2,94	0,9418	515,1
Fusión	1	39,35	7643	3751	10,58	0,6493	5274
	0,75	32,76	6363	3414	12,25	0,7374	5154
	0,5	25,74	5000	2978	13,85	0,8432	4418
	0,25	17,51	3401	2326	19,21	0,9592	3389

Tabla 2.3 Calor intercambiado en función del caudal y la temperatura.

El número de Nusselt depende directamente del número de Reynolds al cuadrado, por lo que un mayor número de Reynolds aumenta el número de Nusselt. El coeficiente de convección de la emulsión aumenta según se aumenta el número de Nusselt, al igual que ocurre para el coeficiente global de intercambio.

También es interesante fijarnos en el valor de la eficiencia. Cuanto mayor es el caudal, menor es la eficiencia del intercambiador, como corresponde a las curvas $\epsilon - NTU$ de cualquier tipo intercambiador.

¹⁰ El factor de fricción teóricamente es igual para la configuración de solidificación como de fusión en la emulsión, sin embargo, se dan pequeñas variaciones debido a que hemos ajustado el valor del caudal al medido en la fase de ensayos para la obtención de un valor representativo más preciso.

¹¹ La diferencia de temperatura máxima viene tomada como la media de las temperaturas de cada uno de los ensayos realizados, que se obtienen en la fase experimental.

2.3 PÉRDIDAS DE CARGA EN LA INSTALACIÓN

Para el diseño de la instalación es fundamental realizar el análisis de las pérdidas de carga de toda la instalación. Según la configuración en la que estemos, varía el número de elementos singulares que afecta a la pérdida total de carga. Los tubos empleados van a ser de cobre, con un diámetro externo de 22 mm e interno de 20 mm (Energía, 2012).

Se procede a contar cada uno de los elementos singulares de cada configuración:

		Pasos por intercambiador	Longitud (m)	nº codos	nº T	nº VC
Emulsión		2	9,1	13	4	6
Fusión	Calefactor	1	8	7	4	4
	Acumulador	1	7,9	1	6	6
Solidificación	Calefactor	1	7,5	6	0	6
	Acumulador	1	9,5	3	6	5

Tabla 2.4 Longitudes y elementos singulares en cada uno de los circuitos.

Las pérdidas¹² de carga en el tubo se obtienen de las ecuaciones:

$$Re_{Tubo} = \frac{\rho \cdot u_{Tubo} \cdot d_i}{\mu} \quad (24)$$

$$\xi_{Tubo} = \sqrt{-0,8685 \cdot \ln \left(\frac{1,964 \cdot \ln(Re) - 3,8215}{Re} \right)} \quad (25)$$

$$\Delta P_{Tubo} = \frac{\xi_{Tubo} \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot u_{Tubo}^2 \cdot L_{Tubo}}{d_i} \quad (26)$$

Las pérdidas de cargas singulares dependerán del número de unidades que haya de cada una y de su valor de k_i (Sanchez, 2020). En la instalación se encuentran los siguientes elementos:

	Codo	T	VC
k	0,7	0,9	0,29

Tabla 2.5 Valor de k de cada elemento

Siendo las pérdidas de carga singulares:

$$\Delta P_{S,i} = k_i \cdot n_i \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot u_{Tubo}^2 \quad (27)$$

¹² La ec. (25) corresponde al autor Techo, para casos con flujo turbulento en tubos lisos.



$$\Delta P_{S,Total} = \Delta P_{S,Codos} + \Delta P_{S,T} + \Delta P_{S,VC} + \Delta P_{Tubo} + \Delta P_{Inter} \quad (28)$$

Y se obtiene como resultado la pérdida de carga en cada uno de los circuitos, en función del caudal establecido:

		Caudal (l/min)	ΔP_{Total} (kPa)
Emulsión		11	10,6
Fusión	Calefactor	19	16,15
	Acumulador	13	7,63
Solidificación	Calefactor	19	8,41
	Acumulador	13	13,96

Tabla 2.6 Pérdida de carga en cada circuito, en función del caudal.

Siendo el más desfavorable el circuito del calefactor en la configuración de fusión. Ese valor, como es el más restrictivo, se emplea para comprobar en el apartado 3.3 si las bombas de que disponía la instalación previa son suficientes o si es necesario cambiarlas.

3. RE – DISEÑO DE LA INSTALACIÓN

El primer paso fue comprobar el estado de la instalación anterior. Se realizó un análisis sobre cada elemento con el fin de determinar y planificar las modificaciones que se deberían realizar (Sanchez, 2020).

3.1 COMPONENTES AÑADIDOS

Inicialmente, las conexiones de la instalación estaban incompletas. Para completarla, se empleó tuberías de cobre, latiguillos, válvulas de tres vías, codos, cruces, mangueras, conexiones macho/hembra – macho/hembra y anillos de compresión, como ya se había empleado previamente. El hecho de aumentar el número de elementos, como se ve en este apartado, hará que el número de líneas y conexiones aumente. Los latiguillos han sido importantes para cerrar las conexiones del circuito, debido a la rigidez que la instalación ha adquirido al tener tantos elementos fijos.

Otro de los elementos cuyo número ha aumentado son las válvulas de cierre. El fin de esto es crear dos circuitos de circulación del agua abriendo o cerrando estas válvulas, además de aislar los elementos importantes para posibles modificaciones. También se ha tenido en cuenta el vaciado del circuito, mediante una válvula que lo controlaría. El agua que se emplea en la instalación no está tratada previamente. Es por eso, por lo que se implementarán dos filtros de agua: uno al final del ciclo del agua, para filtrar la posible contaminación en el circuito, y otro a la salida del acumulador, para filtrar el agua que haya podido llegar de forma externa.



Figura 3.1 Válvula reguladora mariposa.



Figura 3.2 Filtro de agua Y.

Para solventar el problema de tener aire acumulado en la instalación, se añaden purgadores en cada circuito. Deben ser colocados en el punto más alto de la instalación. Además, los fluidos se vierten a la instalación por unos depósitos, que también se encuentran en la parte más alta de ella. No solo se emplean para llenar los circuitos, también servirán como vasos de expansión si se dejan sus respectivas válvulas abierta



Figura 3.3 Depósito.



Figura 3.4 Purgador automático de columna vertical.

Las tres variables más relevantes, cuyos valores se deben tener muy en cuenta son el caudal, la temperatura y la presión. Se dispone de un medidor de caudal másico de Coriolis y de una válvula TA, que también actúa como controladora, ambos a las entradas del intercambiador 2 (Fig. 1.4). Se añadirán dos válvulas TA, ambas para medir el caudal en los circuitos donde no se encuentra el Coriolis.

Para el control y la medida de la temperatura se van a emplear sensores PT-100. De los cuales, 4 de ellos se usan para obtener la temperatura en todas las entradas y salidas del intercambiador 2, que permite conocer la diferencia de temperatura y, por tanto, el calor intercambiado. Se añaden también otros 2 sensores con los que obtendremos un valor de consigna, a las entradas del intercambiador 2. Este valor servirá de referencia para regular las resistencias (y el calefactor) con el programa informático. Por último, un sensor medirá la temperatura ambiente del recinto y otro la temperatura en la que el acumulador se desea mantener. En total se emplean 8 PT-100.

Para obtener los valores de la presión se emplean sensores de presión de Honeywell Heavy Duty Pressure Transducers PX3 Series. Se sitúan uno de ellos a cada entrada y salida del intercambiador 2. En caso de una posible obturación que produjera una excesiva pérdida de carga, estos sensores podrán detectarlas.



Figura 3.5 Sensor PT-100.



Figura 3.6 Sensor Honeywell.



Figura 3.7 Válvula TA.

Las señales de los sensores de temperatura y presión van recogidas en una tarjeta de adquisición de datos de 24 entradas, suficientes para todos nuestros sensores¹³. Esta tarjeta irá dentro del datalogger, que será quien reciba la información de los sensores.



Figura 3.8 Datalogger Keysight Technologies 34970A.

Para facilitar la salida de datos se ha diseñado un programa que recoge todas las salidas de los sensores. Permite exportar y representar los datos obtenidos gráficamente para un mejor seguimiento de cada experimento y evaluar el calor intercambiado. La pantalla principal es la siguiente:

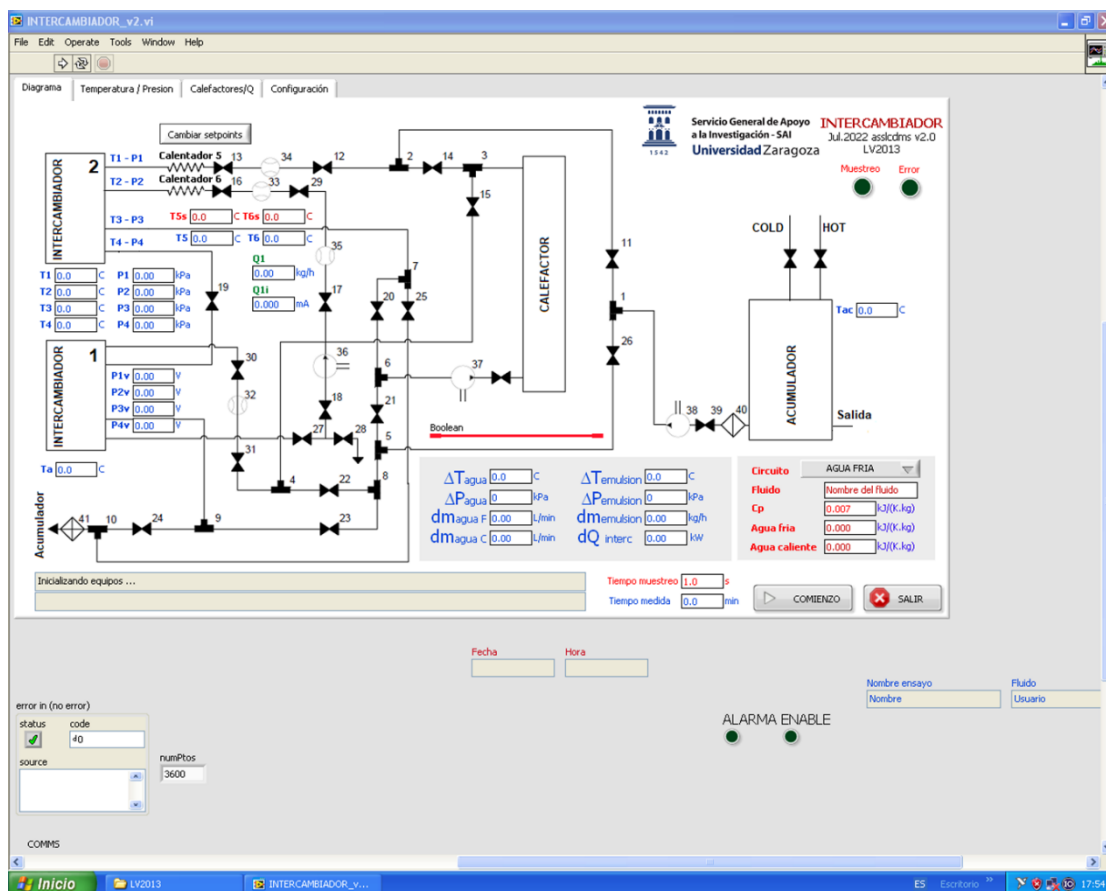


Figura 3.9 Captura de pantalla del programa de la instalación.

¹³ Los sensores de presión ocupan una entrada y las PT-100 ocupan 2 entradas

3.2 PLANOS DE LA INSTALACIÓN

Los cambios realizados han hecho que diseño de la instalación cambie considerablemente¹⁴¹⁵, quedando de la forma mostrada en la figura 3.10:

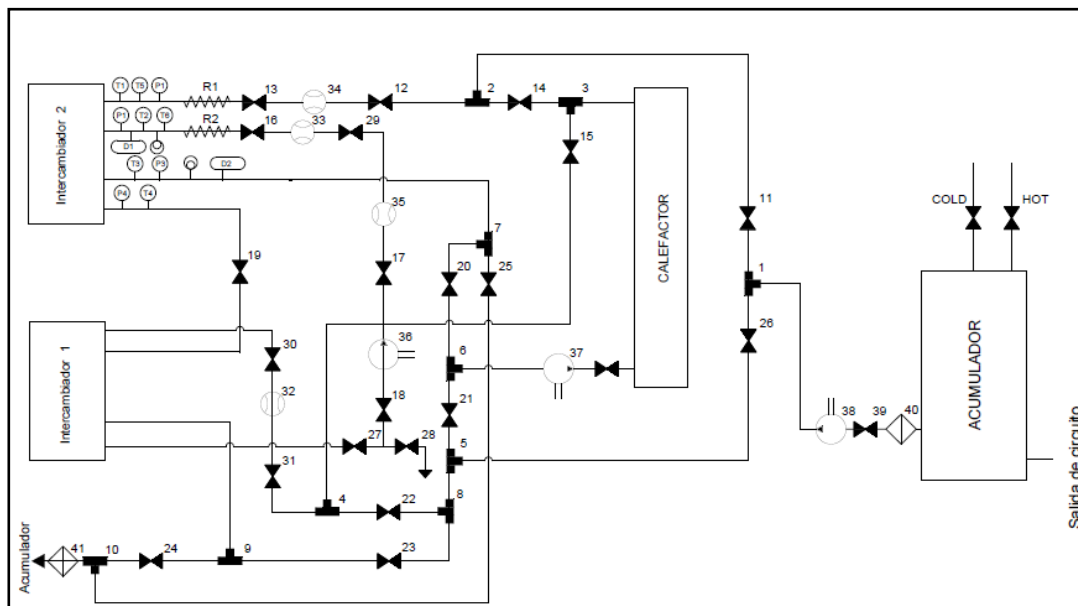


Figura 3.10 Plano de la instalación.

El esquema incluye los siguientes elementos:

Nº unidades	Elementos	Modelo
1	Acumulador	Deposito Lapesa RD 50-1
1	Intercambiador 1	LPIC-01
1	Intercambiador 2	LPIC-01
1	Bomba 36	Iwaki MD-40 RZ
1	Bomba 37	Iwaki MD-40 RZ
1	Bomba 38	Iwaki MD-30 RZ
1	Calefactor	GCP-TR-INOX-II0120
1	Caudalímetro másico Coriolis 35	Krohne OPTIMMAS 1300
1	Válvula TA (Caudalímetro 32)	STAD – PN 25
1	Válvula TA (Caudalímetro 33)	STAD – PN 25
1	Válvula TA (Caudalímetro 34)	STAD – PN 25
25	Válvulas reguladoras	Válvula esfera H-H 3/4 MARIPOSA
4	Sensores de presión	Honeywell PX3 Series
8	Sensores de temperatura	PT-100
2	Filtros de agua	Filtro de asiento inclinado de Latón
2	Purgadores	Respiradero automático Watts 22L0250110
2	Depositos	Estandar

Tabla 3.1 Elementos de la instalación.

¹⁴ Las válvulas de tres vías se numeran para facilitar la construcción y seguimiento de la instalación, su número no es relevante. La instalación contiene un mayor número de estas que no están numeradas.

¹⁵ En el anexo A se encuentra el plano en mayor dimensión, con un zoom en el intercambiador 2.

Además de los que se han añadido en el plano, también hay una serie de elementos que no se indican, pero que se encontraban previamente o han sido comprados y añadidos al sistema:

Elementos	Modelo
Tuberías de cobre	Ø22
Codos, tes, cruces	3/4 (M-M, M-H, H-H)
Mangueras	Ø22
Latiguillos	3/4 H-M
M-M, M-H, H-H	3/4
Anillos de compresión	3/4

Tabla 3.2 Elementos generales de la instalación.

Con el plano de la instalación ya finalizado se realizó la numeración de los elementos. En la instalación se llevarán a cabo dos circuitos diferentes, que serán configurados con válvulas de regulación. La numeración servirá para facilitar esta labor, además de ayudar en el montaje y detección de errores.

Según la función que queramos realizar, el circuito podrá tener dos configuraciones: para la fusión de la emulsión y para su solidificación. Cambiando de posición abierto-cerrado de las válvulas de regulación se cambiará de una configuración a otra.

3.2.1 FUSIÓN DE LA EMULSIÓN

Esta configuración de las válvulas se realiza con el fin de que en la emulsión se produzca la fusión en el intercambiador 2. Para ello debemos tener la válvula COLD abierta en la entrada al acumulador. En el resto del circuito, debemos colocar las válvulas de forma que cumpla el siguiente esquema:

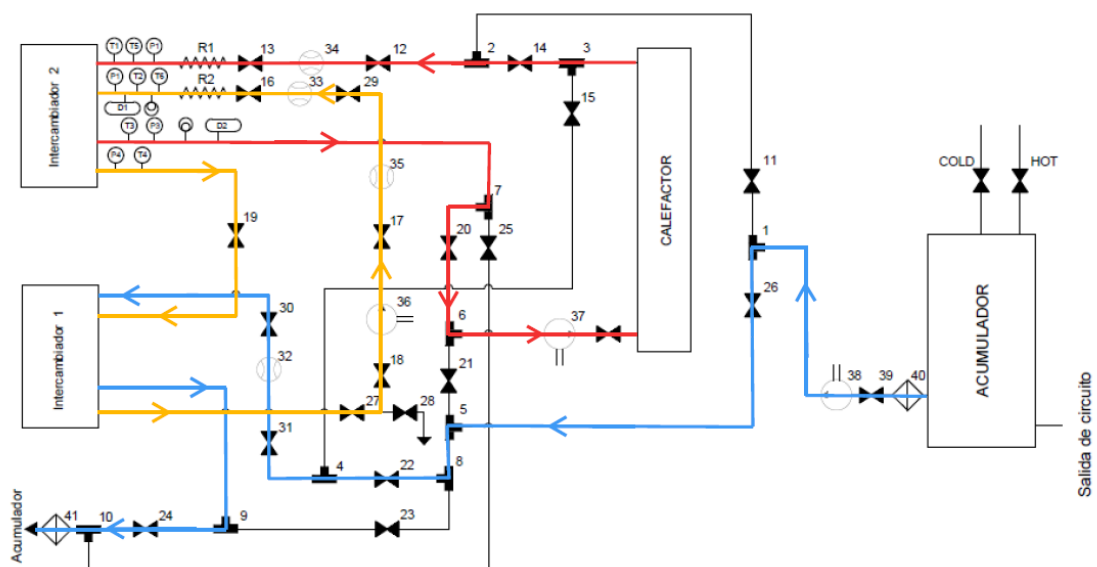


Figura 3.11 Configuración de fusión.

Siendo el esquema de las válvulas abiertas y cerradas el siguiente:

	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	39	HOT	COLD
OPEN		X	X	X		X	X	X	X	X		X		X		X	X		X	X	X	X		X
CLOSE	X				X						X		X		X			X					X	

Tabla 3.3 Válvulas abiertas y cerradas para la configuración de fusión.

3.2.2 SOLIDIFICACIÓN DE LA EMULSIÓN

La segunda configuración de las válvulas se realiza con el fin de que en la emulsión se produzca la solidificación en el intercambiador 2. Para ello debemos tener la válvula COLD abierta en la entrada al acumulador. En el resto del circuito, debemos colocar las válvulas de forma que cumpla el siguiente esquema:

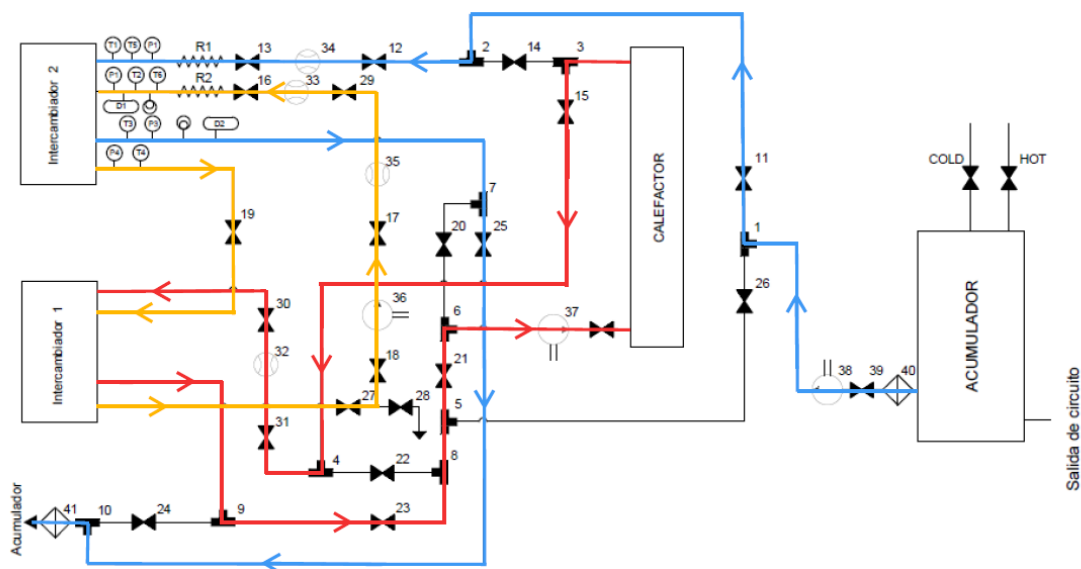


Figura 3.12 Configuración de solidificación.

Siendo el esquema de las válvulas abiertas y cerradas el siguiente:

	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	39	HOT	COLD
OPEN	X	X	X		X	X	X	X	X		X		X		X		X		X	X	X	X		X
CLOSE				X						X	X		X		X		X						X	

Tabla 3.4 Válvulas abiertas y cerradas para la configuración de solidificación.

3.3 BOMBAS

Inicialmente, la instalación disponía de dos bombas Iwaki MD-10 y una Iwaki MD-30 RZ. Las curvas características de estos modelos se muestran en las siguientes figuras (Iwaki, 2017):

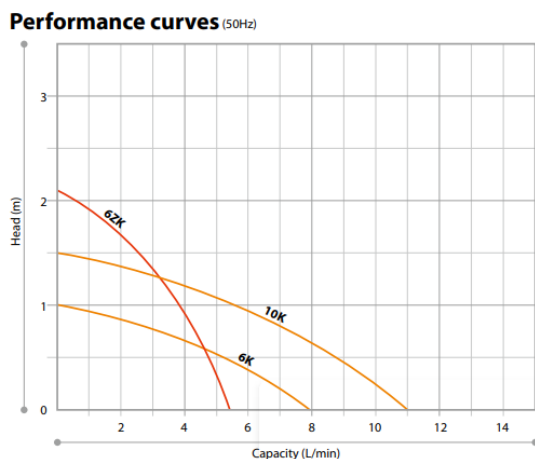


Figura 3.13 Curva de la bomba MD-10.

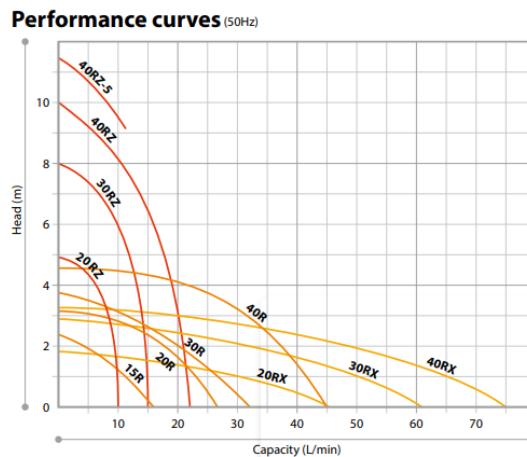


Figura 3.14 Curva de la bomba MD-30 RZ y MD-40 RZ.

Después de haber realizado los cálculos teóricos sobre las pérdidas de carga (ver tabla 2.6) se observa como las bombas MD-10 no cumplen con las especificaciones necesarias para el funcionamiento. Se probaron en el laboratorio en las configuraciones de menor pérdida de carga, pero los resultados fueron negativos. Por lo que se buscaron nuevas bombas para sustituirlas.

Para buscar la bomba adecuada, se utilizan los valores de caudal y pérdidas de carga calculados (ver tabla 2.6). El circuito con más pérdidas es, dentro de la configuración de fusión, el del calefactor, debido a un mayor caudal que va a generar mayores pérdidas en ese circuito. Es por ello, por lo que la bomba MD-30 RZ cumple con las especificaciones de altura y de caudal.

Sin embargo, la bomba MD-30 RZ es un modelo que da una mayor altura a cambio de disminuir la cantidad de caudal que es capaz de impulsar. Y aunque no se va a tener problemas con la altura, se quiere aumentar el caudal impulsado por la bomba en caso de necesitarlo en un futuro. Para asegurarnos de esto, se selecciona el modelo de bombas MD-40 RZ, mostrado en la misma figura.

4. PUESTA EN MARCHA

Una vez finalizado el montaje de la instalación, se procede a la puesta en marcha de la misma. Va a consistir en la prueba de diferentes circuitos y elementos para comprobar su funcionamiento. El objetivo es poder identificar posibles fallos al probar con agua en la instalación para poder subsanarlos antes de realizar las pruebas con emulsiones de PCM.

4.1 ENSAYO DE ENFRIADO DEL ACUMULADOR

Para efectuar los ensayos, es necesario que el sistema suministre calor y frío. Para el frío, se emplea el acumulador. Es un modelo de Lapesa RD 50-1, el cual tiene dos canales en su interior: uno que lleva al mismo depósito, y que hace la función de depósito de agua de la instalación y el otro, con forma de serpentín helicoidal, que está conectado de forma externa. Mediante este serpentín, se le suministrará agua fría, generada por una máquina de frío externa, que producirá el enfriamiento del fluido del depósito.

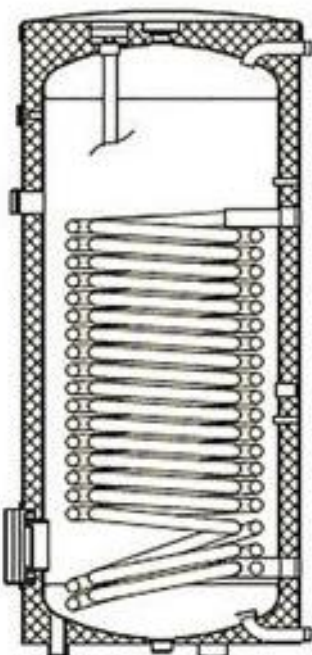


Figura 4.1 Estructura interna acumulador.



Figura 4.2 Deposito Lapesa RD 50-1.

En la medición de la temperatura del fluido en el acumulador se usará una PT-100, que se coloca en la parte superior y que es de longitud suficiente para medir la temperatura a una altura media del tanque.

4.2 ENSAYO DE BOMBAS

Dentro de las dos configuraciones de fusión y solidificación, cada una de ellas está compuesta por tres circuitos diferentes, siendo el circuito de la emulsión constante en ambas configuraciones. Para un buen funcionamiento de la instalación, se debe asegurar cada uno de ellos.

El procedimiento consiste en aislar cada uno de los circuitos gracias a las válvulas de regulación y comprobar el funcionamiento de cada uno de los circuitos. El principal problema ha sido las bolsas de aire acumuladas en la instalación, que al cambiar de configuración aparecen en los circuitos.

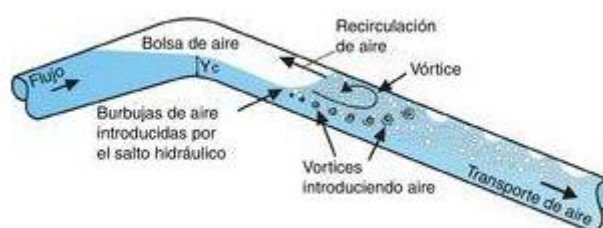


Figura 4.3 Explicación gráfica de las bolsas de aire. (Pozos-estrada, 2017)

Para eliminarlas se ha probado varios métodos: añadir purgadores en los puntos más altos de cada circuito donde se puedan acumular las bolsas de aire, sellar cada una de las uniones con teflón de cinta y/o teflón líquido en los lugares más comprometidos, evitar curvas, giros, codos innecesarios, mantener siempre un depósito en conexión con el circuito a funcionar, aunque éste no le corresponda, mediante válvulas. Una vez que el depósito realice su función y llene el circuito por completo, la válvula que lo conecta se cierra para aislarlo. Y, por último, realizar varios intentos de encendido y apagado de la bomba, para que se cebe correctamente.

Una vez solucionado este problema, se ha puesto en marcha el circuito para cada una de las diferentes configuraciones y se ha comprobado mediante las válvulas TA¹⁶ un caudal esperado, lo que nos asegura que no hay más pérdidas de carga de las esperadas.

4.3 VERIFICACIÓN VÁLVULAS TA

Una vez se ha comprobado que el fluido circula correctamente en la instalación, el siguiente paso es analizar en qué condiciones se hace. Para ello, se han colocado varias válvulas TA, de forma que en todos los circuitos de cada configuración se encuentra, como mínimo, una de ellas.

¹⁶ Válvulas ya verificadas, se ve en el apartado 4.3.

Una válvula TA tiene diferentes funciones. Además de la propia, de regular el paso de flujo en función del grado de apertura, se utiliza la diferencia de presión creada en la válvula para calcular parámetros como el caudal y medir la pérdida de carga. Mediante un dispositivo que irá conectado mediante dos tubos pequeños a la entrada y salida de la válvula, se encargará de recoger los valores del modelo de válvula, grado de apertura y diferencia de presión para obtener el caudal volumétrico.



Figura 4.4 Dispositivo de medición de las válvulas TA.

Sin embargo, para hacer funcionar bien este dispositivo se debe asegurar que no haya ningún estímulo externo que varíe la medición, ya que es muy sensible. El circuito debe partir desde parado, con la válvula colocada en el grado de apertura deseado y con la configuración de válvulas ya realizada. En caso de detectar errores en la medida, se debe parar la instalación e iniciar de nuevo.

Para asegurar su buen funcionamiento en todos los circuitos, se ha verificado usando el medidor de caudal másico de Coriolis para un ensayo con agua, acoplando la válvula al circuito de la emulsión, que es donde se encuentra el Coriolis. Con él se puede conocer el valor del flujo real y se compara con el valor obtenido mediante la válvula TA, para obtener finalmente el error que se puede tener en futuras mediciones.

Se toman medias para los diferentes grados de apertura de la válvula:

Cierre	Coriolis(kg/s)	l/s	l/min	Cor. Med.	TA(m3/s)	l/min	TA med.	Error %	Error medio %
4	519,3	519,3	8,66	8,65	0,4786	7,98	8,26	4,471291	3,63290
	519	519	8,65		0,50007	8,33			
	518,9	518,9	8,65		0,5007	8,35			
	518,7	518,7	8,65		0,4956	8,26			
	519,1	519,1	8,65		0,504	8,40			
3,5	518,2	518,2	8,64	8,63	0,504	8,40	8,43	2,325761	
	517,9	517,9	8,63		0,5078	8,46			
	517,4	517,4	8,62		0,5055	8,43			
	517,5	517,5	8,63		0,5112	8,52			
	517,4	517,4	8,62		0,4997	8,33			
3	515	515	8,58	8,59	0,5061	8,44	8,40	2,112047	
	515,1	515,1	8,59		0,4984	8,31			
	515,1	515,1	8,59		0,5023	8,37			
	515,2	515,2	8,59		0,5084	8,47			
	515,3	515,3	8,59		0,5061	8,44			
2,5	510,5	510,5	8,51	8,51	0,4872	8,12	8,12	4,568786	
	510,5	510,5	8,51		0,4884	8,14			
	510,4	510,4	8,51		0,4884	8,14			
	510,4	510,4	8,51		0,4872	8,12			
	510,3	510,3	8,51		0,4843	8,07			
2	498	498	8,30	8,30	0,4821	8,04	8,04	3,172818	
	498	498	8,30		0,4827	8,05			
	497,9	497,9	8,30		0,4812	8,02			
	497,9	497,9	8,30		0,4837	8,06			
	498,1	498,1	8,30		0,4812	8,02			
1,5	468,8	468,8	7,81	7,81	0,4609	7,68	7,70	1,433508	
	468,8	468,8	7,81		0,4625	7,71			
	468,7	468,7	7,81		0,4615	7,69			
	468,7	468,7	7,81		0,4627	7,71			
	468,9	468,9	7,82		0,4627	7,71			
1	425,2	425,2	7,09	7,09	0,3919	6,53	6,57	7,346094	
	425,2	425,2	7,09		0,3938	6,56			
	425,3	425,3	7,09		0,3949	6,58			
	425,3	425,3	7,09		0,3946	6,58			
	425,3	425,3	7,09		0,3949	6,58			

Tabla 4.1 Comparativa entre las lecturas del medidor de Coriolis y la válvula de regulación TA.

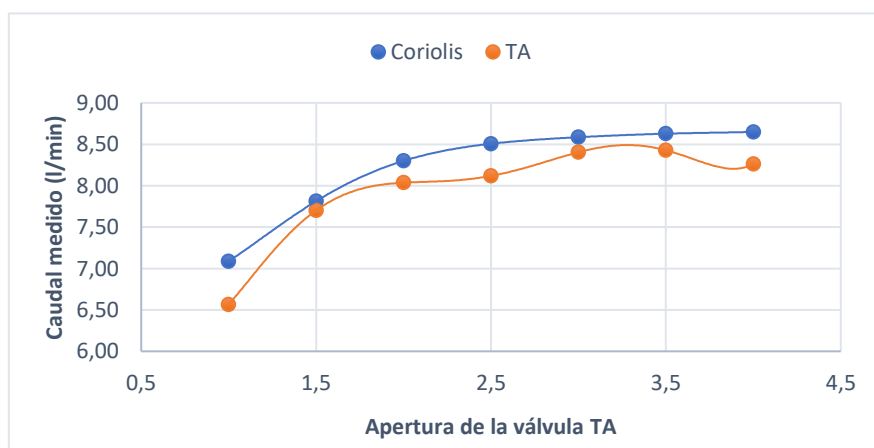


Figura 4.5 Gráfico de la comparativa entre las lecturas del medidor de Coriolis y la válvula de regulación TA.

4.4 MEDICIONES DE CAUDAL

Una vez calibrado el medidor de la válvula TA, y empleando las nuevas bombas adquiridas, se puede calcular el caudal máximo de cada uno de los circuitos. A partir de este valor se regula el caudal mediante las válvulas TA y de estrangulación, en caso de querer disminuirlo.

	Fusión (l/min)	Solidificación (l/min)	kg/h
Emulsion	11	11	650
Calefactor	19	19	
Acumulador	13	13	

Tabla 4.2 Caudales en los diferentes circuitos.

Obtenidos estos valores, se establecen como datos en los cálculos teóricos de las pérdidas de carga e intercambio de calor.

4.5 VERIFICACIÓN DE RESISTENCIAS Y CALEFACTOR

Las resistencias y el calefactor son los elementos que se encargan de calentar los fluidos. Esta temperatura va a estar controlada y monitorizada por el programa informático. Mediante dos controladores PID se regula la potencia disipada tanto por las resistencias eléctricas como por el calefactor en los circuitos de la emulsión y del agua de forma que la temperatura a la entrada del intercambiador de calor a ensayar de ambos fluidos sea las de consigna y se mantenga constante durante el ensayo para alcanzar condiciones estacionarias.



Figura 4.6 Temperatura introducida(roja) y de consigna (verde).

Para llegar a la temperatura deseada, se puede emplear las resistencias, el calefactor o ambos a la vez. La temperatura a la entrada del intercambiador no es la misma que la de consigna, y será la primera la que se emplee como valor en los balances de energía.

Mediante una serie de ensayos se consigue ajustar la temperatura de consigna en función de la temperatura deseada, ya que hay una diferencia entre la consigna y el valor detectado a la entrada del intercambiador, que es precisamente el dato a tener en cuenta en los balances de energía.

5. INSTALACIÓN AGUA – AGUA

La última fase va a consistir en realizar una serie de ensayos que verifiquen el modelo teórico que se ha determinado del intercambiador y el buen funcionamiento de toda la instalación. Es altamente aconsejable validar el funcionamiento de la instalación y de cada uno de sus componentes con alguna sustancia con propiedades muy bien conocidas, como el agua, antes de hacerlo con sustancias como las emulsiones que van a aportar incertidumbres difíciles de predecir.

Los ensayos¹⁷ de este TFG se van a realizar, por tanto, exclusivamente con agua, que jugará tanto el papel de fluido de proceso (sustituyendo a la emulsión) como de fluido de servicio, para los dos modos de operación: solidificación y fusión. Se va a combinar altas diferencias de temperatura junto a bajas diferencias, a la vez que se emplean diferentes caudales del agua de proceso (emulsión), que influyen directamente en la pérdida de carga y en el intercambio de calor. Con ello se quiere abarcar todo el abanico de posibles ensayos que se puedan realizar en un futuro con las emulsiones.

5.1 ENSAYOS DE SOLIDIFICACIÓN

Para los ensayos de solidificación se configura la instalación de forma que se simule el enfriamiento de la emulsión (sustituida por el agua de proceso) en el intercambiador de calor.

Se realiza en un estado estacionario, por lo que se fijan unas condiciones de temperatura y caudal constantes. Con ello, se realizan test de 10 minutos en los que se toman medidas cada 15 segundos. Se van a medir las temperaturas a la entrada y a la salida de los intercambiadores a lo largo del tiempo, obteniendo el calor intercambiado en cada momento en el intercambiador.

Para esta configuración se van a analizar cuatro ensayos, cada uno con caudales diferentes para el agua de proceso (sucedáneo de la emulsión) y manteniendo el caudal máximo para el agua de servicio, para validar los resultados obtenidos en los cálculos.

¹⁷ Los valores de cada una de las medidas a lo largo del tiempo de cada uno de los ensayos se encuentran recopilados en tablas en el anexo F.

5.1.1 ENSAYO SOLIDIFICACIÓN PARA $\dot{V} = \dot{V}_{max}$

Las temperaturas de los dos circuitos (en ambos casos agua) a la entrada y a la salida a lo largo del tiempo de ensayo:

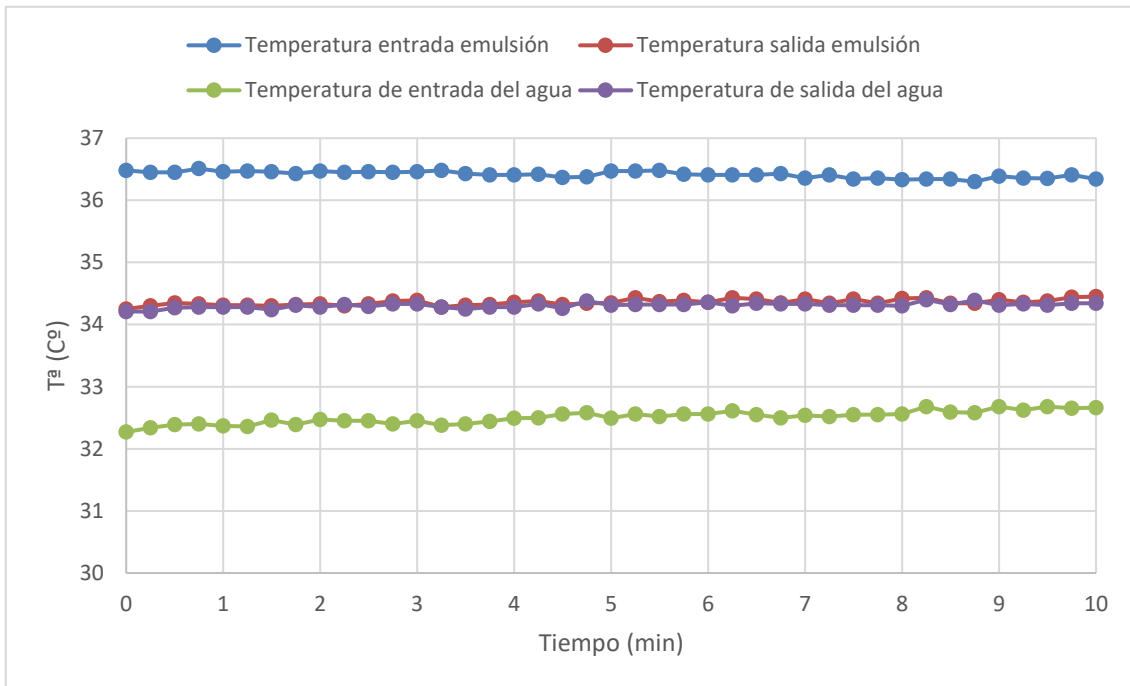


Figura 5.1 Gráfica de temperaturas de la emulsión y del agua en \dot{V}_{max} para solidificación.

Siendo el calor intercambiado realizando el balance desde los dos circuitos:

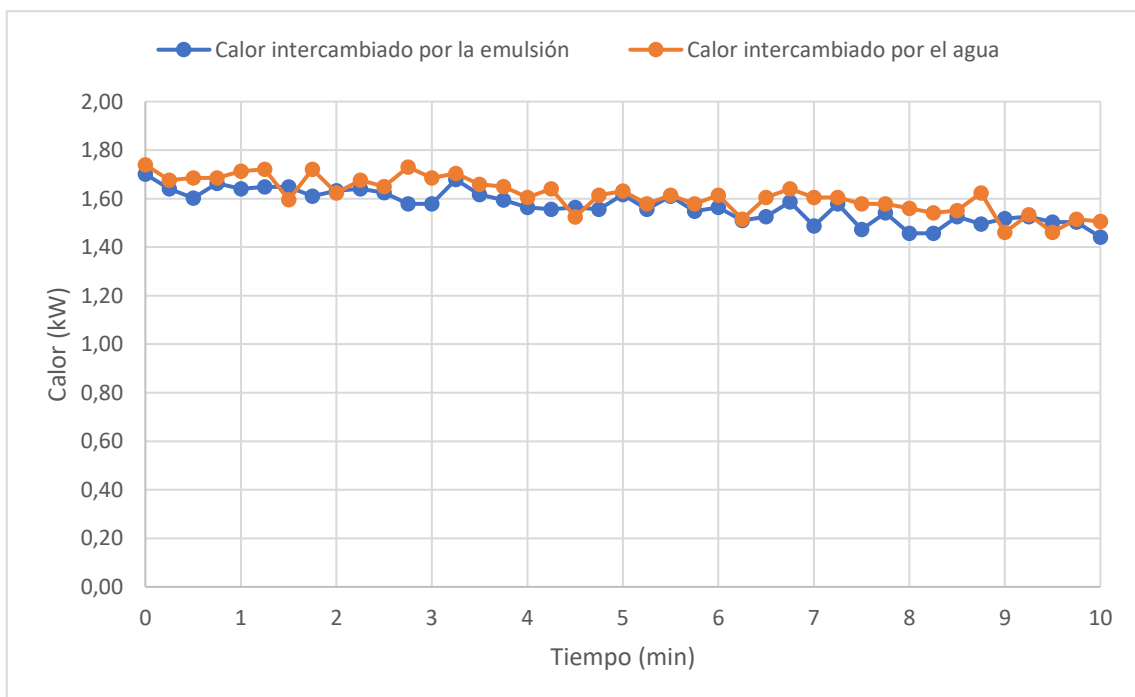


Figura 5.2 Gráfica del calor intercambiado en \dot{V}_{max} para solidificación.

5.1.2 ENSAYO SOLIDIFICACIÓN PARA $\dot{V} = 0.75 \cdot \dot{V}_{max}$

Las temperaturas de los dos circuitos (en ambos casos agua) a la entrada y a la salida a lo largo del tiempo de ensayo:

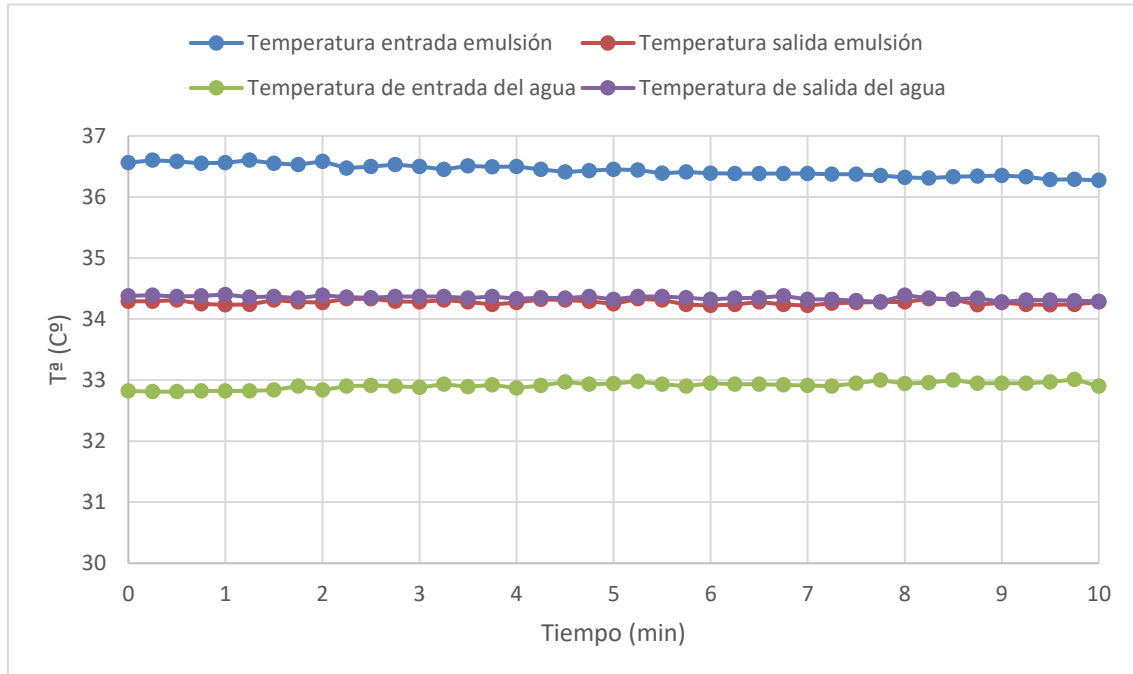


Figura 5.3 Gráfica de temperaturas de la emulsión y del agua en $0.75 \cdot \dot{V}_{max}$ para solidificación.

Siendo el calor intercambiado realizando el balance desde los dos circuitos:

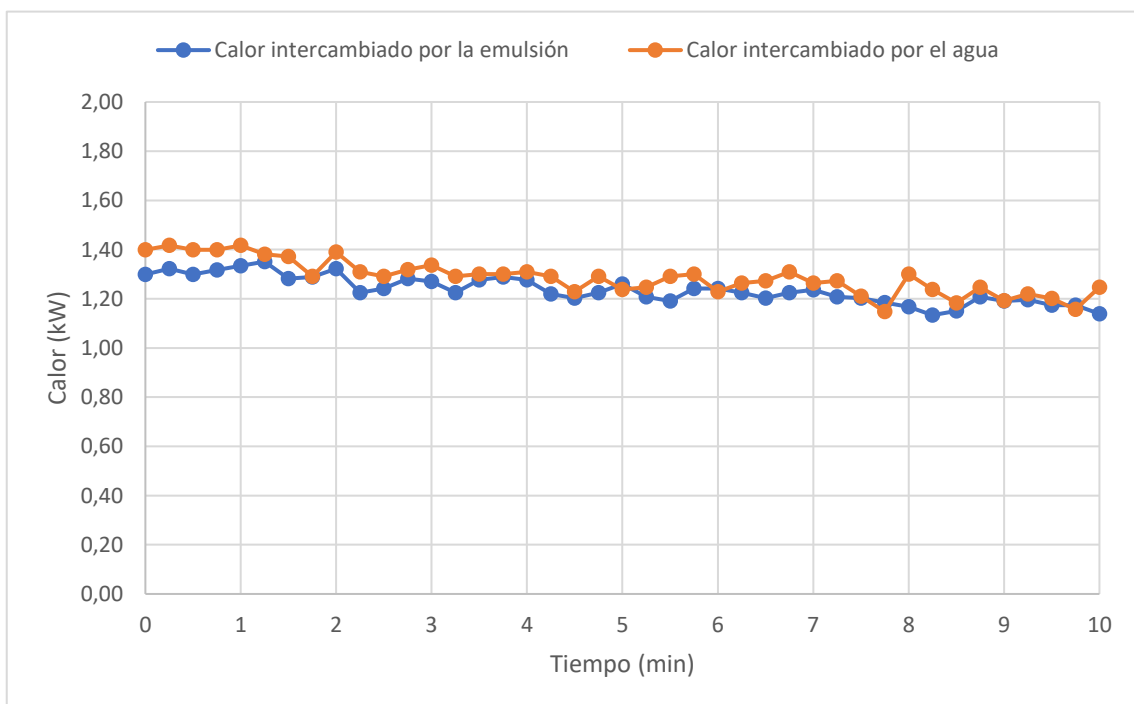


Figura 5.4 Gráfica del calor intercambiado en $0.75 \cdot \dot{V}_{max}$ para solidificación.

5.1.3 ENSAYO SOLIDIFICACIÓN PARA $\dot{V} = 0.5 \cdot \dot{V}_{max}$

Las temperaturas de los dos circuitos (en ambos casos agua) a la entrada y a la salida a lo largo del tiempo de ensayo:

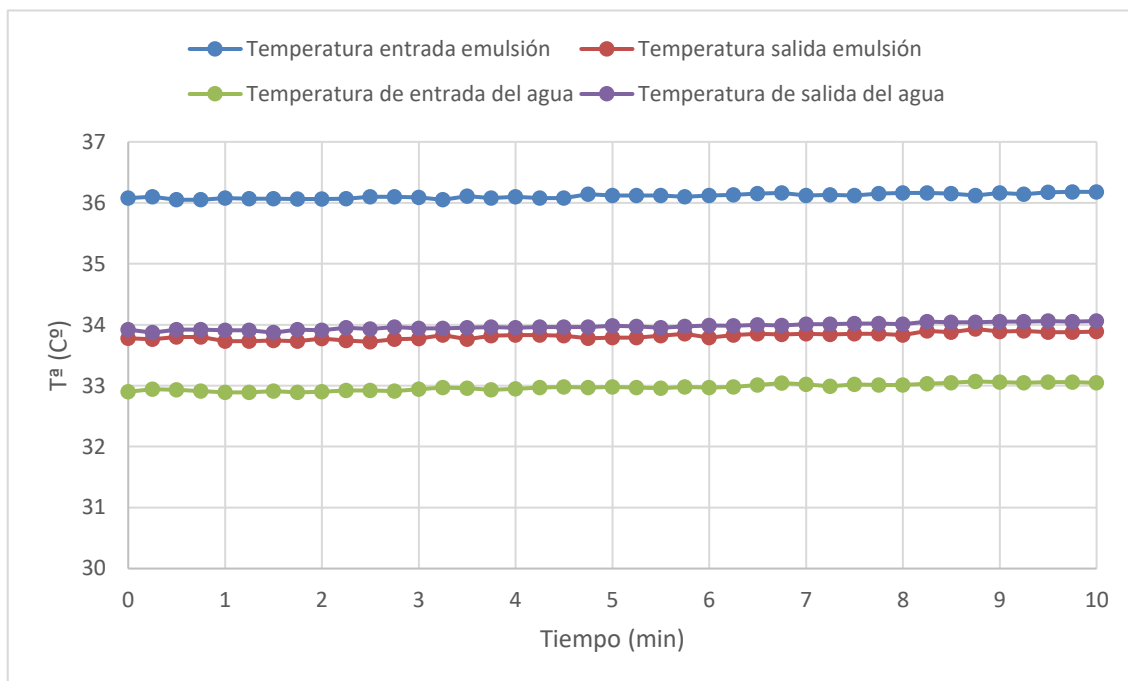


Figura 5.5 Gráfica de temperaturas de la emulsión y del agua en $0.5 \cdot \dot{V}_{max}$ para solidificación.

Siendo el calor intercambiado realizando el balance desde los dos circuitos:

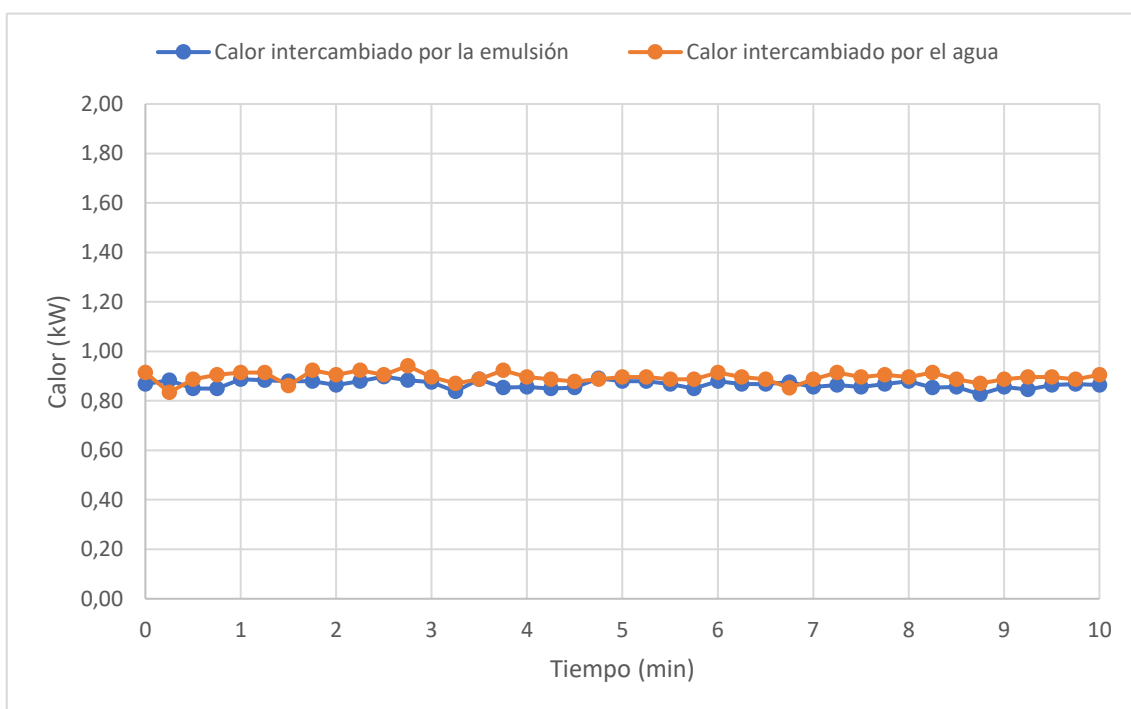


Figura 5.6 Gráfica del calor intercambiado en $0.5 \cdot \dot{V}_{max}$ para solidificación.

5.1.4 ENSAYO SOLIDIFICACIÓN PARA $\dot{V} = 0.25 \cdot \dot{V}_{max}$

Las temperaturas de los dos circuitos (en ambos casos agua) a la entrada y a la salida a lo largo del tiempo de ensayo:

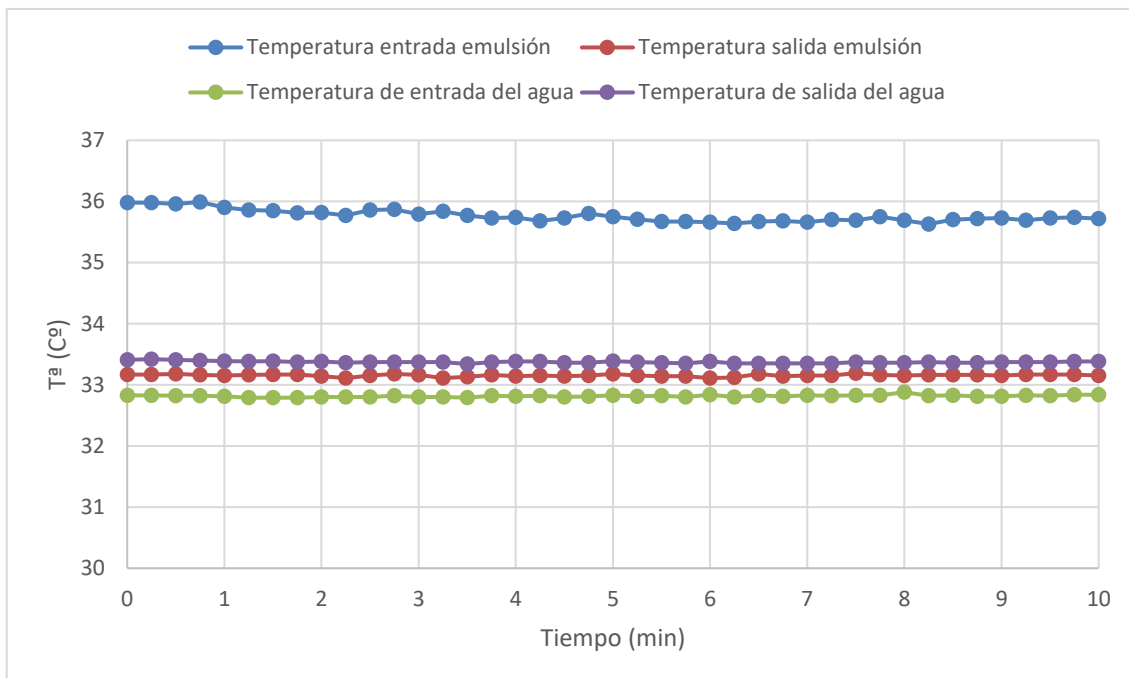


Figura 5.7 Gráfica de temperaturas de la emulsión y del agua en $0.25 \cdot \dot{V}_{max}$ para solidificación.

Siendo el calor intercambiado realizando el balance desde los dos circuitos:

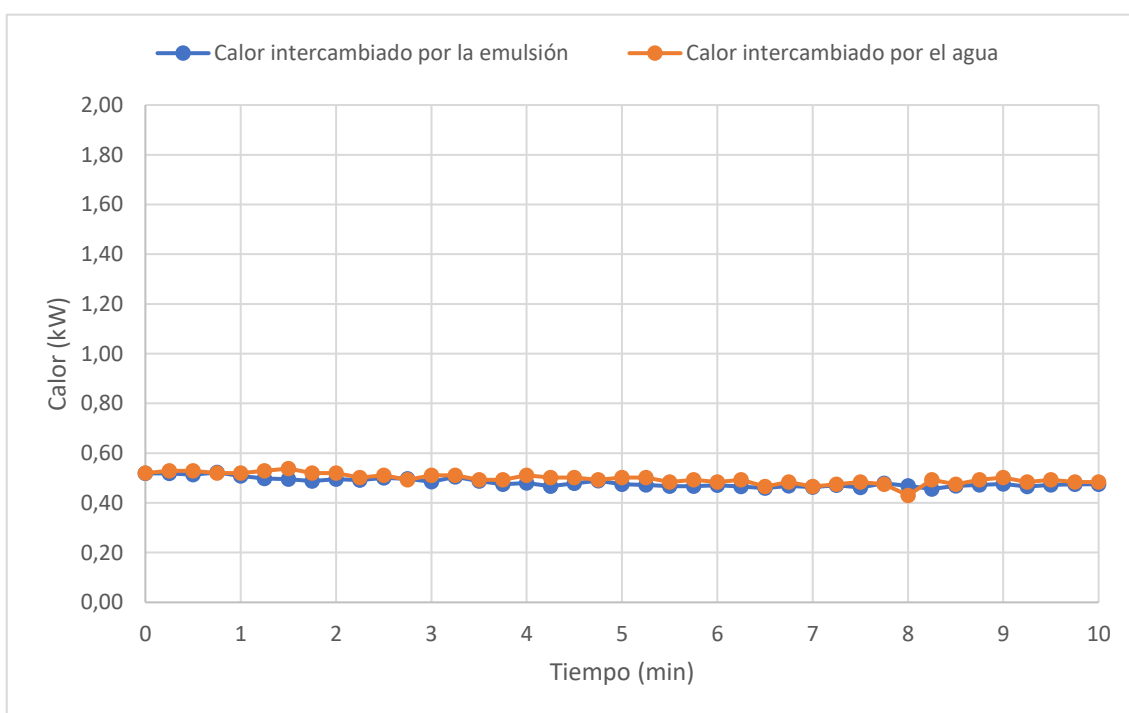


Figura 5.8 Gráfica del calor intercambiado en $0.25 \cdot \dot{V}_{max}$ para solidificación.



5.1.5 CONCLUSIONES ENSAYOS DE SOLIDIFICACIÓN

Analizando y comparando los resultados de los ensayos, se verifica que los resultados obtenidos coinciden con lo esperado.

La diferencia de temperaturas varía según el caudal de operación. El caudal del agua de servicio se mantiene constante en su valor máximo, mientras que el del agua de proceso, -que juega el papel de la emulsión-, se va reduciendo y, tal y como se ha recordado al final del apartado 2.2, la eficiencia del intercambiador va aumentando. Con ella aumenta la variación de la temperatura del agua de proceso y disminuye su temperatura de salida.

$$\varepsilon = \frac{T_{ce} - T_{cs}}{T_{ce} - T_{fe}} \quad (29)$$

En las gráficas previas se puede observar que, efectivamente, sucede así a la vez que va disminuyendo la diferencia de temperaturas del agua de servicio, debido a que al intercambiar un menor calor y mantener constante su caudal del agua, su diferencia de temperatura disminuye proporcionalmente.

Dependiendo del uso que se quiera hacer puede que se necesite un caudal determinado, y se tenga que ceder en la disminución de la temperatura a favor de un mayor caudal.

5.2 ENSAYOS DE FUSIÓN

Para los ensayos de fusión se configura la instalación de forma que se simule el calentamiento del agua de proceso, -jugando el papel de la emulsión-, en el intercambiador de calor.

Se realiza en un estado estacionario, por lo que se fijan unas condiciones de temperatura y caudal constantes. Con ello, se realizan test de 10 minutos en los que se toman medidas cada 10 segundos. Se van a evaluar las temperaturas medidas a la entrada y a la salida del intercambiador a lo largo del tiempo, obteniendo el calor intercambiado en cada momento en el intercambiador.

Para esta configuración se va a analizar cuatro ensayos con los mismos valores de caudales de agua de proceso y servicio que en la solidificación.

5.2.1 ENSAYO FUSIÓN PARA $\dot{V} = \dot{V}_{max}$

Las temperaturas de los dos circuitos (en ambos casos agua) a la entrada y a la salida a lo largo del tiempo de ensayo:

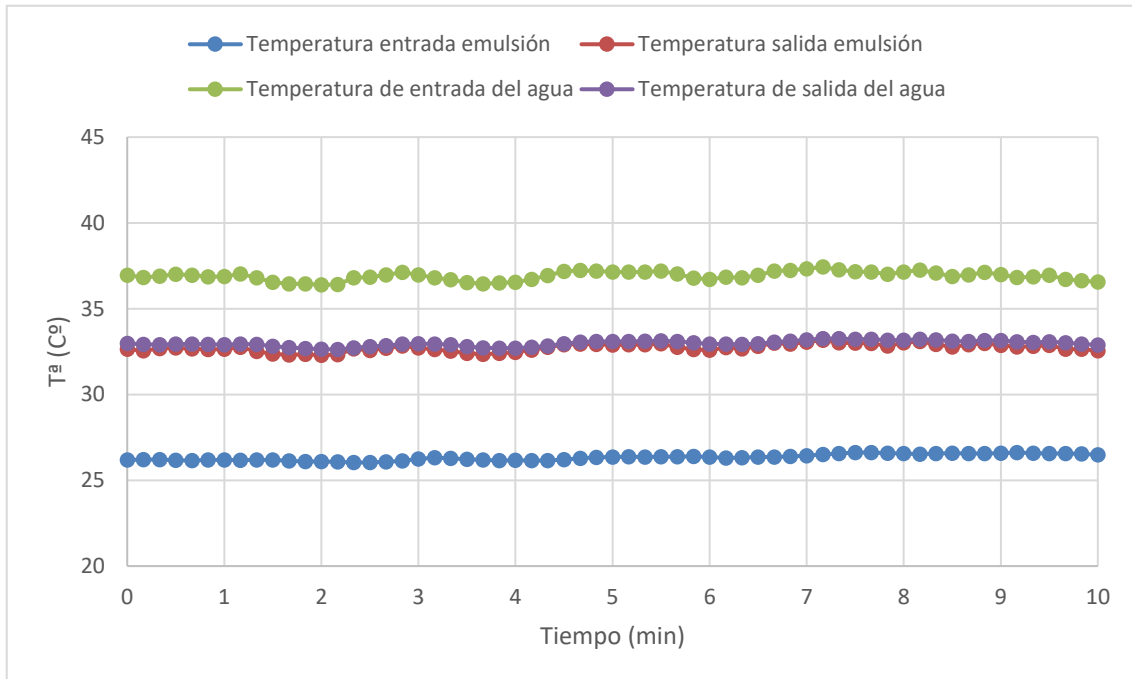


Figura 5.9 Gráfica de temperaturas de la emulsión y del agua en \dot{V}_{max} para fusión.

Siendo el calor intercambiado realizando el balance desde los dos circuitos:

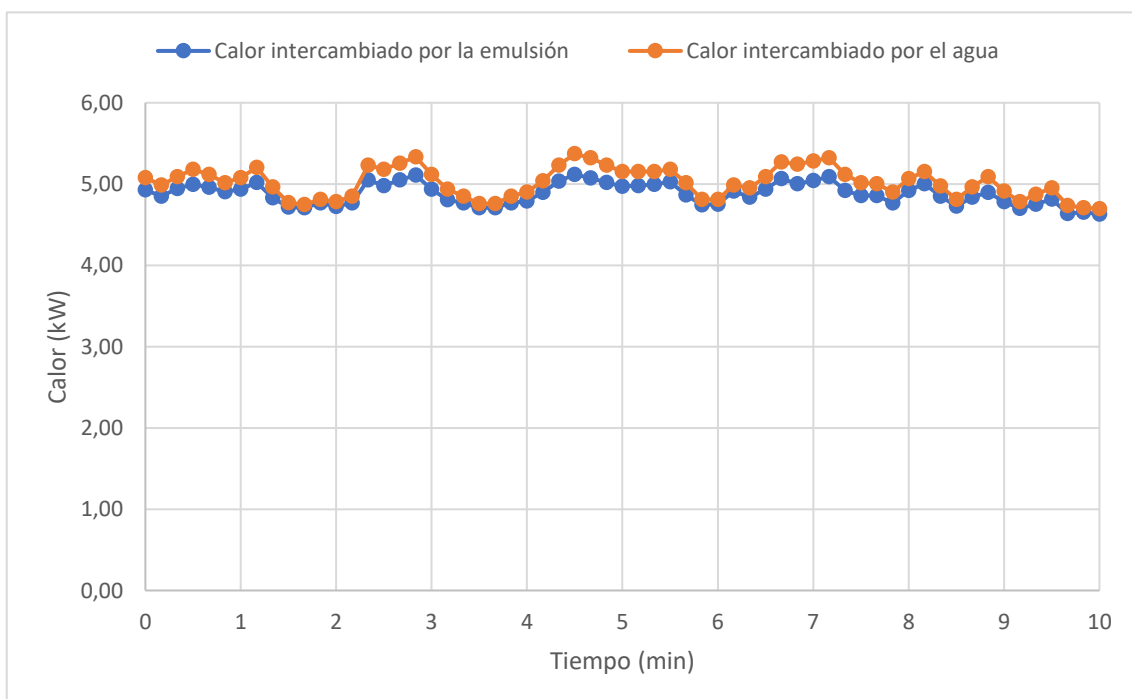


Figura 5.10 Gráfica del calor intercambiado en \dot{V}_{max} para fusión.

5.2.2 ENSAYO FUSIÓN PARA $\dot{V} = 0.75 \cdot \dot{V}_{max}$

Las temperaturas de los dos circuitos (en ambos casos agua) a la entrada y a la salida a lo largo del tiempo de ensayo:

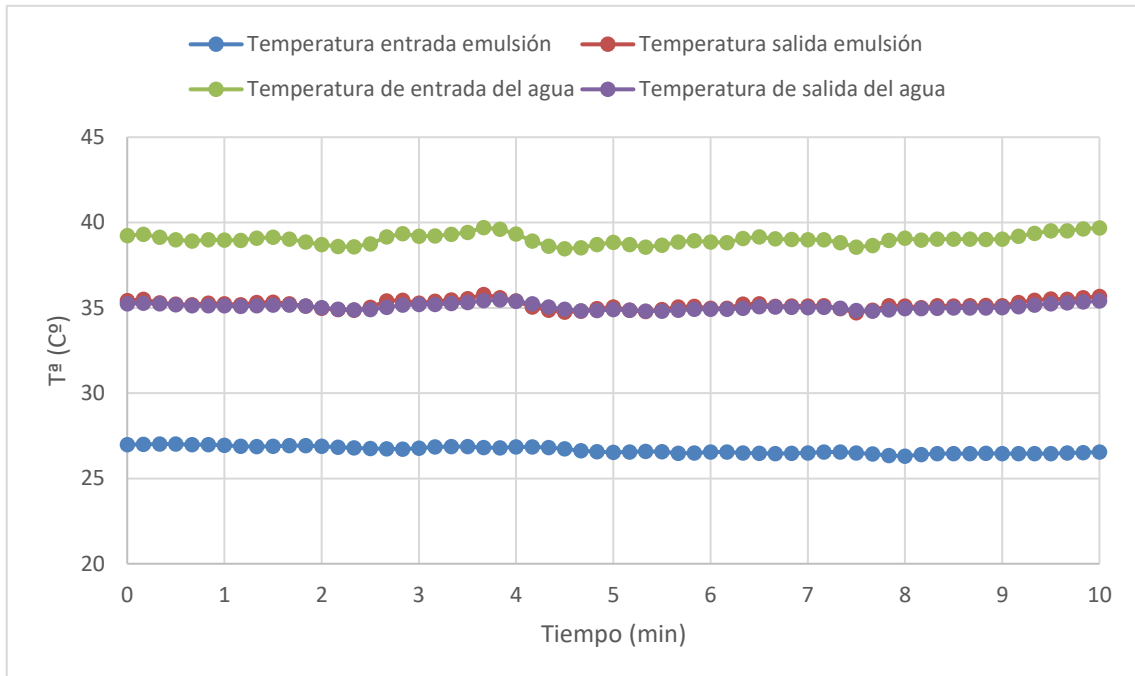


Figura 5.11 Gráfica de temperaturas de la emulsión y del agua en $0.75 \cdot \dot{V}_{max}$ para fusión.

Siendo el calor intercambiado realizando el balance desde los dos circuitos:

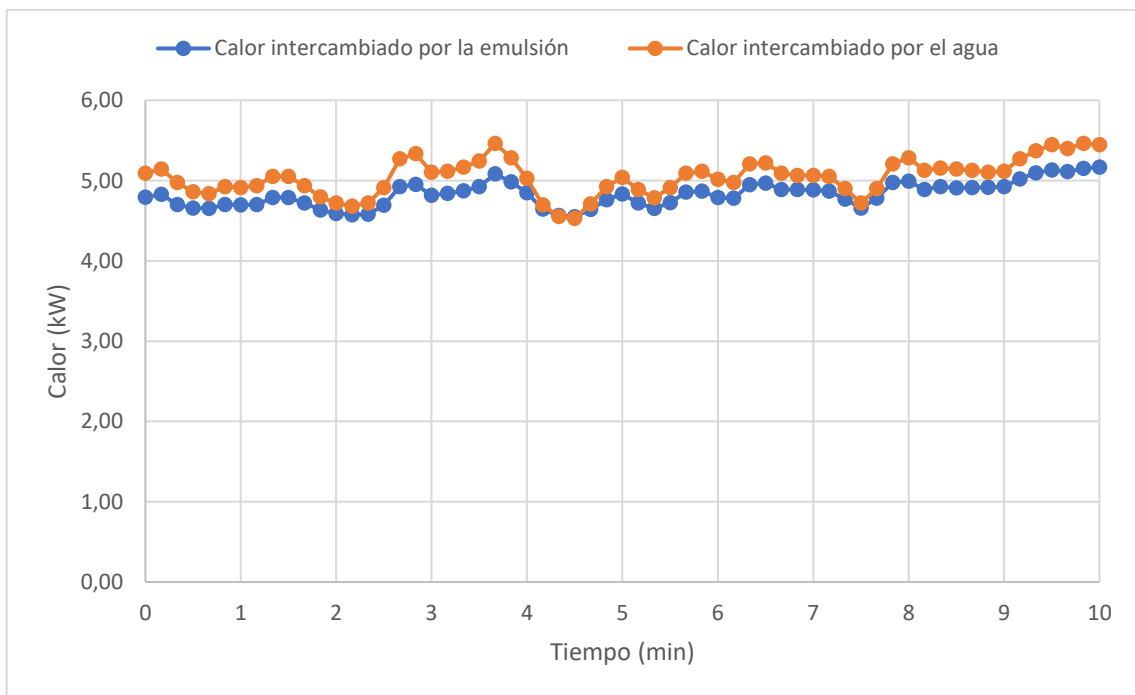


Figura 5.12 Gráfica del calor intercambiado en $0.75 \cdot \dot{V}_{max}$ para fusión.

5.2.3 ENSAYO FUSIÓN PARA $\dot{V} = 0.5 \cdot \dot{V}_{max}$

Las temperaturas de los dos circuitos (en ambos casos agua) a la entrada y a la salida a lo largo del tiempo de ensayo:

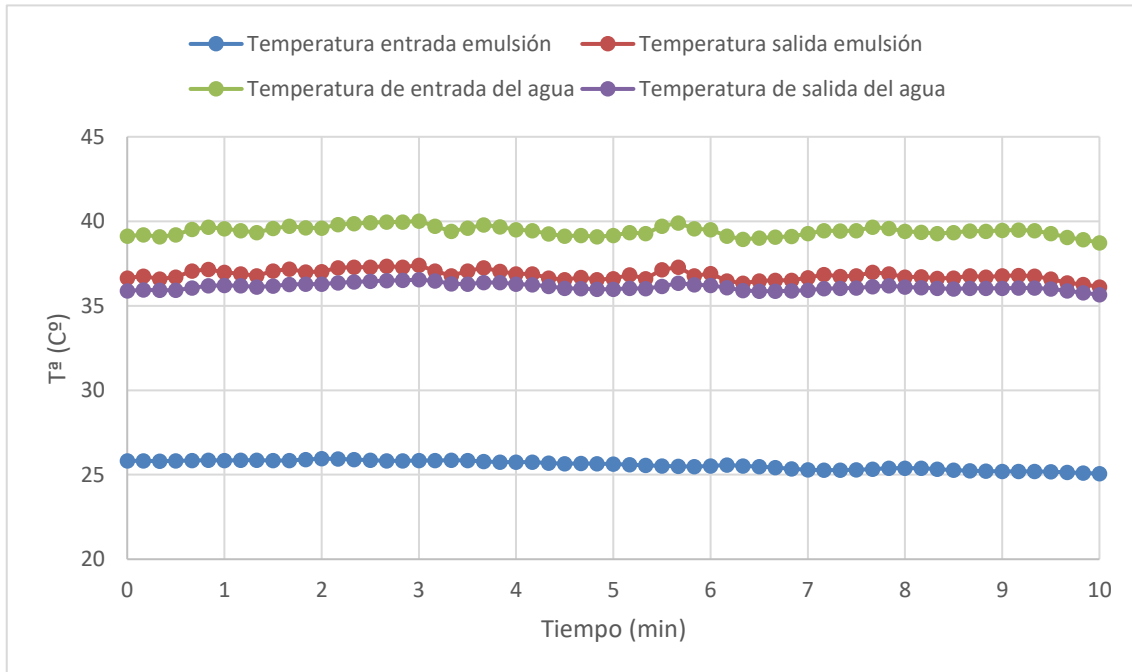


Figura 5.13 Gráfica de temperaturas de la emulsión y del agua en $0.5 \cdot \dot{V}_{max}$ para fusión.

Siendo el calor intercambiado realizando el balance desde los dos circuitos:

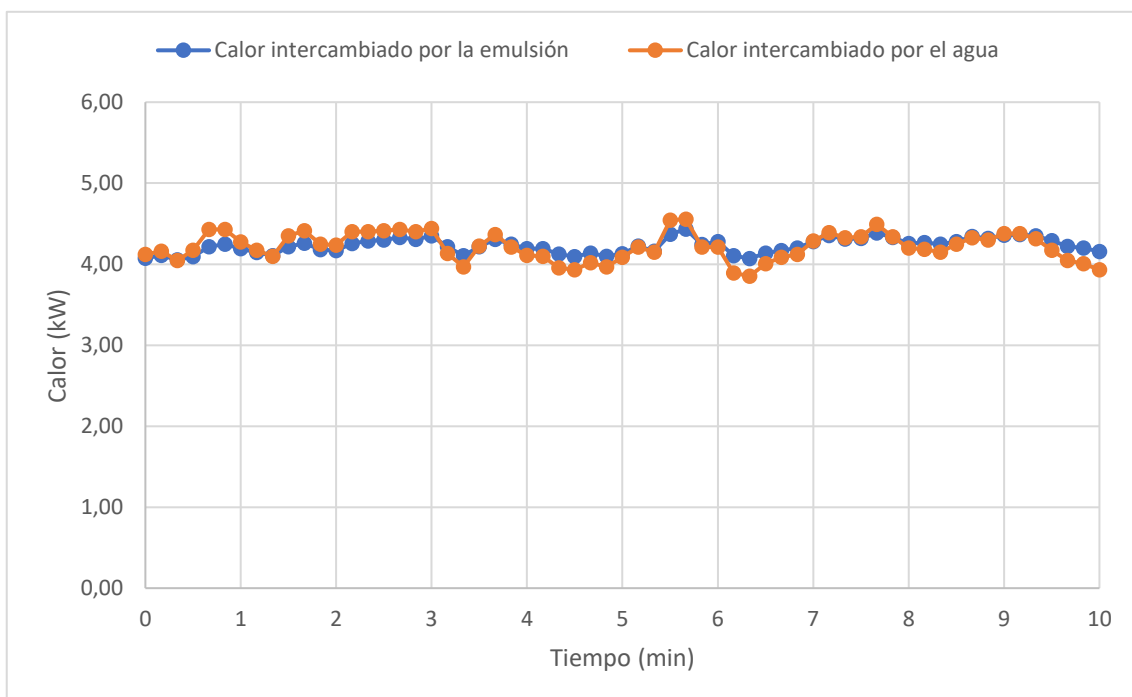


Figura 5.14 Gráfica del calor intercambiado en $0.5 \cdot \dot{V}_{max}$ para fusión.

5.2.4 ENSAYO FUSIÓN PARA $\dot{V} = 0.25 \cdot \dot{V}_{max}$

Las temperaturas de los dos circuitos (en ambos casos agua) a la entrada y a la salida a lo largo del tiempo de ensayo:

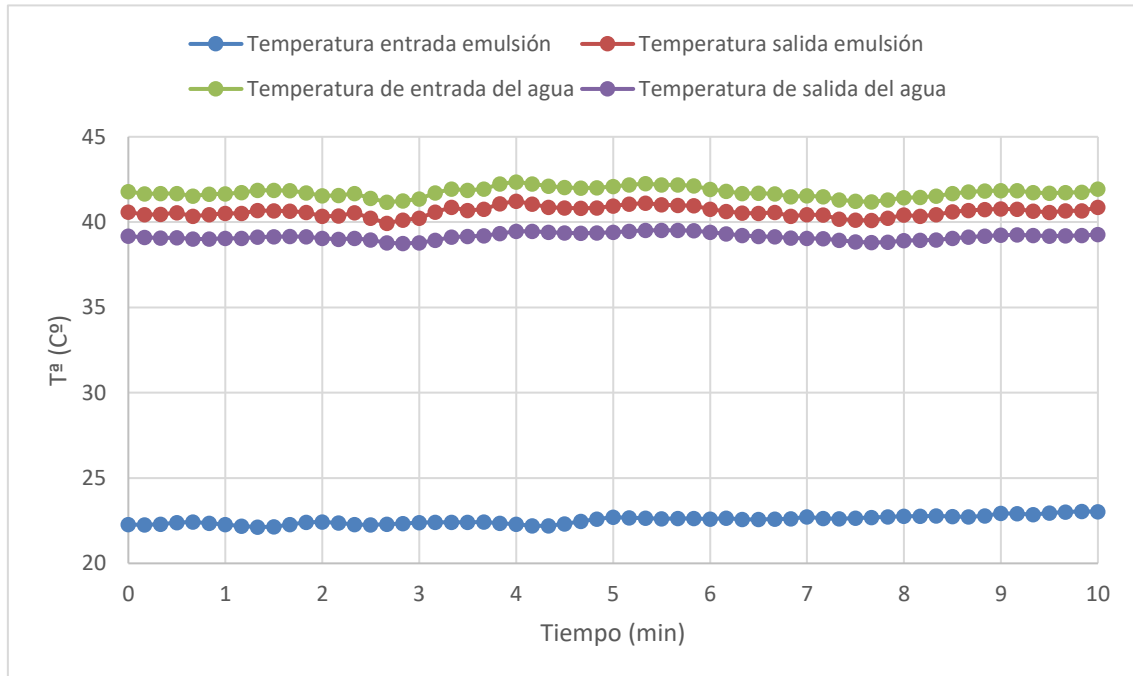


Figura 5.15 Gráfica de temperaturas de la emulsión y del agua en $0.25 \cdot \dot{V}_{max}$ para fusión.

Siendo el calor intercambiado realizando el balance desde los dos circuitos:

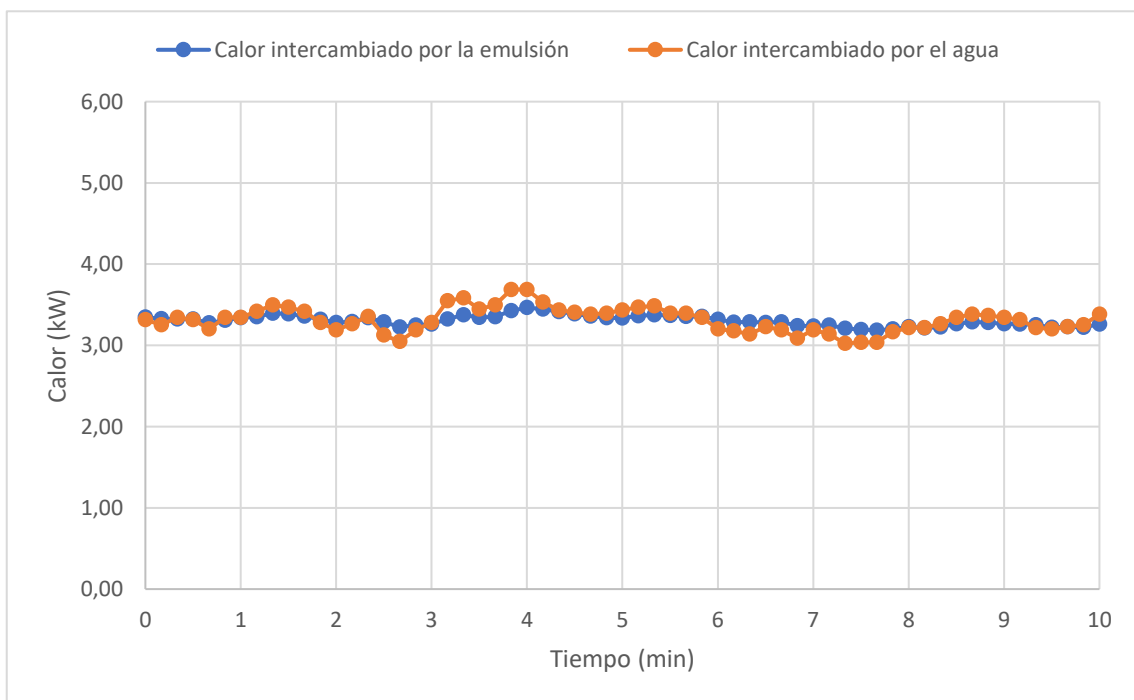


Figura 5.16 Gráfica del calor intercambiado en $0.25 \cdot \dot{V}_{max}$ para fusión.

5.1.5 CONCLUSIONES ENSAYOS DE FUSIÓN

Al igual que con los ensayos de solidificación, se analizan y se comparan para verificar que los resultados que se han obtenido coinciden con lo esperado.

Además de la diferente configuración, la principal diferencia con el ensayo de solidificación va a ser la diferencia de temperaturas empleadas. En este ensayo van a ser mayores, por lo que el intercambio de calor también es mayor.

Es importante realizar los ensayos para pequeñas y grandes variaciones de temperatura ya que en un futuro las condiciones de trabajo pueden ser variables, y se necesita comprobar que se verifica su buen funcionamiento en diferentes condiciones de operación.

El comportamiento según el caudal de operación va a seguir siendo el mismo que para el caso de solidificación y el análisis matemático es idéntico.

6. COMPARATIVA TEÓRICA - EXPERIMENTAL

Una vez se tienen los resultados de los cálculos teóricos y de los ensayos experimentales, se procede a hacer una comparación entre ambos para verificar su validez.

Se va a emplear el coeficiente global de transmisión de calor como variable relevante de comparación. Por un lado, está el valor teórico obtenido tras el cálculo de los coeficientes de convección. Por otro lado, se encuentra el valor experimental, obtenido con el valor del calor intercambiado, el área de intercambio y la media logarítmica de la diferencia de temperaturas entre ambos fluidos¹⁸.

$$\Delta T_{ml} = \frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} \quad (30)$$

$$U_{Exp} = \frac{\dot{Q}_{int}}{A_i \cdot \Delta T_{ml}} \quad (31)$$

Los resultados son los siguientes:

	\dot{V}/\dot{V}_{max}	$U_{teo} \text{ (W/K}\cdot\text{m}^2)$	$U_{exp} \text{ (W/K}\cdot\text{m}^2)$
Solidificación	1	3394	3237
	0,75	3129	2998
	0,5	2756	2554
	0,25	2194	1881
Fusión	1	3751	3741
	0,75	3414	3429
	0,5	2978	2947
	0,25	2326	2272

Tabla 6.1 Tabla comparativa entre el modelo teórico y experimental.

¹⁸ ΔT_1 y ΔT_2 corresponden a la diferencia de temperaturas de la figura 2.4.

Siendo la representación gráfica:

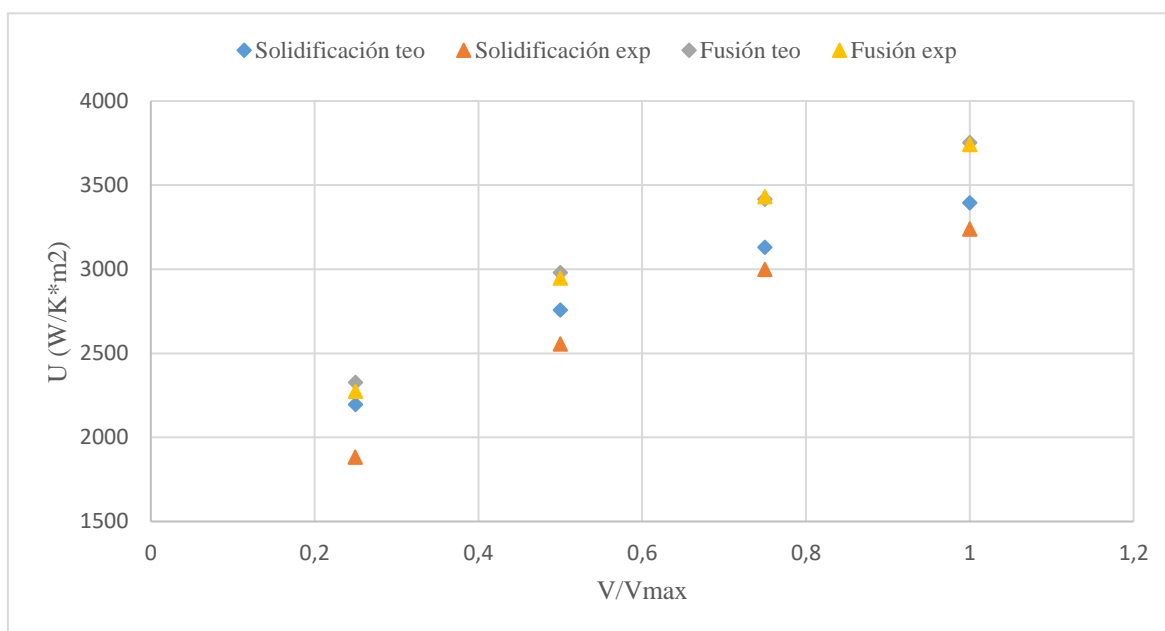


Figura 6.1 Gráfica comparativa entre el modelo teórico y experimental.

Analizando los resultados obtenidos se puede observar la gran proximidad entre los resultados teóricos y los experimentales, especialmente en el caso de la fusión debido a las mayores variaciones de las temperaturas de los fluidos, lo que hace que los errores relativos de los termómetros sean menores. En ambos coinciden la tendencia en relación con el caudal: a mayores caudales, se obtiene un coeficiente de transferencia de calor global mayor. También se observa que cuanto mayor sean las variaciones de temperatura de los fluidos, mayor será el coeficiente de transferencia. Todo esto coincide con los resultados que se esperaba obtener.

Por lo tanto, se puede concluir con una valoración positiva de todo el proceso, ya que se ha conseguido validar un modelo teórico de una instalación experimental a partir de la simulación y la comparación de los resultados teóricos y experimentales.

Esta validación va a permitir en un futuro realizar ensayos con cualquier otro material, como las emulsiones, partiendo de una instalación ya validada con un fluido de propiedades bien establecidas.

7. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

Se puede decir que el objetivo de este trabajo se ha cumplido. Se ha continuado con la línea de investigación de las emulsiones de PCM rediseñando una instalación para el ensayo de estas emulsiones. La puesta en marcha y la realización de un primer ensayo, empleando como fluido conocido de servicio como es el agua, ha permitido validar el modelo teórico que se ha realizado para la instalación. Los resultados obtenidos concuerdan con todo lo esperado, por lo que la instalación ha quedado lista para realizar ensayos con emulsiones de cambio de fase.

Y en eso va a consistir las líneas futuras. Durante los siguientes meses se van a empezar a realizar pruebas con emulsiones PCM con el fin de analizar su comportamiento en un intercambiador de calor. Como los ensayos experimentales han verificado nuestro modelo teórico, sabiendo las propiedades de las emulsiones con las que se va a ensayar y teniendo en cuenta que podrían ser no newtonianas, se debería modificar alguno de sus parámetros como la definición del número de Reynolds o las ecuaciones para calcular las pérdidas de carga y los coeficientes de convección. Sin embargo, el resto del proceso va a ser idéntico, lo que permitirá hacer una predicción del comportamiento antes de realizar los ensayos.



Figura 7.1 Instalación acabada.

BIBLIOGRAFÍA

- A.Heinz, L. a. (2005). *Inventory of Phase Change Materials (PCM), A report of IEA Solar Heating and Cooling Programme*.
- Energía, I. p. (2012). *Guía técnica de selección de equipos de transporte de fluidos*. Madrid: Asociación Técnica Española de Climatización .
- Focke. (1985). *The effecto of the corrugation angle on the thermohydraulic performance of plate heat exchangers*. Int. J. Heat Mass Transfer.
- Gil, A. (2021). *Anexo intercambiadores de calor*. Obtenido de Unizar: https://moodle.unizar.es/add/pluginfile.php/2874743/mod_resource/content/24/Anexo.%20Correlaciones%20y%20gr%C3%A1ficas%20IdQ.pdf
- Gil, A. (2021). *Apuntes intercambiadores de calor*. Obtenido de Unizar: https://moodle.unizar.es/add/pluginfile.php/2874742/mod_resource/content/22/A.2.3.IdQ_2020.pdf
- Iwaki, C. (Junio de 2017). *Iwaki*. Obtenido de <https://www.iwaki-nordic.com/wp-content/uploads/files/brochures/MD.pdf>
- L.Cabeza, H. M. (2008). *Heat and cold storage with PCM*.
- Martin, H. (1995). *A theoretical approach to predict the performance of chevron-type plate heat exchangers*. Karlsruhe: Universität Karlsruhe.
- Pozos-estrada, O. (2017). Análisis de los efectos del aire atrapado en transitorios hidráulicos en acueductos a bombeo. *Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México*, 79-89.
- Rodríguez Ubiñas, E. I. (2015). *Almacenamiento de Energía Térmica Por Calor Latente En los Eddificios: Bases Para La Optimización de Aplicaciones Pasivas, Opacas y Traslúcidas*.
- Sanchez, G. S. (2020). *Design, construction and commissioning of a test bench for PCM slurries – water heat exchangers*. Zaragoza: TFG Universidad de Zaragoza.
- Serna-Montoya, E. (2009). La ingeniería. *Revista digital Lámpsakos*.
- Torrubia, J. (2018). *Diseño de una instalación experimental para el análisis de intercambiadores de calor agua - emulsión de materiales de cambio de fase*. Zaragoza.
- Ubiñas, E. R. (2014). *Almacenamiento de energía térmica por calor latente*:. Madrid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Clasificación de distintos PCM según sus propiedades. (Rodríguez Ubiñas, 2015).....	11
Figura 1.2 Almacenamiento de energía mediante calor latente. (L.Cabeza, 2008).....	11
Figura 1.3 Aplicaciones de materiales PCM. (Ubiñas, 2014)	12
Figura 1.4 Plano de la instalación.....	12
Figura 1.5 Esquema de la instalación para su configuración en fusión.....	13
Figura 1.6 Esquema de la instalación para su configuración en solidificación.....	14
Figura 2.1 Esquema de placas corrugadas. (Martin, 1995)	16
Figura 2.2 Perfiles del hueco entre placas según la fase entre placas. (Martin, 1995)..	16
Figura 2.3 Dirección de flujo y vórtices en la hipótesis 2. (Focke, 1985).....	17
Figura 2.4 Gráfica de temperaturas en un intercambiador a contracorriente. (Gil, Apuntes intercambiadores de calor, 2021)	20
Figura 2.5 Factor de fricción en función del ángulo de inclinación de las corrugaciones.	22
Figura 2.6 Factor de convección en función del ángulo de inclinación de las corrugaciones.....	23
Figura 3.1 Filtro de agua Y	27
Figura 3.2 Válvula reguladora mariposa	27
Figura 3.3 Purgador automático de columna vertical.....	28
Figura 3.4 Depósito.	28
Figura 3.5 Sensor PT-100.....	28
Figura 3.6 Sensor Honeywell.	28
Figura 3.7 Válvula TA.....	28
Figura 3.8 Datalogger Keysight Technologies 34970A	29
Figura 3.9 Captura de pantalla del programa de la instalación.	29
Figura 3.10 Plano de la instalación.....	30
Figura 3.11 Configuración de fusión.	31
Figura 3.12 Configuración de solidificación.	32
Figura 3.13 Curva de la bomba MD-10.....	33
Figura 3.14 Curva de la bomba MD-30 RZ y MD-40. RZ.....	33
Figura 4.1 Estructura interna acumulador.	34
Figura 4.2 Deposito Lapesa RD 50-1.	34
Figura 4.3 Explicación gráfica de las bolsas de aire. (Pozos-estrada, 2017).....	35
Figura 4.4 Dispositivo de medición de las válvulas TA.....	36
Figura 4.5 Gráfico de la comparativa entre las lecturas del medidor de Coriolis y la válvula de regulación TA.	37
Figura 4.6 Temperatura introducida(roja) y de consigna (verde).....	38
Figura 5.1 Gráfica de temperaturas de la emulsión y del agua en V_{max} para solidificación.	40
Figura 5.2 Gráfica del calor intercambiado en V_{max} para solidificación.....	40
Figura 5.3 Gráfica de temperaturas de la emulsión y del agua en $0.75 \cdot V_{max}$ para solidificación.	41
Figura 5.4 Gráfica del calor intercambiado en $0.75 \cdot V_{max}$ para solidificación.....	41

Figura 5.5 Gráfica de temperaturas de la emulsión y del agua en $0.5 \cdot V_{max}$ para solidificación.	42
Figura 5.6 Gráfica del calor intercambiado en $0.5 \cdot V_{max}$ para solidificación.	42
Figura 5.7 Gráfica de temperaturas de la emulsión y del agua en $0.25 \cdot V_{max}$ para solidificación.	43
Figura 5.8 Gráfica del calor intercambiado en $0.25 \cdot V_{max}$ para solidificación.	43
Figura 5.9 Gráfica de temperaturas de la emulsión y del agua en V_{max} para fusión. .	45
Figura 5.10 Gráfica del calor intercambiado en V_{max} para fusión.	45
Figura 5.11 Gráfica de temperaturas de la emulsión y del agua en $0.75 \cdot V_{max}$ para fusión.	46
Figura 5.12 Gráfica del calor intercambiado en $0.75 \cdot V_{max}$ para fusión.	46
Figura 5.13 Gráfica de temperaturas de la emulsión y del agua en $0.5 \cdot V_{max}$ para fusión.	47
Figura 5.14 Gráfica del calor intercambiado en $0.5 \cdot V_{max}$ para fusión.	47
Figura 5.15 Gráfica de temperaturas de la emulsión y del agua en $0.25 \cdot V_{max}$ para fusión.	48
Figura 5.16 Gráfica del calor intercambiado en $0.25 \cdot V_{max}$ para fusión.	48
Figura 6.1 Gráfica comparativa entre el modelo teórico y experimental.	51
Figura 7.1 Instalación acabada.	52



LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Valores obtenidos en el modelo teórico en función del ángulo.....	22
Tabla 2.2 Factor de fricción en función del caudal.	24
Tabla 2.3 Calor intercambiado en función del caudal y la temperatura.	24
Tabla 2.4 Calor intercambiado en función del caudal y la temperatura.	25
Tabla 2.5 Valor de k de cada elemento	25
Tabla 2.6 Perdida de carga en cada circuito, en función del caudal.....	26
Tabla 3.1 Elementos de la instalación.	30
Tabla 3.2 Elementos generales de la instalación.	31
Tabla 3.3 Válvulas abiertas y cerradas para la configuración de fusión.	32
Tabla 3.4 Válvulas abiertas y cerradas para la configuración de solidificación.....	32
Tabla 4.1 Comparativa entre las lecturas del medidor de Coriolis y la válvula de regulación TA.	37
Tabla 4.2 Caudales en los diferentes circuitos	38
Tabla 6.1 Tabla comparativa entre el modelo teórico y experimental.	50