



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Diseño de una instalación experimental para el análisis de intercambiadores de calor agua-emulsión de materiales de cambio de fase

Design of an experimental setup for the analysis of water - phase change material slurries heat exchangers

Autor/es

Jorge Torrubia Torralba

Director/es

Mónica Delgado Gracia
José María Marín Herrero



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

TRABAJOS DE FIN DE GRADO / FIN DE MÁSTER

D./D^a. Jorge Torrubia Torralba,

con nº de DNI 73027947A en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster) Grado _____, (Título del Trabajo)

Diseño de una instalación experimental para el análisis de intercambiadores de calor agua-emulsión de materiales de cambio de fase

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 14 de Septiembre de 2018

Fdo: Jorge Torrubia Torralba

Diseño de una instalación experimental para el análisis de intercambiadores de calor agua-emulsión de materiales de cambio de fase

RESUMEN

El presente TFG forma parte de un proyecto de I+D Retos del Ministerio de Economía y Empresa que está llevando a cabo el grupo de investigación en Ingeniería Térmica y Sistemas Energéticos, perteneciente al Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón de la Universidad de Zaragoza. El objetivo es el diseño de una instalación experimental en la que se puedan ensayar intercambiadores de calor por los que circulará por un lado agua y por el otro una emulsión de materiales de cambio de fase con el fin de estudiar la transferencia de calor entre ambos.

Para ello se han determinado en primer lugar las propiedades termofísicas y reológicas de la emulsión de materiales de cambio de fase. Para la caracterización de la curva entalpía-temperatura se ha utilizado una instalación de la metodología T-history y un calorímetro diferencial de barrido. La caracterización de las propiedades reológicas se ha realizado mediante un reómetro de esfuerzo controlado.

Tras ello, se ha dimensionado un intercambiador de calor adecuado para el estudio del cambio de fase del material de cambio de fase de la emulsión y por último, se han seleccionado el resto los componentes de la instalación experimental.

Tabla de contenidos

Resumen	1
1. Introducción	5
2. Revisión bibliográfica	7
2.1. Almacenamiento térmico de energía	7
2.1.1. Almacenamiento térmico de energía mediante calor latente	7
2.1.2. Propiedades de los PCMs	8
2.1.3. Clasificación y elección del PCM	10
2.1.4. Dispersiones de PCM como material de cambio de fase	13
2.2. Intercambiadores de calor	15
3. Caracterización de la emulsión de PCM	19
3.1. Caracterización de las propiedades termofísicas.....	19
3.1.1. Método T-History.....	19
3.1.1.1. Ensayos de enfriamiento	19
3.1.2. Método DSC.....	20
3.1.2.1. Ensayos de calentamiento	22
3.1.3. Resultados de las medidas de las propiedades termofísicas	22
3.2. Caracterización de las propiedades reológicas	24
3.2.1. Resultados de las medidas de las propiedades reológicas	26
3.3. Resumen de las propiedades de la emulsión de PCM	28
4. Intercambiador de calor	32
4.1. Correlación experimental para la emulsión de PCM	32
4.2. Dimensionamiento del intercambiador de calor	38
5. Instalación	42
5.1. Selección de componentes de la instalación	42
5.2. Pérdidas de carga de la instalación	47

6. Conclusiones.....	50
Bibliografía	52
Nomenclatura	54
Anexo A	
Anexo A.1. Clasificación de los PCM.....	56
Anexo A.2. Problemas relacionados con la estabilidad de emulsiones	61
Anexo B	
Anexo B.1. Clasificación de los intercambiadores de calor	64
Anexo B.2. Materiales de los intercambiadores de calor	67
Anexo C	
Anexo C.1. Historia del método T-History	70
Anexo C.2. Instalación T-History del grupo GITSE	75
Anexo C.3. Especificaciones del equipo DSC	78
Anexo C.4. Especificaciones del reómetro de esfuerzo controlado	79
Anexo D	
Anexo D.1. EES: Cálculo de la correlación para la emulsión de PCM	80
Anexo D.2. EES: Dimensionamiento del intercambiador de calor	83
Anexo D.3. EES: Cálculo de las pérdidas de carga de la instalación	86
Anexo E	
Anexo E.1. Baño Uber UC040T-H	88
Anexo E.2. Caudalímetro de Coriolis Krohne-optimass7000	89
Anexo E.3. Acumuladores: Depósito Lapesa RD 50-1	91
Anexo F. Catálogos.....	92

1. Introducción

En la actualidad nos encontramos con un problema energético sin precedentes, ya que no sólo sigue aumentando el consumo energético, sino que estos recursos, generalmente, fósiles son cada vez menores.

Por otro lado, el consumo masivo de estos últimos está provocando una serie de cambios en el clima, lo que se conoce comúnmente como cambio climático. Esta situación, ha provocado diversos acuerdos en el marco de las Naciones Unidas con el fin de luchar contra el cambio climático, el último de ellos fueron los acuerdos de París que entraron en vigor en 2016. En estos acuerdos, se fijó la reducción de los gases de efecto invernadero, a través de la obtención de energía limpia y un uso más eficiente de la misma. Por tanto, el almacenamiento de energía junto con el uso de las energías renovables serán dos claves para el futuro, y este es el contexto en el que se sitúa este trabajo.

El presente TFG se enmarca dentro de un proyecto de I+D Retos del Ministerio de Economía y Empresa que desarrolla el grupo de investigación de la Universidad de Zaragoza GITSE (Grupo de Ingeniería Térmica y Sistemas Energéticos) con título: “HYBRITES: 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.

Una de las tareas de este proyecto es el desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía térmica de tipo latente con emulsiones de materiales de cambio de fase para ser integrados en redes de calefacción de distrito con el fin de aumentar la fracción renovable. Estos fluidos, además de almacenar energía térmica, pueden ser utilizados como fluidos caloportadores en los circuitos que conformarían estas redes de distrito. Por tanto el objetivo de este TFG será el de contribuir a este estudio diseñando una instalación experimental en la que se estudiará el comportamiento térmico de estos fluidos de almacenamiento de energía térmica (emulsiones de PCM) cuando circulan por intercambiadores de calor.

Este TFG se apoya en el trabajo realizado anteriormente por investigadores del GITSE y otras universidades en cuanto a la obtención de emulsiones/suspensiones de PCM y su respectivo estudio sobre su capacidad de almacenar y transferir calor.

Comprende una serie de etapas, en primer lugar, es necesario conocer tanto las propiedades termofísicas como las reológicas de la emulsión de PCM, la cual se ha escogido atendiendo a diversas razones que se explican en el presente trabajo, en la parte de revisión bibliográfica. Las propiedades termofísicas se han hallado a partir de dos métodos distintos utilizando los equipos disponibles en el laboratorio para la determinación de propiedades del GITSE. Estos son por un lado: el método T-History, utilizado para el cálculo de sus propiedades cuando el PCM de la emulsión pasa de fase líquida a fase sólida; y por otro el método DSC, utilizado cuando el PCM de la emulsión pasa de fase sólida a líquida. Para hallar las propiedades reológicas de la emulsión de PCM se ha utilizado un reómetro de esfuerzo controlado.

Una vez conocidas las propiedades de la emulsión de PCM, para cada uno de sus estados, a las temperaturas que se manejarán en la instalación, esto es: cuando el PCM de la misma está en fase líquida, cuando está cambiando de fase y cuando está en fase sólida; se procede al cálculo de las dimensiones de un intercambiador de calor apropiado para estudiar el cambio de fase del PCM de la emulsión y que se adapte bien a una instalación con el mismo fin. Para ello se utilizará el programa EES.

Por último, con el intercambiador de calor elegido, se elegirán el resto los componentes de la instalación experimental, que permitirá su posterior estudio.

Tras la finalización de este proyecto, la investigación no acaba aquí, ya que se deberán realizar los ensayos pertinentes sobre la instalación diseñada, para comprobar en la práctica la viabilidad de las emulsiones de PCM para almacenar energía y ser utilizadas en redes de distrito.

Los objetivos del proyecto se pueden resumir:

- Revisión bibliográfica de los PCM, emulsiones de PCM e intercambiadores de calor
- Caracterización termofísica y reológica de la emulsión de PCM
- Dimensionado de los intercambiadores de calor a ensayar
- Diseño de un banco de ensayos para este intercambiador de calor

2. Revisión bibliográfica

2.1. Almacenamiento térmico de energía

El almacenamiento térmico de energía permite almacenar energía en forma de calor (o frío), con lo cual, aunque no se tenga disponible la fuente primaria para generar ese calor, debido a que las fuentes renovables son de carácter intermitente y no se suelen acoplar bien a la demanda, esa energía térmica seguirá estando disponible. Así mediante un sistema adecuado de TES, se puede acoplar la demanda a la producción, cuando éstas no son simultáneas.

Existen tres formas de almacenar energía térmica: mediante calor sensible, energía termoquímica y calor latente como se puede observar en la figura 2.1. Este trabajo se va a centrar en el almacenamiento de energía térmica a través del cambio de fase de materiales, es decir, mediante calor latente.

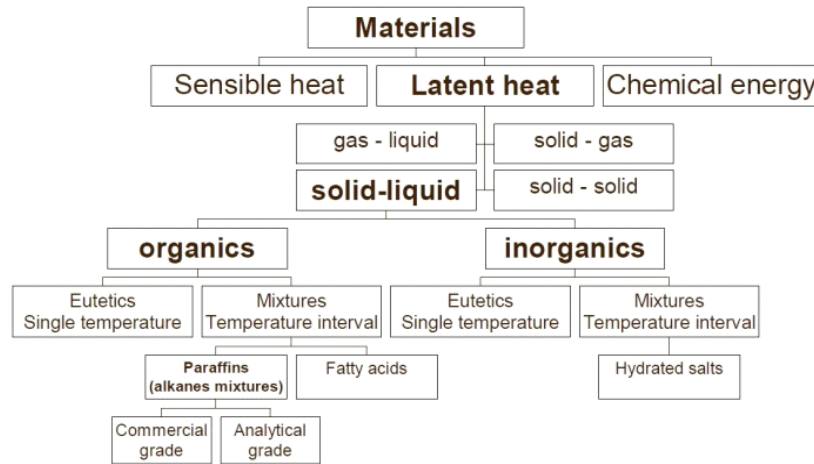


Figura 2.1 Clasificación de las formas de almacenamiento térmico de energía [1]

2.1.1. Almacenamiento térmico de energía mediante calor latente

El calor latente es la energía requerida por una sustancia para cambiar de fase, ya sea de estado sólido a estado líquido (fusión) o de estado líquido a gaseoso (vaporización) u otros cambios de estado. Este cambio de fase se produce a un determinado rango de temperaturas (a presión constante) dependiendo de la sustancia que se trate.

El almacenamiento de energía térmica mediante calor latente es especialmente efectivo para pequeños saltos de temperatura en comparación con el almacenamiento por calor sensible. El calor de fusión de un material es del orden de 80 a 100 veces mayor que el calor requerido para incrementar la temperatura de dicho material un grado mediante calor sensible.

Por tanto, se consigue una mayor densidad de almacenamiento de energía por unidad de volumen en intervalos de temperatura reducidos. Las sustancias que se emplean para esto se denominan materiales de cambio de fase.

Existen distintos cambios de fase que pueden ser aprovechables para el intercambio de energía:

Sólido-Sólido: tiene la principal ventaja de que no es necesario un contenedor para el PCM, pero se usan poco debido a que es difícil encontrar este tipo de transiciones con alto calor latente de transición.

Líquido-Gas y Sólido-Gas: aunque presentan variaciones de entalpía de cambio de fase grandes, no se suelen utilizar, debido a que también tienen cambios de volumen grandes. Lo que llevaría a un aumento de la presión o del volumen del contenedor del PCM y los problemas relacionados con ello.

Líquido - Sólido: Son las más utilizadas ya que sus cambios de volumen suelen ser más aceptables y pueden tener entalpías de cambio de fase relativamente elevadas. Es el caso de la emulsión de PCM que se ensayará en la instalación.

En la figura 2.2, se puede apreciar cómo efectivamente se almacena una mayor energía a partir del cambio de fase de los materiales.

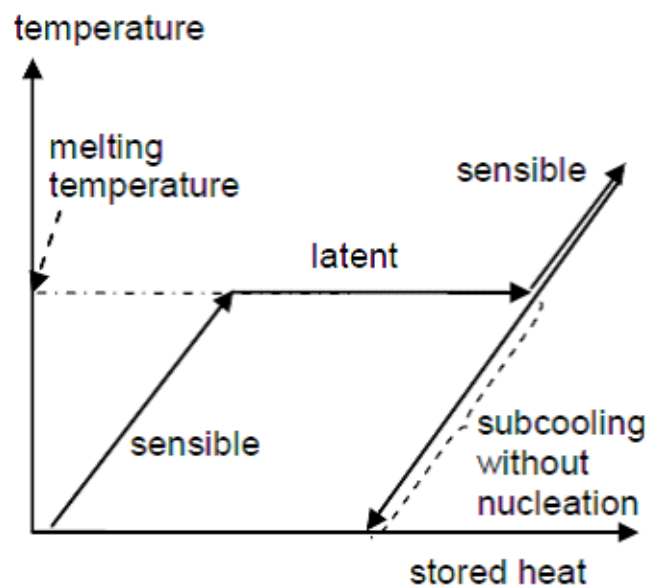


Figura 2.2 Almacenamiento de energía mediante calor latente [2]

2.1.2 Propiedades de los PCMs

Así, las principales características requeridas para los materiales de cambio de fase son las siguientes [1]:

Termofísicas:

- Cambios de volumen pequeños durante la transición de fase
- Punto de fusión en el rango de temperaturas deseado para la aplicación
- Alto calor latente de fusión por unidad de masa

- Alto calor específico
- Alta conductividad térmica: si interesa tener una rápida respuesta del sistema
- Baja conductividad térmica: si se quiere aumentar la inercia térmica en edificios, por ejemplo.
- Fusión congruente: el material ha de fundir y solidificar de forma que las fases sólidas y líquidas posean idéntica composición.
- Bajo subenfriamiento: para asegurar que tanto la fusión como la solidificación puedan ocurrir en un rango de temperaturas pequeño. El subenfriamiento es un efecto que se produce cuando el PCM baja por debajo de la temperatura de solidificación y este no solidifica, y por tanto solo almacena calor sensible. Este efecto, que se puede observar en la figura 3, puede ser reducido utilizando agentes nucleantes.

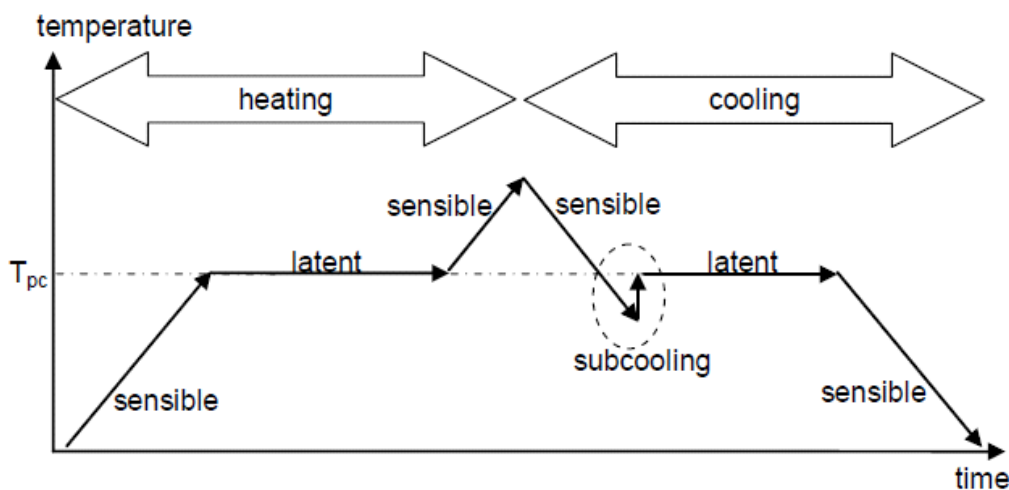


Figura 2.3 Efecto del subenfriamiento [1]

Químicas:

- Estabilidad química
- Compatibilidad con los contenedores de PCM: no debe producir corrosión
- No tóxico, no inflamable, no contaminante, no explosivo.

Económicas:

- Barato
- Disponible en grandes cantidades

2.1.3. Clasificación y elección del PCM

Hay gran cantidad de materiales que se pueden utilizar como PCMs, así, en primer lugar, se pueden clasificar en función de su entalpía y temperatura de fusión. La figura 2.4 presenta dicha clasificación:

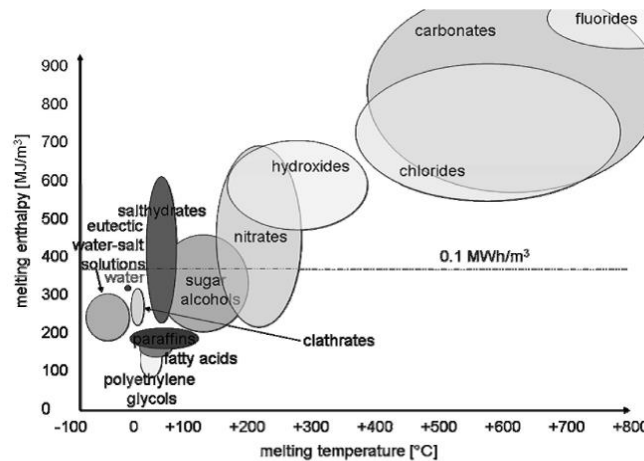


Figura 2.4 Clasificación de los PCM según su temperatura y entalpía de fusión [2]

Observando la figura 2.4, se aprecia que para la aplicación de este TFG, que estará entorno a los 50 °C al tratarse de un sistema de calefacción, los PCM que más se ajustan a esta temperatura son las parafinas y las sales hidratadas. En el Anexo A.1 se encuentra información más detallada acerca de la clasificación del resto de PCMs.

Otra de las formas de clasificar a los PCM es de acuerdo a su naturaleza química, es decir, en orgánicos e inorgánicos, de esta forma se pueden comparar sus principales características.

Tabla 2.1 Clasificación de los PCM según su naturaleza química [1]

	Orgánicos	Inorgánicos
Ventajas	No corrosivos	Mayor entalpía de cambio de fase
	Bajos o inexistentes problemas de Subenfriamiento	
	Estabilidad química y térmica	
Inconvenientes	Menor entalpía de cambio de fase	Subenfriamiento
	Baja conductividad térmica	Corrosión en contacto con aleaciones metálicas
	Inflamabilidad	Segregación de fases

Observando la tabla 2.1, se puede apreciar que para la aplicación descrita en el trabajo resulta más interesante un PCM orgánico, ya que el PCM en forma de emulsión (que es como se utilizará en la instalación) presenta un efecto de subenfriamiento aún más notable, por consiguiente reducirlo al máximo es importante. Además, como va a estar circulando por un intercambiador de calor, interesa que no sea corrosivo y que presente una buena estabilidad térmica y química. En conclusión, en cuanto a su naturaleza química se opta por un compuesto orgánico.

Por consiguiente, al tratarse las sales hidratadas de compuestos inorgánicos, éstas quedan descartadas como PCM a usar en esta aplicación. Por tanto se utilizará la parafina como PCM, pero en forma de dispersión para que se pueda utilizar como fluido caloportador en la instalación.

Otra razón para el uso de parafinas es que presentan una excelente estabilidad frente a repetidos ciclos de fusión-solidificación ya que se pueden conseguir un gran número de cambios de fase en la sustancia sin que cambien las características del material [3].

Además la parafina cumple las propiedades expuestas en el apartado 2.1.2, sobre todo económicas ya que el PCM utilizado en cuestión se trata de un subproducto de una refinería de petróleo. La refinería suministra directamente la parafina en forma de emulsión, con una fracción másica de PCM del 60%. Este producto es utilizado para otros fines completamente distintos al aquí planteado, es decir, se trata de un co-producto.

Así, aunque las sales hidratadas presentan una entalpía de fusión mayor tal y como se observa en la figura 2.5 y por tanto mejor capacidad de almacenamiento energético (figura 2.6), estas presentan los inconvenientes propios de los PCM inorgánicos: baja estabilidad durante el ciclo térmico, el hecho de ser corrosivas y presentar un alto grado de subenfriamiento, efecto indeseable como se ha explicado anteriormente [3].

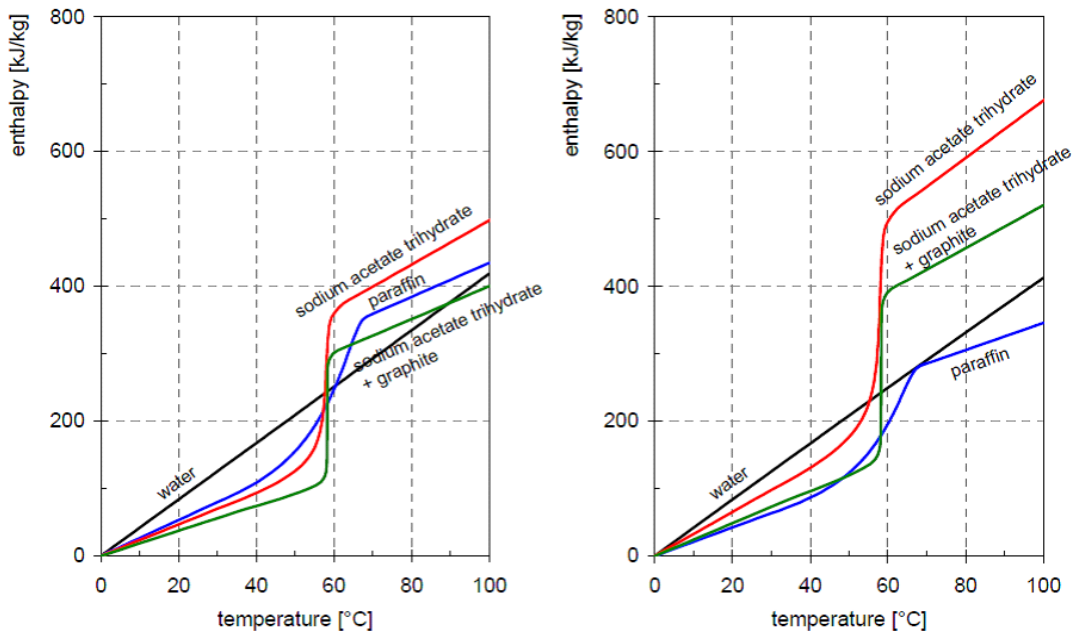


Figura 2.5 Comparación de parafinas y sales hidratadas como PCM según su entalpía y temperatura[3]

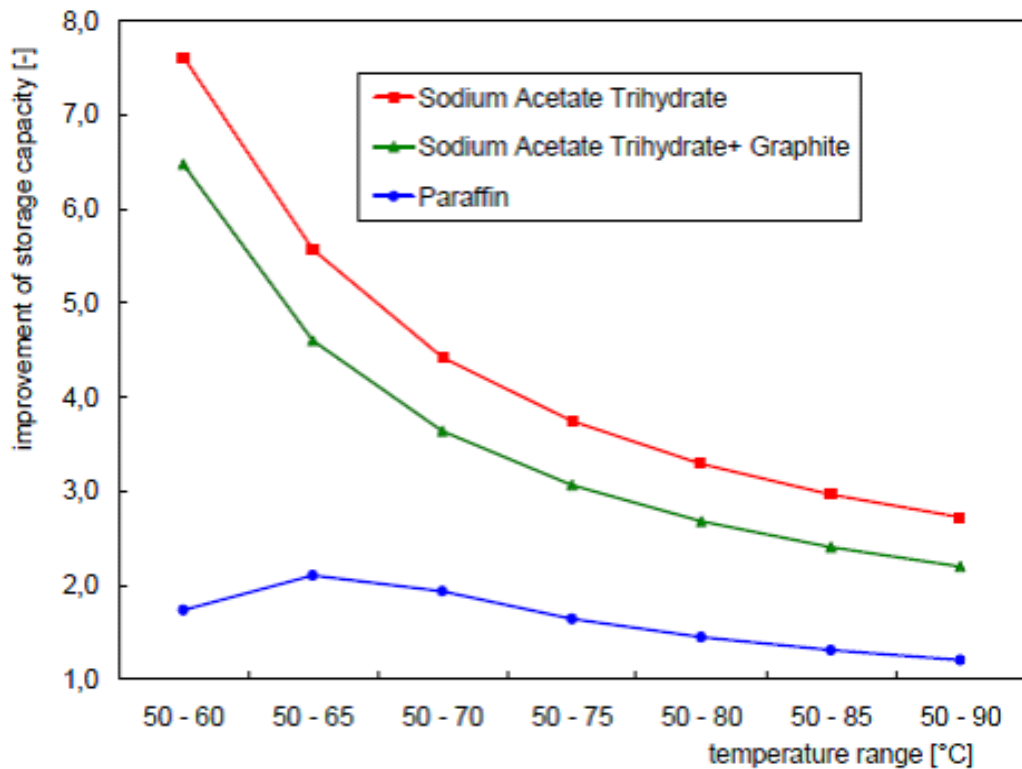


Figura 2.6 Comparación de parafinas y sales hidratadas en cuanto a su mejora en la capacidad de almacenamiento respecto del agua[3].

Ahora que se ha razonado el uso de parafina como PCM, hay que determinar qué tipo de emulsión/suspensión es la más adecuada.

2.1.4. Dispersiones de PCM como material de cambio de fase

Hasta ahora se ha seleccionado el tipo de PCM a utilizar teniendo en cuenta, el rango de temperaturas en el que se va a encontrar la instalación, su naturaleza química y el hecho de que éste debe estar disperso en un fluido, para poder ser bombeado por la instalación y el intercambiador de calor.

Así, en la revisión bibliográfica de Delgado y colaboradores [4] se estudian dos fluidos térmicos latentes: emulsiones de PCM y suspensiones con PCM microencapsulado (ambas de parafina).

Por un lado, las emulsiones son sistemas formados por dos fases inmiscibles, una de ellas está formada por gotas de parafina, que cambian de fase líquida a sólida y viceversa en el proceso térmico, mientras que la otra está formada por agua.

En este caso, el principal problema radica en mantener una emulsión estable ya que pueden aparecer problemas de estratificación, es decir, que las gotas de parafina se unan unas a otras formando mayores gotas y formando finalmente una capa flotante de PCM en la parte superior de la fase formada por el agua, debido a la diferencia de densidades. Para evitar este problema se hace uso de surfactantes (figura 2.7) [5].

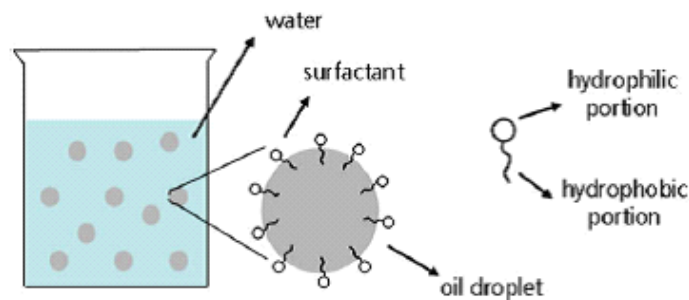


Figura 2.5 Función de los surfactantes en el agua [5]

Por otro lado, la técnica de la microencapsulación consiste en encapsular pequeñas partículas de parafina con un material de recubrimiento que lo aísla y protege del ambiente, y después dispersar dichas partículas en el fluido. El tamaño de las microcápsulas puede ir desde los 2 μm hasta los 2000 μm y el espesor de las películas de recubrimiento desde 0,5 a 150 μm . Hay diferentes técnicas para conseguir la microencapsulación, pueden ser procesos físicos, químicos o físico-químicos [4]. Así, en el caso de la dispersión de PCM microencapsulado (mPCM) es particularmente difícil mantener un fluido homogéneo y estable si las partículas no se procesan con un tamaño muy pequeño. Por otro lado, la cápsula evita que el PCM fugue a la fase continua, que en ese caso podría solidificarse en conductos y causar obstrucciones, por tanto, es importante que las cápsulas sean suficientemente resistentes a la fuerza producida por las bombas. No obstante, este método presenta mayor coste adicional debido a los materiales de recubrimiento de la parafina [5]. Por este motivo se utilizará la emulsión de PCM como fluido para la instalación.

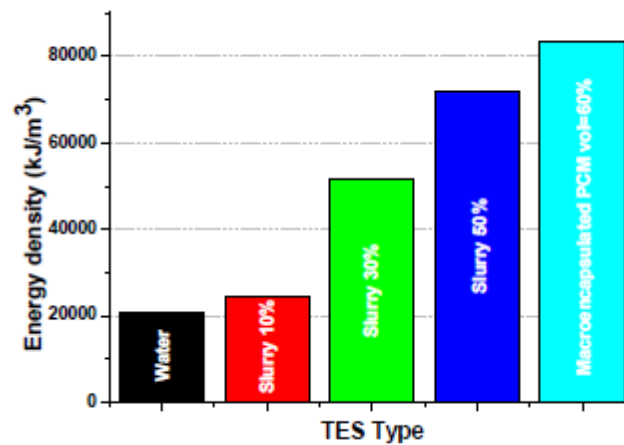


Figura 2.9 Densidad de energía de diferentes TES [6]

Como se puede observar en la figura 2.9 estos fluidos, tanto las emulsiones de PCM (que se utilizarán en la instalación) como las suspensiones de PCM microencapsulado, resultan ventajosas comparadas con los sistemas convencionales de almacenamiento basados en agua y pueden ser competitivos frente los tanques de almacenamiento basados en PCM. Así sus ventajas respecto al agua son: mayor capacidad de almacenamiento energético, la transferencia de calor tiene lugar (aproximadamente) a una temperatura constante y una posible reducción en la potencia de bombeo, resultado de la necesidad de menos flujo másico debido a su mayor capacidad calorífica. Por otro lado, respecto a los tanques de PCM macroencapsulado, la principal ventaja es la reducción de las pérdidas en la transferencia de calor por el hecho de tratarse de un fluido que se puede bombear.

Además, como se ha señalado antes, una de las desventajas del almacenamiento de energía térmica a través de los PCM es su baja conductividad térmica, que se traduce en una carga y descarga lenta. No obstante las emulsiones de PCM y mPCM pueden mejorar su conductividad térmica ya que están dispersadas en agua, cuya conductividad térmica es mayor. Además la transferencia de calor también puede mejorar como consecuencia de la relación superficie/volumen de las gotas de PCM.

Aunque la presencia de otras fases a nivel microscópico cambie el funcionamiento de las emulsiones, éstas deben ser tratadas como si fueran fluidos homogéneos. Por otro lado, estas emulsiones se caracterizan por ser generalmente no newtonianas y por presentar, un comportamiento pseudoplástico que se puede caracterizar por la ley de potencias o modelo Ostwald de Waele. Estas características tendrán un papel relevante a la hora de dimensionar el intercambiador [6].

En el anexo A.2 hay disponible más información acerca de los problemas que pueden presentar las emulsiones y suspensiones de PCM.

2.2. Intercambiadores de calor

En todo intercambiador de calor se distingue entre el fluido de proceso que es el objeto principal del intercambio, y el fluido de servicio que es el foco necesario de calor o de frío, para modificar la temperatura del fluido de proceso. En este TFG, el agua será el fluido de servicio y la emulsión de PCM el de proceso.

Para el intercambio de calor entre ambos se utilizará un intercambiador de placas corrugadas, ya que es el que aporta mejores prestaciones para este tipo de aplicaciones. En el Anexo B.1 aparece una clasificación de los tipos de intercambiadores de calor que se pueden encontrar y se justifica el uso de este tipo de intercambiadores de calor, mientras que en el anexo B.2 aparece una clasificación de los materiales de los mismos.

Estos intercambiadores consisten en una serie de placas con corrugaciones en ángulo superpuestas una encima de otra con el ángulo de las corrugaciones en sentido opuesto respecto de la anterior. En la figura 2.10 se muestra una fotografía de una placa individual y en la 2.11 el comportamiento de los fluidos dentro del intercambiador de calor.

Las dimensiones geométricas principales de estos intercambiadores son las siguientes: L , W , H que coincide con la distancia entre las placas, N_p y β , fijado en 65° , ya que es el ángulo que provoca que la transmisión de calor sea más efectiva [7]. Así con estos parámetros se pueden conocer todos los datos geométricos del intercambiador, utilizando las ecuaciones de 2.1 a 2.9.

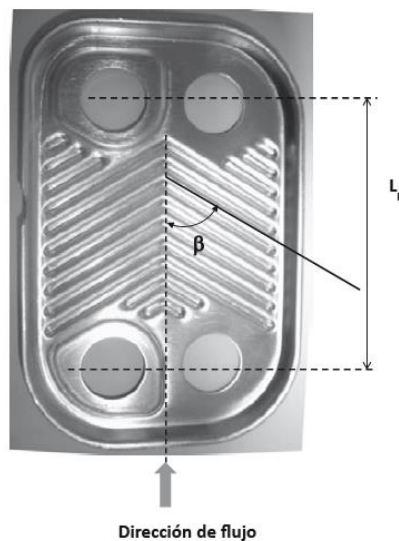


Figura 2.10 Placa individual de un intercambiador de placas corrugadas [7]

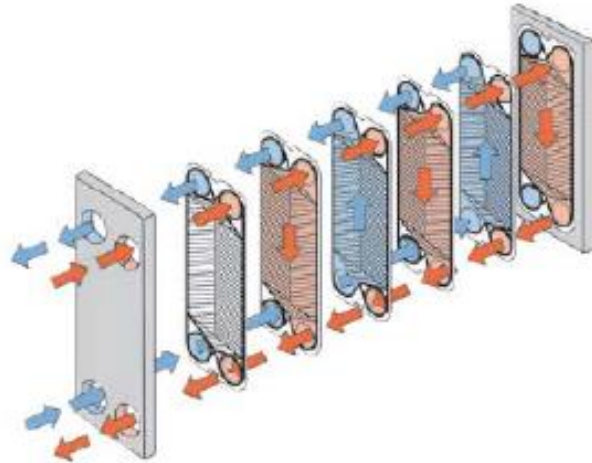


Figura 2.11 Funcionamiento de un intercambiador de placas. Fuente: Alfa laval

El número de canales:

$$N_c = N_f - 1 \quad (2.1)$$

$$N_p = N_c + N_f + 1 \quad (2.2)$$

Donde N_f es el número de canales por los que circula el fluido frío, N_c es el número de canales por los que circula el fluido caliente y N_p el número de placas del intercambiador.

Áreas transversales:

$$A_{paso} = W \cdot H \quad (2.3)$$

$$A_{pasototalc} = A_{paso} \cdot N_c \quad (2.4)$$

$$A_{pasototalf} = A_{paso} \cdot N_f \quad (2.5)$$

Áreas superficiales:

$$A_{pl} = L \cdot W \quad (2.6)$$

$$A_{pr} = A_{pl} \cdot N_p \quad (2.7)$$

$$A_{ht} = \Phi \cdot A_{pr} \quad (2.8)$$

Donde: A_{pl} es el área proyectada en el plano de una placa; A_{pr} es el área plana de todo el intercambiador; A_{ht} es el área superficial total de contacto entre los fluidos y las placas de todo el intercambiador, siendo Φ , es un factor de corrección que tiene en cuenta el aumento de área producido por la corrugación de las placas. Este factor tiene un valor típico de 1,22 [7].

Diámetro hidráulico

$$D_h = \frac{2 \cdot H}{\Phi} \quad (2.9)$$

Además, para este tipo de intercambiadores, se encontró en la bibliografía una correlación para el cálculo del número de Nusselt válida para el lado del agua [7] (ecuación 2.10).

$$Nu = 0.122 \cdot (Pr)^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_p}\right)^{1/6} \cdot (f \cdot Re^2 \cdot \text{sen}(2\beta))^{0.374} \quad (2.10)$$

Con:

$$\frac{1}{f} = \frac{\cos(\beta)}{\sqrt{b \tan(\beta) + c \text{sen}(\beta) + f_0 / \cos(\beta)}} + \frac{1 - \cos(\beta)}{\sqrt{f_1}} \quad (2.11)$$

Siendo:

$$f_0 = \frac{93}{Re} \quad (2.12)$$

$$f_1 = a \cdot \left(\frac{597}{Re} + 3.85\right) \quad (2.13)$$

Con: $a = 3,8$; $b = 0,18$; $c = 0,36$; $\beta = 65^\circ$

Donde: μ_p la viscosidad del fluido en la pared del intercambiador.

Sin embargo, en la bibliografía no se encontró ninguna correlación válida para un fluido como la emulsión de PCM que se va a ensayar, pero se disponía de ensayos experimentales con una sustancia relativamente próxima (aceite SAE 300) en intercambiadores de estas características que, en caso de cumplirse las condiciones de semejanza exigibles, podrían ser utilizados. El desarrollo se detalla en el apartado 4.1.

3. Caracterización de la emulsión de PCM

Cómo ya se ha justificado en el apartado anterior, la emulsión de PCM que se va utilizar es una emulsión de parafina y para dimensionar el intercambiador de calor se han de conocer las propiedades termofísicas y reológicas del mismo. Para ello se utilizará por un lado el método T-History y DSC, con el fin de caracterizar la curva entalpía-temperatura, y por otro lado un reómetro de esfuerzo controlado, para conocer sus propiedades reológicas.

3.1. Caracterización de las propiedades termofísicas

3.1.1 Método T-History

El método T-History tiene la ventaja de utilizar equipos relativamente sencillos y básicos y de tener tanto un bajo precio de ejecución como de mantenimiento, en comparación con otros métodos como el DSC o el DTA. Por tanto se considera una metodología muy atractiva para determinar la curva entalpía-temperatura de los PCMs [8].

Para más información acerca de este método, en el Anexo C.1 aparece una breve explicación de su historia y de las distintas aportaciones de diversos autores en la mejora del mismo.

Teniendo en cuenta el método T-history original y las mejoras que han ido introduciéndose, finalmente, se procede de la forma mostrada en el siguiente apartado, utilizando los equipos disponibles en el laboratorio de determinación de propiedades termofísicas del GITSE. En el Anexo C.2 hay una breve explicación de dichos equipos.

3.1.1.1. Ensayos de enfriamiento

En primer lugar, se deben de pesar las masas de las muestras de la emulsión de PCM y del material de referencia (en este caso, agua), así como de las probetas contenedoras.

Una vez conocidas las masas, se calienta previamente la muestra de emulsión de PCM y la de referencia en el baño termostático, que se debe encontrar a una temperatura superior de la temperatura de fusión del PCM. Una vez que las sustancias contenidas en las probetas alcanzan las temperaturas del baño, se trasladan a la cámara de aire cerrada que debe encontrarse a una temperatura inferior que el inicio de cambio de fase del PCM, donde se dejan enfriar.

En cuanto, los tubos de ensayo que contienen tanto la emulsión de PCM como el agua se sacan del baño y se introducen en la cámara de aire se comienzan a registrar los datos de temperatura en función del tiempo y el experimento finaliza cuando la emulsión de PCM y el agua han alcanzado la temperatura de la cámara de aire.

Tras registrar las curvas temperatura-tiempo, registradas por el sistema de adquisición de datos, se pueden hallar la entalpía de fusión y el calor específico.

Para que este método sea coherente, la temperatura en el interior de los tubos tiene que ser uniforme, para ello estos tubos deben ser sistemas de capacidad, ya que en ellos la temperatura no depende de las coordenadas espaciales, si no que es uniforme y sólo varía con el tiempo. Los sistemas de capacidad deben tener un número de Biot inferior a 0,1, cuya definición aparece en la ecuación 3.1.

$$Bi = \frac{h \cdot D}{\lambda} \quad (3.1)$$

Dado que el diámetro de los portamuestras es de 0,01 m y la conductividad térmica de la emulsión de PCM es de 0,4 W/(m·K) (en los casos de nuestros tubos de ensayo y PCM), el coeficiente de convección tendrá un valor aproximado de 4 W/(m·K), valor que se consigue en condiciones de convección natural. Así es especialmente importante que en la cámara de aire no existan ventiladores que fueren la convección.

Teniendo en cuenta esto, se plantea el balance de energía a ambas probetas (ecuaciones 3.2 y 3.3):

$$m_{vidrio} \cdot c_{p(vidrio)} \cdot \frac{\Delta T_{vidrio}}{\Delta t} + m_{PCM} \cdot c_{p(PCM)} \cdot \frac{\Delta T_{PCM}}{\Delta t} = h \cdot A \cdot (T_{PCM} - T_{inf}) \quad (3.2)$$

$$m_{vidrio} \cdot c_{p(vidrio)} \cdot \frac{\Delta T_{vidrio}}{\Delta t} + m_{agua} \cdot c_{p(agua)} \cdot \frac{\Delta T_{agua}}{\Delta t} = h \cdot A \cdot (T_{agua} - T_{inf}) \quad (3.3)$$

De esta ecuación son conocidas todas las variables menos el calor específico de la emulsión de PCM ($c_{p(PCM)}$), y el coeficiente de convección (h), que es común para el agua y el PCM siempre que su temperatura superficial sea la misma. Por tanto, obtenemos un sistema de dos ecuaciones y dos incógnitas para cada tiempo registrado por el sistema, de donde se extrae la curva $c_p(T)$ para la emulsión de PCM.

3. 1.2. Método DSC

El método DSC es el más usado para realizar estudios termoanalíticos, especialmente para medir las temperaturas y entalpías de fusión. Además, el empleo de esta técnica permite también: calcular el calor específico, estimar diagramas de cambio de fase, definir el grado de cristalinidad y la temperatura de cristalización, analizar la estabilidad cinética y oxidativa entre otros [9].

El equipo DSC está compuesto por un horno aislado, con un control de temperatura (figura 3.1). En él hay dos crisoles, uno vacío, que servirá de referencia, y otro que contiene el material a ensayar, los cuales van a experimentar procesos de calentamiento y enfriamiento.

El equipo utilizado en este caso fue del tipo flujo de calor, concretamente el modelo: DSC 200 F3 Maia del fabricante Netzsch con un rango de temperaturas de operación entre los -180°C y los 600°C, disponible en el laboratorio de determinación de propiedades del GITSE, cuyas especificaciones se encuentran en el Anexo C.3. El calentamiento es generado por una resistencia eléctrica situada debajo de la placa donde se colocan las muestras, mientras que el sistema de enfriamiento funciona con nitrógeno líquido.

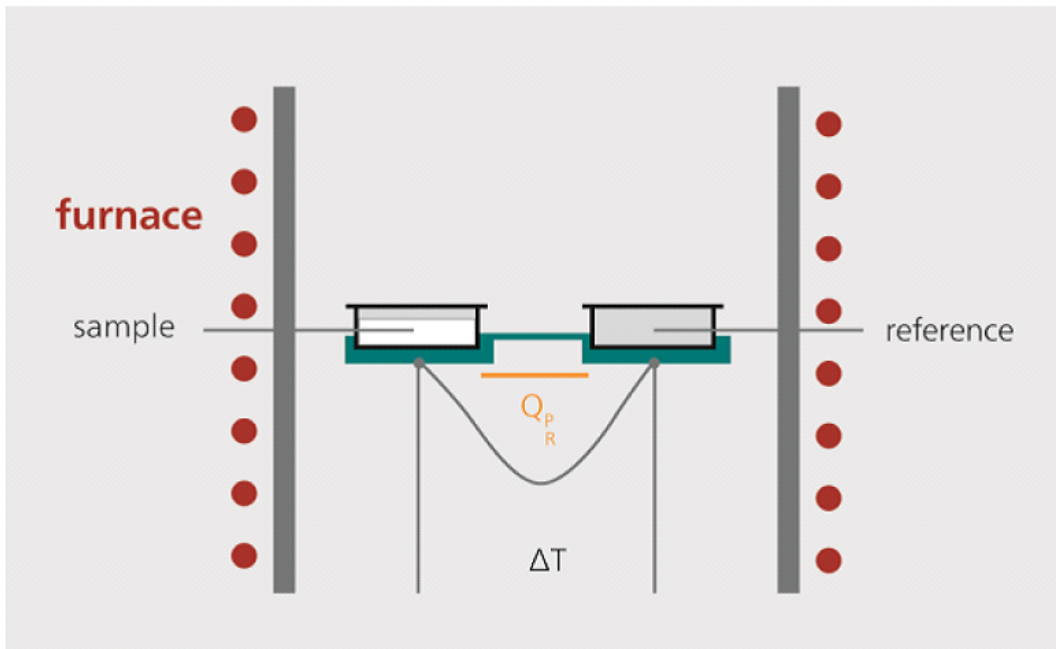


Figura 3.1 Esquema de un equipo DSC [9]

A lo largo del experimento a una velocidad de calentamiento constante, las temperaturas de los dos crisoles se elevan paralelamente debido a la diferencia entre sus calores específicos.

Como se muestra en la figura 3.2, las curvas tienen una tendencia lineal hasta t_1 , cuando el proceso de fusión de la muestra comienza. En esta fase de transición, de t_1 a t_2 , la temperatura de la muestra casi no cambia (debido al cambio de fase) mientras que la de la referencia continúa creciendo continuamente.

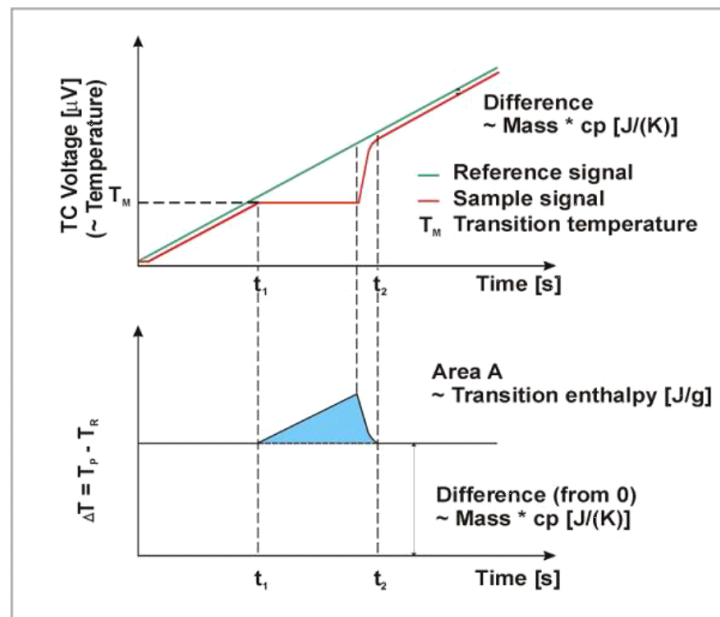


Figura 3.2 Ejemplo de cálculo mediante el método DSC[9]

El área bajo el pico, presentada en la figura 3.2, corresponde con el calor latente de fusión o solidificación [9].

3.1.2.1. Ensayos de calentamiento

Los ensayos de calentamiento mediante el método DSC fueron realizados por el personal de laboratorio, y a través de ellos se obtuvieron las curvas entalpía-temperatura para el calentamiento.

Los ensayos de calentamiento se hicieron mediante este método por las limitaciones técnicas de la cámara de aire del método T-history, cuya temperatura máxima es inferior a la del cambio de fase de la emulsión de PCM.

3.1.3. Resultados de las medidas de las propiedades termofísicas

Con la realización de los ensayos anteriores se obtuvieron dos curvas: entalpía en función de la temperatura en el enfriamiento mediante el método T-History y la entalpía en función de la temperatura en el calentamiento mediante el método DSC.

En la figura 3.3 se pueden observar las curvas obtenidas:

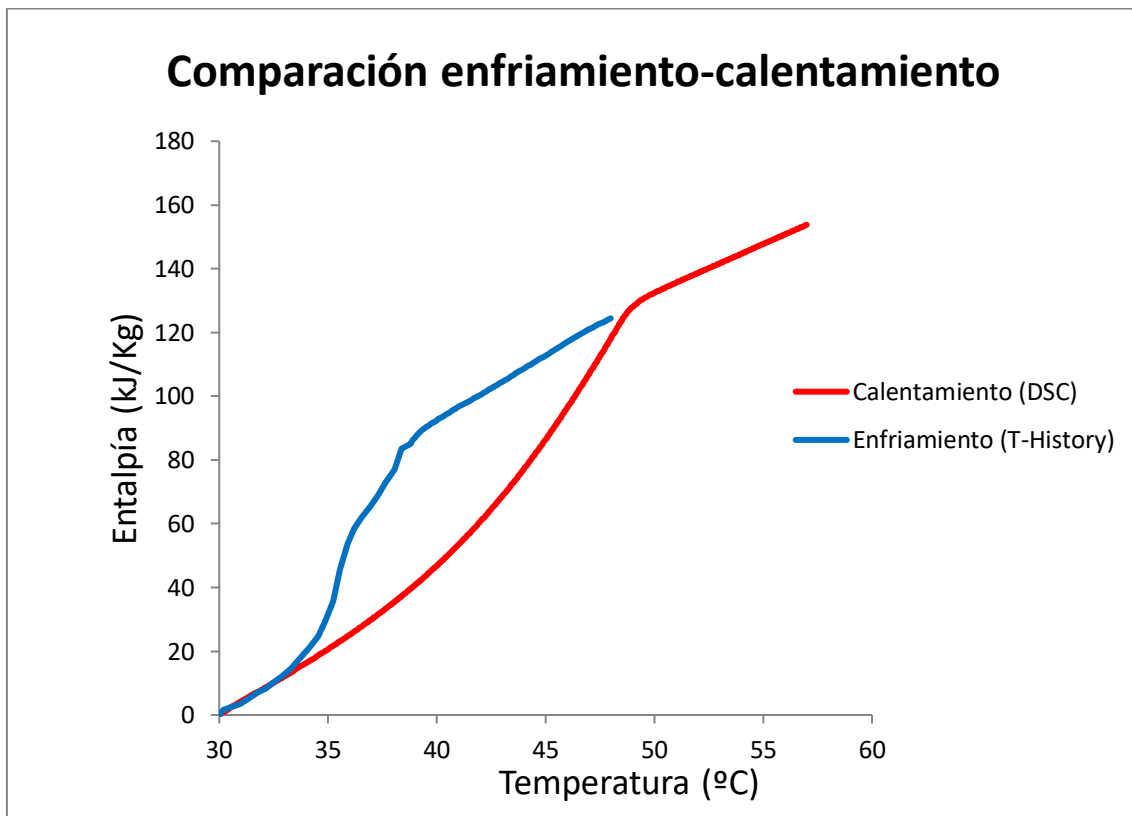


Figura 3.3 Comparación de la evolución de la entalpía con la temperatura para el calentamiento y enfriamiento de la emulsión de PCM

Tal y como se observa en la figura 3.3, el PCM está en su fase sólida entre los 30 y 35 °C, aproximadamente y en su fase líquida entre los 40°C en adelante para el enfriamiento y de 50 en adelante para el calentamiento.

Además, se aprecia el fenómeno de histéresis, que provoca que el cambio de fase ocurra en un rango de temperaturas distinto dependiendo de si se calienta la emulsión o de si se enfría.

Tal y como es de esperar, se observa que estas curvas son más suaves que las mostradas en la teoría (figura C.5 del Anexo C.1.) ya que el PCM es una emulsión de parafina y agua y por tanto no se trata de una sustancia pura.

Para el análisis del comportamiento del PCM en el intercambiador es necesario conocer cómo varía el calor específico en función de la temperatura, el cual se ha calculado a partir de la derivada de la entalpía respecto de la temperatura.

La figura 3.4 muestra esta curva para el calentamiento.

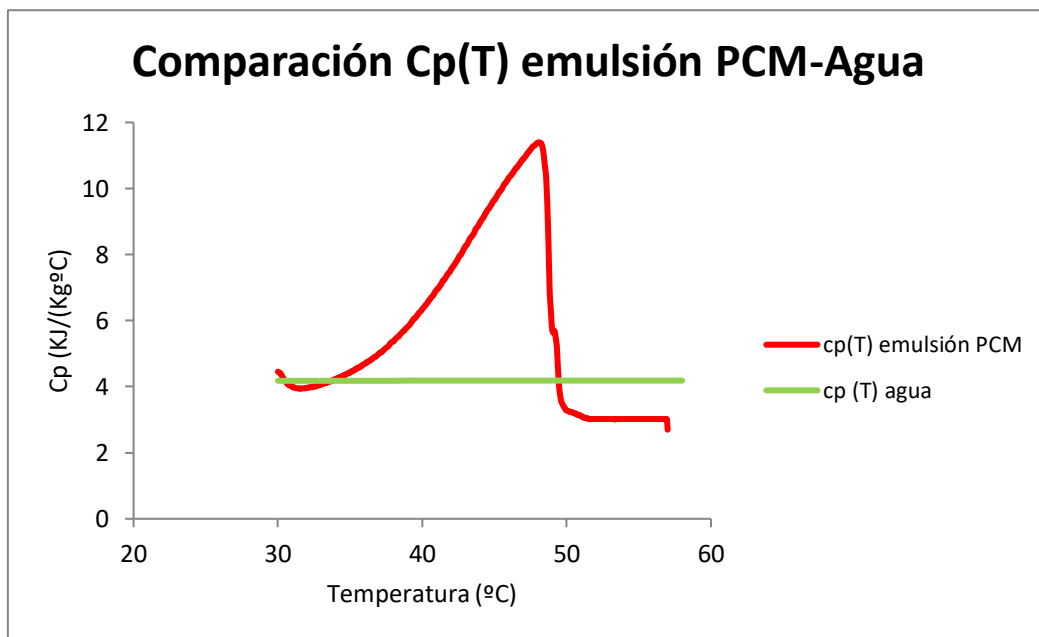


Figura 3.4 Comparación del calor específico en función de la temperatura para el calentamiento entre la emulsión de PCM y el agua

Como se aprecia en la figura 3.4, el cambio de fase de PCM en esta emulsión tiene lugar entre los 35 y 50 °C, por lo que el intercambiador de calor deberá trabajar en este rango de temperaturas. Esta curva como la de entalpía-temperatura, es más suave que las teóricas (figura C.6), ya que se trata de una emulsión de PCM y no de una sustancia pura.

Con el objetivo de facilitar los futuros cálculos del intercambiador y teniendo en cuenta lo anterior, las propiedades del PCM se van a dividir en 3 zonas:

- 1) El PCM de la emulsión se encuentra en fase sólida: de 30 a 35°C
- 2) El PCM de la emulsión se encuentra cambiando de fase (fusión): de 35 a 50°C
- 3) El PCM de la emulsión se encuentra en fase líquida: de 50 a 55°C

Obteniendo un calor específico medio para cada una de estas tres zonas de:

- 1) C_p "sólida" = 4130 J/(kg·K)
- 2) C_p "cambio de fase (fusión)" = 7462 J/(kg·K)
- 3) C_p "líquida" = 3060 J/(kg·K)

3.2. Caracterización de las propiedades reológicas

La viscosidad es una propiedad muy importante a la hora analizar la transferencia de calor y caracterizar el comportamiento fluidodinámico de la emulsión del PCM en el intercambiador. Por consiguiente su estudio es de mucha relevancia.

Como se ha señalado con anterioridad, esta emulsión de PCM se trata de un fluido no newtoniano, lo que significa que la viscosidad depende, además de la temperatura (como cualquier fluido) de la velocidad de cizalla. Por tanto, es muy importante el análisis de la evolución de la viscosidad con estos parámetros (velocidad de cizalla y temperatura) para obtener toda la información necesaria para la caracterización de su comportamiento reológico.

El estudio del comportamiento reológico de la emulsión de PCM elegida ha sido estudiado a través del reómetro de esfuerzo controlado AR-G2 del fabricante TA Instruments, disponible en el laboratorio GITSE, mostrado en la figura 3.5 y cuyas especificaciones se encuentran en el Anexo C.4.



Figura 3.5 Reómetro de esfuerzo controlado AR-G2 [5]

La temperatura se puede controlar o bien mediante un horno (-150 ° C - 600 ° C) o mediante una placa Peltier (-40 ° C - 200 ° C).

Se pueden caracterizar una amplia gama de materiales mediante el empleo de este instrumento gracias a diversos accesorios. Además de diferentes geometrías de conos, platos y cilindros concéntricos de diferentes diámetros, con el controlador de temperaturas Peltier, se puede utilizar el solventtrap para evitar la evaporación de la muestra, y cuyo esquema se muestra en la Figura 3.6.

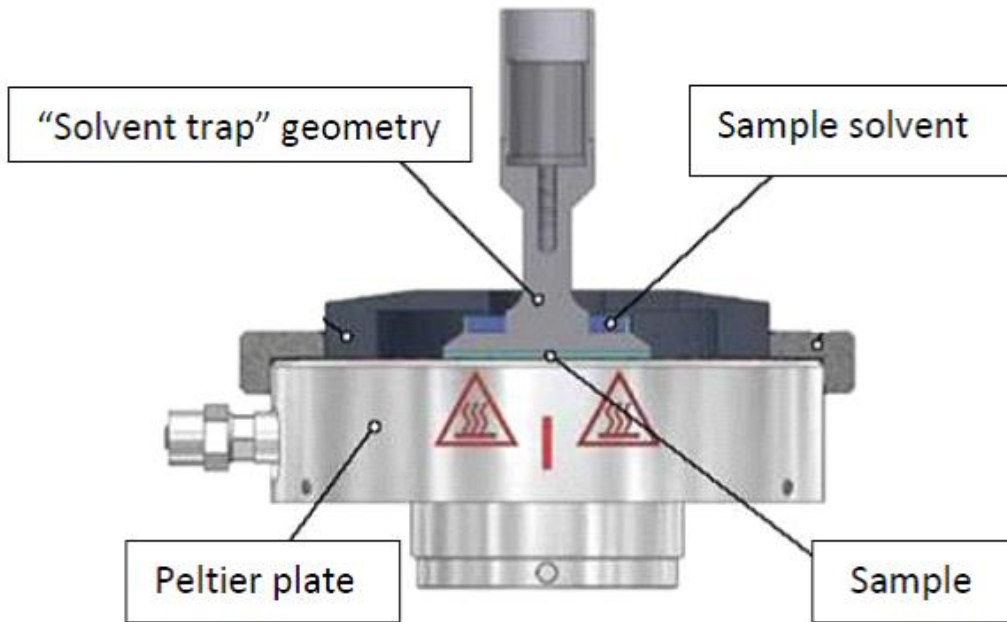


Figura 3.6 Esquema del solvent trap del reómetro [5]

Para la caracterización reológica de la emulsión de PCM se llevaron a cabo ensayos rotacionales. En ellos, para determinar la viscosidad de la muestra se mide el esfuerzo necesario para producir una determinada velocidad angular, así, la viscosidad se calcula a partir de la ecuación 3.4.

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (3.4)$$

Donde $\dot{\gamma}$ es la velocidad de cizalla (s^{-1}) y τ es el esfuerzo cortante (Pa).

La metodología seguida para medir la viscosidad de la emulsión PCM fue elaborada por M. Delgado durante el desarrollo de su tesis doctoral [5], quien ayudó en el presente trabajo experimental.

Teniendo en cuenta la temperatura de cambio de fase de la emulsión de PCM así como la posible evaporación del agua de la muestra, la configuración de la placa Peltier resultó ser la más adecuada para averiguar su viscosidad, ya que permite usar el accesorio solventtrap. Además, se eligió la geometría de plato, con un diámetro de 40 mm, ya que permite realizar mediciones de viscosidad con una rampa de temperatura.

Se realizaron dos ensayos diferentes, ambos en el modo de rotación: uno a temperatura constante con barrido de velocidad de cizalla, y otro a velocidad de cizalla constante variando la temperatura.

El primer conjunto de medidas se ha logrado a través de una variación logarítmica de velocidad de cizalla entre 0.001 s^{-1} y 1000 s^{-1} , a una temperatura constante de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. En cuanto a las segundas mediciones, la rampa de temperatura se llevó a cabo a una velocidad de $0,5 \text{ K / min}$ a una velocidad de cizalla de 100 s^{-1} . Se realizaron varias medidas y se observó que los resultados eran repetibles.

3.2.1. Resultados de las medidas de las propiedades reológicas

En la figura 3.7, aparece la viscosidad en función de la temperatura, para una velocidad de cizalla de 100 s^{-1} .

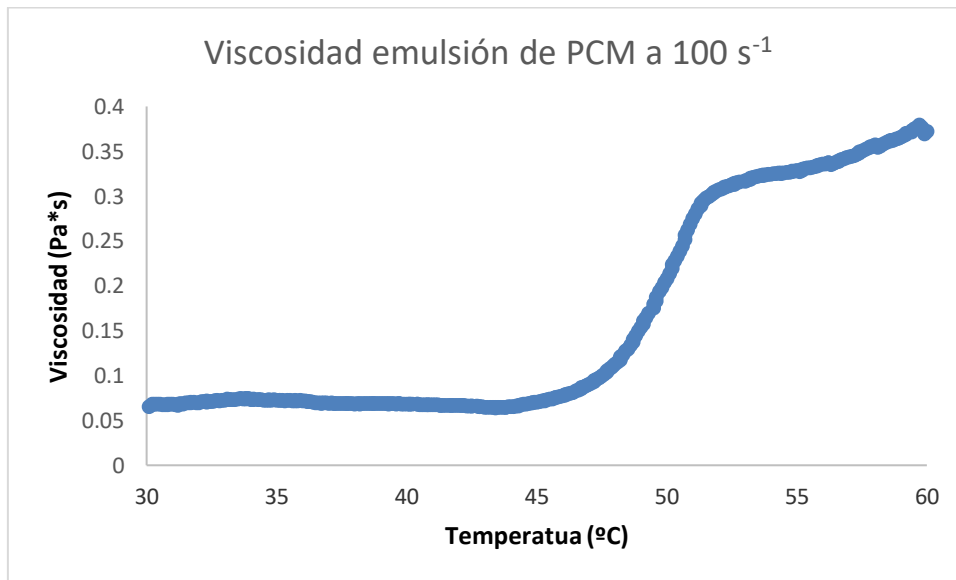


Figura 3.7 Evolución de la viscosidad con la temperatura de la emulsión de PCM para una velocidad de cizalla de 100 s^{-1}

En ella se aprecia como entre los 20 y los $45 \text{ }^\circ\text{C}$, la viscosidad permanece prácticamente constante en torno a los $0,07 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, pero al llegar a los 45°C se dispara hasta alcanzar los $0,4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ a los $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Esto es debido a que al tratarse de un coproducto, la formulación de la emulsión de PCM no es la óptima para trabajar a temperaturas superiores a 45°C .

En la figura 3.8 se observa la viscosidad en función de la velocidad de cizalla para una temperatura de 25°C , la cual muestra un comportamiento pseudoplástico.

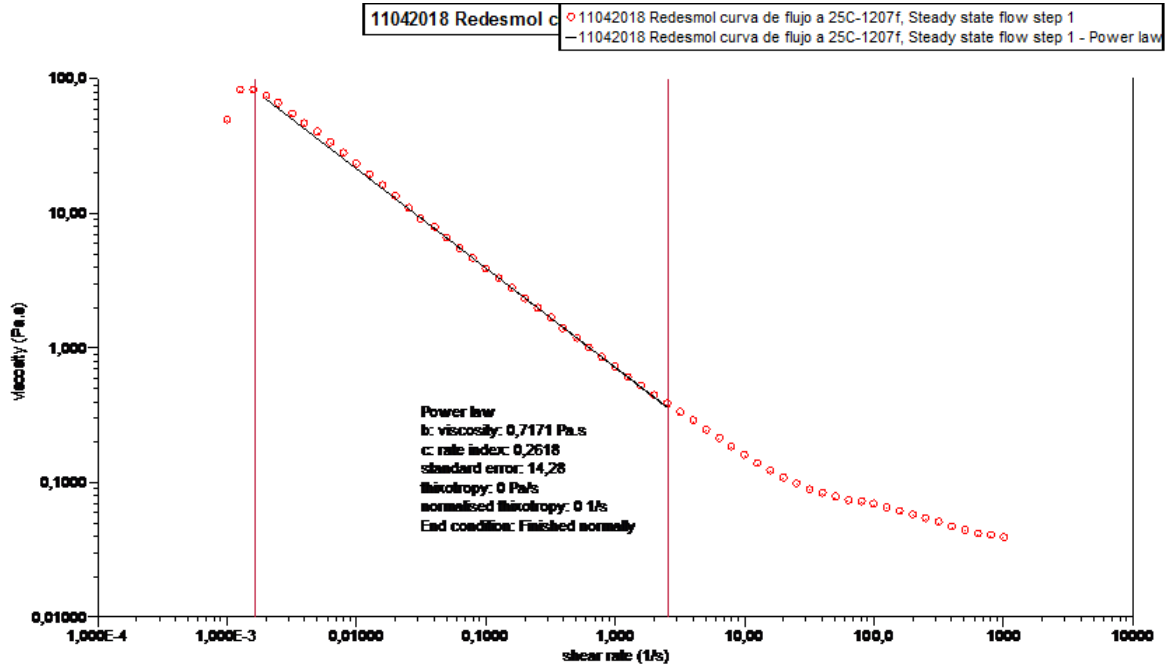


Figura 3.8 Evolución de la viscosidad con la velocidad de cizalla de la emulsión de PCM a una temperatura de 25°C

Además en la figura 3.8 aparecen calculados los coeficientes c: índice de comportamiento del flujo (n a partir de ahora) con un valor de 0,2618 y b: índice de consistencia del flujo (K a partir de ahora) con un valor de 0,7171 Pa·s, según el ajuste a la ley de potencias o modelo Ostwald de Waele.

Una vez que se tienen estos datos, se puede calcular la velocidad de cizalla a la que estará sometida la emulsión de PCM en el intercambiador de calor de acuerdo a la ecuación 3.5.

$$\dot{\gamma} = \frac{2 \cdot n + 1}{3 \cdot n} \cdot \left(\frac{6 \cdot \dot{V}}{WH^2} \right) \tag{3.5}$$

La ecuación 3.5 es válida para canales planos [10], geometría similar a la que se da en un intercambiador de placas corrugadas y para fluidos no newtonianos como es el caso de la emulsión de PCM. \dot{V} es el caudal, que se fija en 6 l/min (0,0001 m³/s), W se fija en 7cm y H en 1mm (valores típicos en modelos comerciales).

Con estos datos se obtiene una velocidad de cizalla de 16628 s⁻¹. Este valor, según se observa en la figura 3.8, supera ampliamente el rango en el que se realizó el ajuste a la ley de potencias de Ostwald, habiendo alcanzado el plato newtoniano, estado en el que los fluidos no newtonianos se comportan como newtonianos. Por tanto, la viscosidad de la emulsión de PCM en el intercambiador de calor sólo dependerá de la temperatura.

Así pues, se toma como viscosidad a 25°C el valor que se tiene para la velocidad de cizalla más alta (1000 s⁻¹). Este valor es 0,03855 Pa·s. Al tener también la variación de la viscosidad en función de la temperatura para 100 s⁻¹, se puede estimar la variación de la viscosidad en función de la misma en el plato newtoniano siguiendo la misma proporción.

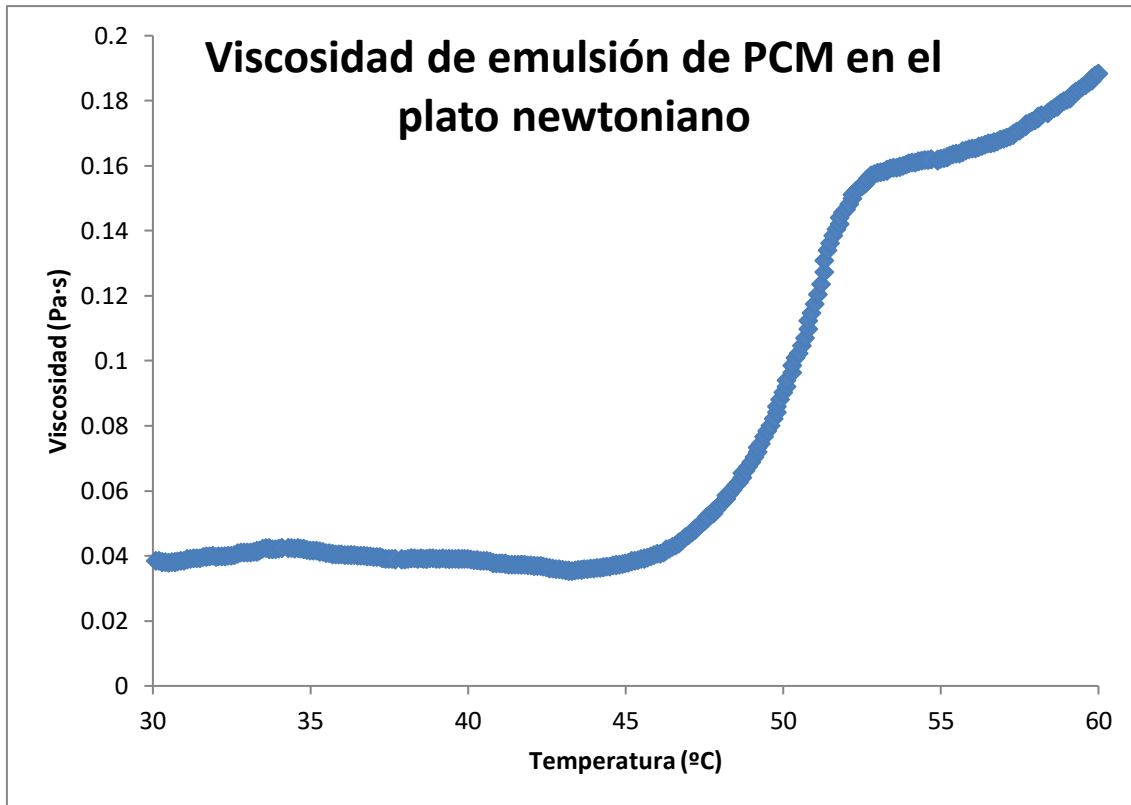


Figura 3.9. Evolución de la viscosidad con la temperatura de la emulsión de PCM en el plato newtoniano

En la figura 3.9 se puede observar la estimación de la viscosidad dentro del intercambiador en función de la temperatura e independiente de la velocidad de cizalla al encontrarse en el plato newtoniano.

Como se ha explicado anteriormente, para realizar los cálculos del intercambiador, se van a dividir las propiedades de acuerdo a 3 zonas. En este caso la viscosidad en las distintas regiones quedará de la siguiente forma:

- 1) Viscosidad "sólida" (T=30-35°C): 0,040 Pa·s
- 2) Viscosidad "cambio de fase (fusión)" (T=35-50°C): 0,044 Pa·s
- 3) Viscosidad "líquida" (T=50-55°C): 0,142 Pa·s

3.3. Resumen de las propiedades de la emulsión de PCM

Además del calor específico y de la viscosidad, para realizar los cálculos para el dimensionado y diseño del intercambiador de calor e instalación experimental, se debe conocer también la densidad y conductividad térmica de la emulsión de PCM.

De medidas realizadas previamente a este TFG se conoce que la densidad a una temperatura de 20, 40 y 60°C es 936, 912 y 868 kg/m³, respectivamente.

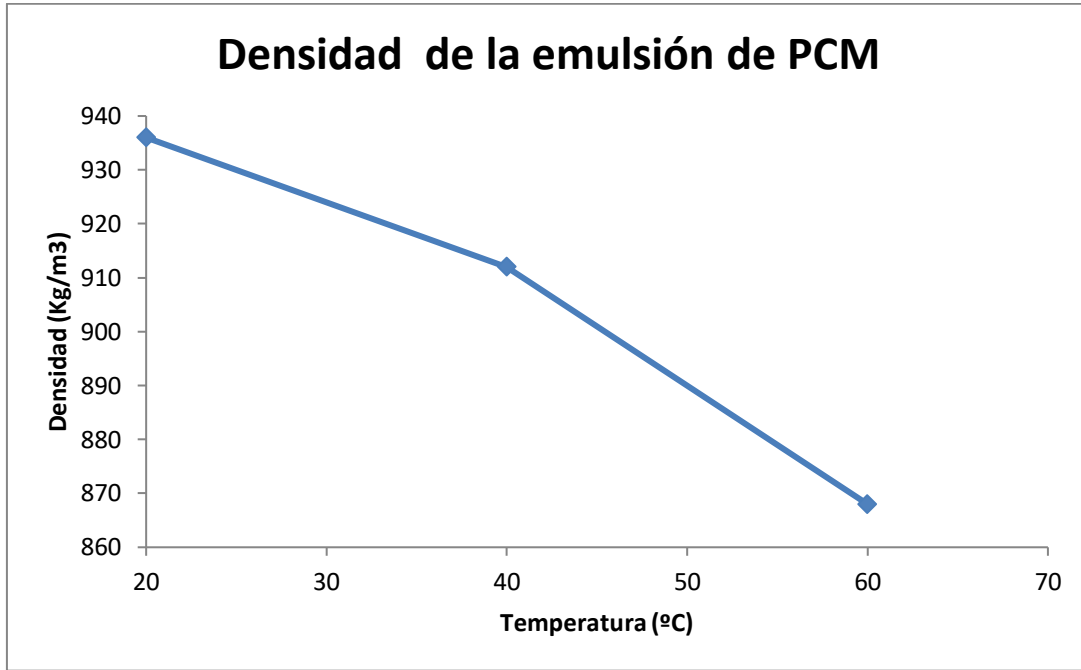


Figura 3.10 Densidad de la emulsión de PCM entre los 20 y 60°C

Según la figura 3.10 se puede tomar los siguientes valores de la densidad para cada una de las regiones:

- 1) Densidad de la emulsión con el PCM en fase sólida: $920 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- 2) Densidad de la emulsión con el PCM en el cambio de fase (fusión): $912 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- 3) Densidad de la emulsión con el PCM en fase líquida: $885 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

En cuanto a la conductividad térmica, se conoce de anteriores investigaciones que la difusividad térmica de la emulsión de PCM es $9 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, y que ésta se puede considerar constante para las fases sólida y líquida de la emulsión de PCM. La conductividad durante el cambio de fase (fase fusión) se ha estimado como la media de ambos resultados.

$$\lambda = c_p \cdot \rho \cdot \alpha \quad (3.6)$$

De acuerdo a la ecuación 3.6, se puede calcular la conductividad en las fases líquida y sólida. Así para cada una de las fases la conductividad térmica tendrá un valor de:

- 1) Conductividad de la emulsión de PCM fase sólida: $0,342 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$
- 2) Conductividad de la emulsión de PCM durante cambio de fase (fusión): $0,293 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$
- 3) Conductividad de la emulsión de PCM en fase líquida: $0,244 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$

Todas estas propiedades quedan resumidas en la tabla 3.1, así como el cálculo del número de Prandtl para cada una de las regiones anteriormente definidas de acuerdo a su definición (ecuación 3.7)

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda} \quad (3.7)$$

Tabla 3.1 Resumen de las propiedades de la emulsión de PCM en sus tres regiones

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

4. Intercambiador de calor

4.1. Correlación experimental para la emulsión de PCM

Como se ha señalado en el apartado de la revisión bibliográfica, no se encontraron correlaciones válidas para fluidos con las características de la emulsión de PCM.

No obstante, se dispone de los resultados de los ensayos de un intercambiador de placas corrugadas cuya geometría es conocida (figura 4.1) y cuyos fluidos son agua-glicol 50% y aceite SAE 300. Estos ensayos permiten, como se mostrará seguidamente, obtener una correlación experimental para la convección forzada del aceite que circula por los canales calientes del intercambiador ensayado. El análisis dimensional establece que estas correlaciones son funciones de los números de Reynolds y Prandtl, cuyos valores establecen los límites de validez de la correlación obtenida.

Para poder aplicar la correlación obtenida a partir de los ensayos con el aceite en el caso de la emulsión de PCM, es necesario que sus números de Prandtl coincidan o, al menos tengan órdenes de magnitud próximos.

Así con las ecuaciones expuestas a continuación y los datos de los ensayos se elaborará un programa en el software EES que permita obtener dicha correlación. Este programa aparece en el Anexo D.1.

Las propiedades del PCM se presentaron en la tabla 3.1 del apartado 3.6 y las del aceite en la tabla 4.1; comparando ambas se llega a la conclusión de que efectivamente sus respectivos números de Prandtl se encuentran dentro de los mismos órdenes de magnitud. No obstante, se es consciente de que la coincidencia no es plena y se toma, a falta de una correlación más precisa, este procedimiento como un primer paso para poder hacer un diseño previo del intercambiador que sea adecuado para la instalación, que es el objeto general de este TFG. Cuando la instalación se haya construido y esté operativa permitirá realizar medidas con la emulsión de donde se podrán extraer correlaciones apropiadas para ella.

Las propiedades del aceite SAE 300 de los ensayos según la bibliografía [11] son las que aparecen en la tabla 4.1. En ella las filas en color salmón corresponden a las temperaturas en las que se quiere operar con la suspensión y la de color verde corresponde a la temperatura utilizada en los ensayos con el aceite.

De la misma forma son comparables las propiedades del agua-glicol (50%) con las del agua que se muestran en las tablas 4.2 y 4.3.

Tabla 4.1 Propiedades del Aceite SAE 300

ACEITE SAE 300					
T	μ	ρ	C_p	λ	Prandlt
°C	Pa·s	kg/m ³	J/(kg·K)	W/(m·K)	-
37	0,25	877	1950	0,1435	3397,2
47	0,137	871	1990	0,1425	1913
57	0,0796	865	2030	0,1415	1142
67	0,0515	859	2070	0,1405	758,75
77	0,035	854	2120	0,139	533,81
87	0,0255	848	2160	0,138	399,13
97	0,0189	842	2200	0,137	303,5
107	0,0147	837	2250	0,136	243,2
117	0,0112	832	2000	0,135	165,9

Tabla 4.2 Propiedades Agua-Glicol 50%

Agua-Glycol 50%					
T	μ	ρ	C_p	λ	Prandlt
°C	Pa·s	kg/m ³	J/(kg·K)	W/(m·K)	-
30	0,00294	1068,75	3319	0,373	26,16
40	0,00226	1063,66	3358	0,378	20,08
50	0,00178	1058,09	3396	0,383	15,8
60	0,00143	1052,04	3435	0,387	12,7
70	0,00117	1045,49	3474	0,391	10,4
80	0,00098	1038,46	3512	0,394	8,7
90	0,00082	1030,95	3551	0,396	7,35
95	0,00076	1027,01	3570	0,396	6,9

Tabla 4.3 Propiedades del Agua

Agua					
T	μ	ρ	C_p	λ	Prandlt
°C	Pa·s	kg/m ³	J/(kg·K)	W/(m·K)	-
30	0,000798	995,7	4183	0,3031	11,01
40	0,0006533	992,3	4182	0,6179	4,42
50	0,000547	988,1	4181	0,6411	3,57
60	0,000467	983,3	4182	0,6411	3,05
70	0,000404	977,9	4186	0,6496	2,6
80	0,000355	971,9	4194	0,6563	2,27
90	0,000315	965,4	4204	0,6614	2
95	0,000298	962	4210	0,6634	1,9

Por otro lado, se conocen las dimensiones del intercambiador de placas corrugadas con las que se realizó el ensayo, estas son: L: 20 cm; W: 7 cm; H: 1mm; Np:30, cuya imagen se muestra en la figura 4.1.



Figura 4. 1. Intercambiador de placas corrugadas del ensayo conocido

Como se ha especificado antes, se tienen los siguientes datos provenientes de ensayos para un total de 16 puntos: caudales, temperaturas de entrada y de salida y el calor intercambiado entre los fluidos que se utilizará a modo de comprobación. Estos datos están recogidos en la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Datos ensayos del intercambiador

L (m)	W (m)	H (m)	Np	Caudal cal (l/min)	Caudal frío (l/min)	Tce (°C)	Tfe (°C)	Tcs (°C)	Tfs (°C)
0,2	0,07	0,001	30	9,98	10	130,4	90,31	106,4	101,7
0,2	0,07	0,001	30	13	10	129,6	89,96	107,9	102,8
0,2	0,07	0,001	30	16	10	129,6	90,01	110,1	104,2
0,2	0,07	0,001	30	20	10	129,7	90,11	112,3	105,8
0,2	0,07	0,001	30	9,99	12	130,2	89,8	105,3	99,18
0,2	0,07	0,001	30	13,01	12	129,6	90,08	107,3	101,1
0,2	0,07	0,001	30	16	12	130	90,12	109,3	102,4
0,2	0,07	0,001	30	20	12	129,7	90,08	111,5	103,9
0,2	0,07	0,001	30	10	16	130,3	89,82	104,5	97,03
0,2	0,07	0,001	30	12,99	16	129,6	90,15	106,3	98,69
0,2	0,07	0,001	30	16,01	16	129,7	90,06	108,2	99,82
0,2	0,07	0,001	30	20	16	129,7	90,1	110,4	101,1
0,2	0,07	0,001	30	9,99	20	130,3	89,91	104	95,73
0,2	0,07	0,001	30	13	20	129,7	90,11	105,7	97,12
0,2	0,07	0,001	30	16	20	129,7	90,09	107,5	98,14
0,2	0,07	0,001	30	20	20	129,7	90,07	109,6	99,23

Como son conocidas todas las temperaturas, se puede aplicar el método MLTD, del que se puede extraer el coeficiente global de transmisión del calor y, calculando el coeficiente de convección del lado del agua se puede obtener, finalmente, el del lado del aceite.

La correlación que se va a buscar inicialmente debe ser lo más sencilla posible. La forma potencial ha sido utilizada con éxito durante mucho tiempo y es conveniente empezar por ella (ecuación 4.1).

$$Nu = a \cdot Pr^{1/3} \cdot Re^b \quad (4.1)$$

Así, al conocer todos los datos geométricos del intercambiador con las ecuaciones de 2.1 a 2.9 y los caudales, el siguiente paso es calcular las velocidades con las ecuaciones 4.2 y 4.3.

$$v_c = \frac{\dot{V}_c}{A_{pasototalc}} \quad (4.2)$$

$$v_f = \frac{\dot{V}_f}{A_{pasototalf}} \quad (4.3)$$

Siendo \dot{V}_c y \dot{V}_f los caudales de los fluidos en el intercambiador

Tras ello, al conocer las propiedades del agua-glicol 50% a 95°C (tabla 4.2) y las del aceite SAE 300 a 117°C (tabla 4.1) que son las temperaturas medias a las que se encontraban los fluidos durante los ensayos, se pueden calcular los números de Reynolds con su definición (ecuación 4.4).

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot Dh}{\mu} \quad (4.4)$$

El flujo másico de cada fluido se calcula a través de su caudal volumétrico y la densidad de acuerdo a las ecuaciones 4.5 y 4.6.

$$\dot{m}_c = \rho_c \cdot \dot{V}_c \quad (4.5)$$

$$\dot{m}_f = \rho_f \cdot \dot{V}_f \quad (4.6)$$

Con los flujos másicos, al conocer las temperaturas, se puede obtener el calor intercambiado mediante balances de energía (ecuaciones 4.7, 4.8 y 4.9). El calor intercambiado del frío al cálido y viceversa deberá ser similar puesto que se trata de un intercambiador de placas.

$$q_c = \dot{m}_c \cdot c_{pc} \cdot (T_{ce} - T_{cs}) \quad (4.7)$$

$$q_f = \dot{m}_f \cdot c_{pf} \cdot (T_{fs} - T_{fe}) \quad (4.8)$$

$$q = \frac{q_c + q_f}{2} \quad (4.9)$$

Estrictamente, q_c y q_f no son iguales, debido a las pérdidas de calor al exterior, pero como se puede observar en la tabla 4.5 (obtenida como resultado del programa EES (Anexo D.1)), estos valores son lo suficientemente próximos como para considerar el método MLTD válido. Al ser valores tan cercanos se ha optado por utilizar una media de ambos balances para calcular la energía intercambiada entre ambos fluidos.

Tabla 4.5 Resultados del cálculo de q_c , q_f y q mediante el software EES

Caudal cal (l/min)	caudal frío (l/min)	Tce (°C)	Tfe (°C)	Tcs (°C)	Tfs (°C)	qc (W)	qf (W)	q (W)
9,98	10	130,4	90,31	106,4	101,7	6643	6960	6801
13	10	129,6	89,96	107,9	102,8	7824	7846	7835
16	10	129,6	90,01	110,1	104,2	8653	8671	8662
20	10	129,7	90,11	112,3	105,8	9651	9588	9619
9,99	12	130,2	89,8	105,3	99,18	6899	6878	6888
13,01	12	129,6	90,08	107,3	101,1	8046	8081	8063
16	12	130	90,12	109,3	102,4	9185	9005	9095
20	12	129,7	90,08	111,5	103,9	10095	10134	10114
10	16	130,3	89,82	104,5	97,03	7155	7049	7102
12,99	16	129,6	90,15	106,3	98,69	8394	8350	8372
16,01	16	129,7	90,06	108,2	99,82	9546	9542	9544
20	16	129,7	90,1	110,4	101,1	10705	10755	10730
9,99	20	130,3	89,91	104	95,73	7287	7113	7200
13	20	129,7	90,11	105,7	97,12	8653	8567	8610
16	20	129,7	90,09	107,5	98,14	9851	9838	9845
20	20	129,7	90,07	109,6	99,23	11149	11195	11172

Como se conoce la geometría y las temperaturas, es posible obtener el coeficiente global de transmisión de calor U, aplicando el método de la media logarítmica (MLTD) (fórmulas de 4.10 a 4.13)

$$\Delta T_1 = T_{ce} - T_{fs} \quad (4.10)$$

$$\Delta T_2 = T_{cs} - T_{fe} \quad (4.11)$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad (4.12)$$

$$q = U \cdot A_{ht} \cdot \Delta T_{ml} \quad (4.13)$$

Tras conocer el valor de U, utilizando la correlación de Nu (ecuación 2.10) para el lado del agua-glicol, se puede obtener dicho número y después, mediante la definición de Nu (ecuación 4.14) el coeficiente de transmisión de calor para el lado del agua-glicol (h_f). Una vez hallados, a través de la ecuación 4.15 es posible hallar el coeficiente de transmisión de calor para el lado del aceite (h_c) y tras él, su número de Nu, de nuevo con la ecuación 4.14:

$$Nu = \frac{h \cdot Dh}{\lambda} \quad (4.14)$$

$$h_c = \left(\frac{1}{U} - \frac{1}{h_f}\right)^{-1} \quad (4.15)$$

Así, al introducir las ecuaciones anteriormente citadas y los datos de la tabla paramétrica en el programa EES (Anexo D.1) se llega a los resultados de la figura 4.2, en la que se aprecia la dependencia de Nusselt con Reynolds para el lado del aceite.

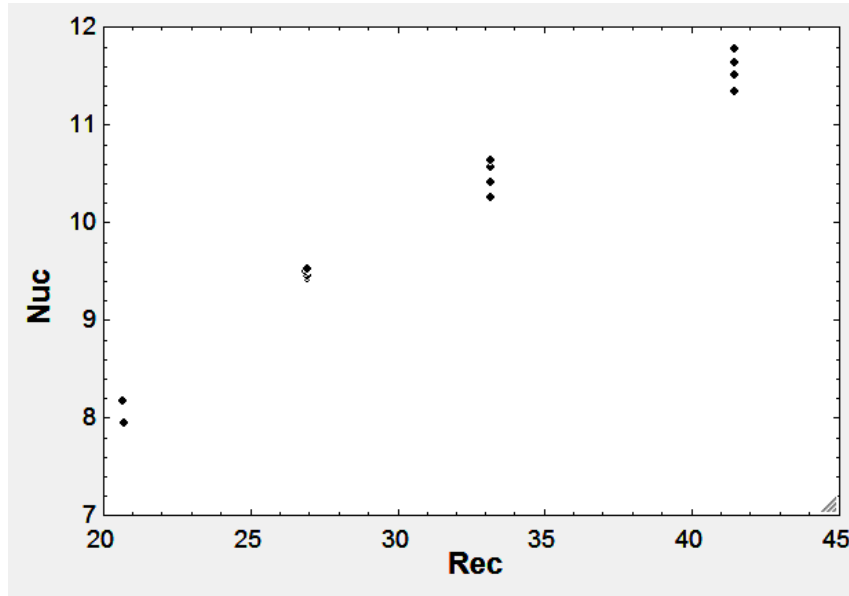


Figura 4. 2 Dependencia de Nu con Re en el lado del aceite (caliente) para cada punto de ensayo

Como solo se ha ensayado con una sustancia (el aceite), no se puede establecer la dependencia del coeficiente adimensional Nu con la variable Pr por lo que es más conveniente ajustar unidimensionalmente la función Y con la variable Re .

$$Y = \frac{Nu_c}{Pr_c^{1/3}} \quad (4.16)$$

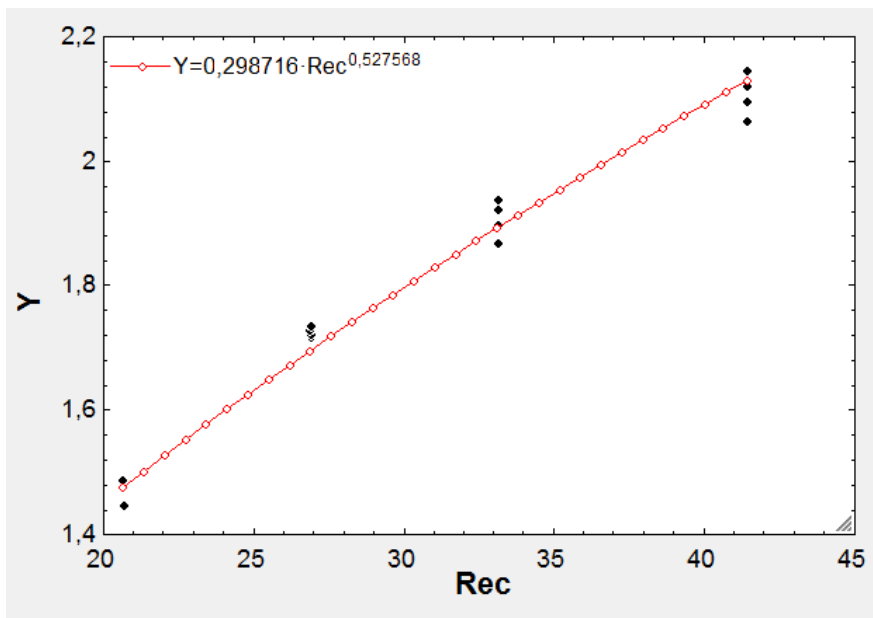


Figura 4. 3 Dependencia de Y con Re en el lado del aceite para cada punto de ensayo, y ajuste potencial

Así, tras hacer el ajuste, y cómo se observa en la figura 4.3 se obtienen los parámetros $a=0,2987$ y $b = 0,5276$, cuyos datos estadísticos aparecen en la figura 4.4.

	Value	Std. Error	No. points = 16
a0	2,987158E-01	1,052075E-01	rms = 3,1765E-02
a1	5,275679E-01	1,710902E-02	bias = -9,7458E-05
a2			R^2 = 98,45%
a3			<input type="checkbox"/> Copy to Clipboard
a4			<input checked="" type="checkbox"/> OK
a5			
a6			

Figura 4.4 Datos estadísticos de la correlación 4.17

Por consiguiente la correlación queda de acuerdo a la ecuación 4.17 y tendrá un rango de validez entre números de Reynolds de 20 y 40, como se observa en las figura 4.2 y 4.3, y será aplicable a cualquier geometría semejante de intercambiador de placas corrugadas.

$$Nu = 0,2987 \cdot Pr^{1/3} \cdot Re^{0,5276} \quad (4.17)$$

4.2. Dimensionamiento del intercambiador de calor

Una vez que se tiene una correlación válida para el PCM debido a su similitud con el aceite SAE 300 para intercambiadores de placas corrugadas, se puede calcular el tamaño de un intercambiador apropiado para la instalación.

Para ello se vuelve a optar por realizar otro programa en el software EES (Anexo D.2), pero ahora hay que seguir el proceso inverso, ya que el objetivo es dimensionar un intercambiador en el que se asegure que el PCM cambia de fase, es decir, que al menos el PCM entre a 35°C y salga a 50°C, que como se puede ver en el apartado de propiedades son las temperaturas a las que cambia de fase en el calentamiento. Así pues, todas las propiedades del PCM que se utilizan son las de la segunda región, es decir cuando el PCM de la emulsión está cambiando de fase (fusión).

Por consiguiente, como en el caso anterior, se dispone de las ecuaciones geométricas de los intercambiadores de placas corrugadas (ecuaciones de 2.1 a 2.9), de una correlación válida para el lado del agua (ecuación 2.10) y de la calculada anteriormente para el lado del PCM (ecuación 4.17).

Como las temperaturas de entrada y de salida del PCM que se quieren lograr son conocidas (35 y 50°C, respectivamente) y se estima la temperatura de entrada del agua para lograrlo, que se fija en 80°C, la temperatura de salida caliente se calcula mediante los balances de energía (ecuaciones 4.18 y 4.19).

$$q = \dot{m}_f \cdot cp_{fus} \cdot (T_{fs} - T_{fe}) \quad (4.18)$$

$$q = \dot{m}_c \cdot cp_c \cdot (T_{ce} - T_{cs}) \quad (4.19)$$

Con todas las temperaturas conocidas, se aplica el método MLTD (ecuaciones de 4.10 a 4.13), pero esta vez U (ecuación 4.20) ya es conocida mediante las correlaciones de Nusselt (ecuación 4.17 para el PCM y ecuación 2.10 para el agua) y por su definición (ecuación 4.14), ya que de ella se obtienen los coeficientes de transmisión de calor (h_c y h_f), por tanto, la única incógnita

restante es el área de intercambio A_{ht} , que se utilizará para estimar el tamaño del intercambiador.

$$U = \left(\frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_f} \right)^{-1} \quad (4.20)$$

Así, se fijan como datos de entrada: las temperaturas anteriormente citadas, los caudales de agua y emulsión que se fijan en 6 l/min (el caudalímetro del que se dispone mide hasta 7 l/min), las dimensiones de una placa (W=7cm, H=1mm) (tomadas de las dimensiones típicas de placas comerciales) y las velocidades de los fluidos fijadas entre 0,2 m/s y 0,8 m/s, valores recomendados por la bibliografía [7].

En la tabla 4.6 aparecen los resultados obtenidos en función de las velocidades fijadas. Hay que recordar que la correlación de Nusselt para el PCM sólo es válida para Reynolds entre 20 y 40, por tanto el PCM deberá circular entre 0,6 y 0,8 m/s, para lograrlo en estas condiciones y conseguir el salto de temperaturas fijado, el intercambiador de calor deberá tener 6 placas de unos 30 cm de largo.

Tabla 4. 6 Resultados del cálculo geométrico del intercambiador de placas.

v _f (m/s)	v _c (m/s)	T _{cs} (°C)	L (m)	N _p (-)	Ref (-)	Rec (-)	q (W)	h _f (W/(m ² ·K))	h _c (W/(m ² ·K))	D _{pf} (bar)	D _{pc} (bar)	A _{ht} (m ²)
0,2	0,2	54,95	0,2237	16,29	6,796	898,8	10208	1522	10669	0,2384	0,04275	0,3111
0,2667	0,2667	54,95	0,2444	12,71	9,061	1198	10208	1771	13182	0,4029	0,08225	0,2654
0,3333	0,3333	54,95	0,2599	10,57	11,33	1498	10208	1992	15533	0,6015	0,1356	0,2346
0,4	0,4	54,95	0,2718	9,143	13,59	1798	10208	2193	17761	0,8305	0,203	0,2122
0,4667	0,4667	54,95	0,2811	8,122	15,86	2097	10208	2379	19892	1,087	0,2842	0,195
0,5333	0,5333	54,95	0,2884	7,357	18,12	2397	10208	2553	21943	1,369	0,379	0,1812
0,6	0,6	54,95	0,2941	6,762	20,39	2696	10208	2717	23926	1,673	0,4872	0,1698
0,6667	0,6667	54,95	0,2986	6,286	22,65	2996	10208	2872	25852	1,998	0,6084	0,1603
0,7333	0,7333	54,95	0,3021	5,896	24,92	3296	10208	3020	27727	2,342	0,7423	0,1521
0,8	0,8	54,95	0,3049	5,571	27,18	3595	10208	3162	29557	2,704	0,8886	0,1451

Por último, quedaría estimar las pérdidas de carga en el intercambiador, para ello se utiliza la ecuación 2.11, para obtener el factor de fricción f , que depende exclusivamente del número de Reynolds, y después mediante la ecuación 4.21 se puede hallar la pérdida de carga.

$$\Delta p_c = f \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \frac{L}{Dh} \quad (4.21)$$

La ecuación 2.11, no sería válida para el PCM ya que es únicamente válida para el agua según la bibliografía [7], aunque a falta de una ecuación adecuada, se va a utilizar como estimación.

En conclusión: para 6 l/min de caudal y conseguir un salto de temperatura de 35 a 50 °C para el PCM con el agua entrando a 80 °C, se necesita un intercambiador de L=30 cm, W=7 cm, H=1 mm y con unas 6 placas ($A_{ht} = 0,16 \text{ m}^2$). Para esta geometría la velocidad de los fluidos es aproximadamente de 0,7 m/s y la pérdida de carga para el lado del agua quedaría en 0,6 bar y la del lado de la emulsión en 2 bar, valores considerablemente alto.

No obstante, esta geometría se ha forzado para que el número de Reynolds del PCM quedara en 20 y poder aplicar la correlación (ecuación 4.17). El problema que genera esta geometría es

la excesiva pérdida de carga, por tanto sería conveniente buscar un intercambiador con menos longitud de placa y mayor número de placas para seguir asegurando el tamaño del área de intercambio (A_{ht}). Además no se han encontrado intercambiadores de calor comerciales con las características del programa EES.

Por consiguiente, se propone el intercambiador LPIC-01 de Lapesa (figura 4.5) como un buen primer intento, ya que a pesar de tener menos longitud de placa (19,2 cm), presenta un número de placas mayor (20).

Ref.	Nº de placas
LPIC-01	20
LPIC-02	20
LPIC-03	20
LPIC-04	30
LPIC-05	40
LPIC-07	40
LPIC-10	60
LPIC-12	70

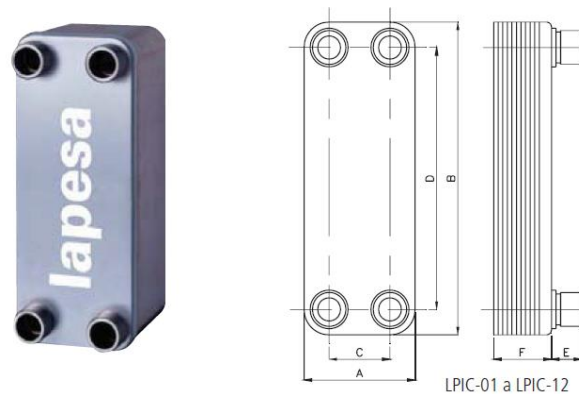


Figura 4.5 Intercambiador de calor propuesto LPIC-01 Fuente: Catálogo Lapesa

5. Instalación

5.1. Selección de componentes de la instalación

Una vez conocidas las propiedades de los fluidos que van a circular por la instalación, así como los caudales y temperaturas de operación, y un intercambiador de calor apropiado, es posible comenzar el diseño de la instalación en la que se estudiará el cambio de fase de fusión de la emulsión de PCM circulando a través de un intercambiador de calor.

Para la selección de los componentes de esta instalación también se ha tenido en cuenta la instrumentación de la cual dispone el GITSE de la Universidad de Zaragoza.

Así, el objetivo de esta instalación será el de suministrar al intercambiador de calor los fluidos de proceso (emulsión de PCM) y servicio (agua) a las temperaturas y caudales señalados en los apartados anteriores: 35°C para la emulsión y 80°C para el agua con unos caudales de 6 l/min.

Será necesario instalar adecuadamente equipos de medición: caudalímetros y sensores de temperatura; así como transductores de presión si se quisiese medir la pérdida de carga de los fluidos a su paso por el intercambiador de calor.

La instalación se divide en dos zonas distintas: por la que circula la emulsión de PCM y por la que circula el agua, estas serán idénticas a excepción del uso de una caldera de condensación para calentar el agua, y de un baño termostático para la zona de la emulsión de PCM. Esto se puede observar en las figuras 5.1 y 5.2.

Cada una de las zonas tendrá un bypass que permitirá recircular el fluido para que el experimento no comience hasta que se haya alcanzado la temperatura requerida.

Debido a las conexiones que presentan la caldera, el baño termostático Huber UC040T-H (1) y los acumuladores Lapesa RD 50-1 (2) (ya disponibles), todas ellas de roscas de G3/4", se ha optado por este tipo de rosca y diámetro nominal para toda la instalación, a excepción de las conexiones al intercambiador, ya que se pretende que la instalación sea flexible y permita ensayar distintos intercambiadores, que podrían tener conexiones distintas. La información de ambos equipos aparece en el Anexo E.

A continuación aparece una lista de los componentes que aparecen en las figuras 5.1 y 5.2, con una breve descripción de sus conexiones roscadas:

1. Baño termostático: ida y retorno macho G3/4"
2. Tubos trenzados de acero: conexión hembra G3/4" por un lado y macho G3/4" por el otro. Se utilizarán 10 en total, 5 en cada circuito: 4 para realizar las conexiones del baño al acumulador y otro más para la impulsión de la bomba.
3. Adaptadores hembra-hembra G3/4". Se utilizarán 12 en total, 5 para el lado de la emulsión de PCM y 7 para el lado del agua, ya que hay que contar con hacer la conexión a la caldera.

4. Acumulador: presenta conexiones macho G3/4" en los laterales por donde se conectará a través de los adaptadores G3/4" (3) al baño termostático. Por este circuito, el del serpentín, circulará el agua, mientras que en el depósito estará la emulsión. En la parte superior del depósito hay otras 2 conexiones macho G3/4", donde se conectarán los tubos trenzados de acero G3/4" (2) y tras ellos los adaptadores G3/4" (3).
5. Tubería recta roscada: es la tubería principal del circuito, tiene una rosca macho G3/4" en ambos extremos. Entre los elementos del circuito, se ha decidido dejar una separación de 20 cm, por consiguiente: se requieren para el lado de la emulsión de PCM, 7 tramos de 20 cm (6 entre instrumentación y 1 para el bypass) y 2 de 125 cm (estos dos últimos se corresponderían con la zona por la que vuelve la emulsión al depósito, que al contar con menos instrumentación son más largos). Por tanto, en total, como el circuito del agua es idéntico serían necesarios 14 tramos de 20 cm y 4 de 125 cm. Así teniendo en cuenta la longitud de tubería utilizada más la longitud de los elementos (disponible en el Anexo F) el circuito tendrá una longitud total de 7 metros (sin contar el bypass), este dato se utilizará posteriormente para el cálculo de las pérdidas de carga.
6. Válvulas de bola: presentan una conexión hembra G3/4" por ambos lados. En total se requieren 6.
7. Bomba: Presenta dos conexiones macho de G3/4", por tanto es necesario usar adaptadores (3) tanto en la toma de aspiración como en la de impulsión.
8. Válvula TA: Se conecta mediante dos roscas hembra G3/4" por ambos lados. Se utilizarán dos en total, una para el lado del agua y otra para el lado de la emulsión de PCM.
9. Conexiones en T: Se utilizarán 8 en total, en las cuales, las conexiones rectas serán macho G3/4" y la que es perpendicular a estas hembra G3/4"
10. Caudalímetro: se utilizará el caudalímetro disponible en el laboratorio del GITSE, cuyas especificaciones se detallan más adelante.
11. Adaptador reductor: Por un lado presenta una rosca macho G3/4" y por el otro una macho G1/2", se usarán 4 en total
12. Adaptador hembra-hembra G1/2", se usarán en total 4 a estos irán conectadas las PT-100
13. Sensores de temperatura Pt-100: las Pt-100 presentan una unión roscada G1/2"
14. Adaptador para tubos flexibles: la rosca de conexión a la T será siempre hembra G3/4", pero la conexión a la tubería puede ser distinta dependiendo del intercambiador.
15. Tubos flexibles: estos tubos estarán conectados por un lado al adaptador (14) y por otro al intercambiador de calor, su diámetro dependerá de las entradas del intercambiador y en consecuencia, se elegirá un adaptador (14) adecuado para dicho tubo (15).

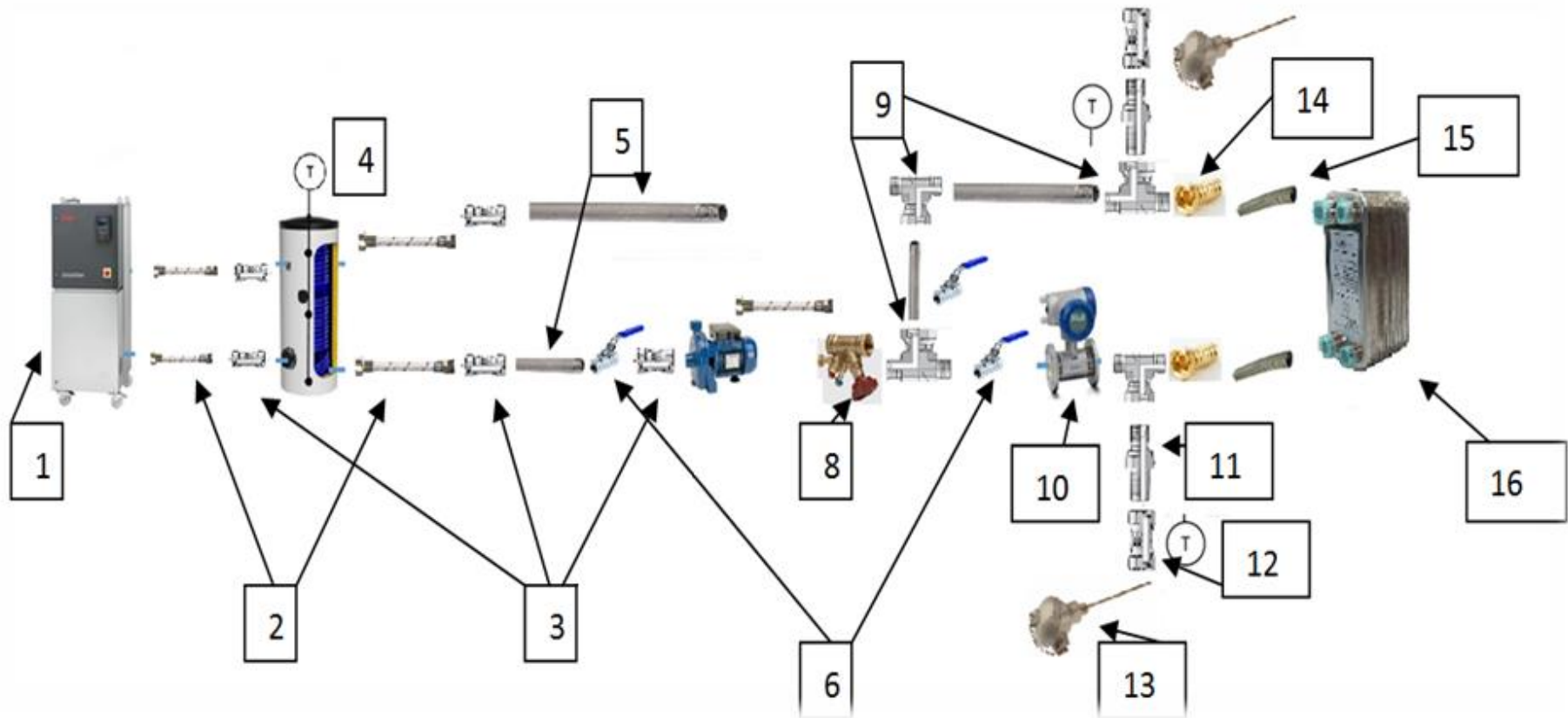


Figura 5.1 Esquema instalación para el lado del PCM

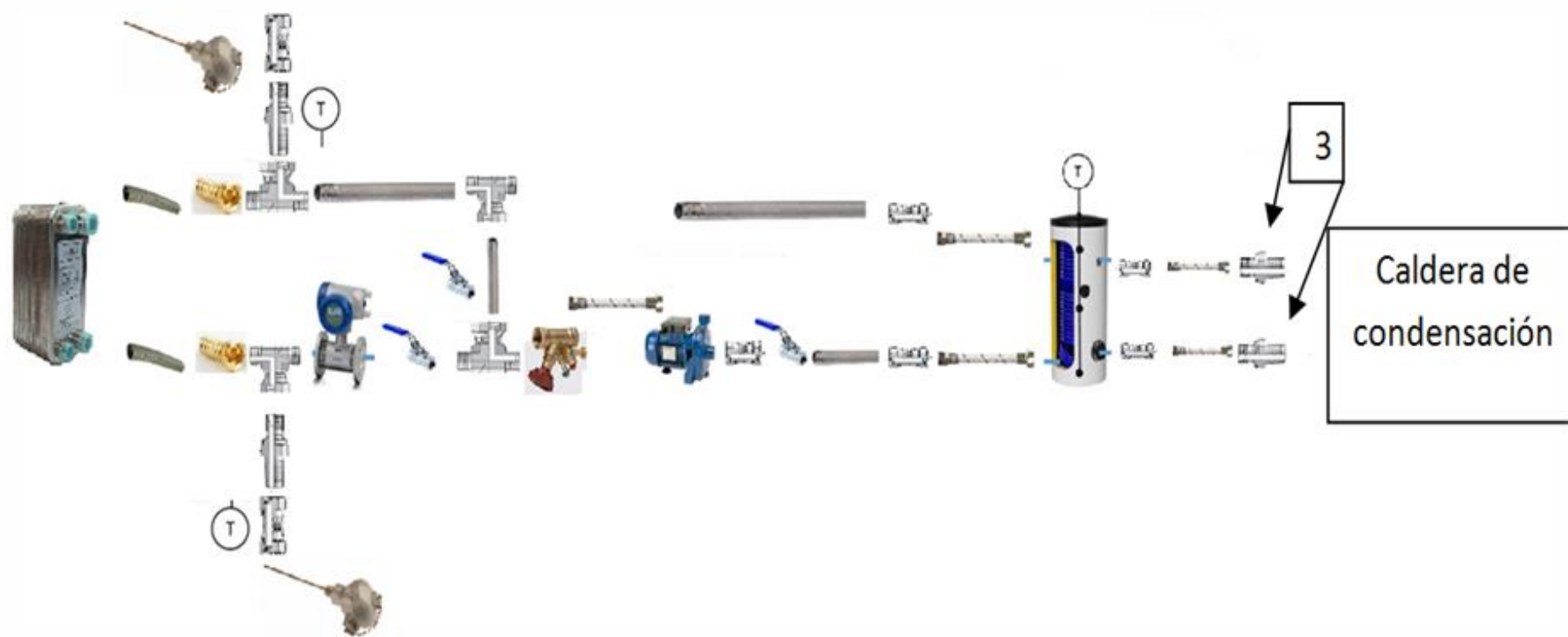


Figura 5.2 Esquema de la instalación para el lado del agua

Tras hacer un inventario de todo lo que se necesitaría para construir la instalación, hay que seleccionar los componentes específicos. Algunos de ellos, ya estaban disponibles de anteriores proyectos. A continuación se listan dichos componentes:

1. Baño termostático Huber UC040T-H (Anexo E.1)
Rango de temperatura de trabajo: -10 a 100°C
Potencia calorífica: 2 kW
Potencia enfriamiento: 4 kW a 15°C
2. Transductor presión diferencial TPD-18 de Desin Instruments
Rango de medida: hasta 0,16 bares
3. Caudalímetro de Coriolis Krohne OPTIMASS 7000 S06 (Anexo E.2)
Rango de medida: 0,3-7 l/min
Accuracy: 0,1 %
4. Depósito Lapesa RD 50-1 con serpentín interior. Capacidad de 46 litros. (Anexo E.3)

Algunos de estos componentes pueden ser aprovechados para la nueva instalación, por tanto, se utilizará:

El baño termostático Huber UC040T-H como el baño termostático (1); el caudalímetro de Coriolis Krohne OPTIMASS 7000 S06 (10) y el depósito Lapesa RD 50-1 como acumulador (4). En cuanto al transductor de presión (16), teniendo en cuenta los cálculos del apartado anterior es posible que no mida la suficiente caída de presión, así que es probable adquirir uno con más fondo de escala. Por tanto, se ha elegido el que lleva código RS 286-709 del catálogo de RS (anexo F.1) que permite medir una pérdida de carga de hasta 30 psi (2,07 bar), suficiente teniendo en cuenta que la caída de presión según la tabla 4.6 para un intercambiador de calor de L=0,3 m y 6 placas es de unos 2 bar.

Así, quedan por elegir una serie de elementos:

Como tubos trenzados de acero (2), se escogerán los del catálogo de RS Pro (Anexo F.2) con la conexión final de "female swivel 3/4"BSP", los adaptadores hembra-hembra G3/4" (3) se eligen del catálogo de Parker K4 BSP Adapters (Anexo F.2) el modelo "12H6MK4".

Tal y como se ha señalado el acumulador (4) será el depósito Lapesa RD50-1, cuyas dimensiones se especifican en el Anexo E.3.

Las tuberías (5) se escogieron del catálogo de RS PRO, cuyas especificaciones se encuentran en el Anexo F.4. Las características de las válvulas de bola (6) se encuentran en el Anexo F.5 y también se escogieron del catálogo de RS PRO.

La justificación de la selección de las bombas (7), se hará en el siguiente apartado, en el que se estiman las pérdidas de carga que tendrá el circuito.

En cuanto a la válvula TA (8), ésta se elige del catálogo IMI TA/Válvulas de equilibrado/STAD y la escogida es la del número de artículo 52 151-620, ya que corresponde a rosca hembra G3/4. En el Anexo F.6 aparecen sus especificaciones.

Las conexiones en T (9) que se van a utilizar se escogen del catálogo de Parker K4 BSP Adapters (Anexo F.7), el modelo 12S6MK4, cuya rosca perpendicular es hembra y las otras dos macho. Todas ellas con conexiones G3/4".

El caudalímetro (10), como ya se ha dicho es el caudalímetro de Coriolis Krohne OPTIMASS 7000 S06 que ya está disponible en el laboratorio cuyas características aparecen en el Anexo E.2.

Los adaptadores 11 y 12, se eligen del catalogo de Parker K4 BSP Adapters (Anexo F.8). Así el 11 será el modelo 12-8HMK4, que tiene dos roscas macho, una de 3/4" y otra de 1/2" y el 12 será 8H6MK4, que tiene por los dos lados conexiones hembra de 1/2" a la que se unirán las PT100 (13), que como se puede observar en las especificaciones (Anexo F.9), ya presentan una terminación roscada de 1/2". Estas fueron nuevamente escogidas del catálogo de RS PRO.

Y por último quedan las conexiones con el intercambiador de calor, que por un lado consiste en un conector para tubos flexibles (14), que se corresponde con el modelo cuyas características aparecen en el Anexo F.10 del catalogo de RS PRO, y que presenta una terminación hembra roscada y como conexión al tubo hará falta tener varias terminaciones distintas, por ejemplo una de 3/4" y otra de 1" ya que los intercambiadores a ensayar pueden ser distintos, con el fin de hacer más flexible la instalación. Por tanto es necesario escoger por lo menos dos conectores diferentes. En cuanto a los tubos flexibles (15) se han escogido los del catálogo Tygon XL-60, ya que aguantan la temperatura necesaria. Estos serán de 1" (AN8000053) ó de 3/4"(AN8000038) dependiendo del intercambiador a ensayar. Sus principales características se encuentran en el Anexo F.11.

5.2. Pérdidas de carga de la instalación

En cuanto a la justificación de las bombas a utilizar, se realiza una estimación de las pérdidas de carga, mediante el software EES (código en Anexo D.3). De los cálculos anteriores (del intercambiador de calor) se conocía la pérdida de carga en el intercambiador de calor tanto para el lado de la emulsión de PCM como para el lado agua, sin embargo, aunque estas pérdidas sean las más importantes de la instalación, no son las únicas.

En primer lugar, se va a analizar la caída de presión total en el lado del agua (fluido caliente), que al tratarse de un fluido newtoniano, las pérdidas de carga se calculan a partir de la ecuación 5.1:

$$\Delta p_{c_{agua}} = f \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \frac{L}{D} \quad (5.1)$$

El factor de fricción depende del número de Reynolds, el cual se calcula de acuerdo a la ecuación 5.2 y que tiene un valor de 12800 para un caudal de 6 l/min, un diámetro interno de tubería de 20,93 mm (especificación de tubería Anexo F.4) y la densidad del agua a 65°C (temperatura media entre la entrada y la salida del intercambiador).

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (5.2)$$

Obtenido el número de Reynolds, a través del diagrama de Moody se puede estimar la f , suponiendo una rugosidad relativa de 0,005, se obtiene un valor aproximado de 0,04. Así, aplicando la ecuación 5.1 con los datos anteriormente citados y una longitud de tubería total (L) de 7m, la pérdida de carga en los conductos es igual a 554,1 Pa, que sumado a la pérdida de carga que se daba en el intercambiador: 0,6 bar (tabla 4.6), resulta una pérdida total de 0,61 bar.

Ahora, es necesario calcular la pérdida de carga en los conductos del lado de la emulsión de PCM, que al tratarse de un fluido no newtoniano pseudoplástico, su pérdida de carga vendrá marcada por la ecuación 5.3, según la bibliografía [12].

$$\Delta p_{PCM} = f \cdot \frac{8 \cdot L \cdot \rho_{fus} \cdot \dot{V}^2}{D^5 \cdot \pi^2} + 2 \cdot K \cdot L \cdot Q^n \cdot \left(\frac{2}{D}\right)^{n+1} \cdot \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n} \cdot \frac{4}{\pi \cdot D^2}\right)^n \quad (5.3)$$

En los conductos la velocidad de cizalla, se calcula a partir de la ecuación 5.4, y tiene un valor de $27,77 \text{ s}^{-1}$, por tanto la emulsión ya no se encuentra en el plato newtoniano y los valores de K y n son los que aparecen en la figura 3.8.

$$\gamma' = \frac{2 \cdot v}{D} \quad (5.4)$$

El número de Reynolds para un fluido no newtoniano se calcula de acuerdo a la ecuación 5.5 [6], de donde se obtiene un valor de 227, por tanto su flujo es laminar y de acuerdo a eso, finalmente su factor de fricción tiene un valor de 0,2821, según la ecuación 5.6 ya que está circulando por una tubería.

$$Re = 2^{3-n} \cdot \left(\frac{n}{3n+1}\right)^n \cdot \frac{D^n \cdot \rho \cdot v^{2-n}}{K} \quad (5.5)$$

$$f = \frac{64}{Re} \quad (5.6)$$

Con esto ya se puede calcular Δp_{PCM} , que será igual a 7572 Pa, que sumada a la pérdidas estimadas que aparecen en la tabla 4.6, 2 bar, resulta una pérdida total de 2,1 bar.

En conclusión, para un caudal de 6l/min tanto en el circuito del agua como en el de la emulsión de PCM queda una pérdida de carga de 0,61 bar para el agua (6,22 m.c.a) y 2,1 bar para la emulsión de PCM (21,41 m.c.a).

Una vez que se ha realizado esta estimación, del catálogo de IWAKI Magnetic Drive Pumps, se elige la bomba 30RZ para el lado del agua, ya que cumple los requisitos de caudal (15 l/min como máximo) y de altura (8 m.c.a como máximo), como se puede observar en la figura 5.3. Para el lado del PCM se elige la bomba del catálogo de AGP, el modelo CPM, ya que proporciona un caudal de 600 l/h (10/min) y una presión de 26 m.c.a, como se puede observar en la figura 5.4. En el Anexo F.12 aparece más información acerca de estas bombas.

6. Conclusiones

El objetivo de este TFG, era el de diseñar una instalación para poder estudiar la transferencia de calor en un intercambiador de calor emulsión de PCM-agua. En primer lugar se llevó a cabo una revisión bibliográfica que tratara de explicar porqué se había elegido esta emulsión de parafina como fluido caloportador.

Tras ello, se caracterizó la emulsión de PCM para conocer sus propiedades termofísicas y reológicas. Con todo esto, mediante el programa EES, se trató de buscar una correlación válida para el lado de la emulsión de PCM en un intercambiador de calor de placas corrugadas a través de unos estudios previos utilizando aceite.

Una vez obtenida dicha correlación, que no es más que una estimación (puesto que el aceite y la emulsión de PCM presentan algunas diferencias), se dimensionó un intercambiador de calor que pudiera proporcionar el salto de temperaturas que se buscaba, es decir, para que el PCM de la emulsión pasase de estado sólido a estado líquido.

Cuando se obtuvieron las dimensiones de dicho intercambiador de calor, se estimaron las pérdidas de carga que éste podría ocasionar en la instalación, con el fin de elegir una bomba adecuada para la misma. Por último, se trató de aprovechar la instrumentación disponible de anteriores investigaciones del GITSE y se eligieron los elementos restantes con el fin de diseñar dicha instalación.

Esto es un breve resumen de todo lo que se ha llevado a cabo durante la realización de este TFG, sin embargo, el proyecto está lejos de terminar. Así pues los siguientes pasos consistirán en construir la instalación aquí propuesta y hallar, experimentalmente, correlaciones válidas tanto para la transferencia de calor como para la pérdida de carga en este tipo de intercambiadores de calor cuando circula una emulsión de PCM.

Con este tipo de correlaciones, ya se estaría en disposición de estudiar más profundamente el potencial de estas emulsiones de PCM como un material de almacenamiento de energía térmica y fluido caloportador en redes de distrito para el aumento de la fracción renovable, que es el objetivo final del proyecto.

Bibliografía

- [1] L. Cabeza and A.Heinz, "Inventory of Phase Change Materials (PCM). A report of IEA Solar Heating and Cooling Programme", no. January, 2005.
- [2] H. Mehling and L. Cabeza, "Heat and cold storage with PCM", p.305, 2008.
- [3] A. Heinz and W. Streicher, "Application of phase change materials and PCM-slurries for thermal energy storage", 2006.
- [4] M. Delgado, A. Lázaro, J.Mazo and B. Zalba, "Review on phase change material emulsions and microencapsulated phase change material slurries: Materials, heat transfer studies and applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no.1, pp. 253-273, 2012.
- [5] M. Delgado, "Analysis of microencapsulated phase change material slurries and phase change material emulsions as heat transfer fluid and thermal storage material", 2013.
- [6] L. Huang and M. Petermann, "An experimental study on rheological behaviors of paraffin/water phase change emulsion", vol. 83, pp. 479-486, 2015.
- [7] J.M. Marín and S. Guillén, "Diseño y cálculo de intercambiadores de calor monofásicos", 2013.
- [8] A. Solé, L. Miró, C. Barreneche, I. Martorell, L. Cabeza, "Review of the T-history method to determine thermophysical properties of phase change materials (PCM)", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 26, pp. 425-436, 2013.
- [9] G. Rinaldi, "Study on "low-cost" PCM emulsion as Thermal Energy Storage material for District Heating applications", 2016.
- [10] Y. Son, "Determination of shear viscosity and shear rate from pressure drop and flow rate relationship in a rectangular channel", *Polymer*, vol.48, no.2, pp. 632-637, 2007
- [11] J.M. Marín, C. Monné and J. Uche, "Transferencia de calor", 1998.
- [12] H.L. Laurencio, J. Falcón, Y. Retirado and O. Pérez, "Modelo para cálculo de pérdidas de presión en tuberías conductoras de petróleo pesado", *Minería y Geología*, vol.28, no.3, pp. 70-86, 2012
- [13] Zhang Yinping, Jiang Yi and Jiang Yi, "A simple method, the T-history method, of determining the heat fusion, specific heat and thermal conductivity of phase change materials", *Meas. Sci. Technol.*, vol 10, pp. 201-205
- [14] J.M. Marín, B. Zalba, L. Cabeza and H. Mehling, "Determination of enthalpy-temperature curves of phase change materials with the temperature-history method:

-
- improvement to temperature dependent properties", *Meas. Sci. Technol.*, vol 14, pp. 184-189
- [15] J.M. Marín, B. Zalba and A. Lázaro "New Installation at the University of Zaragoza (Spain) of T-History method to measure the thermal properties", 2005
- [16] J.H. Peck, J. Kim, C. Kang and H. Hong, "A study of accurate latent heat measurement for a PCM with a low melting temperature using T-history method ", *Int J. Refrig.*, Vol. 29, pp. 1225-1232
- [17] E. D. Kravvaritis, K. A. Antonopoulos and C. Tzivanidis, "Improvements to the measurement of the thermal properties of phase change materials", *Meas. Sci. Technol.*, (2010)
- [18] H. Hong, S. K. Kim, Y. Kim, "Accuracy improvement of T-history method for measuring heat of fusion of various materials", *Int J. Refrig.*, Vol. 27, pp. 360-366
- [19] A. Lázaro, "Caracterización del comportamiento de materiales de cambio de fase para almacenamiento térmico de energía", *Proyecto final de carrera. Universidad de Zaragoza*, (2004)

Nomenclatura

A	Área [m^2]
A'	Área curvas temperatura-tiempo [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}$]
c_p	Capacidad calorífica [$\text{J}/(\text{Kg}\cdot\text{K})$]
D	Diámetro [m]
f	Factor de fricción [-]
h	Coeficiente de convección [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$] Entalpía [kJ/kg]
H	Altura de la corrugación [m]
K	índice de consistencia del flujo [-]
L	Longitud de la placa [m], Longitud de la tubería [m]
m	Masa [kg]
\dot{m}	Flujo másico [kg/s]
n	Índice de comportamiento del flujo [-]
N	Número de canales [-]
N_p	Número de placas [-]
q	Calor [W]
T	Temperatura [K, $^{\circ}\text{C}$]
U	Coeficiente global de transferencia de calor [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]
v	Velocidad [m/s]
\dot{V}	Caudal [m^3/s]
W	Anchura de la placa [m]

LETRAS GRIEGAS

α	Difusividad térmica [m^2/s]
β	Ángulo de corrugación [$^\circ$]
λ	Conductividad [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]
μ	Viscosidad [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]
ρ	Densidad [kg/m^3]
ϕ	Coeficiente de ampliación debido a la corrugación [-]
$\dot{\gamma}$	Velocidad de cizalla [$1/\text{s}$]

SUBÍNDICES

c	Fluido caliente
e	Entrada
f	Fluido frío
s	Salida

NÚMEROS ADIMENSIONALES

Bi	Número de Biot
Nu	Número de Nusselt
Pr	Número de Prandtl
Re	Número de Reynolds

ABREVIATURAS

GITSE	Grupo de Ingeniería Térmica y Sistemas Energéticos
PCM	Material de cambio de fase, del inglés Phase Change Material
DSC	Calorímetro Diferencial de Barrido, del inglés Differential Scanning Calorimetry
TES	Almacenamiento de Energía Térmica, del inglés Thermal Energy Storage
DTA	Análisis Térmico Diferencial, del inglés Differential Thermal Analysis
EES	Engineering Equation Solver