



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

**TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA**

**ANÁLISIS Y PROPUESTA DE MEJORA DE LA  
EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA  
INSTALACIÓN DE ACEITE TÉRMICO DE  
UNA PLANTA DE PINTURAS MEDIANTE LA  
MODIFICACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE  
LOS PRODUCTOS EN LOS REACTORES**

AUTOR: AUREA JORDÁN ALFONSO

TUTOR: FERNANDO NAYA SANCHIS

**Curso Académico: 2014-15**



## ÍNDICE

<b>MEMORIA .....</b>	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO 1: OBJETIVO Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO .....</b>	<b>9</b>
<b>CAPÍTULO 2: ANÁLISIS DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN DE LA EMPRESA .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1 Introducción .....</b>	<b>11</b>
<b>2.2 Descripción de la instalación de calefacción .....</b>	<b>11</b>
<i>2.2.1 Distribución en planta de los reactores de producción .....</i>	<i>11</i>
<i>2.2.2 Tipo de calentamiento .....</i>	<i>12</i>
<i>2.2.3 Transporte del aceite térmico .....</i>	<i>13</i>
<i>2.2.4 Circuito de calefacción propio de los reactores .....</i>	<i>15</i>
<i>2.2.5 Otros equipos de la instalación .....</i>	<i>18</i>
<b>2.3 Producción de resinas .....</b>	<b>20</b>
<b>CAPÍTULO 3: POSIBLES MEJORAS DE LA INSTALACIÓN .....</b>	<b>29</b>
<b>3.1 Posibles mejoras energéticas aplicables al sistema de calefacción .....</b>	<b>29</b>
<i>3.1.1 Modificación del proceso de calentamiento de la instalación de calefacción .....</i>	<i>29</i>
<i>3.1.2 Modificación del proceso de enfriamiento en los reactores .....</i>	<i>30</i>
<i>3.1.3 Otras posibilidades contempladas .....</i>	<i>31</i>
<b>3.2 Propuesta de mejora escogida .....</b>	<b>35</b>
<b>CAPÍTULO 4: CONDICIONES DE CONTORNO .....</b>	<b>37</b>
<b>4.1 Introducción .....</b>	<b>37</b>
<b>4.2 Condiciones de contorno .....</b>	<b>37</b>
<i>4.2.1 Condiciones de contorno de las tuberías .....</i>	<i>37</i>
<i>4.2.2 Condiciones de contorno de los reactores .....</i>	<i>39</i>
<b>4.3 Parámetros que influyen en la eficiencia de la instalación .....</b>	<b>40</b>
<b>CAPÍTULO 5: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS OBTENIDOS .....</b>	<b>43</b>
<b>5.1 Introducción .....</b>	<b>43</b>
<b>5.2 Procedimiento experimental .....</b>	<b>43</b>
<i>5.2.1 Estudio de la pérdida de calor en las tuberías .....</i>	<i>43</i>
<i>5.2.1 Estudio del sistema de enfriamiento de los reactores R3 y R4 .....</i>	<i>48</i>
<b>5.2 Resultados obtenidos .....</b>	<b>52</b>
<b>5.3 Propuesta de mejora .....</b>	<b>54</b>
<b>PRESUPUESTO .....</b>	<b>57</b>
<b>CAPÍTULO 1: PRESUPUESTO Y MEDICIONES .....</b>	<b>59</b>
<b>1.1 Justificación de precios personal .....</b>	<b>59</b>

<b>1.2 Justificación de precios material .....</b>	<b>60</b>
<b>1.3 Justificación de costes generales .....</b>	<b>61</b>
<b>1.4 Presupuesto general .....</b>	<b>62</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>63</b>
<b>ANEXO 1: NOMENCLATURA.....</b>	<b>65</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Consumo de gas por el sector de las pinturas, barnices, tintas de imprenta y masillas en miles de euros. ....	9
Tabla 2. Volumen de los reactores y distancia de cada uno de ellos a las calderas. ....	12
Tabla 3. Propiedades del aceite térmico Cepsa diatermo. ....	13
Tabla 4. Propiedades del Dowcal. ....	13
Tabla 5. Propiedades de la lana de roca.....	15
Tabla 6. Propiedades del acero. ....	15
Tabla 7. Cantidad producida de los productos pertenecientes al R1. ....	20
Tabla 8. Cantidad producida de los productos pertenecientes al R2. ....	20
Tabla 9. Cantidad producida de los productos pertenecientes al R3. ....	21
Tabla 10. Cantidad producida de los productos pertenecientes al R4. ....	21
Tabla 11. Cantidad producida de los productos pertenecientes al R5. ....	21
Tabla 12. Etapas de producción de los productos producidos en la instalación (1). ....	23
Tabla 13. Etapas de producción de los productos producidos en la instalación (2). ....	24
Tabla 14. Etapas de producción de los productos producidos en la instalación (3). ....	25
Tabla 15. Planificación mes de mayo de 2015 (1). ....	26
Tabla 16. Planificación mes de mayo de 2015 (2). ....	27
Tabla 19. Ejemplo temperaturas de producción en el reactor 1. ....	30
Tabla 20. Ejemplo temperaturas de producción en el reactor 2. ....	31
Tabla 17. Ventajas del aceite térmico y el agua como fluidos térmicos. ....	33
Tabla 18. Inconvenientes del aceite térmico y el agua como fluidos térmicos. ....	34
Tabla 21. Medidas características de los reactores R3 y R4. ....	39
Tabla 22. Temperatura del aceite térmico a la llegada de cada reactor.....	47
Tabla 23. Plan de producción mensual propuesto.....	54
Tabla 24. Cuadro de precios personal.....	59
Tabla 25. Cuadro de precios personal detallado.....	59
Tabla 26. Cuadro de precios de materiales.....	60
Tabla 27. Cuadro de costes generales.....	61
Tabla 28. Presupuesto general.....	62

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución en planta de los reactores y las calderas. ....	11
Figura 2. Composición de las tuberías del sistema de calefacción. Unidades en metros. ....	14
Figura 3. Distancia de los reactores a las calderas. ....	15
Figura 4. Sistema de calefacción de los reactores. ....	16
Figura 5. Sistema de calefacción de los destiladores. ....	19
Figura 6. Sistema de calefacción de los diluidores. ....	20
Figura 7. Esquema reactor de producción. ....	39
Figura 8: Propuesta de mejora del sistema de enfriamiento de los reactores. ....	55

## **ÍNDICE DE ILUSTRACIONES**

Ilustración 1. Diagrama de flujo de la instalación. ....	14
Ilustración 2. Tubería modelada en CREO. ....	43
Ilustración 3. Mallado de la tubería en ANSYS Meshing. ....	44
Ilustración 4. Reactor modelado en CREO. ....	49
Ilustración 5. Mallado del reactor en ANSYS Meshing. ....	50

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Evolución del precio medio anual del gas natural en España. ....	10
Gráfico 2. Evolución de la temperatura del aceite térmico en una tubería de 130 metros. ....	47
Gráfico 3. Temperatura del aceite térmico en el serpentín a la entrada de aceite térmico frío. ....	51
Gráfico 4. Temperatura del aceite térmico en el serpentín a la entrada de aceite térmico caliente .....	52

**Análisis y propuesta de mejora de la eficiencia energética de la instalación de aceite térmico de una planta de pinturas mediante la modificación de la distribución de los productos en los reactores.**

# MEMORIA

|

## **CAPÍTULO 1: OBJETIVO Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO**

El objetivo del presente Trabajo Fin de Grado (TFG) es el análisis del sistema de aceite térmico usado como sistema de calefacción industrial en una fábrica de pinturas y la posterior propuesta de mejora.

Para la fabricación de pinturas la empresa PPG Ibérica emplea un sistema de calefacción con aceite térmico. Este aceite térmico es calentado por las calderas mediante gas natural y enviado a los reactores de producción a través de unas tuberías aisladas térmicamente.

En este Trabajo Fin de Grado se estudia el sistema de calefacción utilizado por la empresa para calentar y enfriar el producto que hay en el interior de los reactores con el objetivo de analizar y mejorar las situaciones energéticamente ineficientes.

Un ahorro en gas natural es deseado ya que en la actualidad el consumo energético del sector de las pinturas en España está en aumento. Tal y como se puede ver en la Tabla 1 proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística (INE), el consumo de gas natural anual consumido por este sector asciende a más de sesenta millones de euros en el año 2013.

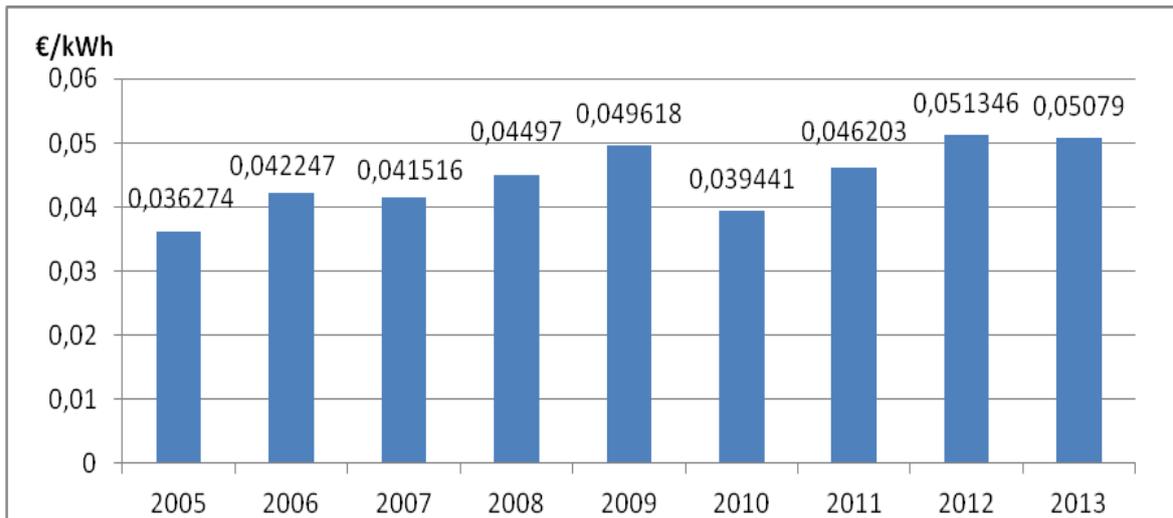
**Tabla 1. Consumo de gas por el sector de las pinturas, barnices, tintas de imprenta y masillas en miles de euros.**

<b>037 CNAE 20.3. Pinturas, barnices, tintas de imprenta y masillas</b>	<b>Gas (miles de €)</b>
2013	63.896
2011	59.360
2009	42.465
2007	58.638
2005	47.248
2003	42.998
2001	45.912

Fuente: Elaboración propia a partir de Instituto Nacional de Estadística.

La cantidad monetaria gastada mensualmente en gas natural por la empresa en la que se centra este trabajo es, de media, 41.000€. Se debe de tener en cuenta que el precio del gas natural ha ido aumentando en los últimos años, tal y como se puede observar en el Gráfico 1, lo que conlleva mayores gastos en energía anualmente.

En el presente trabajo se pretende optimizar el proceso de calefacción de la empresa y de esta forma minimizar el consumo de gas natural consumido, lo cual proporcionará a la empresa una ventaja competitiva y una mejora económica así como un menor impacto medioambiental en el entorno.



**Gráfico 1. Evolución del precio medio anual del gas natural en España.**

Fuente: Elaboración propia a partir de Preciogas.com.

La justificación del TFG deriva, por tanto, de proporcionar a la empresa PPG Ibérica de Quart de Poblet una ventaja competitiva a través de la reducción del consumo de gas natural lo que conlleva a una reducción de los gastos económicos destinados a esta fuente de energía.

Además la realización de este Trabajo Fin de Grado queda justificada de forma académica ya que representa la última etapa de los estudios de Grado en ingeniería química realizados por la autora del presente trabajo.

## CAPÍTULO 2: ANÁLISIS DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN DE LA EMPRESA

### 2.1 Introducción

La planta de fabricación PPG Ibérica de PPG Industries en la que se centra el presente Trabajo Fin de Grado se encuentra en Quart de Poblet (Valencia).

Esta filial está destinada a la producción de pinturas y recubrimientos para el sector del automóvil. En sus instalaciones se producen actualmente 51 tipos de productos distintos.

Para la fabricación de dichos productos la planta de fabricación dispone de un sistema de calefacción diseñado para mantener las temperaturas de producción adecuadas en la fabricación de cada recubrimiento. La planta de producción está compuesta por reactores, diluidores, intercambiadores de calor, bombas y tuberías que unen estos elementos.

En el presente capítulo se describe de forma detallada la instalación de calefacción de la empresa junto con los productos producidos y el plan de producción del mes de mayo de 2015.

### 2.2 Descripción de la instalación de calefacción

#### 2.2.1 Distribución en planta de los reactores de producción

Para la producción de pinturas y recubrimientos en la empresa PPG Ibérica se emplean cinco reactores encargados de mantener homogéneo el producto tanto física como térmicamente en su interior. Estos cinco reactores están distribuidos en dos zonas de la empresa cada una de las cuales pertenece a un edificio distinto.

Tal y como muestra la Figura 1, en una primera zona se encuentran cuatro de los reactores encargados de la producción de pinturas, estos reactores se denominan R1, R2, R3 y R4. En la segunda zona se encuentra el quinto reactor de producción (R5).

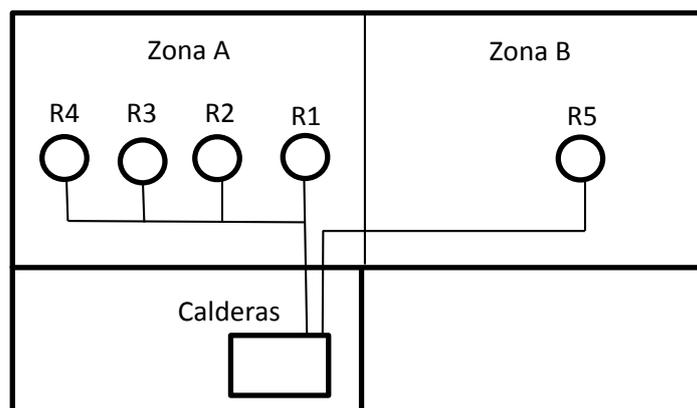


Figura 1. Distribución en planta de los reactores y las calderas.

Fuente: Elaboración propia.

Las características de los reactores encargados de la producción son distintas. Los reactores R2, R3 y R4 pueden producir un volumen total de  $10\text{m}^3$ , el reactor R1 es capaz de producir  $6\text{m}^3$  y el reactor R5 puede contener hasta  $20\text{m}^3$  de producto. Como se puede observar en la Figura 1 cada reactor

está a una distancia diferente de las calderas, esta distancia puede ser importante a la hora del estudio de las temperaturas a las que el aceite térmico llega al reactor.

En la Tabla 2 se pueden ver los datos relativos al volumen de cada reactor así como la distancia que hay desde las calderas a éstos.

**Tabla 2. Volumen de los reactores y distancia de cada uno de ellos a las calderas.**

Reactor	Volumen (m <sup>3</sup> )	Distancia a calderas (m)
R1	6	45,009
R2	10	56,937
R3	10	83,097
R4	10	85,901
R5	20	129,753

Fuente: Elaboración propia.

### 2.2.2 Tipo de calentamiento

Debido a que los productos que se producen en los reactores deben de ser calentados a distintas temperaturas durante su producción, la instalación de calefacción tiene un fluido térmico encargado de calentar el producto que hay en el interior de los reactores mediante contacto indirecto.

El calentamiento con fluido térmico es un tipo de calentamiento indirecto en el que se calienta un fluido en fase líquida, mediante una fuente de calor, y es bombeado hasta el punto deseado donde transfiere su energía térmica dentro de un circuito cerrado. Un fluido térmico debe tener muy buenas condiciones para la transferencia de calor y, además, evitar que las variaciones de temperatura que se den en el proceso donde se emplea cambien sus propiedades físicas.

El fluido térmico empleado en la instalación es un aceite térmico que lleva el calor desde las calderas, donde es calentado con gas natural, hasta el equipo a calentar. El aceite térmico es calentado alternativamente en las dos calderas de 2.000 litros que tiene la instalación y distribuido a las dos zonas de la planta a través de unas tuberías diseñadas con este fin.

En la zona de calderas hay dos calderas que se emplean alternativamente para que una de ellas no esté trabajando las 24 horas del día sino que se repartan entre ambas el tiempo de uso de forma que se minimice la posibilidad de averías y, en caso de que una se averíe, exista otra caldera con el fin de no parar la producción.

Las calderas son alimentadas con gas natural teniendo éstas un coste mensual de 41.000€ de media. Éstas son las encargadas de elevar y mantener el aceite térmico a 210°C de forma que a la salida de estas la temperatura del aceite sea constante.

En la empresa PPG las calderas calientan aceite térmico Cepsa diatermo debido a que el rango de temperaturas de trabajo de este aceite es de 0 a 315°C lo cual significa que es adecuado para el rango de temperaturas que demanda la instalación que es de 10 a 210°C aproximadamente. Además de la temperatura existen otros parámetros del aceite a tener en cuenta como la viscosidad, el calor específico, entre otros, pero el rango de temperaturas al que se permite calentar el aceite es el parámetro más importante para la instalación con la que se trabaja debido a que limita las temperaturas de producción. Las propiedades del aceite térmico empleado se pueden ver en la Tabla 3.

**Análisis y propuesta de mejora de la eficiencia energética de la instalación de aceite térmico de una planta de pinturas mediante la modificación de la distribución de los productos en los reactores.**

**Tabla 3. Propiedades del aceite térmico Cepsa diatermo.**

Densidad 15°C, kg/m <sup>3</sup>	864
Calor específico a 200°C, J/(kg·°C)	2000
Viscosidad a 100°C, kg/(m·s)	0,0043
Conductividad térmica 40°C, W/(m·°C)	0,109

Fuente: Ficha de seguridad aceite térmico Cepsa diatermo.

Para los productos del reactor R2 no es necesaria una temperatura tan alta como para los del resto de los reactores, es por ello que dicho reactor utiliza otro fluido caloportador, el Dowcal, el cual está diseñado para trabajar en un rango entre 0 y 150°C aproximadamente.

La empresa utiliza para acondicionar el aceite térmico Dowcal, a la temperatura demandada por el producto que hay en el reactor R2, dos intercambiadores de calor pertenecientes al sistema de calefacción propio de los reactores. Uno de los intercambiadores está provisto de aceite térmico Cepsa diatermo proveniente de las calderas para ser usado en el caso de necesitar calentar el aceite térmico Dowcal, el otro intercambiador de calor contiene agua de red para enfriar el aceite térmico Dowcal en caso de ser necesario. Con esta metodología de calentamiento y enfriamiento del aceite térmico Dowcal se evita duplicar equipos como calderas y bombas para calentarlo. Las propiedades del Dowcal se pueden ver en la Tabla 4.

**Tabla 4. Propiedades del Dowcal.**

Densidad, g/m <sup>3</sup>	1,044
Punto inflamación, °C	120
Punto congelación, °C, máx.	-14
Punto ebullición, °C	170
Temperatura auto-ignición, °C	435
Viscosidad a 20°C, mm <sup>2</sup> /s	10 - 30
Presión vapor a 20°C, mbar	3

Fuente: Elaboración propia.

### **2.2.3 Transporte del aceite térmico**

Tal y como se muestra en la ilustración 1 el aceite térmico Cepsa diatermo es calentado por las calderas a 210°C y cuando alcanza esta temperatura es impulsado por tres bombas centrífugas calorifugadas hacia la planta de producción. El sistema de calefacción tiene tres bombas a la salida de las calderas para impulsar el fluido desde las calderas a los intercambiadores de calor así como cada reactor posee otra bomba que impulsa el fluido desde la entrada del intercambiador de calor al reactor. También tiene tres bombas de retorno para devolver el aceite térmico desde el reactor a las calderas. Dependiendo de la demanda de aceite de los reactores de la planta las válvulas de entrada a éstos se abren o cierran.

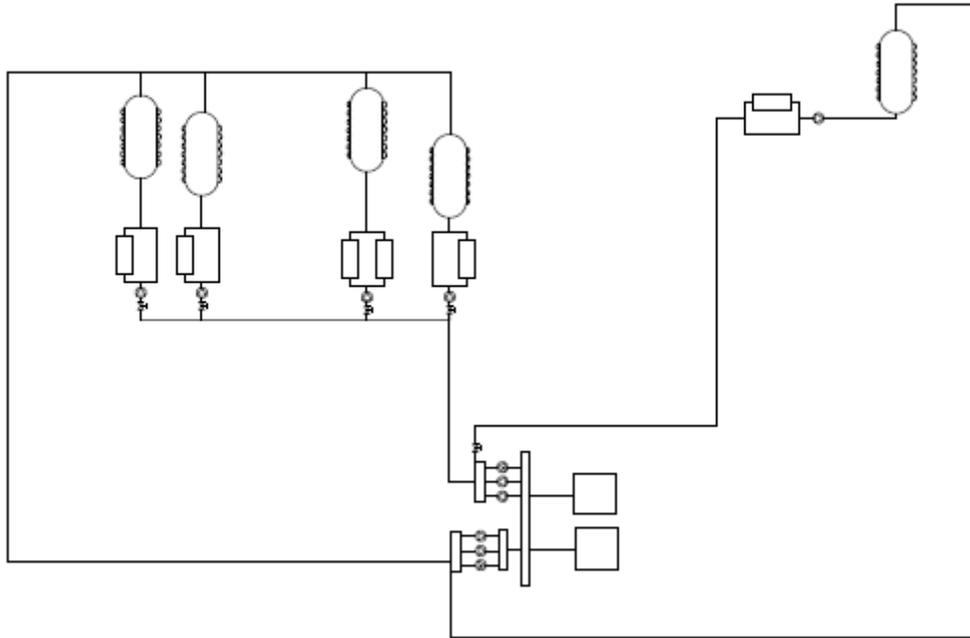


Ilustración 1. Diagrama de flujo de la instalación.

Fuente: Elaboración propia.

Existen dos tuberías a la salida de las calderas que son las encargadas de distribuir el aceite térmico entre los distintos equipos que posee la instalación. Las tuberías que transportan el aceite térmico son tuberías de acero al carbono calorifugadas de 6 pulgadas de diámetro.

Las tuberías de acero al carbono de 6 pulgadas de diámetro tienen un espesor de 5mm. Éstas están aisladas con una capa de 50mm de espesor de lana de roca seguido de una fina chapa de acero al carbono de 2mm de espesor. En la Figura 2 se puede ver representada esquemáticamente la tubería.

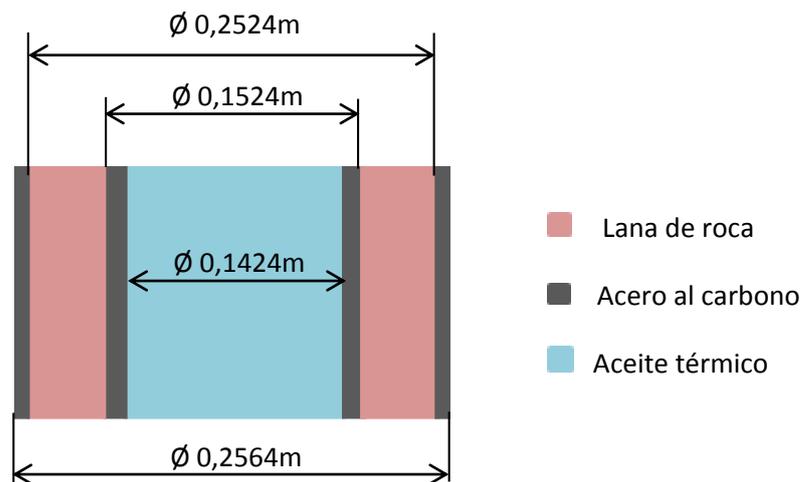


Figura 2. Composición de las tuberías del sistema de calefacción. Unidades en metros.

Fuente: Elaboración propia.

Las tuberías están diseñadas con estas características para que la pérdida de calor del fluido térmico por el recorrido desde las calderas hasta el reactor sea mínima. La lana de roca que rodea la tubería tiene como fin aislar la tubería de acero al carbono por donde pasa el producto de forma que la

**Análisis y propuesta de mejora de la eficiencia energética de la instalación de aceite térmico de una planta de pinturas mediante la modificación de la distribución de los productos en los reactores.**

temperatura baje lo mínimo posible antes de llegar al reactor. Las características de los materiales que forman la tubería se pueden identificar en las tablas 5 y 6.

**Tabla 5. Propiedades de la lana de roca.**

Densidad 15°C, kg/m <sup>3</sup>	100
Calor específico, J/(kg·°C)	840
Conductividad térmica, W/(m·°C)	0,06

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la empresa.

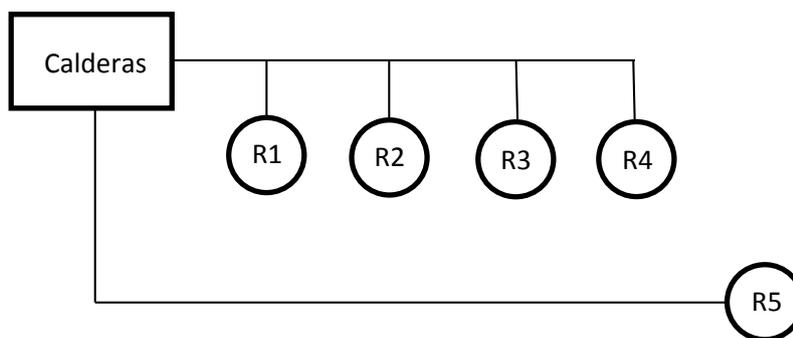
**Tabla 6. Propiedades del acero.**

Densidad 15°C, kg/m <sup>3</sup>	7850
Calor específico, J/(kg·K)	460
Conductividad térmica, W/(m·K)	50

Fuente: <<http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp>>

El aceite es distribuido por estas tuberías hacia las dos zonas de la planta de producción. Este aceite puede ir dirigido a tres equipos distintos de la planta que son reactores, destiladores y diluidores.

Por una parte, una tubería es la encargada de dirigir el aceite térmico a los reactores R1, R2, R3 y R4. Estos reactores se encuentran en el edificio adyacente a las calderas, la distribución de éstos se puede ver representada en la Figura 3. Por otra parte, la otra tubería que posee la instalación a la salida de la caldera es la encargada de llevar el aceite térmico al reactor R5. Este reactor se encuentra en el edificio adyacente a los cuatro primeros reactores, y, para que el aceite térmico llegue a él, la tubería pasa por la azotea del antes de llegar al reactor, por tanto el recorrido que realiza el aceite térmico es mayor.

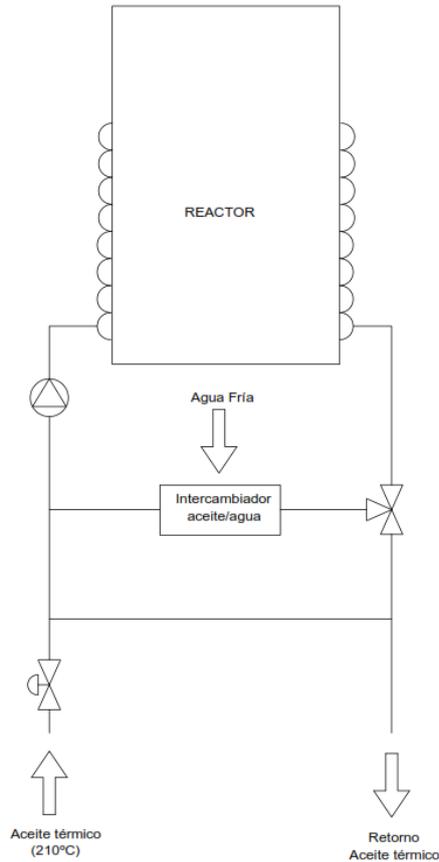


**Figura 3. Distancia de los reactores a las calderas.**

Fuente: Elaboración propia.

**2.2.4 Circuito de calefacción propio de los reactores**

Debido a que los productos que se producen en los reactores deben de ser calentados a distintas temperaturas durante su producción, cada reactor posee un circuito de calefacción propio conocido como lazo de control, este circuito se puede ver representado en la Figura 4.



**Figura 4. Sistema de calefacción de los reactores.**

Fuente: Reproducido de Análisis y propuesta de mejora de la eficiencia energética de la instalación de aceite térmico de una planta de pinturas mediante modificaciones en el circuito de calentamiento de los reactores, Sara Portolés.

Entre la tubería que abastece al reactor de aceite térmico y el propio reactor, cada reactor posee entre uno y dos intercambiadores de calor que son los encargados de regular la temperatura del aceite antes de que este entre en contacto con el reactor. Los intercambiadores son abastecidos con agua de red a temperatura ambiente y aceite térmico.

Los intercambiadores de calor son los responsables del enfriamiento indirecto en la instalación, es decir, son los elementos encargados de enfriar el aceite térmico a través del contacto con su superficie; el funcionamiento de un intercambiador de calor se basa en que es un dispositivo que facilita la transferencia de calor entre dos o más fluidos.

Se pueden identificar los intercambiadores que componen el circuito de calefacción propio de los reactores como intercambiadores de calor de carcasa y tubos. Dependiendo de la dirección del flujo de las corrientes, los intercambiadores que emplea la empresa se pueden clasificar como de flujo paralelo. Estos intercambiadores de calor tienen la función de acondicionar el aceite térmico que va a abastecer el reactor a la temperatura adecuada que demanda cada etapa de fabricación del producto.

Los reactores R1, R3, R4 y R5 tienen un intercambiador de calor aceite térmico Cepsa Diatermo/agua de red. El reactor R2 posee unas características distintas a los demás reactores ya que este reactor es abastecido con Dowcal como fluido caloportador. El Dowcal es calentado por

**Análisis y propuesta de mejora de la eficiencia energética de la instalación de aceite térmico de una planta de pinturas mediante la modificación de la distribución de los productos en los reactores.**

uno de los intercambiadores de calor al que le llega aceite térmico de las calderas. Además el reactor R2 posee otro intercambiador de calor con agua de red en caso de que se quiera enfriar el aceite térmico Dowcal.

Además en el circuito de calefacción propio de los reactores también se considera intercambiador de calor el serpentín que hay alrededor del reactor y por el que circula aceite térmico ya que el contacto indirecto entre el aceite y el propio reactor permite calentar o enfriar la resina que hay en su interior.

Cada producto durante su fabricación pasa por diversas etapas en las que se añaden reactivos al reactor. Cada etapa tiene una temperatura óptima o set-point a la que debe estar el producto y una temperatura máxima y mínima a la que se puede encontrar el aceite térmico en la camisa del reactor (formada por el serpentín que lleva el aceite térmico) para conseguir el set-point en el producto, estas últimas temperaturas no pueden ser sobrepasadas.

Hay dos procesos que se pueden llevar a cabo en el circuito de calefacción:

1. El calentamiento del aceite térmico y como consecuencia el calentamiento del producto o resina que hay en el reactor.
2. El enfriamiento del aceite térmico y, por tanto, la resina del interior del reactor.

A continuación se explican los procedimientos que se llevan a cabo en el circuito de calefacción de los reactores dependiendo del proceso.

#### Proceso de calentamiento

Si se quiere calentar el producto que hay en el interior del reactor, debido a que es la primera etapa de producción o porque se inicia una nueva etapa cuyo set-point es más elevado que el de la etapa anterior, la válvula de entrada de aceite térmico procedente de las calderas al reactor se abre proporcionalmente para dejar pasar aceite térmico y que éste se mezcle con el que hay en el interior de la camisa del reactor hasta que llegue a la temperatura máxima del aceite para esa etapa de producción con el objetivo de que el producto del interior del reactor llegue al set-point lo antes posible.

Tras haberse alcanzado la temperatura máxima permitida del aceite térmico se cierra la válvula del circuito general que da acceso al aceite térmico a la camisa del reactor y se mantiene el aceite que hay en el interior de la camisa recirculándose hasta que la temperatura del producto alcanza el set-point. Una vez alcanzada la temperatura óptima del producto, el aceite térmico que hay en el interior de la camisa sigue recirculándose hasta que la temperatura del producto se encuentra por debajo o por encima de la deseada. Si la temperatura de la resina se encuentra por debajo de la deseada, se vuelve a abrir de forma porcentual la válvula del circuito de aceite general que permite la renovación del aceite térmico que hay en el interior de la camisa por otro a mayor temperatura.

El aceite que es eliminado de la camisa se devuelve a las calderas para devolverlo nuevamente a la temperatura de 210°C. Las tres bombas de retorno que hay en las calderas favorecerán la devolución del aceite.

### Proceso de enfriamiento

Si en vez de bajar la temperatura del producto durante la recirculación del aceite térmico, la temperatura que hay en la camisa hiciera que el producto se encontrase a una temperatura mayor de lo deseado o se cambiara de etapa de producción a una cuyo set-point tiene una temperatura mayor, el aceite térmico de su interior sería recirculado al intercambiador de calor del propio reactor a través de una válvula de tres vías que comunica la salida de la camisa del reactor con el enfriador y la recirculación para enfriarlo lo más rápido posible con agua de red.

Por una parte, el lazo de control implementado en la empresa puede presentar defectos en su diseño ya que está diseñado de forma que cuando la temperatura del producto está por encima del set-point el aceite térmico en su totalidad es recirculado por el intercambiador de calor que enfría el aceite. En cambio, si la temperatura del producto está en un valor más bajo del deseado se introduce en el sistema de calefacción del propio reactor más aceite proveniente de las calderas a 210°C. El problema de dicho diseño es que no tiene en cuenta la inercia de temperatura del aceite al añadir aceite térmico a mayor temperatura y, por tanto, el sistema se mantiene en un constante aumento y disminución de la temperatura siendo este diseño muy ineficiente energética y económicamente.

Por otra parte, las calderas mantienen de forma constante una salida de aceite térmico a 210°C y los productos producidos en la empresa no precisan para su fabricación una temperatura tan elevada. La temperatura más alta a la que es necesario abastecer un reactor es de 180°C, si bien, el aceite térmico necesita recorrer en determinadas ocasiones distancias de hasta 130 metros aproximadamente para llegar al reactor. De la misma manera, los reactores necesitan, para fabricar determinados productos, aceite térmico a temperaturas menores de 180°C, como por ejemplo de 30°C y para conseguir esta temperatura los intercambiadores de calor deben de trabajar rápidamente para conseguir bajar la temperatura del aceite térmico lo más rápido posible. Además, a la salida del reactor el aceite térmico es devuelto de nuevo a las calderas siendo necesario que utilicen grandes cantidades de energía para devolver la temperatura del aceite térmico a 210°C.

Este diseño de la instalación de calefacción es energéticamente ineficiente ya que el que las calderas tengan que producir aceite térmico a 210°C habiendo productos que necesitan temperaturas notablemente inferiores durante su proceso de fabricación supone un malgasto de energía en determinados usos de la instalación. Además, hay que considerar el problema del enfriamiento ya que se realiza mediante un intercambio de calor agua de red/aceite térmico lo que supone una pérdida de energía debido a que el calor adquirido por el agua no es reutilizado por otro proceso.

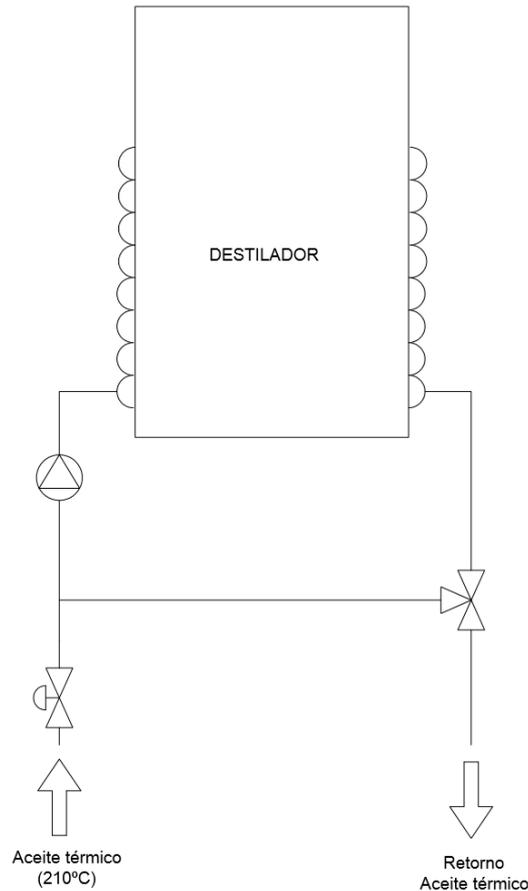
#### ***2.2.5 Otros equipos de la instalación***

A parte de los reactores, en la planta también hay destiladores destinados a la fabricación de productos. En los destiladores, al contrario que en los reactores, no existe un intercambiador de calor aceite térmico/agua de red destinado a refrigerar el aceite térmico. Esto es debido a que en los destiladores interesa aportar la máxima energía posible.

En el supuesto de que se superase el valor máximo de temperatura deseado, el aceite se recircularía por la propia camisa del destilador hasta conseguir bajar el valor de la temperatura.

En la Figura 5 se puede observar un esquema del sistema de calefacción de los destiladores.

**Análisis y propuesta de mejora de la eficiencia energética de la instalación de aceite térmico de una planta de pinturas mediante la modificación de la distribución de los productos en los reactores.**



**Figura 5. Sistema de calefacción de los destiladores.**

Fuente: Reproducido de Análisis y propuesta de mejora de la eficiencia energética de la instalación de aceite térmico de una planta de pinturas mediante modificaciones en el circuito de calentamiento de los reactores, Sara Portolés.

Además, también están los diluidores. Los diluidores al igual que los reactores y destiladores poseen una camisa que permite calentar el producto. Estos demandan una temperatura que suele estar alrededor de 80°C. Por esta razón, la calefacción de los diluidores funciona con agua desionizada.

El agua desionizada que usan como fluido térmico proviene de un intercambiador agua desionizada/aceite térmico ubicado en la torre de servicios, el cual calienta el agua con el aceite procedente de las calderas a la temperatura deseada. El agua desionizada caliente es distribuida por los tanques y diluidores de la planta, los cuales regularán la temperatura del agua a la deseada mediante la apertura las válvulas proporcionales de agua caliente y agua fría. En la Figura 6 se puede observar un esquema del sistema de calefacción de los diluidores.

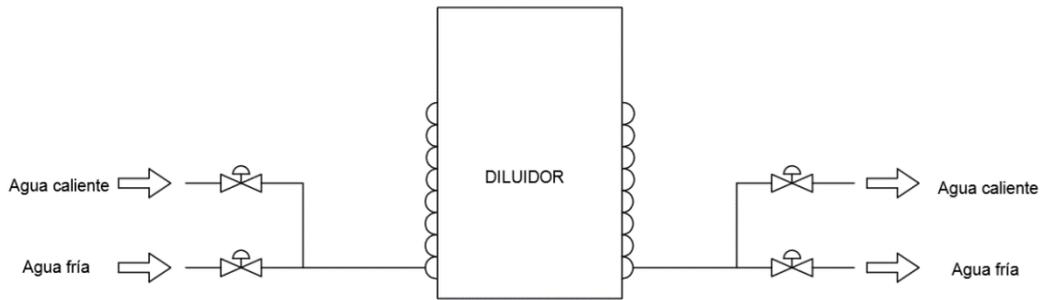


Figura 6. Sistema de calefacción de los diluidores.

Fuente: Reproducido de Análisis y propuesta de mejora de la eficiencia energética de la instalación de aceite térmico de una planta de pinturas mediante modificaciones en el circuito de calentamiento de los reactores, Sara Portolés.

### 2.3 Producción de resinas

Entre los cinco reactores se producen 51 tipos de productos diferentes. Los recubrimientos que se producen en la empresa se pueden clasificar como de protección industrial, en concreto un barniz, en base agua. A continuación se presentan los metros cúbicos producidos de cada pintura en el mes de mayo de 2015 y los reactores en que se producen. Véanse las tablas 7, 8, 9, 10 y 11.

Tabla 7. Cantidad producida de los productos pertenecientes al R1.

Reactor	Producto	m <sup>3</sup> producidos/mes
R1	AH	54
	AI	-
	AJ	6
	AK	6
	AL	-
	AM	114
	AN	18
	AO	6
	AP	6
	AQ	6
	AR	6
	AS	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8. Cantidad producida de los productos pertenecientes al R2.

Reactor	Producto	m <sup>3</sup> producidos/mes
R2	AT	20
	AU	40
	AV	40
	AW	40
	AX	-
	AY	10

Fuente: Elaboración propia.

**Análisis y propuesta de mejora de la eficiencia energética de la instalación de aceite térmico de una planta de pinturas mediante la modificación de la distribución de los productos en los reactores.**

**Tabla 9. Cantidad producida de los productos pertenecientes al R3.**

Reactor	Producto	m <sup>3</sup> producidos/mes
R3	L	90
	M	150
	N	70
	O	30
	P	10
	Q	-
	R	20
	S	30
	T	-
	U	-
	V	-

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 10. Cantidad producida de los productos pertenecientes al R4.**

Reactor	Producto	m <sup>3</sup> producidos/mes
R4	W	100
	X	70
	Y	10
	Z	20
	AA	-
	AB	30
	AC	20
	AD	10
	AE	40
	AF	20
	AG	10

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 11. Cantidad producida de los productos pertenecientes al R5.**

Reactor	Producto	m <sup>3</sup> producidos/mes
R5	A	920
	B	40
	C	180
	D	-
	E	60
	F	120
	G	60
	H	40
	I	120
	J	-
	K	160

Fuente: Elaboración propia.

Los productos que se generan en cada reactor son incompatibles con los generados por los otros reactores, es decir, un producto no se puede producir en otro reactor que no sea el asignado en las tablas 7, 8, 9, 10 y 11.

A continuación se presenta una lista de los productos que se producen actualmente en los reactores R3 y R4 con las etapas de producción que tienen cada uno de ellos y las temperaturas de producción.

En las tablas 12, 13 y 14 se pueden ver los diferentes procesos por los que pasa cada producto producido en los reactores R3 y R4 durante su fabricación. Cabe destacar la variedad de temperaturas y etapas de producción de cada producto así como las constantes subidas y bajadas de set-point que se producen al cambiar de etapa.

**Análisis y propuesta de mejora de la eficiencia energética de la instalación de aceite térmico de una planta de pinturas mediante la modificación de la distribución de los productos en los reactores.**

Tabla 12. Etapas de producción de los productos producidos en la instalación (1).

Codificación	Reactor	Etapa 1			Etapa 2			Etapa 3		
		SP	CMax	CMin	SP	CMax	CMin	SP	CMax	CMin
L	3	110	180	80	165	180	80	140	150	80
M	3	100	170	70	130	170	70	103	125	70
N	3	100	180	80	110	180	80	110	180	80
O	3	90	180	80	90	110	-	90	90	-
P	3	130	160	80	135	145	80	93	85	30
Q	3	30	170	80	130	170	80	135	145	80
R	3	130	170	80	130	170	80	135	145	80
S	3	125	160	80	130	160	30	145	160	30
T	3	125	160	80	130	160	30	145	160	30
U	3	50	75	20	93	95	90	120	130	93
V	3	145	130	90	145	160	90	144	110	90
W	4	90	170	80	115	170	100	160	70	30
X	4	90	170	80	165	180	100	82	90	50
Y	4	90	170	80	115	170	100	160	170	30
Z	4	90	170	80	115	170	100	160	170	30
AA	4	90	170	80	115	170	100	160	170	30
AB	4	110	1180	80	165	180	80	140	150	80
AC	4	100	170	70	130	170	70	103	125	70
AD	4	30	170	80	130	170	80	135	145	80
AE	4	125	160	80	130	160	30	145	160	30
AF	4	125	160	80	130	160	30	145	160	30
AG	4	125	160	80	130	160	30	145	160	30

Fuente: Reproducido de PPG Ibérica Quart de Poblet.

Tabla 13. Etapas de producción de los productos producidos en la instalación (2).

Codificación	Reactor	Etapa 4			Etapa 5			Etapa 6		
		SP	CMax	CMin	SP	CMax	CMin	SP	CMax	CMin
L	3	143	150	100	142	170	100	122	170	100
M	3	115	125	70	-	-	-	-	-	-
N	3	165	180	80	122	125	20	122	125	60
O	3	110	180	80	165	180	80	128	133	60
P	3	96	100	80	-	-	-	-	-	-
Q	3	93	85	30	96	100	80	96	100	90
R	3	85	85	30	96	100	80	96	100	80
S	3	90	85	30	98	105	70	-	-	-
T	3	93	85	30	105	115	90	-	-	-
U	3	120	130	93	120	130	93	120	130	93
V	3	105	125	70	115	125	70	-	-	-
W	4	132	85	30	121	126	116	122	170	100
X	4	65	70	50	75	100	50	75	80	40
Y	4	105	110	70	-	-	-	-	-	-
Z	4	105	110	70	70	140	60	70	85	30
AA	4	100	110	60	70	140	60	70	85	30
AB	4	143	150	100	142	170	100	122	170	100
AC	4	115	125	70	-	-	-	-	-	-
AD	4	93	85	30	96	100	80	96	100	90
AE	4	90	85	30	98	105	70	-	-	-
AF	4	93	85	30	105	115	90	-	-	-
AG	4	93	85	30	98	105	70	-	-	-

Fuente: Reproducido de PPG Ibérica Quart de Poblet.

**Análisis y propuesta de mejora de la eficiencia energética de la instalación de aceite térmico de una planta de pinturas mediante la modificación de la distribución de los productos en los reactores.**

Tabla 14. Etapas de producción de los productos producidos en la instalación (3).

Codificación	Reactor	Etapa 7			Etapa 8		
		SP	CAmax	CAmin	SP	CAmax	CAmin
L	3	122	125	50	98	105	40
M	3	-	-	-	-	-	-
N	3	137	140	60	-	-	-
O	3	128	128	40	128	128	100
P	3	-	-	-	-	-	-
Q	3	-	-	-	-	-	-
R	3	-	-	-	-	-	-
S	3	-	-	-	-	-	-
T	3	-	-	-	-	-	-
U	3	120	130	93	-	-	-
V	3	-	-	-	-	-	-
W	4	-	-	-	-	-	-
X	4	-	-	-	-	-	-
Y	4	-	-	-	-	-	-
Z	4	-	-	-	-	-	-
AA	4	70	140	60	70	85	30
AB	4	122	125	50	98	105	40
AC	4	-	-	-	-	-	-
AD	4	-	-	-	-	-	-
AE	4	-	-	-	-	-	-
AF	4	-	-	-	-	-	-
AG	4	-	-	-	-	-	-

Fuente: Reproducido de PPG Ibérica Quart de Poblet.

Una vez estudiado los tipos de productos que se fabrican en la empresa y su cantidad producida durante el mes de mayo de 2015, se procede a estudiar el plan de producción mensual durante dicho mes.

Debido a que el trabajo se centra en los reactores R3 y R4 se presenta el plan mensual de estos dos reactores. En este plan se puede identificar que productos se producen cada día en los reactores R3 y R4.

**Tabla 15. Planificación mes de mayo de 2015 (1).**

	<b>R3</b>	<b>R4</b>
<b>01-may</b>	N	AG-X
<b>02-may</b>	R	Z
<b>03-may</b>	M-L	-
<b>04-may</b>	M-O	AD
<b>05-may</b>	P-L	W
<b>06-may</b>	N	W
<b>07-may</b>	S	X
<b>08-may</b>	M	X-AC
<b>09-may</b>	M	AB
<b>10-may</b>	M-N	AE
<b>11-may</b>	S	W
<b>12-may</b>	L	W
<b>13-may</b>	O-L	AF
<b>14-may</b>	-	Y
<b>15-may</b>	M	X
<b>16-may</b>	M-M	X

Fuente: Reproducido de PPG Ibérica Quart de Poblet.

**Análisis y propuesta de mejora de la eficiencia energética de la instalación de aceite térmico de una planta de pinturas mediante la modificación de la distribución de los productos en los reactores.**

**Tabla 16. Planificación mes de mayo de 2015 (2).**

	R3	R4
<b>17-may</b>	N-R	W-W
<b>18-may</b>	N-M	-
<b>19-may</b>	M	AE
<b>20-may</b>	M	AB
<b>21-may</b>	L	Z
<b>22-may</b>	M-O	W
<b>23-may</b>	S-L	W
<b>24-may</b>	N	X
<b>25-may</b>	L	X
<b>26-may</b>	-	AF-AC
<b>27-may</b>	M-N	W
<b>28-may</b>	L	W
<b>29-may</b>	M	-
<b>30-may</b>	M	AB
<b>31-may</b>	M	AE

Fuente: Reproducido de PPG Ibérica Quart de Poblet.

Como se puede observar en el plan de producción de las resinas producidas en el mes de mayo, el plan se construye teniendo en cuenta el tiempo inicial y final de producción de cada resina así como el volumen demandado. En cambio, no se tienen en cuenta las temperaturas de producción de cada producto ya que el diseño de la instalación no permite reutilizar el calor del aceite térmico que es devuelto a las calderas.



## **CAPÍTULO 3: POSIBLES MEJORAS DE LA INSTALACIÓN**

Tras el estudio de la instalación de calefacción se han podido identificar las siguientes situaciones que pueden ser mejoradas:

- Pérdida del calor adquirido por el agua de red al enfriar el aceite térmico del serpentín debido a que no se reutiliza el agua de red caliente, que se obtiene de intercambiar el calor con el aceite térmico, para otro proceso.
- Temperaturas bajas del aceite térmico al ser devuelto a las calderas lo que supone un mayor gasto en gas natural.

En el presente capítulo se exponen las posibles alternativas de solución ante el problema planteado para poder concretar la alternativa escogida de mejora energética de la instalación.

### **3.1 Posibles mejoras energéticas aplicables al sistema de calefacción**

Entre las posibles líneas de actuación para mejorar energéticamente la instalación de calefacción de la empresa se estudian las siguientes:

1. Modificación del proceso de calentamiento de la instalación de calefacción.
2. Modificación del proceso de enfriamiento en los reactores en función de la pérdida de calor en los procesos de enfriamiento y posterior reordenación de los productos en los reactores.

A continuación se analizan detalladamente las posibles alternativas a aplicar.

#### ***3.1.1 Modificación del proceso de calentamiento de la instalación de calefacción***

Una opción que se propone es modificar el proceso de calentamiento de la instalación de calefacción. Debido a que la caldera debe de calentar el aceite térmico que es devuelto a 210°C independientemente de la temperatura que tenga y, como se ha mostrado anteriormente, los productos fabricados en la empresa tienen una amplia variedad de temperaturas de producción se propone duplicar las calderas y definir una temperatura de calentamiento distinta para cada una de ellas.

Con la creación de una instalación paralela cuya caldera sea la encargada de calentar el aceite térmico a temperaturas más bajas se puede ahorrar en el consumo de gas natural. El aceite que sea devuelto a las calderas a una temperatura más baja que un valor establecido sería enviado a la caldera de baja temperatura, mientras que el aceite cuya temperatura sea más elevada sería enviado a la caldera de alta temperatura, de la misma forma ocurriría con el aceite térmico enviado de las calderas a los reactores para calentar los productos.

Con esta metodología el consumo de gas natural sería inferior ya que no es lo mismo calentar el aceite térmico que es devuelto a las calderas a 40°C nuevamente a 210°C que calentar el aceite de 150°C a 210°C. El consumo es más elevado cuando la temperatura del aceite térmico que se tiene que calentar es más baja ya que se emplea más gas natural para calentarlo. Con esta vía de actuación las distintas temperaturas a las que se demanda el aceite térmico por los reactores, así

como la temperatura del aceite térmico de retorno de éstos, serían reorganizadas en dos calderas que mantendrían el aceite térmico a dos temperaturas distintas.

El inconveniente de esta alternativa es el coste económico que conlleva comprar el material necesario para modificar la instalación y por este motivo, esta posible mejora, no es abordada en este TFG.

### **3.1.2 Modificación del proceso de enfriamiento en los reactores**

En segundo lugar, se propone modificar el sistema de enfriamiento que poseen los reactores. Como ya se ha explicado anteriormente, al bajar el set-point de un producto el aceite térmico es recirculado por el intercambiador de calor de aceite térmico/agua de red de forma que el agua de red enfría al aceite térmico y a su vez el agua es calentada por el aceite térmico. El agua calentada no es empleada por ningún otro proceso de la empresa y por tanto el calor ganado gracias al aceite térmico no es aprovechado.

En esta línea de actuación se pretende aprovechar el calor que el aceite térmico desprende al ser enfriado. Para ello se propone utilizar el aceite térmico frío proveniente de etapas que están siendo calentadas, y por tanto extraen del serpentín el aceite frío, para enfriar el aceite térmico del proceso que quiere ser enfriado. El enfriamiento del aceite térmico se realizaría mediante el mezclado del aceite caliente que tiene la camisa del reactor con aceite térmico frío de un proceso de producción paralelo siguiendo la misma metodología que emplea el sistema de calefacción actualmente para su calentamiento.

Con esta metodología se evitaría enviar a la caldera el aceite térmico de algunos procesos que se producen a muy bajas temperaturas de forma que no se tendría que emplear tanto gas natural para calentar de nuevo el aceite térmico ya que el aceite que fuera devuelto a las calderas estaría a mayor temperatura gracias al mezclado con aceite térmico caliente.

A continuación se explica mediante un ejemplo la metodología de enfriamiento a seguir y las temperaturas a las que el aceite térmico es enviado a calentarse a las calderas. Para el ejemplo se tendrán en cuenta los datos de la Tabla 19 que corresponden con dos etapas consecutivas de la fabricación de un producto.

**Tabla 17. Ejemplo temperaturas de producción en el reactor 1.**

Etapa proceso	Set-point (°C)	Temperatura de alta (°C)	Temperatura de baja (°C)
1	160	170	30
2	105	110	70

Fuente: Elaboración propia.

Además como proceso paralelo en otro reactor se estará produciendo un producto con las temperaturas que se muestran en la Tabla 20.

**Análisis y propuesta de mejora de la eficiencia energética de la instalación de aceite térmico de una planta de pinturas mediante la modificación de la distribución de los productos en los reactores.**

**Tabla 18. Ejemplo temperaturas de producción en el reactor 2.**

Etapa proceso	Set-point (°C)	Temperatura de alta (°C)	Temperatura de baja (°C)
1	130	160	30

Fuente: Elaboración propia.

En el reactor 1 se está produciendo actualmente una resina cuyo set-point se encuentra a 160°C y para ello 100 litros de aceite térmico se encuentran en este instante recirculando por la camisa del reactor a 170°C. Debido al cambio de etapa de producción cambia el set-point a 105°C y para conseguir la temperatura deseada del producto la temperatura del aceite térmico debe de disminuir a 70°C.

En la actualidad el aceite térmico que hay en el interior de la camisa sería recirculado al intercambiador de calor para bajar su temperatura y, por tanto, al finalizar la producción se enviarían a las calderas la totalidad de los litros de aceite térmico a 70°C además de los de aceite térmico a 30°C que se encuentran en el proceso del reactor 2.

Como propuesta de mejora se propone enfriar mediante mezclado con el aceite térmico frío producido en el reactor 2 el aceite térmico caliente que tiene el reactor 1 en su camisa. Para enfriar los litros de aceite de 170°C a 70°C se necesitarían una determinada litros de aceite térmico a 30°C. Al finalizar la producción se enviarían a las calderas la totalidad de los litros a 70°C, la totalidad de los litros a 30°C menos los introducidos en el reactor 1 y tantos litros como los metidos de aceite térmico frío en el reactor 1 a una temperatura superior a 30°C a determinar.

Mediante esta nueva metodología se conseguiría ahorrar el gas natural empleado para calentar el aceite térmico de 30°C a la temperatura de 210°C ya que la temperatura a la que finalmente es devuelto el aceite térmico a las calderas es mayor y por tanto es necesario usar una menor cantidad de gas natural.

Para obtener de esta aplicación una mejora energética se debe de modificar el plan mensual de producción de la empresa de forma que los procesos que necesiten bajar de temperatura se estén produciendo paralelamente a otro proceso donde se esté extrayendo de la camisa del reactor aceite térmico a bajas temperaturas.

### **3.1.3 Otras posibilidades contempladas**

#### Reordenación de los productos en función del tiempo de producción

Otra posibilidad contemplada constaría en un análisis detallado del tiempo que tarda cada producto en ser producido. Una vez obtenido el tiempo de producción se reordenarían los productos en los reactores en función de éste atendiendo al plan de demandas que posee la empresa.

Este tipo de actuación podría evitar la aparición de tiempos muertos en la producción y de esta forma permitir parar las calderas unas horas semanales suponiendo una reducción en el gasto de gas natural pero tras estudiarse el plan de producción de la empresa del mes de mayo de 2015 se ha podido observar que no existen prácticamente tiempos muertos de producción ya que el tiempo entre un producto y otro es mínimo o es empleado para lavar y desinfectar los reactores.

Además, existe un problema añadido que deriva de la incompatibilidad entre productos ya que sólo los productos producidos en los reactores R3 y R4 son compatibles entre sí y por tanto el resto de productos se ven condicionados a ser producidos en los reactores que los producen habitualmente.

#### Cambio del fluido térmico empleado

Por último, otra posibilidad estudiada implica el cambiar el tipo de fluido térmico que la empresa emplea en su sistema de calefacción. En la actualidad, como se ha explicado anteriormente, la empresa utiliza aceite térmico. Entre los posibles fluidos térmicos que podría emplear la empresa están el aceite térmico, el agua calentada, el agua sobrecalentada y el vapor de agua. Estos fluidos térmicos se definen como:

- Aceites térmicos: variedad de mezclas líquidas de color amarillento derivadas del petróleo.
- Vapor de agua: consiste en agua que, por efecto de la elevación de la temperatura, ha cambiado de estado, y adquiere presiones superiores a la atmosférica, las cuales favorecen su movimiento a lo largo de conductos y receptores (C. Martí, 1979 : 20).
- Agua caliente: se entiende como el agua que a la presión atmosférica no ha alcanzado la temperatura de vaporización, es decir los 100°C (C. Martí, 1979 : 23).
- Agua sobrecalentada: se conoce como el agua que se encuentra entre 100°C, punto de ebullición, y 374°C, temperatura crítica, manteniéndose en estado líquido gracias al efecto de la presión.

A continuación se presentan unas tablas comparativas de las ventajas e inconvenientes que tienen estos fluidos térmicos.

**Análisis y propuesta de mejora de la eficiencia energética de la instalación de aceite térmico de una planta de pinturas mediante la modificación de la distribución de los productos en los reactores.**

Tabla 19. Ventajas del aceite térmico y el agua como fluidos térmicos.

	Calentamiento por aceite térmico	Calentamiento por agua	
<b>Ventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Altas temperaturas (250 a 350°C) con presiones bajas</li> <li>✓ No requiere de tratamiento de agua</li> <li>✓ No necesita mantenimiento de trampas de vapor o líneas de condensados</li> </ul>	<b>Vapor de agua</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ No hay peligro inminente por una fuga de agua</li> <li>✓ Mayor aporte de calor que el agua caliente</li> <li>✓ Gran cantidad de calor por unidad de peso</li> <li>✓ Coste bajo del agua</li> <li>✓ No se degrada el fluido</li> </ul>
		<b>Agua caliente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Características inocuas del producto líquido</li> <li>✓ Admite regulaciones de temperatura de alta presión</li> <li>✓ Trabaja sin presión</li> <li>✓ No hay peligro inminente por una fuga de agua</li> <li>✓ Coste bajo del agua</li> <li>✓ No se degrada el fluido</li> </ul>
		<b>Agua sobrecalentada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Características inocuas del producto líquido</li> <li>✓ Altas temperaturas de trabajo</li> <li>✓ Regulaciones de gran precisión</li> <li>✓ No hay peligro inminente por una fuga de agua</li> <li>✓ Coste bajo del agua</li> <li>✓ No se degrada el fluido</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20. Inconvenientes del aceite térmico y el agua como fluidos térmicos.

	Calentamiento por aceite térmico	Calentamiento por agua	
<b>Inconvenientes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>× Una capacidad de calor muy alta en movimiento, que requiere de un alto grado de aislamiento térmico así como equipamiento especial</li> <li>× Degradación con el tiempo del aceite térmico</li> <li>× No pueden haber fugas de aceite térmico</li> <li>× Peligro de fuego, contaminación y envenenamiento</li> <li>× Coste elevado del aceite térmico</li> </ul>	<b>Vapor de agua</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>× Peligro de explosión por la presión interior de la caldera de vapor</li> <li>× Baja temperatura de trabajo (alrededor de 100°C)</li> <li>× Elevado coste de mantenimiento y revisiones de las instalaciones</li> <li>× Control y tratamiento de pH, sales y sólidos en suspensión del agua</li> </ul>
		<b>Agua caliente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>× Baja temperatura de trabajo (alrededor de 100°C)</li> <li>× Sólo utilizable en instalaciones de cortas distancias</li> <li>× Elevado coste de mantenimiento y revisiones de las instalaciones</li> <li>× Control y tratamiento de pH, sales y sólidos en suspensión del agua</li> </ul>
		<b>Agua sobrecalentada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>× Elevado coste de mantenimiento y revisiones de las instalaciones</li> <li>× Control y tratamiento de pH, sales y sólidos en suspensión del agua</li> <li>× Precisa de una bomba</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede comprobar, entre los cuatro tipos de fluidos térmicos propuestos, el aceite térmico es el más adecuado para la instalación de calefacción que posee la empresa ya que, además de poseer la maquinaria adecuada, sólo el aceite térmico alcanza las temperaturas necesarias para la

**Análisis y propuesta de mejora de la eficiencia energética de la instalación de aceite térmico de una planta de pinturas mediante la modificación de la distribución de los productos en los reactores.**

producción a presiones atmosféricas. Por tanto, esta vía de mejora no es aplicable a la instalación con la que se trabaja.

**3.2 Propuesta de mejora escogida**

Entre las posibles propuestas de mejora explicadas anteriormente, en el presente Trabajo Fin de Grado se estudia la posibilidad de aplicar una modificación al sistema de enfriamiento existente en los reactores.

Para estudiar la propuesta de mejora primero se detallan las condiciones de contorno de la instalación de calefacción de forma que se pueda, mediante herramientas de simulación, obtener la solución al problema planteado.

En segundo lugar se analiza mediante herramientas de simulación la pérdida de calor del aceite térmico desde las calderas hasta los reactores para concluir si la protección de las tuberías es la adecuada para este tipo de instalación.

En tercer lugar se analizan los productos fabricados en los reactores R3 y R4 y se obtiene, mediante herramientas de simulación, el resultado a los problemas planteados. Se escogen estos dos reactores para la redistribución de productos porque son los únicos que pueden producir los productos producidos tanto en un reactor como en el otro.

Finalmente se elabora un plan mensual de producción en el que la redistribución de productos resulte beneficiosa para el ahorro energético de gas natural.



## **CAPÍTULO 4: CONDICIONES DE CONTORNO**

### **4.1 Introducción**

En el presente capítulo se definen de forma detallada las condiciones de contorno necesarias para definir el comportamiento de los reactores R3 y R4, así como las tuberías de la instalación. Además, se estudiarán los parámetros que influyen en el funcionamiento de la instalación con el fin de mejorar su funcionamiento.

### **4.2 Condiciones de contorno**

Para poder aplicar posibles mejoras en la instalación, en este apartado se detallarán las condiciones de contorno de los reactores y las tuberías con las que se trabaja actualmente en la empresa.

#### **4.2.1 Condiciones de contorno de las tuberías**

Con el fin de obtener mediante herramientas de simulación la pérdida de calor del aceite térmico en su recorrido por las tuberías de la instalación, se definen unas condiciones de contorno obtenidas a partir de la instalación real. Los datos proporcionados por la empresa son:

- Características del aceite térmico (definidas en el apartado 2.2.2).
- Características de la lana de roca (definidas en el apartado 2.2.3).
- Características del acero (definidas en el apartado 2.2.3).
- Temperatura ambiente = 298K.
- Temperatura del aceite térmico a la salida de las calderas = 483K.
- Velocidad del aceite térmico = 10m/s.
- Temperatura de la chapa cuando la instalación está en funcionamiento = 314K.

A partir de los datos de la instalación real proporcionados por la empresa se obtienen los parámetros necesarios para su proceso de cálculo. Debido a que un valor fundamental para el desarrollo del trabajo es la temperatura a la que llega el aceite térmico al reactor, se debe estudiar la pérdida de calor existente a lo largo de las tuberías y para ello se debe determinar la transferencia de calor que condiciona la instalación.

Se pueden clasificar los distintos procesos de transmisión calorífica en tres tipos los cuales pueden encontrarse simultáneamente en el proceso:

- **Conducción:** mecanismo de intercambio de energía interna de un cuerpo a otro, o de una parte de este cuerpo a otra mediante el intercambio de la energía cinética del movimiento de las moléculas por comunicación directa o por el flujo de electrones libres cuando se trata de la conducción calorífica en los metales. Este flujo de energía o de calor se dirige desde las moléculas de energía más elevadas a las que tienen una cantidad menor (Chapman, 1984 : 3).
- **Convección:** mecanismo de transmisión calorífica que se produce en un fluido cuando una parte de éste se mezcla con otra, a causa de los movimientos de la masa del mismo (Chapman, 1984 : 3).

- Radiación térmica: radiación electromagnética emitida por la superficie de un cuerpo excitado térmicamente (Chapman, 1984 :4).

Como ya se ha explicado anteriormente, el aceite térmico es distribuido mediante unas tuberías, definidas en el apartado 2.2.3, a los reactores para calentar el producto que hay en su interior. Las tuberías que componen la instalación de calefacción tienen las siguientes características:

- Tubería de acero al carbono de 6 pulgadas de diámetro y 5mm de espesor.
- Aislante de lana de roca de 50mm de espesor.
- Chapa de acero al carbono de 2mm de espesor.

Por tanto la transmisión de calor en esta tubería es la siguiente:

- Convección: se entiende por convección a la transferencia de calor entre una superficie y un fluido, por tanto, en la tubería con la que se trabaja existe transferencia de calor por convección entre el aceite térmico y la tubería de acero al carbono, además de entre la chapa de acero y el aire.
- Conducción: es la transferencia de calor en un medio. En la tubería objeto de este estudio existiría transmisión de calor por conducción en los materiales que la forman.

Una vez conocido el tipo de transmisión de calor existente en la tubería se procede a la definición de los parámetros necesarios para determinar la temperatura del aceite térmico que recorre la tubería.

#### Coefficiente de convección aceite térmico – tubería de acero al carbono

Tras definir el material del que está fabricada la tubería y la superficie de contacto de ésta con el aceite térmico, la herramienta de trabajo calcula el coeficiente de convección que existe entre estas superficies.

#### Coefficiente de convección chapa de acero al carbono – aire

Entre la chapa de acero al carbono y el aire ambiental existe convección natural. La correlación para la convección natural tanto en tubos verticales como horizontales para flujo turbulento se define como:

$$h = 1,65 \cdot \sqrt[3]{\Delta T}$$

Donde  $\Delta T$  se define como la diferencia de temperaturas entre el fluido y el exterior.

Aplicando la fórmula se obtiene que el coeficiente de convección existente es:

$$h = 9,40 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

#### Superficies de la tubería en contacto

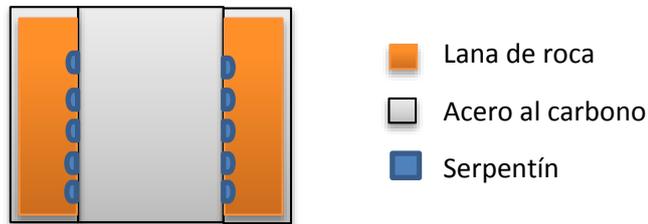
Otro parámetro importante a definir en la instalación es el contacto existente en las tuberías. La tubería compuesta por acero tiene contacto directo con el aceite térmico que pasa por su interior así como con la lana de roca que la envuelve. Además la lana de roca está en contacto directo con la chapa de acero. Los contactos quedan entonces definidos de la siguiente manera:

- Aceite térmico – tubería.
- Tubería – lana de roca.
- Lana de roca – chapa.

**Análisis y propuesta de mejora de la eficiencia energética de la instalación de aceite térmico de una planta de pinturas mediante la modificación de la distribución de los productos en los reactores.**

**4.2.2 Condiciones de contorno de los reactores**

Al igual que con las tuberías, el reactor tiene unas condiciones de contorno que definen su transferencia de calor. En la Figura 7 se muestra un esquema del reactor:



**Figura 7. Esquema reactor de producción.**

Fuente: Elaboración propia.

Los reactores tienen en su interior el producto que se quiere calentar. Para calentar el producto el reactor tiene alrededor de sí mismo un serpentín de acero al carbono por el que se recircula el aceite térmico, la lana de roca que protege esta tubería del ambiente y una chapa de acero al carbono. En resumen un reactor está compuesto por los siguientes materiales:

- Reactor de acero al carbono de 8mm de espesor.
- Tubería de aceite al carbono para aceite térmico de 1cm de espesor.
- Lana de roca de 5cm de espesor.
- Chapa de acero al carbono de 2mm de espesor.

A continuación se presenta una tabla con los valores característicos que definen a los reactores con los que se trabaja en el presente Trabajo Fin de Grado (R3 y R4).

**Tabla 21. Medidas características de los reactores R3 y R4.**

	<b>Diámetro interior (m)</b>	<b>Diámetro exterior (m)</b>	<b>Espesor de la pared (mm)</b>	<b>Altura (m)</b>
<b>Reactor</b>	2,0500	2,0660	8,0	3,3800
<b>Serpentín</b>	0,0508	0,0603	9,5	2,0000
<b>Lana de roca</b>	2,0660	2,1660	50,0	3,3760
<b>Chapa</b>	2,1660	2,1700	2,0	3,3800

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos proporcionados por la empresa.

La transmisión de calor en este reactor es la siguiente:

- Convección: en el reactor existe transferencia de calor por convección entre el aceite térmico y la tubería de acero al carbono, entre la chapa de acero y el aire y entre el reactor y la resina.

- Conducción: en el reactor hay transmisión de calor por conducción entre los materiales que lo forman que son reactor, tubería, lana de roca y chapa.

Una vez conocido el tipo de transmisión de calor existente en el reactor se procede a la definición de los parámetros necesarios para determinar su comportamiento.

#### Coefficiente de convección aceite térmico – tubería de acero al carbono y resina – reactor.

Tras definir el material del que están fabricados el reactor y la tubería y las superficies de contacto de éstos con la resina y el aceite térmico, respectivamente, la herramienta de trabajo calcula el coeficiente de convección que existe entre estas superficies.

#### Coefficiente de convección chapa de acero al carbono – aire y reactor – aire

Entre la chapa de acero al carbono y el aire ambiental así como entre el reactor y éste existe convección natural. La correlación para la convección natural se define de la siguiente forma:

$$h = 1,65 \cdot \sqrt[3]{\Delta T}$$

Donde  $\Delta T$  se define como la diferencia de temperaturas entre el fluido y el exterior.

Aplicando la fórmula se obtiene que el coeficiente de convección existente es:

$$h = 9,40 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

#### Superficies del reactor en contacto

Al igual que para la tubería, para el reactor también es necesario definir las superficies en contacto. Los contactos del reactor se definen de la siguiente manera:

- Resina – reactor.
- Reactor – tubería.
- Tubería – aceite térmico.
- Tubería – lana de roca.
- Lana de roca – reactor.
- Lana de roca – chapa.
- Reactor – chapa.
- Tubería – chapa.

Una vez obtenidas las condiciones de contorno que definen la instalación de calefacción con la que se trabaja, se puede proceder a realizar cambios en los parámetros de la instalación que permitan realizar una mejora energética y económica. Para ello se definen los parámetros que influyen en la eficiencia de la instalación en el siguiente apartado.

### **4.3 Parámetros que influyen en la eficiencia de la instalación**

Como se ha podido ver en capítulos anteriores, la instalación está compuesta por calderas, bombas, tuberías, intercambiadores de calor y los reactores a los que abastece, entre otros. En el presente apartado se exponen las variables que afectan al sistema de calefacción con el fin de mejorarlo energéticamente.

Un parámetro fundamental que afecta a la instalación es la temperatura del aceite térmico que abastece a los reactores. Debido a que la instalación de calefacción debe proporcionar aceite térmico a una temperatura en los reactores que viene determinada por el set-point de cada etapa de formación de un producto, es de vital importancia que el parámetro estudiado se ajuste fielmente a los valores establecidos para la buena fabricación de los productos.

**Análisis y propuesta de mejora de la eficiencia energética de la instalación de aceite térmico de una planta de pinturas mediante la modificación de la distribución de los productos en los reactores.**

Otro parámetro que afecta a la instalación es la presión. En el caso estudiado, las bombas son las encargadas de dar la presión necesaria para que el fluido caloportador sea trasladado desde las calderas hasta los intercambiadores de calor y de estos a los reactores.

La velocidad a la que viaja el aceite térmico por las tuberías, así como el caudal, es otro parámetro a tener en cuenta a la hora del estudio de la instalación. Un mayor caudal hace que el fluido llegue antes a los reactores y, de igual manera, puede provocar una menor pérdida de temperatura en el trayecto que realiza.

Por tanto, existe en la instalación un factor limitante que es la temperatura, ya que obtener la temperatura deseada del aceite térmico en el reactor es primordial para la correcta fabricación de los productos y esta temperatura es la que está directamente relacionada con el consumo de gas natural. Además, en la instalación influyen también el caudal y la presión a la que circula el fluido.



## **CAPÍTULO 5: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS OBTENIDOS**

### **5.1 Introducción**

En la actualidad la instalación de calefacción de la empresa tiene una temperatura de salida de aceite térmico de las calderas de 210°C. Este aceite es distribuido a los cinco reactores a través de dos tuberías que se bifurcan para abastecer a cada reactor.

Para obtener las condiciones actuales de la instalación de calefacción se siguen una serie de pasos que permiten de forma fiable obtener el funcionamiento de la parte del sistema de calefacción estudiado. Los pasos a seguir son los siguientes:

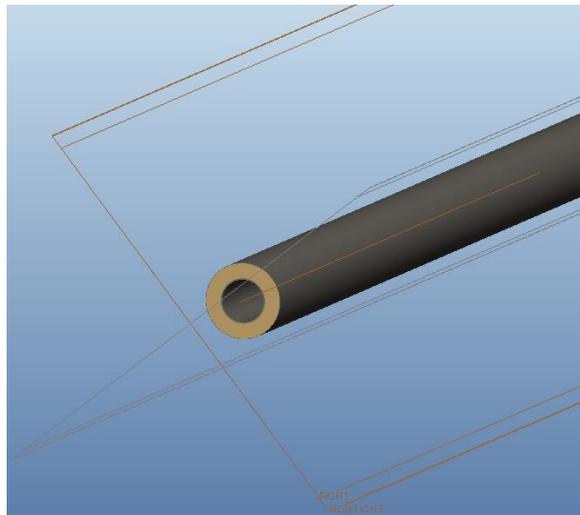
1. Modelado de la instalación.
2. Mallado de la estructura.
3. Aplicación de métodos matemáticos para su resolución.

A continuación se explican de forma detallada el procedimiento seguido para la obtención de resultados.

### **5.2 Procedimiento experimental**

#### ***5.2.1 Estudio de la pérdida de calor en las tuberías***

Primero se modela la instalación, de la forma más parecida a la instalación real, de forma que los resultados obtenidos finalmente sean lo más ajustados a la realidad. Para ello se emplea un programa de modelado conocido como CREO. Las tuberías de la instalación quedan como las mostradas en la Ilustración 2:

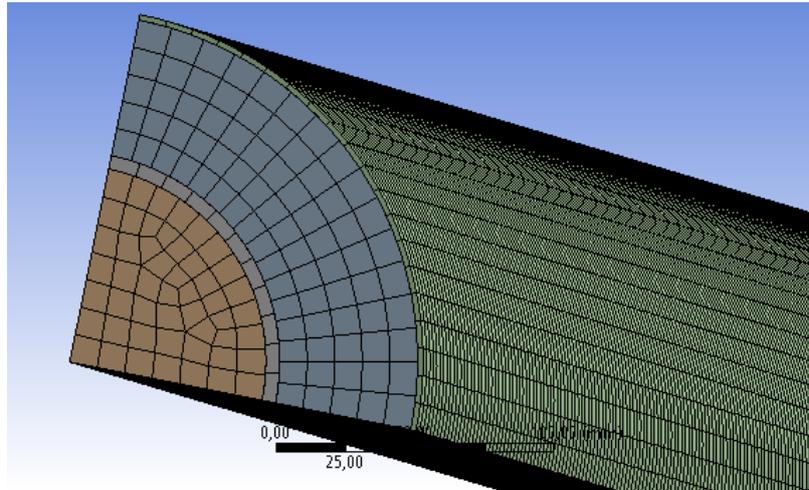


**Ilustración 2. Tubería modelada en CREO.**

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se realiza el mallado de la estructura el cual servirá de guía para las siguientes simulaciones. El mallado es una función que permite diseccionar en tantas partes como se quiera el modelo a simular de forma que a más pequeño sea el mallado más precisos serán los resultados obtenidos tras la simulación. Además, para facilitar el proceso de cálculo se simplifica la tubería

aplicando una doble simetría. El mallado realizado para la figura anterior se puede ver en la Ilustración 3:



**Ilustración 3. Mallado de la tubería en ANSYS Meshing.**

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que la instalación con la que se trabaja es compleja y por tanto su comportamiento también lo es, se emplea para obtener su comportamiento la herramienta de cálculo ANSYS la cual, mediante métodos matemáticos complejos, puede obtener resultados próximos a la realidad difíciles de predecir con las herramientas de cálculo habituales. Los métodos matemáticos de resolución aplicados para el caso trabajado son los siguientes:

#### Flujo turbulento

El aceite térmico presenta un comportamiento de flujo turbulento en las tuberías de la instalación y por tanto no mantiene el mismo comportamiento viscoso en la pared cercana a la tubería que en el interior de ésta. Por ello se define una ecuación que tiene en cuenta el carácter turbulento de los fluidos así como su viscosidad en los diferentes espacios que recorre.

La ecuación que establece la distancia entre dos regiones se define como.

$$Re_y = \frac{\rho y \sqrt{k}}{\mu}$$

Donde,

$y$  es interpretada como la distancia a la pared más cercana en m.

$\rho$  es la densidad en  $\text{kg/m}^3$ .

$k$  es la energía cinética por unidad de masa en J/kg.

$\mu$  es la viscosidad dinámica en cP.

A continuación se definen las formulas empleadas para analizar el comportamiento del flujo en paredes cercanas a la tubería. En este proceso se emplea la ecuación de Wolfstein donde la viscosidad turbulenta se define como:

$$\mu_{t,2layer} = \rho C_\mu l_\mu \sqrt{k}$$

Donde,

$$l_\mu = y C_l^* (1 - e^{-Re_y/A_\mu})$$

**Análisis y propuesta de mejora de la eficiencia energética de la instalación de aceite térmico de una planta de pinturas mediante la modificación de la distribución de los productos en los reactores.**

$\mu_{t,2layer}$  es la viscosidad turbulenta en cP.

$\rho$  es la densidad en kg/m<sup>3</sup>.

$k$  es la energía cinética por unidad de masa en J/kg.

$l_\mu$  es la longitud en m.

$y$  es la distancia a la pared más cercana en m.

$A_\mu$  es el área en m<sup>2</sup>.

$Re_y$  es el número de Reynolds, adimensional.

Las fórmulas de Jongen empleadas para analizar el comportamiento del flujo en paredes lejanas a la tubería son:

$$\mu_{t,enh} = \lambda_\varepsilon \mu_t + (1 - \lambda_\varepsilon) \mu_{t,2layer}$$

Donde,

$$\lambda_\varepsilon = \frac{1}{2} \left[ 1 + \tanh \left( \frac{Re_y - Re_y^*}{A} \right) \right] \quad A = \frac{|\Delta Re_y|}{\operatorname{artanh}(0,98)}$$

$$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{l_\varepsilon} \quad l_\varepsilon = y C_l^* (1 - e^{-Re_y/A_\mu})$$

Siendo,

$A$  el área en m<sup>2</sup>.

Ecuación de energía

En la instalación, como se ha explicado anteriormente, existe transferencia de calor, es por ello que se emplea la siguiente ecuación para calcular la transferencia de calor debida a la conducción y la convección.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h$$

Donde,

$k_{eff} = k + k_t$  siendo  $k_t$  la conductividad térmica en condiciones turbulentas y  $k$  la conductividad térmica, las unidades de las tres son W/(m·K).

$\vec{J}_j$  es la difusión del flujo de las especies con las que se trabaja en J/(m<sup>2</sup>·s).

$p$  es la presión en Pa.

$\vec{v}$  vector de velocidad m/s.

$T$  temperatura K.

$S_h$  es la entropía total en J/K.

$\bar{\tau}_{eff}$  tensor de tensiones Pa.

$\rho$  densidad Kg/m<sup>3</sup>.

$E$  es la energía de activación en J, para fluidos incompresibles se define como:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}$$

Donde,

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho}$$

Siendo  $Y_j$  la fracción másica de las especies y  $h_j$  coeficiente de transferencia de calor en W/(m<sup>2</sup>·K) definido como:

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT$$

Donde  $T_{ref}$  es 298,15K y  $c_{p,j}$  es el calor específico en J/(Kg·K).

#### Cálculo presión – velocidad

Para la resolución del problema se emplea una ecuación que tiene en cuenta la relación presión–velocidad con el fin de cumplir la ley de conservación de la masa y obtener el campo de presiones.

Aplicando la ecuación,

$$J_f = \rho_f \frac{a_{p,c0} v_{n,c0} + a_{p,c1} v_{n,c1}}{a_{p,c0} + a_{p,c1}} + d_f ((p_{c0} + (\nabla p)_{c0} \bar{r}_0) - (p_{c1} + (\nabla p)_{c1} \bar{r}_1)) = \hat{J}_f + d_f (p_{c0} - p_{c1})$$

Se obtiene que,

$$J_f^* = \hat{J}_f + d_f (p_{c0}^* - p_{c1}^*)$$

Donde,

$$J_f = J_f^* + d_f (p'_{c0} - p'_{c1})$$

Sustituyendo la ecuación anterior en:

$$\sum_f^{N_{faces}} J_f A_f = 0$$

Se obtiene la siguiente ecuación para la corrección de la presión:

$$a_p p' = \sum_{nb} a_{nb} p'_{nb} + \sum_f^{N_{faces}} J_f^* A_f$$

Una vez obtenidos los resultados, la presión y el flujo de las caras son corregidos mediante las expresiones:

$$p = p^* + \alpha_p p' \qquad J_f = J_f^* + d_f (p'_{c0} - p'_{c1})$$

**Análisis y propuesta de mejora de la eficiencia energética de la instalación de aceite térmico de una planta de pinturas mediante la modificación de la distribución de los productos en los reactores.**

Siendo,

$p_{cn}$  presión de celda en Pa.

$v_{n,cn}$  velocidad normal de celda en m/s.

$p^*$  presión predicha de capa en Pa.

$J_f^*$  flujo de cara en  $J/(m^2 \cdot s)$ .

$p'$  corrección de la presión en Pa.

$\alpha_p$  factor de relajación.

$J_f$  flujo de cara en  $J/(m^2 \cdot s)$ .

Tras la resolución del problema planteado mediante ANSYS Fluent aplicando las condiciones de contorno explicadas anteriormente y los métodos de cálculo expuestos, se puede observar que la temperatura del aceite térmico a lo largo de su recorrido desde las calderas hasta los cinco reactores es prácticamente invariable, siendo la temperatura del aceite térmico a la llegada al último reactor tan solo  $0,61^\circ\text{C}$  inferior que la del aceite térmico a la salida de las calderas. La evolución de la temperatura del aceite térmico se puede observar en el Gráfico 2.

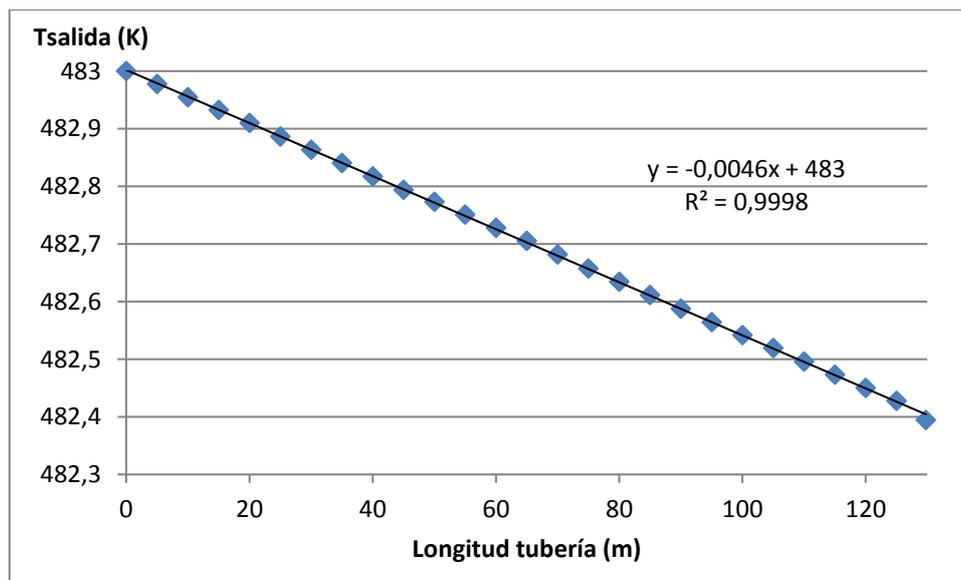


Gráfico 2. Evolución de la temperatura del aceite térmico en una tubería de 130 metros.

Fuente: Elaboración propia.

La temperatura a la que llega el aceite térmico a cada reactor se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 22. Temperatura del aceite térmico a la llegada de cada reactor.

Reactor	R1	R2	R3	R4	R5
Temperatura de llegada del aceite térmico ( $^\circ\text{C}$ )	209,793	209,738	209,618	209,605	209,384

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los resultados obtenidos se puede asegurar que la protección térmica de las tuberías es la adecuada para la instalación ya que la pérdida de calor es mínima. Por tanto, no es necesario aplicar ninguna modificación de ahorro energético debido a la pérdida de temperatura a esta parte de la instalación ya que no existen pérdidas de calor y por tanto es energéticamente eficiente.

Debido a que la temperatura del aceite térmico que llega a los reactores es prácticamente de 210°C y dado que la temperatura de aceite térmico más alta de producción es de 180°C, se propondrá a la empresa reducir la temperatura a la que deben de calentar el aceite térmico en las calderas, ya que esta bajada de temperatura puede suponer un ahorro energético en gas natural.

### **5.2.1 Estudio del sistema de enfriamiento de los reactores R3 y R4**

Como se ha podido comprobar el sistema de calentamiento del aceite térmico y su transporte es eficiente. A continuación se considera el sistema de enfriamiento de aceite térmico existente en los propios reactores.

Como se ha explicado anteriormente el proceso de enfriamiento de los reactores se realiza mediante la recirculación del aceite térmico al intercambiador de calor que gracias al uso de agua de red la temperatura del aceite térmico disminuye aumentando, en consecuencia, la del agua.

La propuesta de mejora que se quiere implementar tiene como idea principal aprovechar el calor extraído del aceite térmico caliente cuando éste se quiere enfriar en un proceso de producción. Para conseguir aprovechar el calor extraído se propone como método de enfriamiento utilizar el aceite térmico frío que ha sido eliminado de otro proceso.

Como se va a trabajar con los reactores R3 y R4 se estudian las temperaturas más desfavorables que se alcanzan durante la fabricación de los productos producidos en ambos reactores. Se puede observar que los productos S, AE, AF y AG alcanzan, en diversas etapas, temperaturas de aceite térmico de 30°C mientras que los productos Z y W tienen, en determinados cambios de etapas, que bajar la temperatura del aceite térmico de 170 a 70°C y por tanto tiene que bajar la temperatura un total de 100°C

Debido a que estos son los cambios más bruscos de temperatura del aceite térmico que se producen en los reactores R3 y R4 durante el proceso de producción, se estudia en el presente Trabajo Fin de Grado cuanto aceite térmico a 30°C es necesario para enfriar de 170 a 70°C el aceite térmico y cuanto aceite térmico proveniente de las calderas a 210°C es necesario para aumentar de 30 a 160°C el aceite térmico.

Con el estudio de estos procesos se puede determinar cuánto aceite térmico de 30°C se va a obtener de un proceso y en consecuencia cuánto aceite térmico a 30°C se puede introducir en el proceso a enfriar.

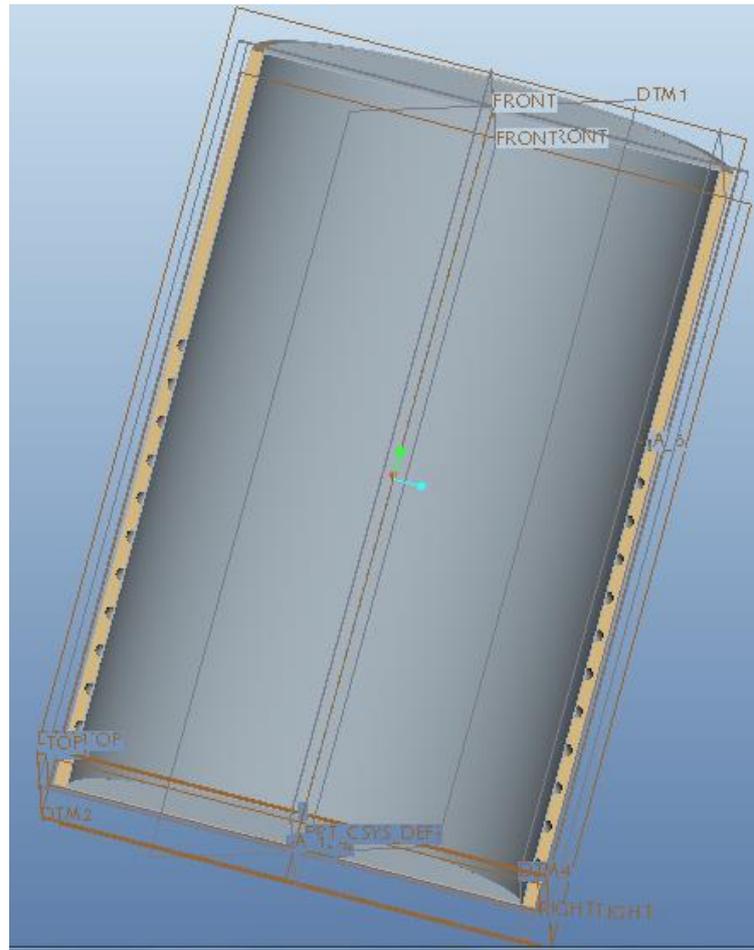
Para obtener la solución a este problema, debido a que el modelo del reactor donde se producen los cambios de temperatura es complejo y por tanto los cálculos también lo son, se emplea la herramienta de cálculo ANSYS para obtener el comportamiento del reactor de producción.

Para obtener los resultados finales, los pasos a seguir son los mismos que los explicados anteriormente:

1. Modelado de la instalación.
2. Mallado de la estructura.
3. Aplicación de métodos matemáticos para su resolución.

Debido a que los reactores con los que se trabaja son iguales, el modelado del reactor es el mismo para ambos. El modelado, realizado con CREO es el que se puede observar en la Ilustración 4:

**Análisis y propuesta de mejora de la eficiencia energética de la instalación de aceite térmico de una planta de pinturas mediante la modificación de la distribución de los productos en los reactores.**



**Ilustración 4. Reactor modelado en CREO.**

Fuente: Elaboración propia.

Tras el modelado de la instalación se realiza el mallado el cual permite realizar los cálculos sobre el modelo de forma precisa gracias a la descomposición del modelo en segmentos. El mallado realizado con ANSYS Meshing es el que se puede observar en la Ilustración 5.

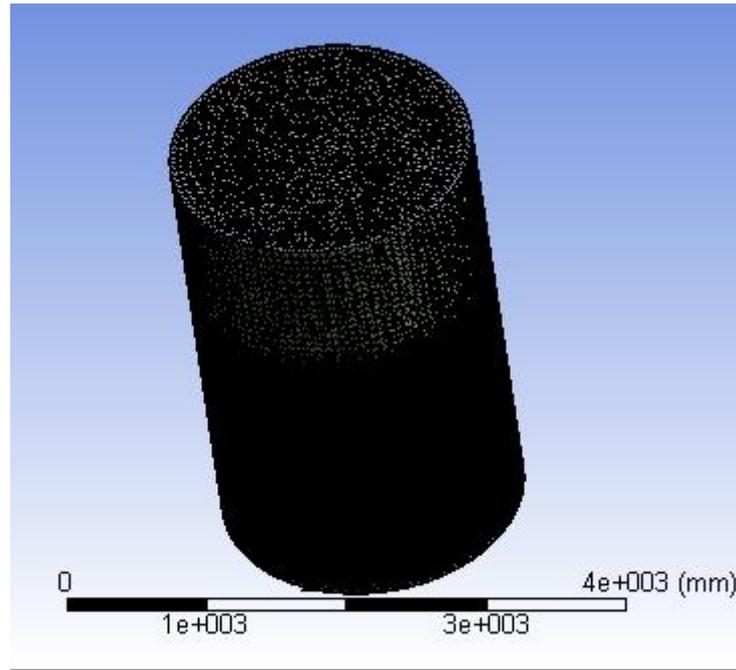


Ilustración 5. Mallado del reactor en ANSYS Meshing.

Fuente: Elaboración propia.

Los métodos matemáticos aplicados al reactor se corresponden con los métodos de cálculo aplicados a las tuberías. Al igual que con las tuberías, para obtener el resultado de la simulación se tiene que calcular:

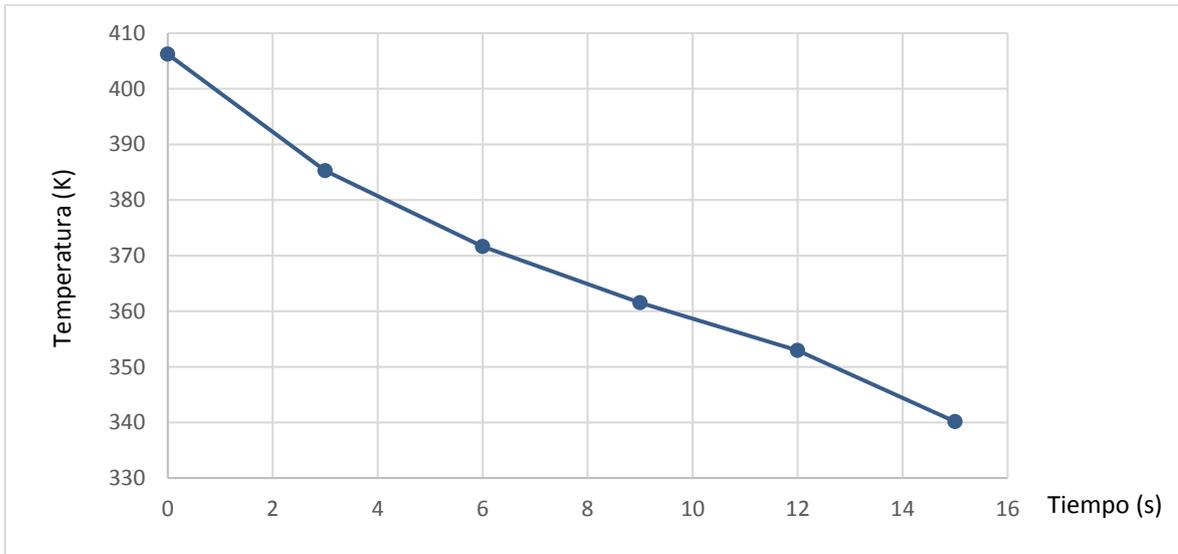
- El modelo tiene flujo turbulento y por tanto se diferencia entre la viscosidad del fluido en zonas cercanas a la pared y en lejanas.
- La transferencia de calor existente en el modelo,
- La relación presión-velocidad con el fin de cumplir la ley de conservación de la masa y obtener el campo de presiones.

Tras la resolución del problema planteado mediante ANSYS Fluent aplicando las condiciones de contorno explicadas anteriormente y los métodos de cálculo expuestos se obtienen los siguientes resultados para las dos situaciones trabajadas.

#### Bajada de temperatura del aceite térmico con aceite térmico frío

Como se ha explicado anteriormente, la simulación realizada ha obtenido el resultado del tiempo necesario para bajar la temperatura de 170°C a 70°C mediante la entrada de aceite frío a 30°C. Los resultados obtenidos se pueden observar en el Gráfico 3.

**Análisis y propuesta de mejora de la eficiencia energética de la instalación de aceite térmico de una planta de pinturas mediante la modificación de la distribución de los productos en los reactores.**



**Gráfico 3. Temperatura del aceite térmico en el serpentín a la entrada de aceite térmico frío.**

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se calcula el caudal de aceite térmico frío introducido por segundo:

$$Q = v \cdot A = 10 \frac{m}{s} \cdot \left( \frac{\pi \cdot 0,0508}{2} \right)^2 m^2 = 0,0637 \frac{m^3}{s}$$

Donde,

v es la velocidad a la que se introduce el aceite térmico.

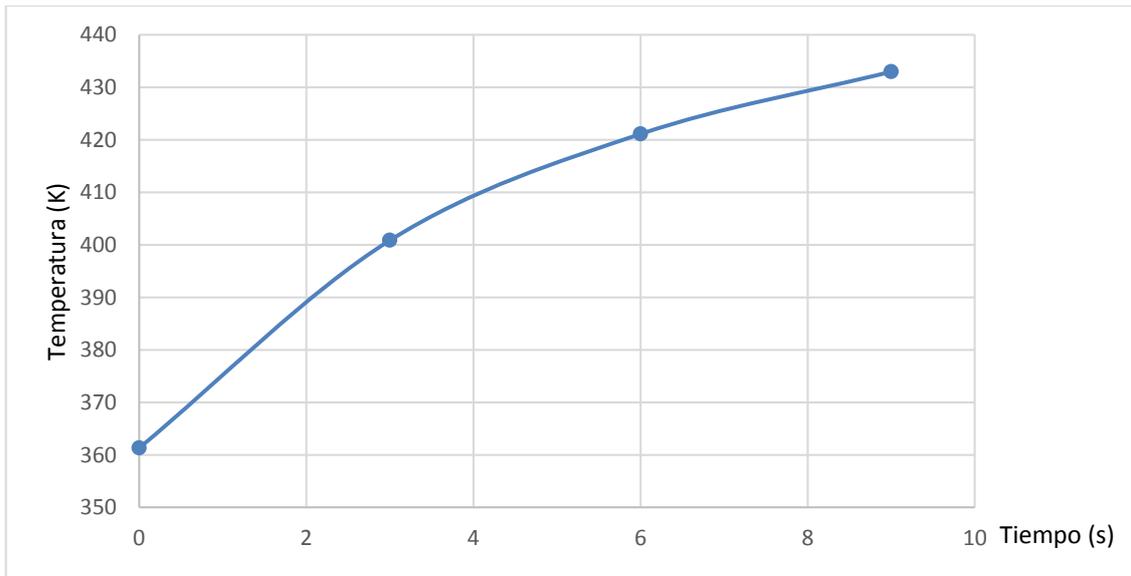
A es el área del serpentín por donde circula el aceite

Obtenido el tiempo que tarda en estabilizarse la temperatura del aceite térmico a 70°C y sabiendo el caudal de entrada de aceite térmico frío, se calcula el volumen de aceite térmico frío introducido.

$$V = Q \cdot t = 0,0637 \frac{m^3}{s} \cdot 15s = 0,955m^3$$

Subida de temperatura del aceite térmico con aceite térmico caliente

Para el caso de subida de temperatura, la simulación realizada ha obtenido el resultado del tiempo necesario para subir la temperatura de 30°C a 160°C mediante la entrada de aceite caliente a 210°C. Los resultados obtenidos se pueden observar en el Gráfico 4.



**Gráfico 4. Temperatura del aceite térmico en el serpentín a la entrada de aceite térmico caliente**

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se calcula el caudal de aceite térmico caliente introducido por segundo:

$$Q = v \cdot A = 10 \frac{m}{s} \cdot \left( \frac{\pi \cdot 0,0508}{2} \right)^2 m^2 = 0,0637 \frac{m^3}{s}$$

Donde,

v es la velocidad a la que se introduce el aceite térmico.

A es el área del serpentín por donde circula el aceite

Obtenido el tiempo que tarda en estabilizarse la temperatura del aceite térmico a 160°C y sabiendo el caudal de entrada de aceite térmico caliente, se calcula el volumen de aceite térmico caliente introducido.

$$V = Q \cdot t = 0,0637 \frac{m^3}{s} \cdot 9s = 0,5733m^3$$

## 5.2 Resultados obtenidos

Como se ha obtenido a partir de las simulaciones del reactor, para el proceso de enfriamiento estudiado son necesarios 0,955m<sup>3</sup> de aceite térmico a 30°C para enfriar el aceite térmico del interior del serpentín a la temperatura deseada. Por otra parte, del proceso de calentamiento del aceite térmico del interior del serpentín se obtienen 0,5733m<sup>3</sup> de aceite térmico frío.

Por tanto para las etapas del proceso estudiadas la totalidad del aceite térmico frío sería utilizado para enfriar el aceite térmico del proceso que se esté realizando simultáneamente y, por tanto, no sería necesario devolver a las calderas aceite térmico a tan baja temperatura.

### Cálculo ahorro energético

A continuación se realiza el cálculo de ahorro energético que conlleva esta propuesta de mejora.

El calor específico del aceite térmico es de 2.000J/kgK que en J/m<sup>3</sup>K es igual a:

**Análisis y propuesta de mejora de la eficiencia energética de la instalación de aceite térmico de una planta de pinturas mediante la modificación de la distribución de los productos en los reactores.**

$$2.000 \frac{J}{kgK} \cdot \rho = 2.000 \frac{J}{kgK} \cdot 864 \frac{kg}{m^3} = 1.728.000 \frac{J}{m^3K}$$

Como el coste del gas natural es de  $8,78 \cdot 10^{-9}$  €/J, se obtiene el coste de calentar  $0,5733m^3$  de aceite térmico de  $30^\circ C$  a  $210^\circ C$ :

$$8,78 \cdot 10^{-9} \frac{€}{J} \cdot 1.728.000 \frac{J}{m^3K} \cdot 0,5733m^3 \cdot (483 - 303)K = 1,566€$$

Por otra parte el aceite térmico que es devuelto a las calderas tiene un coste de calentamiento:

$$8,78 \cdot 10^{-9} \frac{€}{J} \cdot 1.728.000 \frac{J}{m^3K} \cdot 0,5733m^3 \cdot (483 - 443)K = 0,348€$$

Por tanto el ahorro energético por cada vez que se realice este proceso es de:

$$1,566 - 0,348 = 1,218€$$

Debido a que este proceso se realiza 12 veces al mes se obtiene un ahorro mensual de:

$$12 \cdot 1,218 = 14,616€$$

El ahorro anual es por tanto de:

$$14,616 \cdot 12 = 175,39€$$

Teniendo en cuenta que los procesos de enfriamiento son más numerosos durante la producción y que no se realizan tan sólo una vez durante el tiempo de fabricación, se puede establecer que siempre hay aceite térmico frío almacenado y por tanto la totalidad del aceite térmico caliente sería enfriado con este, por tanto, siguiendo el proceso de cálculo anterior, se obtendría un ahorro anual de energía de 292,176€.

$$8,78 \cdot 10^{-9} \frac{€}{J} \cdot 1.728.000 \frac{J}{m^3K} \cdot 0,955m^3 \cdot (483 - 303)K = 2,608€$$

$$8,78 \cdot 10^{-9} \frac{€}{J} \cdot 1.728.000 \frac{J}{m^3K} \cdot 0,955m^3 \cdot (483 - 443)K = 0,579€$$

$$2,608 - 0,579 = 2,029€$$

$$12 \cdot 12 \cdot 2,029 = 292,176€$$

Se debe de tener en cuenta que este ahorro es calculado para tan solo una etapa de producción y que en la actualidad se producen 51 productos en la empresa cada uno con sus etapas de producción tal y como se ha mostrado anteriormente, pero debido a la falta de datos proporcionados por la empresa sólo se ha calculado para esta etapa de producción. Por tanto, se puede concluir que este proceso mejora la eficiencia energética de la instalación lo que conlleva a un ahorro económico diario.

Este modelo realizado será proporcionado a la empresa para que pueda realizar el ahorro energético obtenido de la totalidad de la producción.

### 5.3 Propuesta de mejora

A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que utilizar el aceite térmico frío para enfriar un proceso es beneficioso. Esta propuesta de mejora permite ahorrar gas natural que era empleado para calentar el aceite de 30°C debido a que éste es devuelto a una mayor temperatura.

A raíz de los resultados obtenidos se elabora el plan de producción mensual para un mes de 31 días, éste queda elaborado de la siguiente forma:

Tabla 23. Plan de producción mensual propuesto.

	Lunes		Martes		Miércoles		Jueves		Viernes		Sábado		Domingo	
	R3	R4	R3	R4	R3	R4	R3	R4	R3	R4	R3	R4	R3	R4
<b>Semana 1</b>	W	AE M	W	AG M	Z	S M	X	S M	N AC	M	L	N O	X	Y
<b>Semana 2</b>	W	AE M	W	S M	Z	S M	X	AD M	N O	M L	L	N	L	AB
<b>Semana 3</b>	W	AE M	W	S M	X	R	X	AC N	N O	M	P	AB	L	AC
<b>Semana 4</b>	W	AE M	W	S M	X	R	X	L	L	N	L	AB	L	AC
<b>Semana 5</b>	W	AF	W	AF										

Fuente: Elaboración propia.

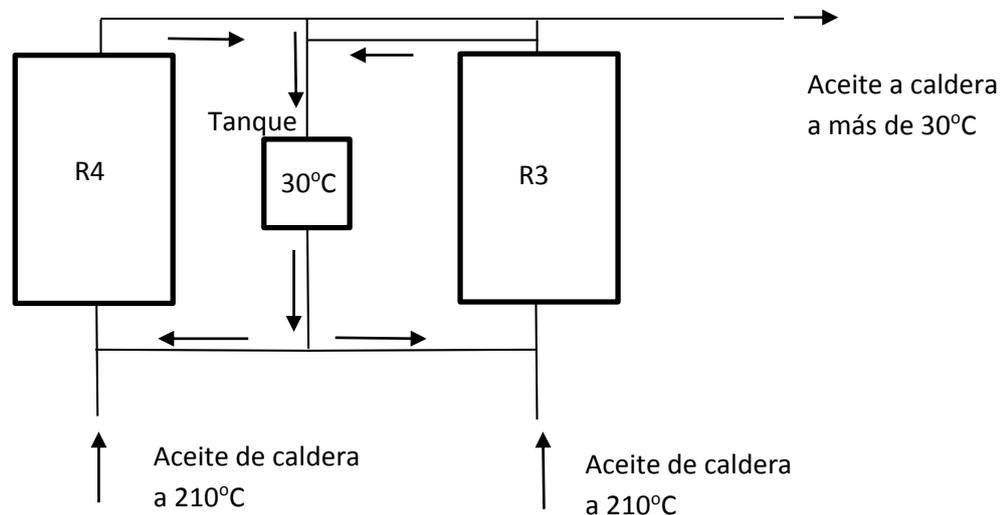
Para la elaboración del plan de producción mensual se ha tenido en cuenta que los procesos cuya temperatura de producción tuviera que ser bajada en más ocasiones, debido a que el cambio de etapa supone un cambio a set-point más bajo, estuviesen produciéndose de forma simultánea a otro proceso paralelo cuya temperatura del aceite estuviera inicialmente a 30°C y haya tenido que ser aumentada, con lo cual se extraería de este reactor aceite térmico a muy bajas temperaturas que podría ser utilizado para enfriar el proceso paralelo.

## Análisis y propuesta de mejora de la eficiencia energética de la instalación de aceite térmico de una planta de pinturas mediante la modificación de la distribución de los productos en los reactores.

Además se ha tenido en cuenta para la elaboración del plan que el tiempo de producción de cada resina se ajustase al tiempo de elaboración de la resina que se está produciendo paralelamente evitando tiempos muertos y ajustándose al volumen de producción demandado.

Se debe de tener en cuenta que con esta redistribución de los productos algunos productos que se producción en el R3 ahora se producen en el R4. Este cambio de reactor no influye a la fabricación ya que como se ha explicado anteriormente los productos producidos en los reactores R3 y R4 pueden producirse en ambos reactores.

Para implementar esta mejora en la instalación se crea un sistema que permite llevar el aceite frío que es extraído de los reactores a un tanque intermedio. Una vez el aceite térmico frío sea demandado por alguno de los dos reactores éste será enviado desde el tanque hasta el circuito de recirculación del reactor. Para ello, es necesario modificar la instalación tal y como muestra la siguiente figura:



**Figura 8: Propuesta de mejora del sistema de enfriamiento de los reactores.**

Fuente: Elaboración propia.

Para implementar estas modificaciones en la instalación es necesario:

- Tanque de 5000 litros de capacidad.
- 6 metros de tubería de acero al carbono de 6 pulgadas.
- 6 válvulas de 3 vías automáticas.
- 1 bomba de aceite térmico.

Donde la bomba servirá para impulsar el aceite térmico contenido en el tanque al reactor que lo demande.



**Análisis y propuesta de mejora de la eficiencia energética de la instalación de aceite térmico de una planta de pinturas mediante la modificación de la distribución de los productos en los reactores.**

## **PRESUPUESTO**



## CAPÍTULO 1: PRESUPUESTO Y MEDICIONES

### 1.1 Justificación de precios personal

Tabla 24. Cuadro de precios personal.

Denominación del personal	Precio (€/h)	Horas	Total
1 Autora del TFG , funciones de Graduada en Ingeniería Química*	12,66	300	3.797,63 €
<b>Total personal:</b>			<b>3.797,63€</b>

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presenta de forma desglosada el coste del personal que ha realizado o colaborado con el presente Trabajo Fin de Grado. En el desglose se presenta de forma detallada el jornal a pagar, la paga extraordinaria proporcional, la dieta y el importe por desplazamiento a percibir por cada persona.

Tabla 25. Cuadro de precios personal detallado.

Designación	Importe parcial	Importe total
<b>Graduada en Ingeniería Química</b>		
Sueldo base correspondiente a 300 h. trabajadas. Se tiene en cuenta que el sueldo base mensual de 1.687,02€ corresponde a 21 días laborales por mes, 8 horas al día.	3.012,54€	
Proporción de paga extraordinaria correspondiente a 300h. trabajadas. Se tienen en cuenta dos pagas anuales de 1.687,02€.	502,09€	
Dieta por desplazamientos. El importe a percibir por día es de 49€.	245€	
Importe por desplazamiento. El importe a percibir es de 0,19€/km.	38€	
<b>Total personal:</b>		<b>3.797,63 €</b>

Fuente: Elaboración propia.

\*Salarios correspondientes al BOE 25 de octubre de 2013.

## 1.2 Justificación de precios material

Tabla 26. Cuadro de precios de materiales.

<b>Designación</b>	<b>Precio unidad(€)</b>	<b>Medida (unidades)</b>	<b>Total (€)</b>
Tubería aislada de 6 pulgadas	475,15	6	2.850,9
Tanque de acero de 5m <sup>3</sup>	1.000	1	1.000
Válvula automática 3 vías	128,33	6	769,98
Bomba de aceite térmico	4.500	1	4.500
<b>Total coste:</b>			<b>9.120,88€</b>

Fuente: Elaboración propia.

### 1.3 Justificación de costes generales

Tabla 27. Cuadro de costes generales.

Designación	Precio (€)	Cantidad	Total
<b>Licencia ANSYS 15.0</b>			
Licencia ANSYS, IVA incluido.	19.717,48	0,25	4.929,37€
			<b>4.929,37€</b>
<b>Licencia CREO</b>			
Licencia CREO anual, IVA incluido.	5000	0,25	1.250€
			<b>500€</b>
<b>Licencia Microsoft Word</b>			
Licencia Microsoft Word anual, IVA incluido.	153	0,25	38,25€
			<b>38,25€</b>
<b>JAZZTEL ADSL</b>			
Jazztel ADSL hasta 12 megas (19,30€ ADSL + 18,14 cuota de línea al mes, IVA incluido)	37,44	4	149,76€
			<b>149,76€</b>
<b>Ordenador</b>			
Ordenador portátil, IVA incluido.	650	1	650€
			<b>650€</b>
<b>Total coste:</b>			<b>6.267,38 €</b>

Fuente: Elaboración propia.

#### 1.4 Presupuesto general

Tabla 28. Presupuesto general.

<b>Designación</b>	<b>Total (€)</b>
Costes de personal	3.797,63
Costes de material	9.120,88
Costes generales	6.267,38
<b>Total coste:</b>	<b>19.185,89</b>

Fuente: Elaboración propia.

Asciende el Trabajo Fin de Grado a la expresada cantidad de **DIECINUEVEMIL CIENTO OCHENTA Y CINCO CON OCHENTA Y NUEVE EUROS.**

## **BIBLIOGRAFÍA**

ANSYS, Inc (2013). *ANSYS Fluent Theory Guide*.

ESPAÑA MINISTERIO DE EMPLEO Y SEGURIDAD SOCIAL. *BOE* 25 de octubre de 2013, núm. 256, p. 86828-86831.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. *Encuesta de consumos energéticos*. <<https://www.upv.es/entidades/ADE/infoweb/fade/info/U0655397.pdf>> [Consulta: 20 de mayo de 2015]

J. CHAPMAN, A. (1984). *Transmisión del calor*. Móstoles: Bellisco.

MARTÍ MIQUEL, C. (1979). *Práctica de los fluidos térmicos*. Barcelona: Marcombo.

MILIARIUM, INGENIERÍA CIVIL Y MEDIO AMBIENTE. *Propiedades térmicas de materiales*. <<http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp>> [Consulta: 15 de junio de 2015]

PRECIOGAS. *Evolución precio gas natural*. <<http://precioogas.com/evolucion>> [Consulta: 20 de mayo de 2015]

TÁBOAS TOUCEDA, F. (2007). "Transferencia de calor en intercambiadores de placas" en Táboas Touceda, F. *Estudio del proceso de ebullición forzada de la mezcla amoníaco/agua en intercambiadores de placas para equipos de refrigeración por absorción*. Tarragona: Universitat Rovira i Virgili.

*Transmisión de calor por convección. Correlaciones para la convección natural*. <<https://lopezva.files.wordpress.com/2011/10/correlaciones-para-la-conveccion-natural.pdf>> [Consulta: 15 de junio de 2015]



**Análisis y propuesta de mejora de la eficiencia energética de la instalación de aceite térmico de una planta de pinturas mediante la modificación de la distribución de los productos en los reactores.****ANEXO 1: NOMENCLATURA**

A:	área
°C:	grados centígrados (celsius)
Cp:	calor específico
$c_{p,j}$ :	calor específico
cp:	centiPoise
E:	energía de activación
€:	Euros
h:	coeficiente de convección
h.:	Hora
$h_j$ :	coeficiente de transferencia de calor
J:	Julios
$\vec{J}_j$ :	difusión del flujo de las especies
$J_f$ :	flujo de cara
$J_f^*$ :	flujo de cara
k:	conductividad térmica
k:	energía cinética por unidad de masa
K:	Kelvin
$k_t$ :	conductividad térmica en condiciones turbulentas
kg:	Quilogramo
l:	litros
$l_\mu$ :	longitud
m:	metro
m <sup>2</sup> :	metro cuadrado
m <sup>3</sup> :	metro cúbico

mm:	milímetro
mm <sup>2</sup> :	milímetro al cuadrado
p:	presión
$p_{cn}$ :	presión de celda
$p'$ :	corrección de la presión
$p^*$ :	presión predicha de capa
Pa:	pascal
Q:	caudal
R1:	reactor 1
R2:	reactor 2
R3:	reactor 3
R4:	reactor 4
R5:	reactor 5
Re:	número de Reynolds
s:	segundo
$S_h$ :	entropía total
T:	temperatura
Tref:	temperatura de referencia
v:	velocidad
$v_{n,cn}$ :	velocidad normal de celda
$\vec{v}$ :	vector de velocidad
W:	vatio
y:	distancia a la pared más cercana
$Y_j$ :	fracción másica de las especies
$\alpha_p$ :	factor de relajación
$\rho$ :	densidad
$\mu$ :	viscosidad dinámica

**Análisis y propuesta de mejora de la eficiencia energética de la instalación de aceite térmico de una planta de pinturas mediante la modificación de la distribución de los productos en los reactores.**

$\mu_{t,2layer}$ : viscosidad turbulenta

$\bar{\tau}_{eff}$ : tensor de tensiones