

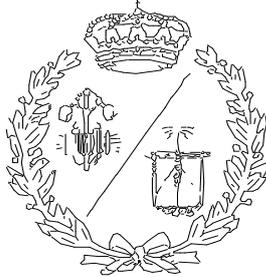
TRABAJO FIN DE GRADO

"DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR"

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**DISEÑO Y CÁLCULO DE UN
INTERCAMBIADOR DE CALOR**
(Design and Analysis of a Heat Exchanger)

Para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

Autor: Jacobo Cabanzón Labat

Mayo - 2018

TRABAJO FIN DE GRADO

“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

ÍNDICE

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. | CARACTERÍSTICAS GENERALES..... | 2 |
| 2.1. | CONCEPTOS | 2 |
| 2.2. | FUNDAMENTOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR..... | 4 |
| 2.3. | CLASIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR | 6 |
| 3. | NORMATIVA APLICABLE | 19 |
| 3.1. | MANUAL HEDH..... | 19 |
| 3.2. | DESCRIPCIÓN NORMA ASME-SECCIÓN VIII..... | 20 |
| 3.3. | RECOMENDACIONES TEMA..... | 21 |
| 4. | IMÁGENES DE INTERCAMBIADORES REALES DE CARCASA Y TUBOS | 23 |
| 5. | DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO..... | 25 |
| 5.1. | PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 25 |
| 5.2. | DEFINICIÓN DE OBJETIVOS | 26 |
| 5.3. | CONSIDERACIONES INICIALES..... | 27 |
| 5.4. | CÁLCULOS PREVIOS AL DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR | 27 |
| 5.5. | SELECCIÓN DE MATERIALES..... | 36 |
| 5.6. | APLICACIÓN AL DISEÑO: PARTES DEL INTERCAMBIADOR | 36 |
| 6. | PLANOS | 47 |
| 7. | RESULTADOS | 47 |
| 7.1. | CONDICIONES DEL ANÁLISIS..... | 47 |
| 7.2. | RESULTADOS OBTENIDOS | 52 |
| 7.3. | OTROS GRÁFICOS INTERESANTES..... | 58 |
| 8. | PRESUPUESTO | 60 |
| 8.1. | PRESUPUESTO OFICINA TÉCNICA | 60 |
| 8.1.1. | OFICINA TÉCNICA..... | 60 |
| 8.1.2. | LICENCIAS DE SOFTWARE | 60 |
| 8.1.3. | NORMATIVA APLICABLE | 60 |
| 8.2. | PRESUPUESTO DE MATERIALES | 61 |
| 8.3. | PRESUPUESTO DE FABRICACIÓN | 61 |
| 8.3.1. | MANO DE OBRA | 61 |
| 8.3.2. | OPERACIONES | 61 |
| 8.4. | BALANCE FINAL DEL PRESUPUESTO | 62 |
| 9. | CONCLUSIÓN..... | 63 |
| 10. | BIBLIOGRAFÍA..... | 64 |

TRABAJO FIN DE GRADO

"DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR"

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

LEYENDA DE LAS FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1: EJEMPLOS DE CONDUCCIÓN, CONVECCIÓN Y RADIACIÓN | 5 |
| FIGURA 2: GRÁFICOS DE FLUJO EN PARALELO Y A CONTRACORRIENTE | 6 |
| FIGURA 3: CALDERA DE COCINA | 9 |
| FIGURA 4: CALDERA INDUSTRIAL | 10 |
| FIGURA 5: RADIADOR VOLKSWAGEN POLO | 12 |
| FIGURA 6: FUNCIONAMIENTO AIRE ACONDICIONADO | 13 |
| FIGURA 7: PARTE VISIBLE AIRE ACONDICIONADO | 14 |
| FIGURA 8: INTERCAMBIADOR TUBULAR | 15 |
| FIGURA 9: INTERCAMBIADOR DE PLACAS | 16 |
| FIGURA 10: INTERCAMBIADOR CARCASA Y TUBOS | 17 |
| FIGURA 11: INTERCAMBIADOR TUBO ESPIRAL | 18 |
| FIGURA 12: CLASIFICACIÓN INTERCAMBIADORES CARCASA Y TUBO SEGÚN TEMA | 22 |
| FIGURA 13: INTERCAMBIADOR SIN CARCASA | 23 |
| FIGURA 14: PLACA ENTRADA INTERCAMBIADOR 1-2 | 23 |
| FIGURA 15: TUBOS EN FORMA DE U EN EL INTERCAMBIADOR | 24 |
| FIGURA 16: INTERCAMBIADOR CON CONDUCTO DE ENTRADA A LA CARCASA | 24 |
| FIGURA 17: INTERCAMBIADOR CON LA CARCASA INSTALADA | 25 |
| FIGURA 18: ALZADO DEL CUBÍCULO DEL INTERCAMBIADOR (EN METROS) | 26 |
| FIGURA 19: PARÁMETROS CORRELACIÓN DE ZUKAUSKAS | 32 |
| FIGURA 20: FACTOR DE CORRECCIÓN LMTD PARA INTERCAMBIADORES 1-2 | 34 |
| FIGURA 21: POSIBLES DISTRIBUCIONES DE LOS TUBOS EN LA CARCASA | 37 |
| FIGURA 22: TUBO EN FORMA DE U | 39 |
| FIGURA 23: PLACA TUBULAR | 40 |
| FIGURA 24: TIPOS DE DEFLECTORES TRASVERSALES | 41 |
| FIGURA 25: DEFLECTOR | 42 |
| FIGURA 26: ENSAMBLAJE CON TUBOS, PLACAS Y DEFLECTORES (1) | 42 |
| FIGURA 27: ENSAMBLAJE CON TUBOS, PLACAS Y DEFLECTORES (2) | 43 |
| FIGURA 28: CABEZAL FINAL | 44 |

TRABAJO FIN DE GRADO

"DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR"

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

| | |
|--|----|
| FIGURA 29: CARCASA | 45 |
| FIGURA 30: CABEZAL DE ENTRADA | 46 |
| FIGURA 31: DETALLE DE LOS REDONDEOS EN CABEZAL Y CARCASA | 46 |
| FIGURA 32: ACTIVACIÓN DE LA CONDUCCIÓN DE CALOR POR LOS SÓLIDOS | 48 |
| FIGURA 33: DEFINICIÓN DEL AGUA COMO LÍQUIDO DEL PROYECTO | 49 |
| FIGURA 34: DEFINICIÓN DEL COBRE COMO MATERIAL POR DEFECTO | 50 |
| FIGURA 35: CAMBIO DE ALGUNOS COMPONENTES A STEEL STAINLESS 302 | 50 |
| FIGURA 36: DEFINICIÓN DE LA PARED EXTERIOR COMO ADIABÁTICA | 51 |
| FIGURA 37: EJEMPLO DE CONDICIONES DE ENTRADA Y SALIDA AGUA MOTOR | 51 |
| FIGURA 38: TEMPERATURA DEL AGUA MOTOR A LO LARGO DE LA CARCASA | 52 |
| FIGURA 39: TEMPERATURA DEL AGUA MOTOR A LA SALIDA | 52 |
| FIGURA 40: CAMBIOS DE TEMPERATURA DEL AGUA MARINA POR LOS TUBOS | 53 |
| FIGURA 41: TEMPERATURA DEL AGUA MARINA A LA SALIDA | 53 |
| FIGURA 42: CALOR QUE ENTRA EN LA CARCASA | 53 |
| FIGURA 43: CALOR QUE SALE DE LA CARCASA | 53 |
| FIGURA 44: CALOR QUE ENTRA EN LOS TUBOS | 54 |
| FIGURA 45: CALOR QUE SALE DE LOS TUBOS | 54 |
| FIGURA 46. COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN LOS TUBOS | 55 |
| FIGURA 47: EVOLUCIÓN DE LA PRESIÓN EN EL PLANO CENTRAL DE LA CARCASA | 56 |
| FIGURA 48: PRESIÓN EN LA SUPERFICIE DE ENTRADA DE LA CARCASA | 56 |
| FIGURA 49: PRESIÓN EN LA SUPERFICIE DE ENTRADA DE LOS TUBOS | 56 |
| FIGURA 50: VELOCIDAD DEL AGUA A LO LARGO DE LA CARCASA | 57 |
| FIGURA 51: TEMPERATURA DE LA CARCASA (SOLID) | 58 |
| FIGURA 52: TEMPERATURA DE LOS DEFLECTORES | 58 |
| FIGURA 53: PRESIÓN EN EL INTERIOR DE LOS TUBOS | 59 |
| FIGURA 54: PRESIÓN A LO LARGO DE LA CARCASA | 59 |

TRABAJO FIN DE GRADO

“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

1. INTRODUCCIÓN

Los intercambiadores de calor son uno de los equipos más comunes encontrados en la mayoría de industrias. El papel de éstos ha adquirido una gran importancia ante la necesidad de ahorrar energía y disponer de equipos óptimos no sólo en función de su análisis térmico y del rendimiento económico en la instalación, sino en función de otros factores como el aprovechamiento energético del sistema y la disponibilidad y cantidad de energía y materias primas necesarias para cumplir una determinada función. Existen varios tipos de intercambiadores de calor y actualmente alrededor del mundo se ofrecen en el mercado multitud de diseños diferentes de éstos.

Es necesario precisar que en cualquier tipo de intercambiador el calor se transfiere en una sola dirección: del fluido con mayor temperatura hacia el fluido de menor temperatura; sin embargo, los fluidos utilizados pueden estar en contacto entre ellos o no; en cuyo caso el calor es transferido del fluido con mayor temperatura hacia el de menor temperatura al encontrarse ambos en contacto térmico con las paredes, normalmente metálicas, que los separan.

En este caso se trabajará con el intercambiador de calor de carcasa y tubos porque es el más común en las aplicaciones industriales en las que se demanda de manera significativa por existir altas temperaturas y presiones, utilizándose para aquellos procesos que requieran enfriamiento, calentamiento o cambio de estado entre líquidos y gases, siendo equipos preparados para las más exigentes condiciones de trabajo y operación. Estos intercambiadores de calor de casco y tubo son tan importantes y tan ampliamente utilizados en la industria, que su diseño ha experimentado un gran desarrollo, existiendo en la actualidad normas ideadas y aceptadas por TEMA (Tubular Exchanger Manufacturer Association) que especifican con detalle los materiales, métodos de construcción, técnicas de diseño y sus dimensiones.

2. CARACTERÍSTICAS GENERALES

2.1. CONCEPTOS

- **Intercambiador de calor:**

Un equipo de intercambio de calor es el que transfiere energía térmica desde una fuente o un fluido a alta temperatura hacia un fluido a baja temperatura con ambos fluidos moviéndose a través del aparato. Esta transferencia puede realizarse por contacto directo entre los fluidos o a través de una pared que separa la fuente y el fluido o los fluidos.

- **Calor:**

Transferencia de energía térmica (es decir, de energía y entropía). Ocurre siempre desde un material caliente a uno más frío. La transferencia de calor puede cambiar la energía interna de los materiales.

- **Energía interna:**

La energía que poseen todas las moléculas y electrones de los que están compuestos los materiales por el hecho de estar vibrando continuamente.

- **Presión de operación o presión de trabajo (P_o):**

Presión manométrica a la que está un equipo en condiciones normales de operación. En el caso de los intercambiadores de calor nos encontramos con dos presiones de operación: una para el lado de los tubos y otra para el lado de la carcasa.

TRABAJO FIN DE GRADO

“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

- **Presión de diseño (PD)**

Presión utilizada en el diseño del intercambiador de calor.

- **Presión de trabajo máxima permisible (MAWP):**

Presión máxima a la que puede ser sometido un intercambiador durante su funcionamiento. Para poder calcular esta presión, es necesario que el equipo se encuentre en su posición normal de operación, que haya condiciones de corrosión y que esté sometido a la temperatura de diseño.

- **Temperatura de operación (T_o):**

Temperatura a la que el intercambiador estará expuesto habitualmente durante su funcionamiento.

- **Temperatura de diseño (TD):**

Temperatura que se utilizará durante el diseño del intercambiador de calor. Puede determinarse de dos formas distintas:

- Si T_o es mayor que 0°C (32°F) la temperatura de diseño será la que resulte mayor de las siguientes.

$$TD \begin{cases} 1.1T_o \\ T_o - 3.89^{\circ}\text{C} \\ 65.56^{\circ}\text{C} \end{cases}$$

- Si T_o es menor que 0°C (32°F) se deberá especificar a la vez la temperatura mínima y la máxima anticipada, no pudiendo sobrepasar ésta última los 65.56°C (150°F) en el lado de la carcasa.

- **Eficiencia de las soldaduras (E):**

Se utiliza para comprobar si se puede confiar en las soldaduras y con qué intensidad ha sido realizado el proceso de inspección. Se mide en porcentajes. En esta tabla se aprecia la eficiencia en caso de soldadura a tope con penetración completa:

| | RADIOGRAFIADA 100% | RADIOGRAFIADA POR PUNTOS | SIN RADIOGRAFIAR |
|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| <i>Eficiencia (E)</i> | 1.00 | 0.85 | 0.7 |

2.2. FUNDAMENTOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor clásica ocurre solamente a través de los procesos de conducción, convección, radiación o cualquier combinación de ellos. La transferencia de calor asociada al cambio de fase de una sustancia (como, por ejemplo, la asociada al proceso de ebullición del agua líquida) a veces se considera como un tipo de convección. La definición de estos procesos es la siguiente:

- **Conducción:**

Es un proceso mediante el cual fluye el calor desde una región alta de temperatura o a otra de baja temperatura dentro de un medio (sólido, líquido y gaseoso), o entre medios diferentes que estén en contacto físico directo. La energía se transmite por comunicación molecular sin desplazamiento apreciable de las moléculas.

- **Convección:**

Es un proceso de transporte de energía por la acción combinada de conducción de calor, almacenamiento de energía y movimiento de mezcla. Tiene gran importancia como mecanismo de transferencia de energía entre una superficie sólida, líquido o gas.

- **Radiación:**

Es un proceso por el cual fluye calor desde un cuerpo de alta temperatura a uno de baja temperatura, cuando estos están separados por un espacio, incluso puede ser el vacío.

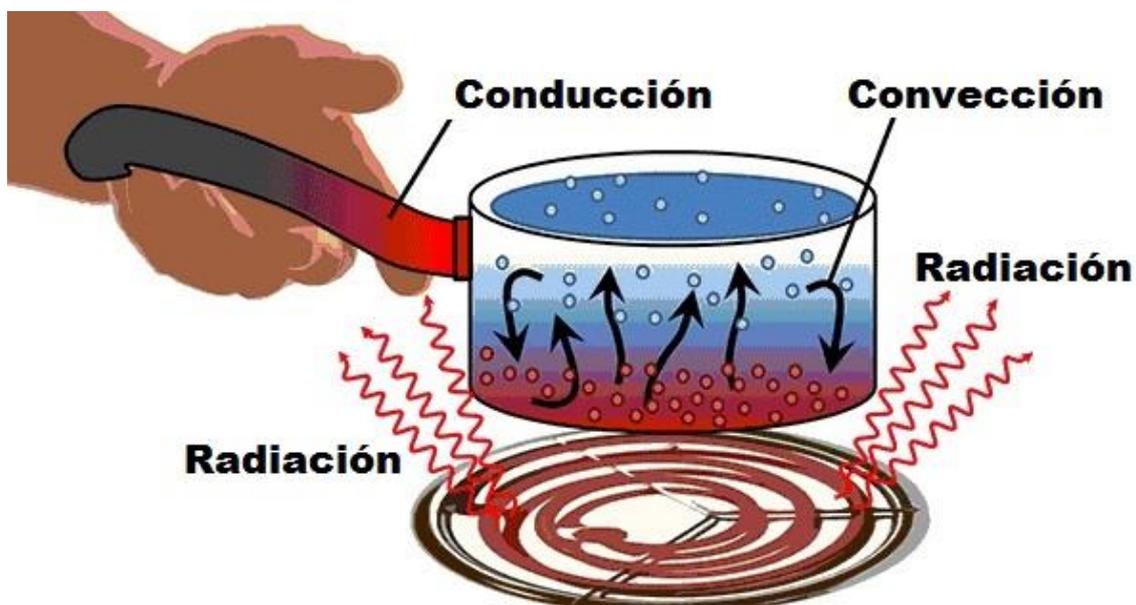


Figura 1

2.3. CLASIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Se puede diferenciar una gran cantidad de criterios para clasificar los equipos de transferencia de calor, pero las más comunes son las que a continuación se enuncian:

- Clasificación según la trayectoria de los fluidos
- Clasificación según la forma en que el calor es transferido
- Clasificación según la aplicación
- Clasificación según características de construcción
- Clasificación según el número de fluidos involucrados

➤ *Clasificación según la trayectoria de los fluidos*

De acuerdo a la trayectoria que tienen los fluidos que intervienen en el proceso los equipos los intercambiadores pueden clasificarse en: intercambiadores de flujo en paralelo, intercambiadores de flujo en contracorriente, intercambiadores de flujo cruzado de un solo paso o intercambiadores de flujo cruzado de pasos múltiples. Los más comunes son los dos primeros:

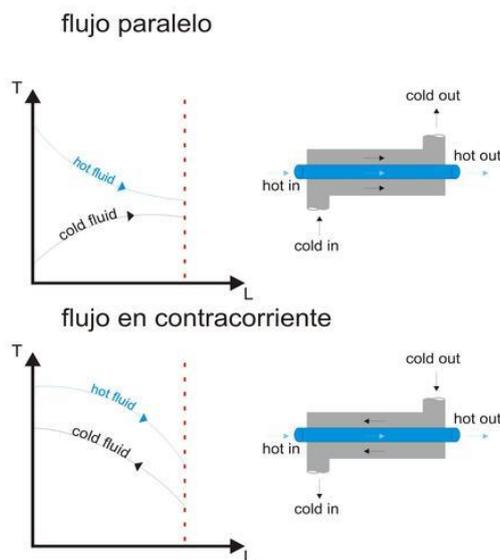


Figura 2

- **Flujo en paralelo:** En esta distribución los fluidos caliente y frío entran por el mismo extremo de la unidad, fluyen a través de ella en la misma dirección y salen por el otro extremo. La diferencia de temperatura es grande al principio, pero decae rápidamente al aumentar la distancia. Es importante señalar que, para tal intercambiador, la temperatura de salida del fluido frío nunca excede la del fluido caliente.

- **Flujo en contracorriente:** Distribución en la que los fluidos entran por extremos opuestos de la unidad y fluyen en direcciones opuestas. En contraste con el intercambiador de flujo paralelo, esta configuración hace que haya transferencia de calor entre las partes más calientes de los dos fluidos en un extremo, así como entre las partes más frías en el otro. El cambio en la diferencia de temperaturas a lo largo de la longitud del intercambiador es ostensiblemente menor que cuando el flujo es paralelo. La temperatura de salida del fluido frío puede exceder ahora la temperatura de salida del fluido caliente.

- **Flujo cruzado de un solo paso:** Distribución en donde un fluido dentro de la unidad circula perpendicularmente a la trayectoria del otro.

- **Flujo cruzado de pasos múltiples:** En esta distribución un fluido se desplaza transversalmente en forma alternativa con respecto a la otra corriente del fluido.

➤ *Clasificación según la forma en que el calor es transferido*

Según la forma en que el calor es transferido, los equipos de transferencia de calor se clasifican en tres categorías.

1. Regeneradores

TRABAJO FIN DE GRADO

“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

2. Intercambiador de calor tipo cerrado

3. Intercambiador de calor tipo abierto

- **Regeneradores:** En estos equipos las dos corrientes de fluidos utilizan la misma vía de forma alternada, cuando pasa el fluido caliente el cuerpo del intercambiador absorbe el calor que luego cederá cuando pase el fluido frío. Es decir, el mismo espacio es ocupado alternativamente por los gases calientes y fríos entre los cuales se intercambia el calor. En general los regeneradores se emplean para recalentar el aire de las plantas de fuerza de vapor, de los hornos de hogar abierto, de los hornos de fundición o de los altos hornos y además en muchas otras aplicaciones que incluyen la producción de oxígeno y la separación de gases a muy bajas temperaturas.

- **Intercambiador de calor tipo cerrado:** En este tipo de equipos, la transferencia de calor se realiza a través del cuerpo que separa las dos corrientes fluidas, este cuerpo puede ser un tubo, una placa o una pared que evita el contacto de los fluidos.

- **Intercambiadores de calor tipo abierto:** Estos equipos realizan el intercambio de calor entre los fluidos permitiendo el contacto directo entre ellos.

➤ *Clasificación según la aplicación*

Ésta es la clasificación más práctica, general y conocida por todas las personas que de una manera u otra se han involucrado con estos equipos, porque cada equipo recibe un nombre preciso:

- Caldera
- Precalentador
- Horno
- Radiador

TRABAJO FIN DE GRADO

“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

- Condensadores
 - Torres de enfriamiento
 - Aire acondicionado
- **Caldera:** Se llama caldera a un equipo que genera vapor para fuerza, procesos industriales o para obtener agua caliente. Son equipos diseñados para transmitir el calor generado por una fuente externa o por la combustión de algún material, a un fluido que puede ser agua o pueden ser líquidos térmicos o mercurio, en cuyo caso se llaman vaporizadores. Pero sea cual sea el producto final, que será muy seguramente vapor, debe ser generado y suministrado con un mínimo de pérdidas. Es un elemento muy común en las viviendas actuales:



Figura 3: Caldera de cocina



Figura 4: Caldera industrial

- **Precalentador:** en calderas de vapor de grandes dimensiones, o en sistemas donde se requieren grandes temperaturas, el fluido de entrada es comúnmente precalentado en etapas, en lugar de tratar de calentar dicho fluido en una sola etapa desde el ambiente hasta la temperatura final. El precalentamiento en etapas, incrementa la eficiencia de la planta y minimiza el choque térmico de los componentes, como es el caso de inyectar fluido a temperatura ambiente en una caldera u otro dispositivo operando a alta temperatura. En el caso de sistemas de generación de vapor, una porción del vapor generado es sustraído y utilizado como fuente de calor para recalentar el agua de alimentación en etapas.
- **Horno:** un calentador por combustión es un intercambiador de calor en el que el fluido de proceso fluye dentro de tubos y se calienta por radiación procedente de una llama de combustión y por convección desde los gases calientes de esta. Normalmente los hornos se dividen en tres partes:

TRABAJO FIN DE GRADO

"DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR"

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

- Sección radiante: donde los tubos están en presencia de la llama. En esta parte la transmisión de calor es por radiación en un 80 % aproximadamente y un 20 % por convección de la circulación de gases calientes alrededor de los tubos.
 - Sección de convección: Los tubos están fuera del alcance de la llama. Los gases calientes se direccionan a través del paquete de tubos. El calor transmitido es por radiación de CO_2 y H_2O en los gases calientes además del calor por convección. Los tubos están equipados con aletas para mejorar las condiciones de transmisión de calor.
 - Sección de blindaje: Las primeras filas de tubos del área de convección son la zona de choque. En ella los tubos no tienen aletas, reciben la misma cantidad de calor por ambos mecanismos.
- **Radiador:** Comúnmente, los intercambiadores de calor están pensados como dispositivos líquido/líquido solamente. Hay que tener en cuenta que un intercambiador de calor es cualquier dispositivo que transfiere calor a partir de un fluido a otro fluido. Por ello, algunas plantas dependen de intercambiadores de calor aire/líquido.
- El ejemplo más familiar de un intercambiador de calor aire/ líquido es un radiador de automóvil. El líquido refrigerante fluye por el motor y toma el calor expelido hasta llevarlo al radiador. Este líquido refrigerante fluye entonces por tubos que utilizan aire fresco del ambiente para reducir la temperatura del líquido refrigerante. Como el aire es un mal conductor del calor, el área de contacto térmico entre el metal del radiador y el aire se debe maximizar. Esto se hace usando aletas en el exterior y se los tubos las cuales mejoran la eficacia de un intercambiador de calor y se encuentran comúnmente en la mayoría de los intercambiadores de calor del aire/líquido y en algunos intercambiadores de calor líquido/líquido de alta eficacia.



Figura 5: Radiador Volkswagen Polo

- **Condensadores:** Los condensadores son aquellos equipos que convierten un fluido que está en estado gaseoso (vapor) a su estado líquido por medio de transferencia de calor desde un foco de enfriamiento, que es otro fluido (líquido y gaseoso), con una temperatura menor a una temperatura del vapor a condensar.
- **Torres de enfriamiento:** Una torre de enfriamiento es un equipo que utiliza la transferencia de calor y de masa para enfriar un líquido de trabajo, que entregará el calor por difusión y convección a una corriente de aire frío. Debido a la existencia del contacto directo entre los fluidos se eliminan algunas resistencias al flujo de calor.
- **Aire acondicionado:** En un sistema central de aire acondicionado, el sistema de retorno de aire atrae hacia el sistema de conductos el aire caliente de la habitación. Este sistema de conductos está formado por un evaporador y un condensador. El refrigerante es bombeado desde el condensador al intercambiador del evaporador. A la vez que el refrigerante está circulando por el interior del evaporador, el aire caliente del interior de la casa está pasando sobre el evaporador. Como el refrigerante está más frío que el aire caliente, el refrigerante absorbe el calor del aire. El refrigerante después se dirige al

TRABAJO FIN DE GRADO

“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

condensador. Cuando el refrigerante caliente se dirige al condensador, es comprimido por el compresor; la compresión del refrigerante hace que éste hierva. El refrigerante, al hervir, despidе el calor que ha sido absorbido dentro de la casa. Entonces atraviesa la bobina dentro del condensador donde se enfría de nuevo y está listo para volver dentro y absorber más calor del interior de la casa.

En resumen, la unidad interior, situada en la pared, suelo, techo... es la que absorbe el exceso de calor de la habitación y hace circular el aire frío por la misma, y la unidad exterior también llamada condensador, es a través de la cual se elimina el exceso de calor absorbido, hacia el exterior. Estas dos unidades están conectadas entre sí por tuberías.

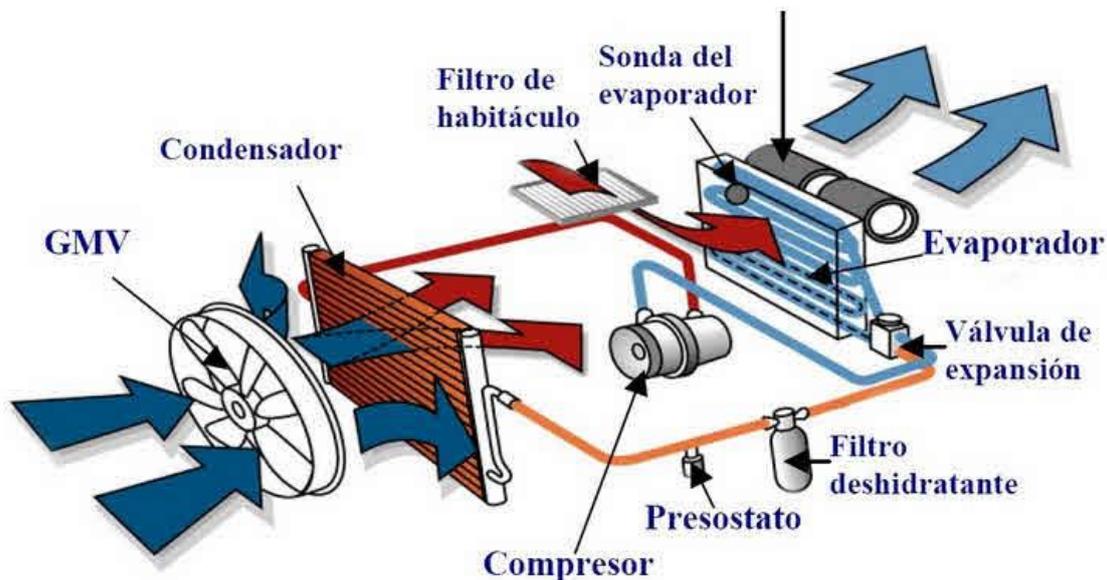


Figura 6: Funcionamiento aire acondicionado

TRABAJO FIN DE GRADO

“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



Figura 7: Parte visible aire acondicionado

➤ *Clasificación según características de construcción*

Los intercambiadores de calor son frecuentemente caracterizados por características de construcción. Los cuatro principales tipos de construcción son:

- Intercambiadores de calor tubulares
- Intercambiadores de calor de placas
- Intercambiadores de calor de casco y tubos
- Intercambiadores de calor tipo tubo espiral

- Intercambiadores de calor tubular: Este intercambiador es generalmente construido por tubos circulares, elípticos, rectangulares, redondos y planas. Existe una considerable flexibilidad en el diseño, porque la geometría puede variar fácilmente cambiando el tubo de diámetro, posición y longitud. Este intercambiador de calor es diseñado para presiones relativamente altas. Se utilizan principalmente líquido-líquido y líquidos con cambios de fase

TRABAJO FIN DE GRADO

"DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR"

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

(condensación y evaporación). Se utilizan para gas-líquido y gas-gas en las aplicaciones de transferencia de calor en las que la temperatura y presión de funcionamiento son muy altas.



Figura 8: Intercambiador tubular

- Intercambiadores de calor de placas: consisten en una estructura con placas metálicas generalmente corrugadas y montadas a presión, que forman el área necesaria para la transferencia de calor, con orificios de acuerdo a la disposición de flujo. Estos intercambiadores no pueden soportar altas presiones ni temperaturas.

TRABAJO FIN DE GRADO

"DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR"

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

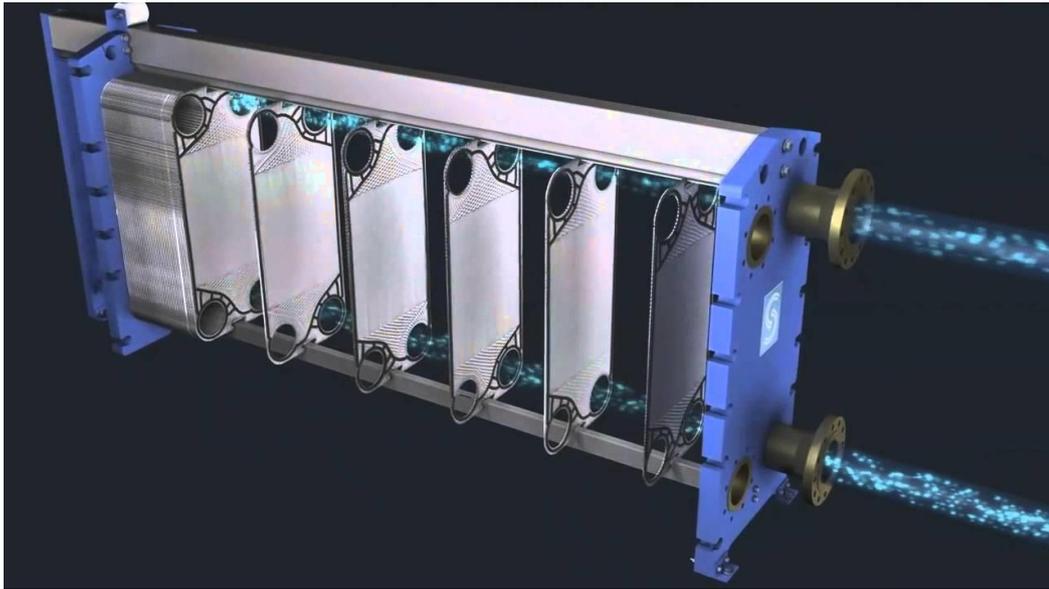


Figura 9: Intercambiador de placas

- Intercambiadores de calor de carcasa y tubos: Los intercambiadores de calor de tipo carcasa y tubos son aquellos en los cuales ocurre transferencia de calor entre dos corrientes fluidas que no se mezclan o que no tienen contacto entre sí. Las corrientes de fluido que están involucradas en esa forma, están separadas entre sí por una pared de tubo, o por cualquier otra superficie, la cual forma el camino de transferencia del calor. Este intercambiador es construido para evitar fugas, por facilidad de limpieza, y para controlar más fácilmente la corrosión.

TRABAJO FIN DE GRADO
“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”
GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

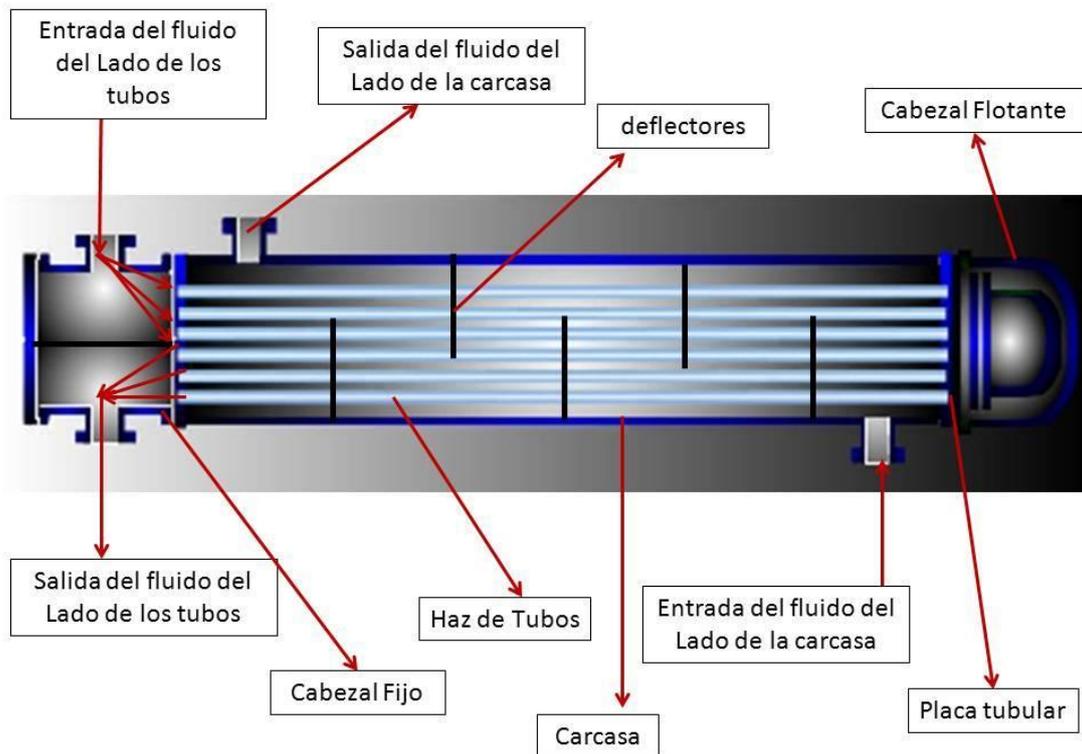


Figura 10: Intercambiador carcasa y tubos

- Intercambiador de calor tipo tubo espiral: Este intercambiador consiste en una o más bobinas en forma de espiral colocadas dentro de un depósito. La tasa de transferencia de calor asociada con un tubo en espiral es mayor que la de un tubo recto. La desventaja de este intercambiador es la limpieza del mismo.

TRABAJO FIN DE GRADO

"DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR"

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

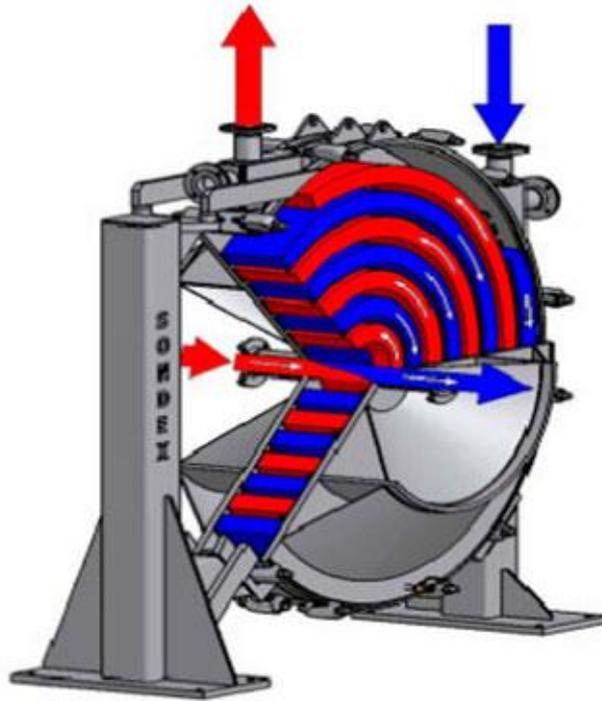


Figura 11: Intercambiador tubo espiral

➤ *Clasificación según el número de fluidos involucrados*

La mayoría de los procesos de disipación o recuperación de energía térmica envuelve la transferencia de calor entre dos fluidos, de aquí que los intercambiadores de dos fluidos sean los más comunes, sin embargo, se encuentran equipos que operan con tres fluidos.

Por ejemplo, en procesos criogénicos y en algunos procesos químicos: separación aire helio, síntesis de amonio, etc.

3. NORMATIVA APLICABLE

Para elegir un determinado tipo de intercambiador es necesario seguir una rutina creada a partir de muchos años de experiencias en ese ámbito.

El primer paso es conocer claramente aquello que queremos hacer, es decir, saber los requerimientos necesarios para afrontar el diseño. Dentro de estos requerimientos, además de aquellos impuestos por el cliente, se establecen una serie de normas que se han de cumplir.

Así pues, la construcción de los intercambiadores ya está muy bien estipulada de acuerdo a procedimientos y recomendaciones estándares de algunas de algunas instituciones especializadas y de los mismos fabricantes.

Dentro de este marco tenemos los siguientes:

1. Diseño térmico y mecánico:
 - Heat Exchanger Design Handbook (HEDH).
2. Diseño mecánico:
 - Normas Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME). Sección VIII. (Recipientes a presión).
 - Recomendaciones Tubular Exchanger Manufacturer Association (TEMA).

3.1. MANUAL HEDH

El manual HEDH establece métodos para el diseño de intercambiadores de calor que permiten realizar manualmente procesos para determinar todos los parámetros esenciales de construcción de un intercambiador, los cuales se diseñan para desempeñar una debida labor térmica. En estos métodos se cuenta con criterios especificados o implícitos, tales como la facilidad en la limpieza y el mantenimiento, velocidades de flujo máximas o mínimas, erosión, caídas de presión, limitaciones de tamaño o peso, expansión térmica, etc., esencialmente buenas prácticas de diseño.

3.2. DESCRIPCIÓN NORMA ASME-SECCIÓN VIII

Se encuentra dividido en tres subsecciones principales:

- Requerimientos Generales
 - Procesos de fabricación
 - Materiales
-
- **Requerimientos generales:** Constituido por una serie de párrafos UG-xx donde se establecen los requerimientos referentes a las condiciones generales del diseño tales como las cargas a tener en cuenta en él, las fórmulas que establecen la manera de calcular los espesores requeridos en cada una de las configuraciones, cómo se puede construir un recipiente cilíndrico tanto para presión interna como externa, los factores de seguridad, los procedimientos de prueba (UG-99) etc.
 - **Procesos de fabricación:** Establece las consideraciones para la fabricación de recipientes a presión ya sea por soldadura o roblonado. Determina los tipos de junta que existen en un recipiente soldado y la categoría de dichas juntas (posición de la junta soldada dentro del recipiente) con el objeto de determinar la eficiencia de la junta como función de dichas características y del tipo de examen que se haga a la soldadura (radiográfico o solo visual).
 - **Materiales:** Suministra una completa información acerca de los esfuerzos admisibles de acuerdo a la designación de los diferentes materiales normalizados que se utilizan en la fabricación de recipientes a presión tanto para aceros al carbón, aleados o inoxidable como materiales no-ferrosos.

3.3. RECOMENDACIONES TEMA

Las recomendaciones TEMA, como su nombre lo indica no son de obligado cumplimiento, se refieren a una serie de consideraciones para el diseño y la fabricación de intercambiadores tubulares producto de la experiencia de los fabricantes a lo largo de los años. Considera aspectos como los tipos y la designación más comúnmente utilizados en la construcción de intercambiadores de calor tubulares y la clase de aplicación que se da al intercambiador de acuerdo a la severidad del servicio, encontrándose tres clases denominadas:

- **Clase R:** Las normas mecánicas TEMA para intercambiadores de calor clase R, especifican el diseño, fabricación y materiales de intercambiadores de calor no sometido a llama, para requerimiento generalmente riguroso en la industria del petróleo y procesos relacionados.
- **Clase C:** Las normas mecánicas TEMA para intercambiadores de calor clase C, especifican el diseño, fabricación y materiales de intercambiadores de calor no sometido a llama, para los requerimientos normalmente moderados de procesos comerciales y aplicaciones generales, buscando obtener el máximo de economía.
- **Clase B:** Las normas mecánicas TEMA para intercambiadores de calor clase B, especifican el diseño, fabricación y materiales de intercambiadores de calor no sometido a llama, para el servicio de los procesos de la industria química.

TRABAJO FIN DE GRADO
"DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR"
GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

| Frente Cabezales estacionarios | | Tipo de carcaza | Terminal Tipos de cabezal |
|-----------------------------------|---|---|---|
| A | Canal y cubierta removible | E Un pase de carcaza | L Similar a cabezal A |
| B | Bonete (cubierta integral) | F Dos pases de carcaza con separador horizontal | M Similar a cabezal B |
| C | Haz de tubo removible Canal integral Cubierta removible | G Flujo dividido | N Similar a cabezal N |
| N | Canal integral Cubierta removible | H Doble flujo dividido | P Cabezal flotante empacado por el exterior |
| D | Altas presiones | J Flujo dividido | S Cabezal flotante |
| | | K Rehervidor | T Cabezal flotante deslizante |
| | | X Flujo cruzado | U Haz de tubo en U |
| | | | W Sello externo |

Figura 12: Clasificación intercambiadores carcasa y tubo según TEMA

4. IMÁGENES DE INTERCAMBIADORES REALES DE CARCASA Y TUBOS



Figura 13: Intercambiador sin carcasa

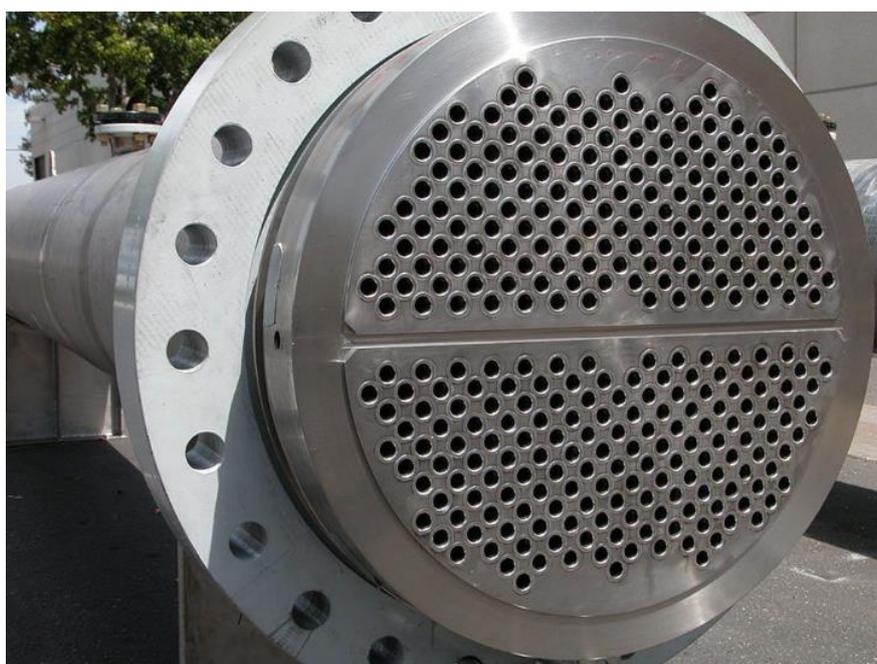


Figura 14: Placa entrada intercambiador 1-2

TRABAJO FIN DE GRADO
"DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR"
GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



Figura 15: Tubos en forma de U en el intercambiador



Figura 16: Intercambiador de grandes dimensiones con la entrada a la carcasa



Figura 17: Intercambiador con la carcasa instalada

5. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

5.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En este proyecto, la aplicación del intercambiador de calor consiste en satisfacer las necesidades del motor de un barco carguero. Dicho barco utiliza un circuito cerrado de agua para refrigerar y mejorar el rendimiento de una de las piezas de su motor que opera a una temperatura muy elevada. Sin embargo, al usarse, este agua se va calentando y si en algún momento sobrepasase los 100°C dejaría de poder usarse como refrigerante de dicha pieza debido a su evaporación. Así pues, la misión del citado intercambiador será la de enfriar el caudal del agua que sale del motor (850 L/min) antes de volver a utilizarla con la citada pieza, utilizando para ello agua obtenida del mar de tal forma que el calor transmitido entre ambos fluidos sea de 500 KW, consiguiendo así que la temperatura del agua usada con el motor no exceda nunca los 100°C y no se evapore. Sin embargo, el cubículo en el que debe ubicarse el intercambiador es muy estrecho (tiene una sección de $0.3 \times 0.25 \text{ m}^2$), por lo que el intercambiador deberá ser lo más corto posible teniendo en cuenta dichas limitaciones. **(A partir de este punto del trabajo se denominará al agua utilizada**

para el motor y que circula por la carcasa *Agua Motor* y a la obtenida del mar que circula por los tubos *Agua Marina* para diferenciarlas).

5.2. DEFINICIÓN DE OBJETIVOS

El objetivo es diseñar un intercambiador que sea capaz de cumplir con todo lo especificado anteriormente, que quepa en el cubículo diseñado para él ($0.3 \times 0.25 \text{ m}^2$ de alto por ancho y discurriendo en paralelo al motor). El líquido refrigerante en el intercambiador será el *agua marina* a la que previamente se hará pasar por una máquina desalinizadora para evitar la corrosión provocada por la sal (como esta máquina no podrá ser excesivamente grande el diseño irá enfocado a que el caudal de *agua marina* no sea demasiado elevado). Este flujo tan reducido de *agua marina* también hará que la eficiencia del intercambiador no sea la mejor, pero prima la operatividad antes que el ahorro económico.

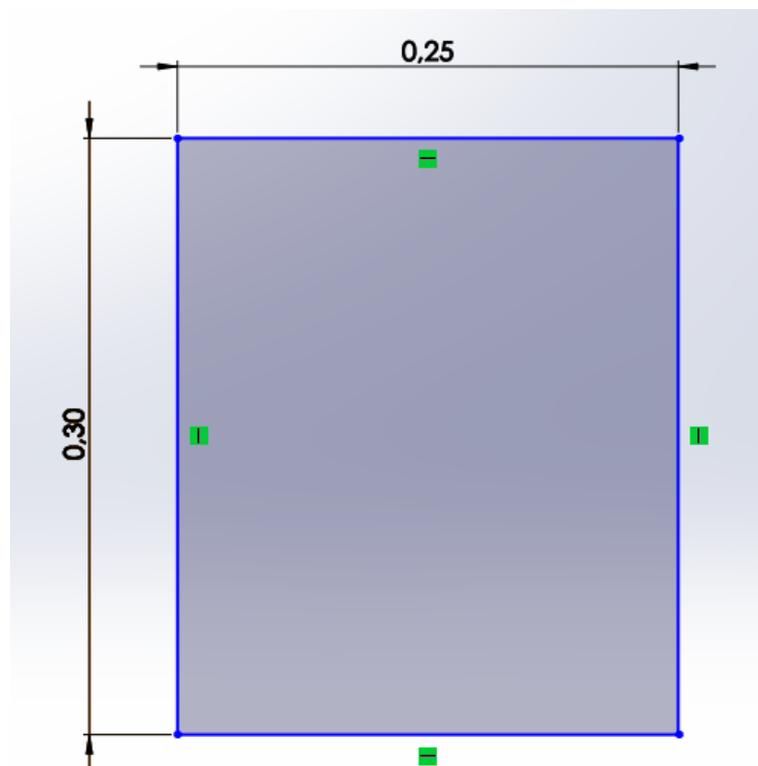


Figura 18: Alzado del cubículo en el que debe ir el intercambiador (en metros)

5.3. CONSIDERACIONES INICIALES

Teniendo en cuenta todo lo anterior se puede elaborar una lista con todas las condiciones y requisitos que debe cumplir el intercambiador:

- Tipo de intercambiador: carcasa y tubos
- Potencia calorífica: 500 KW
- Caudal de *agua motor* (circulará por la carcasa): 850 L/min
- Ancho y alto máximo del intercambiador: 0.3×0.25 m.
- Temperatura máxima a la que puede circular el *agua motor* por el motor (y por ende por el intercambiador): 100°C

5.4. CÁLCULOS PREVIOS AL DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR

Antes de comenzar con el diseño del intercambiador en Solidworks, es necesario dimensionarlo, y para ello se deben realizar unos cálculos a fin de dar con el tamaño que sirva para cumplir con las especificaciones.

El *agua motor* discurrirá por la carcasa exterior a los tubos:

| | | |
|---------|---|-----------------------------|
| Carcasa | } | Diámetro interno: 203.2 mm |
| | | Diámetro externo: 208.74 mm |
| | | Material: acero inoxidable |

TRABAJO FIN DE GRADO

“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estas medidas fueron decididas arbitrariamente. Asimismo, teniendo en cuenta el C_p del agua y la fórmula:

$$Q = \dot{m} \times C_p \times \Delta T \quad (1)$$

Donde Q el calor intercambiado, \dot{m} el flujo másico, C_p el calor específico del fluido y ΔT variación de temperatura del mismo.

Sabiendo que se busca un intercambio de $Q=500 \text{ KW}$ y que el flujo másico del *agua motor* es de $850 \text{ L/min} \rightarrow 13.03 \text{ Kg/s}$, se procede a calcular la diferencia de temperatura que habrá entre la entrada y la salida de este fluido por la carcasa:

$$5000000W = 13.03 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \times 4180 \frac{\text{J}}{\text{KgK}} \times \Delta T$$

$$\Delta T = 9.18 \text{ }^\circ\text{C}$$

Se toman por tanto las siguientes temperaturas de entrada y salida de la carcasa:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{c1} = 89.18^\circ\text{C} \\ T_{c2} = 80 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right.$$

Se deja un margen de seguridad hasta los 100°C (temperatura que se debe evitar alcanzar para poder seguir refrigerando a la pieza)

A su vez, el *agua marina* circulará por los tubos:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Diámetro interno: } 12.7 \text{ mm} \\ \text{Diámetro externo: } 16 \text{ mm} \\ \text{Material: cobre} \end{array} \right.$$

TRABAJO FIN DE GRADO

“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Así pues, se toman unas temperaturas de entrada y salida:

$$\left. \begin{array}{l} T_{f1} = 16^{\circ}\text{C} \\ T_{f2} = 60^{\circ}\text{C} \end{array} \right\} \Delta T = 44^{\circ}\text{C}, \quad \text{lo que implica siguiendo la fórmula (1)}$$

$$Q = \dot{m} \times C_p \times \Delta T$$

$$\dot{m} = \frac{5000000\text{W}}{4180 \frac{\text{J}}{\text{KgK}} \times 44^{\circ}\text{C}} = 2.72 \text{ Kg/s}$$

que el flujo másico del *agua marina* será de 2.72 Kg/s. Este flujo másico ha de repartirse entre los 38 tubos que se ha dispuesto que tenga el aparato, quedando un $\dot{m}/_{\text{tubo}}$ de 0.072 Kg/s. El área interior de cada tubo según el diámetro dado anteriormente será de $1.27 \times 10^{-4} \text{ m}^2$.

Por tanto, se calcula la velocidad del agua por los tubos apoyándose en la siguiente fórmula:

$$\text{Flujo másico} = v \times S \times \rho \quad (2)$$

Siendo v la velocidad del fluido, S la superficie por la que transita y ρ su densidad.

De esta ecuación (2) obtenemos:

$$v = \frac{0.072 \text{ kg/s}}{1.27 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \times 993 \text{ kg/m}^3} = 0.57 \text{ m/s}$$

Una vez obtenida esta velocidad ya se puede hallar el coeficiente de transferencia de calor por convección promedio (h_c) en el interior de los tubos. La temperatura media del *agua marina* a lo largo de éstos, según las que han sido otorgadas a la entrada y a la salida, será de 38°C, teniendo las siguientes características:

TRABAJO FIN DE GRADO

“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

$$\text{Agua} \rightarrow \bar{T} = 38^\circ\text{C} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Viscosidad cinemática } (\nu) = 0.69 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \\ \text{Número de Prandtl } (Pr) = 4.608 \\ \text{Conductividad térmica fluido } (K_f) = 0.6294 \text{ W/mK} \end{array} \right.$$

Con estos datos podemos hallar el número de Reynolds (Re):

$$Re = \frac{v \times L_c}{\nu} \quad (3)$$

$$Re = \frac{0.57 \text{ m/s} \times 12.7 \times 10^{-3} \text{ m}}{0.69 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 10491.3$$

Al ser mayor que 2100, se considera un flujo turbulento, debido a lo cual (y a que el número de Reynolds es mayor que 10000), se utiliza la ecuación de Dittus-Boelter para hallar el número de Nusselt (teniendo en cuenta que el agua sufre un fenómeno de calentamiento):

$$Nu = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.4} \quad (4)$$

$$Nu = 0.023 \times 10491.3^{0.8} \times 4.608^{0.4} = 69.79$$

$$Nu = \frac{h_c \times D}{K_f} \quad (5) \rightarrow h_{cint} = \frac{69.79 \times 0.6294 \text{ W/mK}}{12.7 \times 10^{-3} \text{ m}} = 3458.73 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Tras hallar el coeficiente en el interior de los tubos, se realizará el mismo proceso para conseguir el del exterior. La temperatura media del *agua motor* entre la entrada y la salida es de 84.59°C , temperatura a la cual tiene una densidad $\rho = 965.65 \text{ Kg/m}^3$. Para hallar el resto de parámetros que se necesitarán, deberá hacerse una suposición. La temperatura media del *agua marina* en el interior del tubo como ya se

TRABAJO FIN DE GRADO

“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

ha mencionado al hallar sus propiedades es de 38°C mientras que la del *agua motor* que circula por la carcasa es de 84.59°C. Así pues, se asume que la temperatura en el punto medio de la pared de cada tubo es la media entre esas dos, es decir, aproximadamente 61.3°C. Partiendo de esto, la suposición consiste en decir que la temperatura de la cara exterior de la pared de cada tubo está a 65°C.

A partir de ahí, en estos problemas de convección exterior se halla la temperatura media entre la pared exterior y el fluido que circula por fuera y se hallan las propiedades de dicho fluido (*agua motor* en el proyecto) a la temperatura resultante:

$$\bar{T} = \frac{\bar{T}_{aceite} + T_{pared}}{2} = \frac{84.59 + 65}{2} = 74.79^{\circ}\text{C}$$

Obteniendo a esa temperatura las siguientes propiedades:

$$\text{Agua motor a } 74.79^{\circ}\text{C} \left\{ \begin{array}{l} \nu = 0.39 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \\ K = 0.669 \text{ W/mK} \\ Pr = 2.43 \end{array} \right.$$

Lo siguiente que deberá calcularse será la superficie disponible para el paso de *agua motor* por la carcasa, teniendo en cuenta que nuestro intercambiador será de tipo 1-2, se resta la superficie total del interior de la carcasa menos la ocupada por los tubos de ida y vuelta:

$$S = \pi \times \left(\frac{203.2 \times 10^{-3} \text{ m}}{2} \right)^2 - 2 \times 38 \pi \times \left(\frac{16 \times 10^{-3} \text{ m}}{2} \right)^2 = 0.017 \text{ m}^2$$

Una vez se conoce la superficie, ya se puede calcular la velocidad a la que el *agua motor* transita, utilizando la ecuación (2):

$$\text{Flujo másico} = v \times S \times \rho$$

De donde se obtiene:

$$v = \frac{13.03 \text{ kg/s}}{0.017\text{m}^2 \times 965.65\text{kg/m}^3} = 0.79 \text{ m/s}$$

Para poder hallar el número de Nusselt se va a utilizar la correlación de Zukauskas para convección forzada por el exterior de un tubo:

$$Nu = C \times Re_D^m \times Pr^{1/3} \quad (6)$$

Siendo Re_D :

$$Re_D = \frac{v \times D_{ext}}{\nu} = \frac{0.79 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0.016 \text{ m}}{0.39 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}} = 32410.26$$

A partir de ahí ya se puede calcular el número de Nusselt para sacar el coeficiente de transferencia de calor por convección en el exterior utilizando la ecuación (6) y obteniendo C y m de la siguiente tabla:

| Re_D | C | m |
|----------------|-------|-------|
| 0,4 a 4 | 0,989 | 0,330 |
| 4 a 40 | 0,911 | 0,385 |
| 40 a 4000 | 0,683 | 0,466 |
| 4000 a 40000 | 0,193 | 0,618 |
| 40000 a 400000 | 0,027 | 0,805 |

Figura 19

$$Nu = 0.193 \times 32410.26^{0.618} \times 2.43^{1/3} = 159.1$$

$$Nu = \frac{h_{cext} \times D_{ext}}{K_f}$$

$$h_{cext} = \frac{159.1 \times 0.669 \text{ W/mK}}{0.016 \text{ m}} = 6652.74 \text{ W/m}^2\text{K}$$

TRABAJO FIN DE GRADO

"DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR"

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Una vez se poseen los coeficientes interno y externo, se plantea la siguiente igualdad:

$$UxA = \frac{1}{R_{total}}$$

$$UxA = \frac{Q}{LMTD}$$

De donde se deduce:

$$\frac{Q}{LMTD} = \frac{1}{R_{total}} \quad (7)$$

Donde la R_{total} es la suma de las resistencias de convección interior y exterior de los tubos y de la resistencia de conducción en su pared (despreciable).

La LMTD por su parte es la diferencia de temperatura media logarítmica, que para el caso planteado (intercambiador 1-2 con las citadas temperaturas de entrada y salida) da:

$$LMTD = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} \quad (8)$$

Al tomarse por convenio como si fuera contracorriente, quedará:

$$LMTD = \frac{(T_{c1} - T_{f2}) - (T_{c2} - T_{f1})}{\ln\left(\frac{T_{c1} - T_{f2}}{T_{c2} - T_{f1}}\right)} = \frac{(89.18 - 60) - (80 - 16)}{\ln\left(\frac{89.18 - 60}{80 - 16}\right)} = 44.33$$

Al tratarse de un intercambiador 1-2 deberá utilizarse un factor de corrección para este resultado, obteniéndose de la siguiente tabla para intercambiadores de un paso por carcasa y dos pasos por el lado tubos:

TRABAJO FIN DE GRADO
“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”
GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

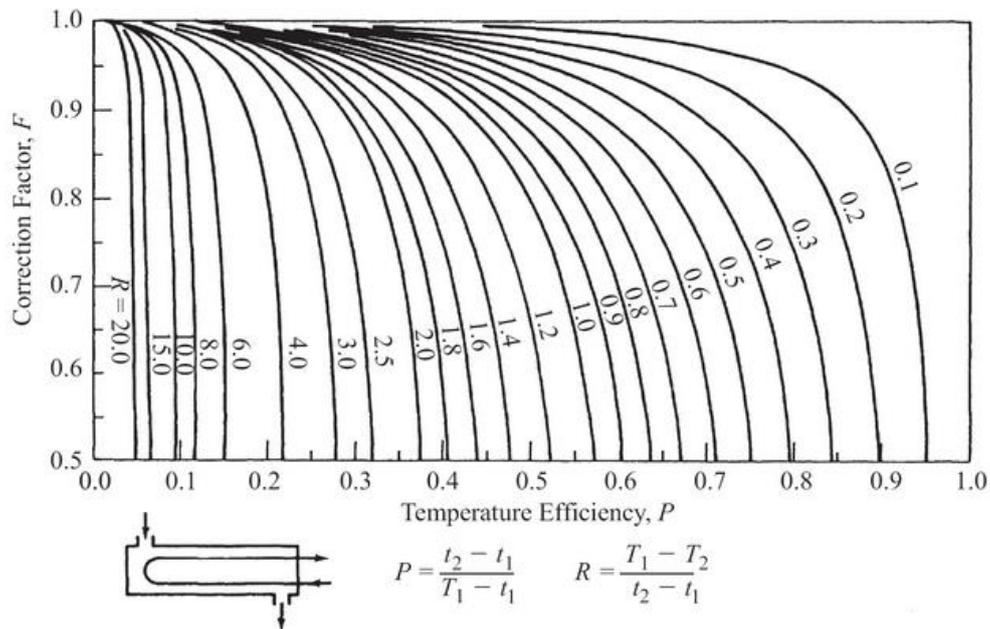


Figure 10: Factor de corrección de la diferencia de temperatura media logarítmica para intercambiadores de tubo y carcasa con un sólo paso por la carcasa y pasando por el tubo dos veces.

Figura 20

Siguiendo las fórmulas de la imagen, en el intercambiador se obtiene:

$$P = \frac{60 - 16}{89.18 - 16} = 0.6$$

$$Z = \frac{89.18 - 80}{60 - 16} = 0.2$$

Y entrando en la gráfica se saca un factor $F=0.97$:

$$LMTD' = LMTD \times F \quad (9) = 44.33 \times 0.97 = 43^{\circ}\text{C}$$

Ahora sí, se sustituye en la igualdad (7), obteniendo:

$$\frac{Q}{LMTD'} = \frac{1}{\frac{1}{h_{cint} \times A_{interiortubos}} + \frac{1}{h_{cext} \times A_{exteriortubos}}}$$

TRABAJO FIN DE GRADO

“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

$$\frac{500000}{43} = \frac{1}{\frac{1}{3458.73 \times 76\pi \times 12.7 \times 10^{-3} \times L} + \frac{1}{6652.74 \times 76\pi \times 16 \times 10^{-3} \times L}}$$

Despejando la L de esta igualdad queda como resultado que la longitud de intercambio ha de ser de 1.56 m.

| DATOS DEL CÁLCULO (SI) | | | | | | |
|---|-----------|-------------------------------------|-------------------------|------------------------|---------------------------|--------------------------|
| PROPIEDAD DEL FLUIDO | SÍMBOLO | UNIDADES | FLUIDO FRÍO | | FLUIDO CALIENTE | |
| | | | ENTRADA | SALIDA | ENTRADA | SALIDA |
| NOMBRE DEL FLUIDO | - | - | AGUA MARINA | | AGUA MOTOR | |
| FLUJO | \dot{m} | Kg/s | 2.72 | | 13.03 | |
| TEMPERATURA | T | °C | 16 | 60 | 89.18 | 80 |
| DENSIDAD | ρ | Kg/m ³ | 998.54 | 983.2 | 965.65 | 971.8 |
| VISCOSIDAD DINÁMICA | μ | N/sm ² × 10 ⁶ | 1162 × 10 ⁻⁶ | 470 × 10 ⁻⁶ | 320.33 × 10 ⁻⁶ | 353.7 × 10 ⁻⁶ |
| CALOR ESPECÍFICO | Cp | KJ/Kg°C | 4190.8 | 4181 | 4201.8 | 4194 |
| CONDUCTIVIDAD TÉRMICA | K | W/m°C | 0.5892 | 0.658 | 0.677 | 0.673 |
| DIÁMETRO DE CARCASA | D | mm | 203.2 | | | |
| DIÁMETRO DE TUBO | d | mm | 12.7 | | | |
| ESPESOR DE TUBO | e | mm | 1.651 | | | |
| CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL MATERIAL DEL TUBO | Ktubo | W/m°C | 386 | | | |
| LONGITUD TUBO | L | m | 1.56 | | | |
| NÚMERO DE TUBOS | n | - | 38 | | | |
| PASO DE TUBO | p | mm | 20 | | | |

5.5. SELECCIÓN DE MATERIALES

Para la selección de los materiales de las distintas partes del intercambiador se debe tener en cuenta una serie de factores que influirán en su funcionamiento posterior:

- **Propiedades mecánicas:** se requieren materiales con un alto límite elástico y tensión de rotura, buenas tenacidad, soldabilidad y economía y que tenga una disponibilidad aceptable
- **Resistencia a la corrosión:** deben poder soportar el ataque químico de los fluidos con los que entrarán en contacto, en este caso, el agua.
- **Facilidad para su fabricación:** los materiales deberán contar con algunas características importantes, como la maquinabilidad, soldabilidad y facilidad para ser formado.
- **Vida estimada:** normalmente, un aparato de este tipo se proyecta para tener una vida útil de alrededor de 50 años, dato a partir del cual se puede elegir el material que se debe utilizar realizando un estudio adecuado.
- **Disponibilidad y tiempo de entrega:** punto importante ya que si se elige un material de fácil aprovisionamiento podemos abaratar bastante el proyecto.
- **Coste del material y fabricación:** un material de “alta gama” conlleva un alto costo de fabricación.

5.6. APLICACIÓN AL DISEÑO: PARTES DEL INTERCAMBIADOR

- **Tubos:** Los tubos son los componentes fundamentales, proporcionando la superficie de intercambio a través de la cual el *agua motor* que circula por la carcasa transmite el calor al flujo de *agua marina* que pasa por el interior, perdiendo así temperatura, que es el objetivo final. En multitud de diseños, como el mío que es 1-2, se usan números pares de pasos. Los números de pasos impares no son comunes, y provocan problemas térmicos y mecánicos en la fabricación y en la operación.

TRABAJO FIN DE GRADO

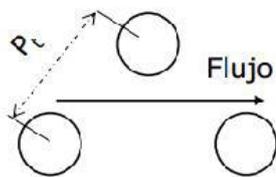
"DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR"

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

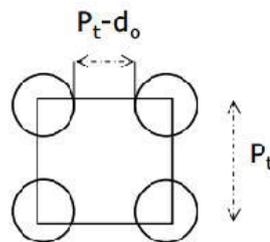
En cuanto a la distribución de los tubos por la carcasa, ésta debe favorecer tanto la obtención del mayor coeficiente de transferencia de calor posible (poca distancia entre los tubos) como la facilidad en la limpieza del aparato (mayor distancia entre tubos). Por lo tanto, debe alcanzarse un equilibrio entre ambas. Este equilibrio, a efectos prácticos, se traduce en una relación entre el espaciamiento entre tubos y el diámetro exterior del tubo de entre 1.25 y 2.

Distribución de los tubos:

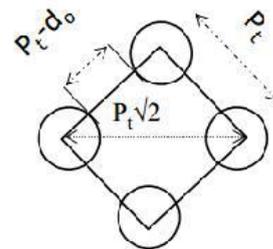
AL TRESBOLILLO



CUADRADA



CUADRADA GIRADA



P_t : paso de tubo Normalmente $P_t = 1.25 \cdot d_o$

Figura 21

Las ventajas e inconvenientes de estas distribuciones son las siguientes:

- Al tresbolillo: es una distribución muy compacta y con un mejor coeficiente, pero tiene el problema en la imposibilidad de su limpieza. Debe ser usada con placas tubulares fijas.
- Cuadrada: es bueno para utilizar con cabezal flotante y en sistemas de evaporación (recalentadores etc.)
- Cuadrada girada: mejor coeficiente a velocidades bajas, se suele emplear en sistemas de condensación.

TRABAJO FIN DE GRADO

"DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR"

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

- Aplicación al proyecto:

En el caso del proyecto se ha optado por una distribución al tresbolillo adoptando un arreglo triangular de 60° . Además, como ya se ha citado en apartados anteriores, los tubos serán de cobre y tendrán un diámetro de 12.7 mm. (interno) y 16 mm. (externo). Al tener este diámetro externo, la separación entre los centros de los tubos será de $1.25 \times 16 = 20 \text{ mm}$. La longitud de la zona recta de todos estos tubos (zona de intercambio de calor) es de 1.56 m.

Al ser un intercambiador 1-2 los tubos son de ida y vuelta con forma de U. Para que todos cupiesen, se han tenido que hacer varias filas en las que los tubos de ida y vuelta tienen diferentes distancias de separación:

- 10 tubos en los que la distancia entre centros de los tubos de ida y vuelta es de 34.64 mm.
- 9 tubos en los que la distancia entre centros de los tubos de ida y vuelta es de 69.28 mm.
- 8 tubos en los que la distancia entre centros de los tubos de ida y vuelta es de 103.92 mm.
- 7 tubos en los que la distancia entre centros de los tubos de ida y vuelta es de 138.56 mm.
- 4 tubos en los que la distancia entre centros de los tubos de ida y vuelta es de 173.2 mm.

TRABAJO FIN DE GRADO

“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

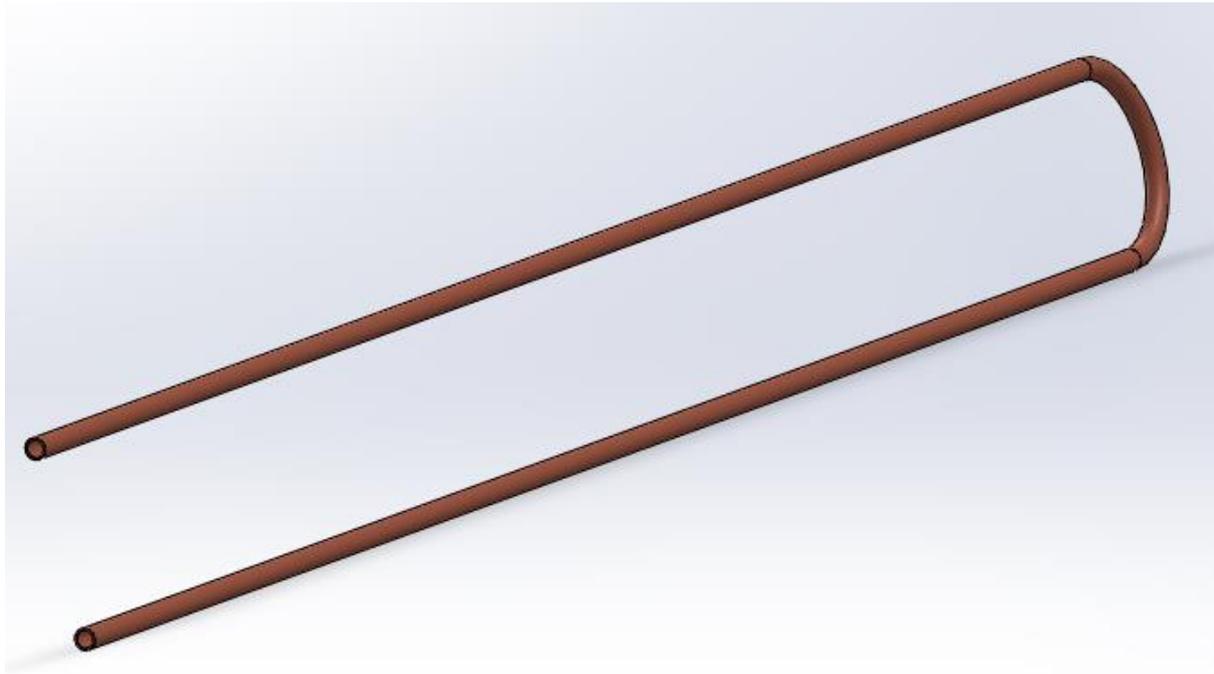


Figura 22: Tubo en forma de U con radio de 69.28 mm.

- **Placa tubular:** la placa tubular sirve de soporte a los tubos, los cuales se mantienen en su lugar al ser insertados dentro de los agujeros de ésta, fijándose mediante expansión o soldadura.

Generalmente, la placa tubular no es más que un metal sencillo que ha sido dado forma y taladrado para albergar los tubos y las sujeciones de los deflectores.

En cuanto al material, debe ser capaz de soportar la corrosión que le puedan provocar ambos fluidos siendo además electroquímicamente compatible con el material de los tubos.

- Aplicación al proyecto:

En este caso, se trata de una placa tubular de acero inoxidable (302 Steel Stainless) de 208.74 mm de diámetro y 20 mm. de grosor. Este material es muy útil para resistir el ataque corrosivo que se puede presentar en las condiciones de servicio (presión y temperatura). Forma parte de la serie 300 de aceros (como se define en la especificación SAE), que incluye un amplio grupo de aleaciones con un 18% de cromo

TRABAJO FIN DE GRADO

"DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR"

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

y un 8% de níquel. Sus principales virtudes son que es fácil de formar, soldar, fabricar y que es resistente a la corrosión.

En dicha placa se puede observar los 76 agujeros que se han realizado para introducir los tubos, 38 para la ida y 38 para la vuelta. Para una mayor fijación de los tubos, se colocarán dos placas, una en cada extremo de la sección recta de los tubos.

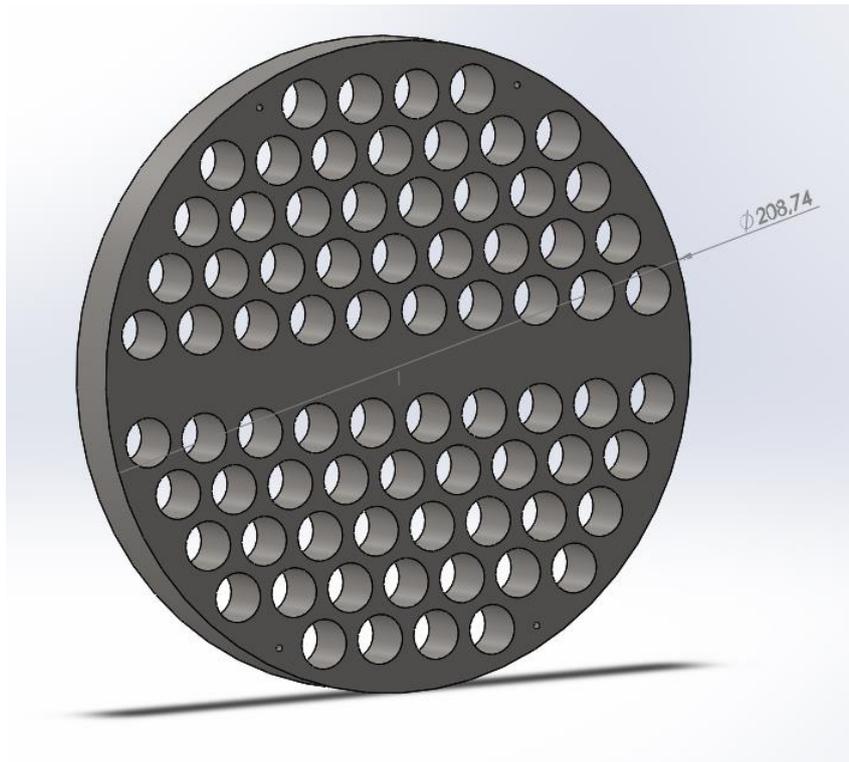


Figura 23: Placa Tubular

- **Deflectores:** su objetivo primordial es controlar la dirección del flujo del líquido que circula por la carcasa. Además, ayudan a que la posición de los tubos sea la adecuada durante el proceso y evitan la vibración producida por los vórtices inducidos por el flujo. En el caso del intercambiador del barco se utilizarán deflectores transversales, los cuales pueden ser de distintos tipos:

TRABAJO FIN DE GRADO

“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

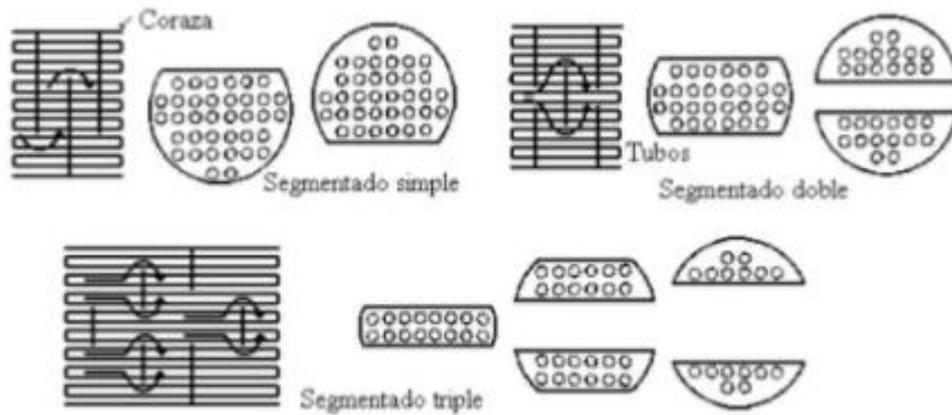


Figura I.2- 6: Tipos de deflectores transversales

Figura 24

De estos tipos, el más común y el que se utilizará es el segmentado simple. El segmento cortado debe ser por norma menor a la mitad del diámetro y para flujos de líquido por la carcasa dicho corte es generalmente del 20 al 25%, mientras que, en el caso de gases a baja presión, se va hasta un 40 o 45%.

- Aplicación al proyecto:

Para el proyecto, se ha elegido que el corte sea del 25%. Como el diámetro del deflector es el mismo que el diámetro interno de la carcasa, el corte será de:
 $0.25 \times 203.2 = 50.8 \text{ mm}$.

Asimismo, los deflectores serán de 302 Steel Stainless y tendrán un espesor de 10 mm.

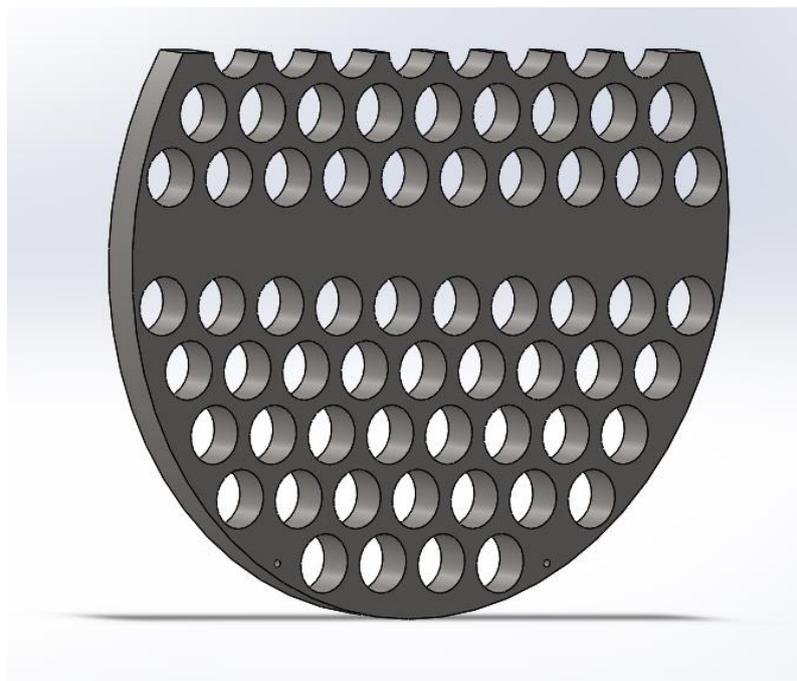


Figura 25: Deflector

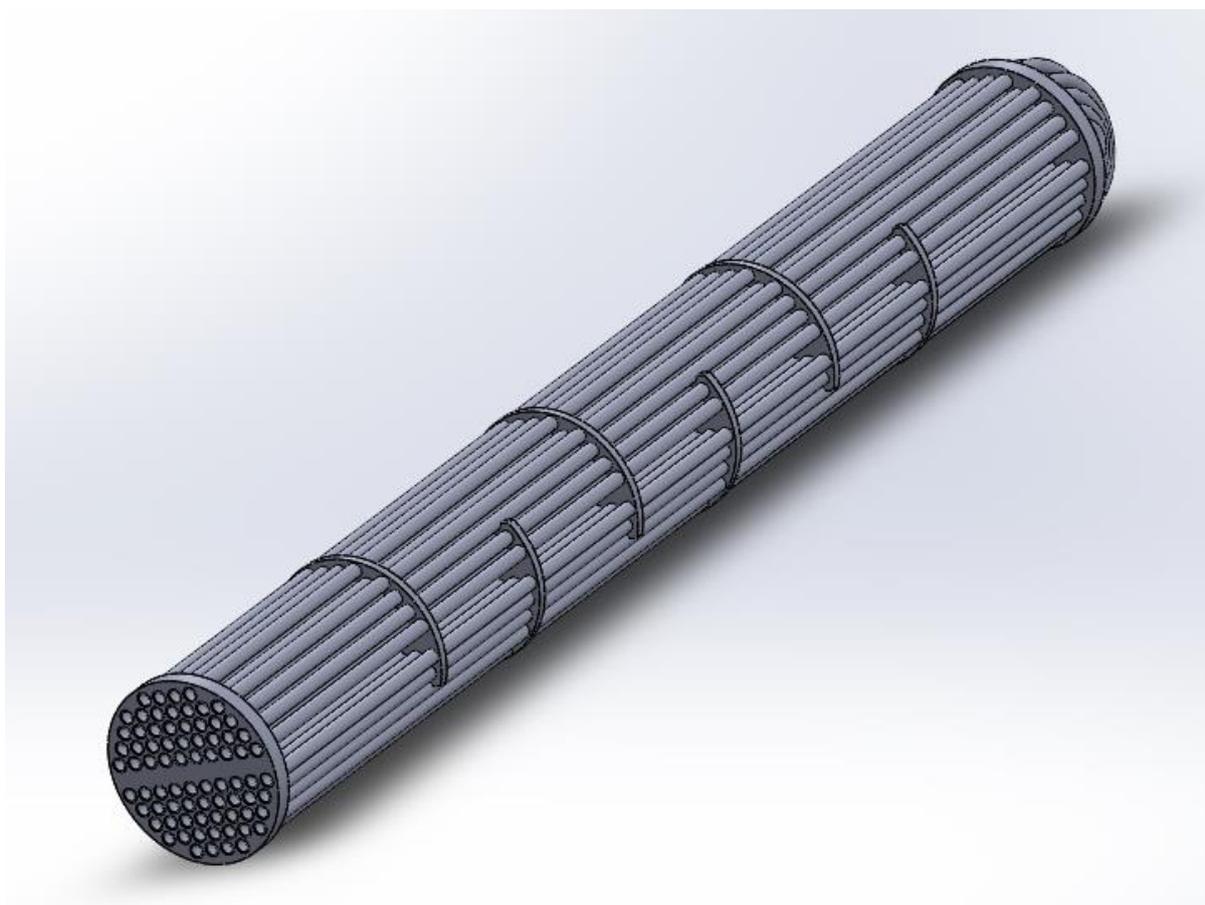


Figura 26: Ensamblaje con tubos, placas y deflectores (1)

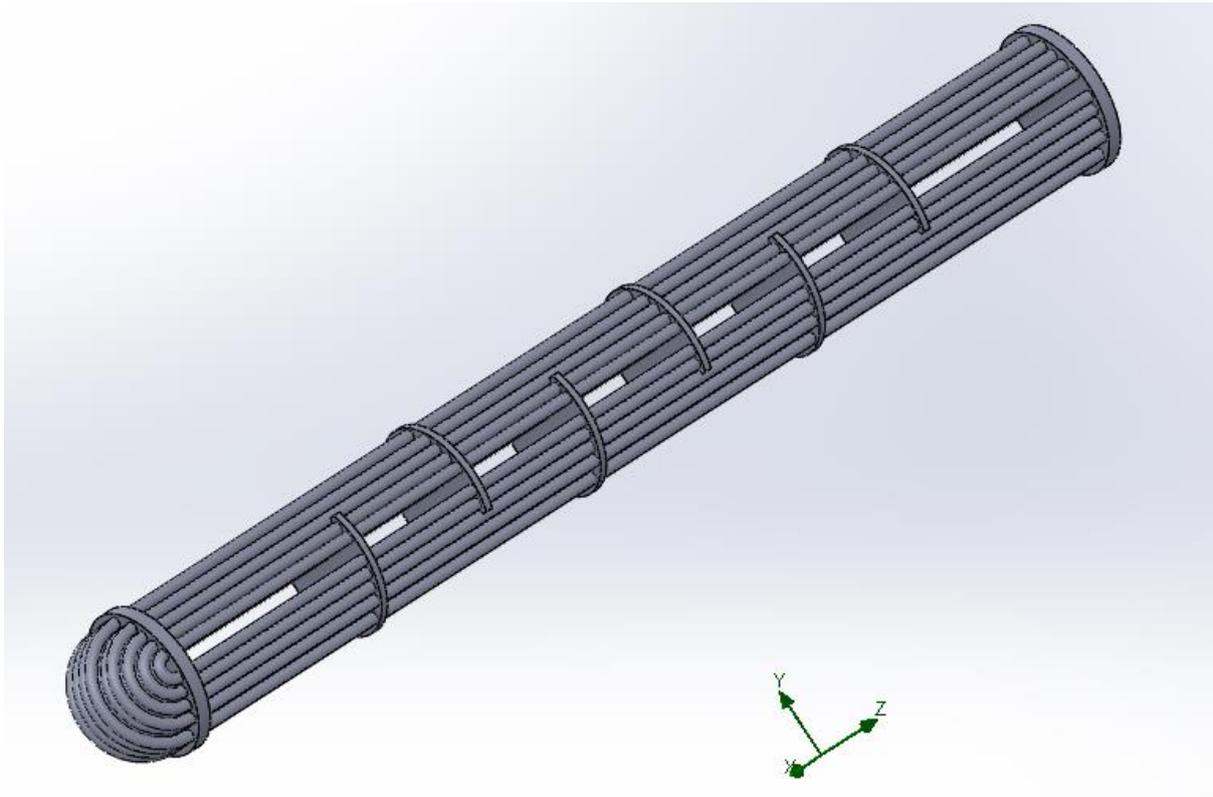


Figura 27: Ensamblaje con tubos, placas y deflectores (2)

- **Cabezal flotante/de retorno:** cuando existe una presión interna, los intercambiadores pueden estar contruidos por distintos tipos de cabezales (planos, semielípticos, abombados...). Cada uno de ellos se utiliza dependiendo de las condiciones de operación y conlleva diferentes costos de fabricación.

En numerosas ocasiones el tiempo del que se dispone para tomar una decisión respecto al cabezal a utilizar es bastante limitado, por lo que se ha estandarizado el uso de cabezales semielípticos o semiesféricos cuando están sometidos a presión interior. Sin embargo, cuando únicamente están sometidos a la presión atmosférica, se suelen utilizar cabezales con tapa plana dado que su coste es bastante inferior.

TRABAJO FIN DE GRADO

“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

- Aplicación al proyecto:

En este intercambiador, como ya se ha mencionado anteriormente, se han dispuesto dos placas tubulares, por lo que la placa tubular del extremo final (por donde sale el aceite) es la que está sometida a la presión que genera el líquido. Así pues, el cabezal en mi caso sólo está afectado por la presión atmosférica y será de hierro y redondeado, por razones estéticas y por albergar el giro de los tubos en forma de U. Estará fabricado en hierro ya que no hace falta que resista la corrosión al no estar en contacto con el aceite.

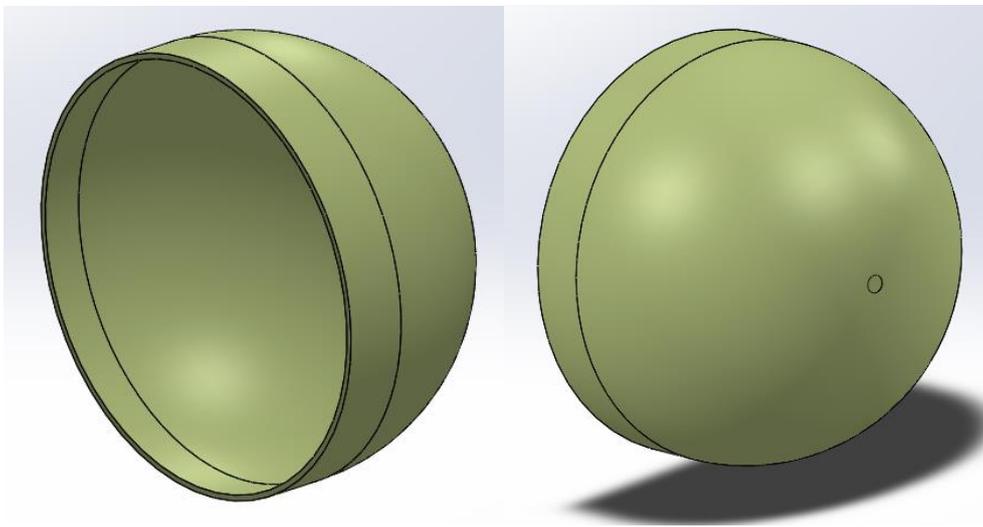


Figura 28: Cabezal final

- **Carcasa:** la carcasa es el recipiente del segundo fluido, aquel que no circula por los tubos (*agua motor* en mi caso). Es importante su dimensionamiento ya que el radio de los deflectores debe ajustarse a él lo mejor posible para evitar las fugas entre carcasa y deflector.

- Aplicación al proyecto:

La carcasa del intercambiador del trabajo está hecha de 302 Steel Stainless y como ya se ha mencionado anteriormente tiene unos diámetros interno y externo de 203.2

TRABAJO FIN DE GRADO

"DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR"

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

mm. y 208.74 mm. respectivamente. Su longitud total es de 1.56 m. y tiene entradas a ambos lados de 100 mm. de diámetro para el *agua motor*.

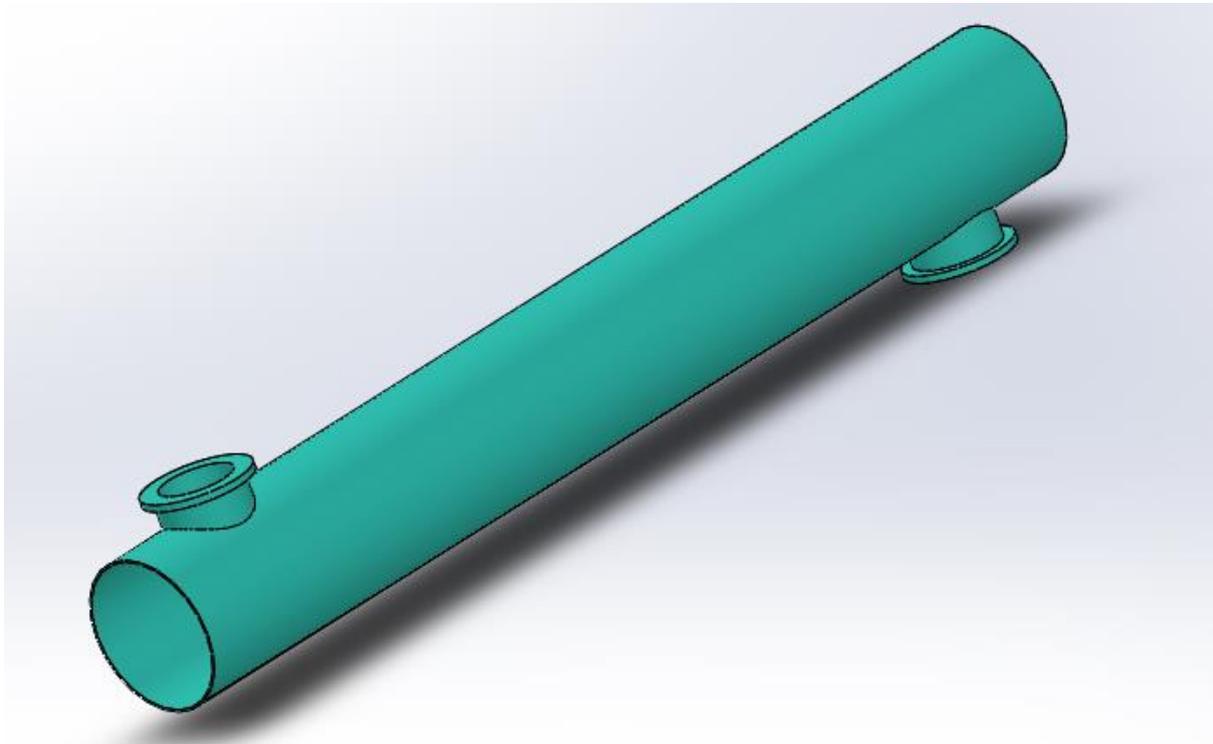


Figura 29: Carcasa

- **Cabezal de distribución/entrada:** Elemento similar a la carcasa, cuya función es recibir el fluido que ha de circular por el interior de los tubos, distribuirlo y recolectarlo para mandarlo fuera de él. Al ser similar a la carcasa, su material será también el acero inoxidable.
 - Aplicación al proyecto:

El cabezal del intercambiador del barco mide 140 mm. de largo contando con las dos aperturas para la entrada y salida del agua de los tubos. Tiene una separación en el centro para evitar que se mezclen los flujos.

Estará fabricada también de 302 Steel Stainless ya que debe soportar el contacto con el agua.

TRABAJO FIN DE GRADO

“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

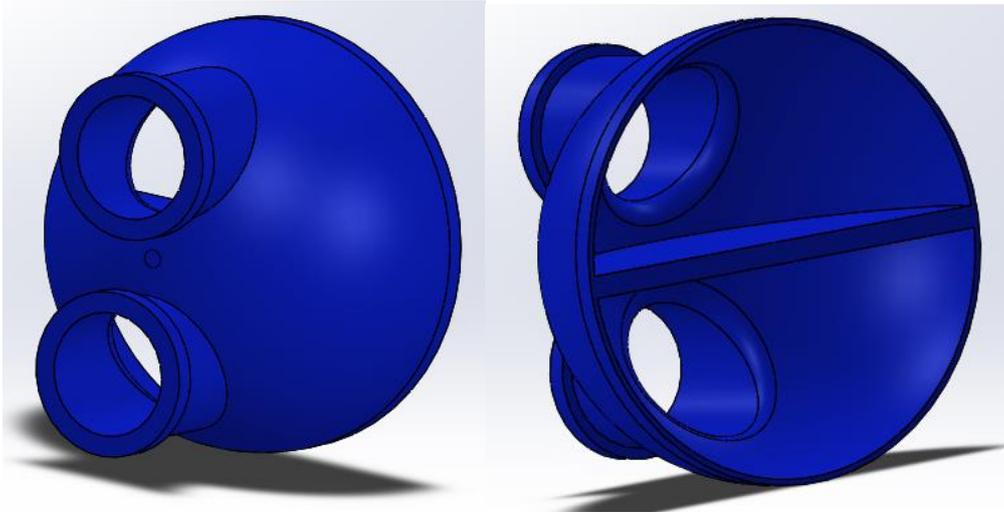


Figura 30: Cabezal de entrada

Es importante el detalle de dar formas redondeadas tanto aquí como en la carcasa a las uniones con los conductos de entrada, ya que eso hace que el líquido pueda fluir más fácilmente a través de la pieza y no encuentre trabas que compliquen el funcionamiento y análisis posterior.

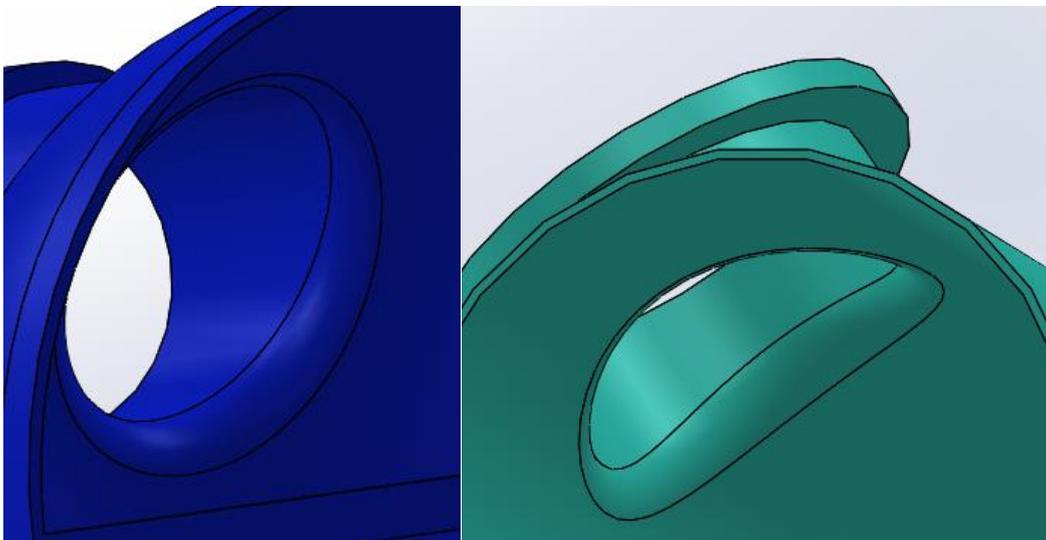


Figura 31: Detalle de los redondeos en cabezal y carcasa

TRABAJO FIN DE GRADO

“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Para empezar, se deben especificar las condiciones de trabajo para recrear la situación que se desea simular:

- **Paso 1:** permitir la conducción de calor en los sólidos.

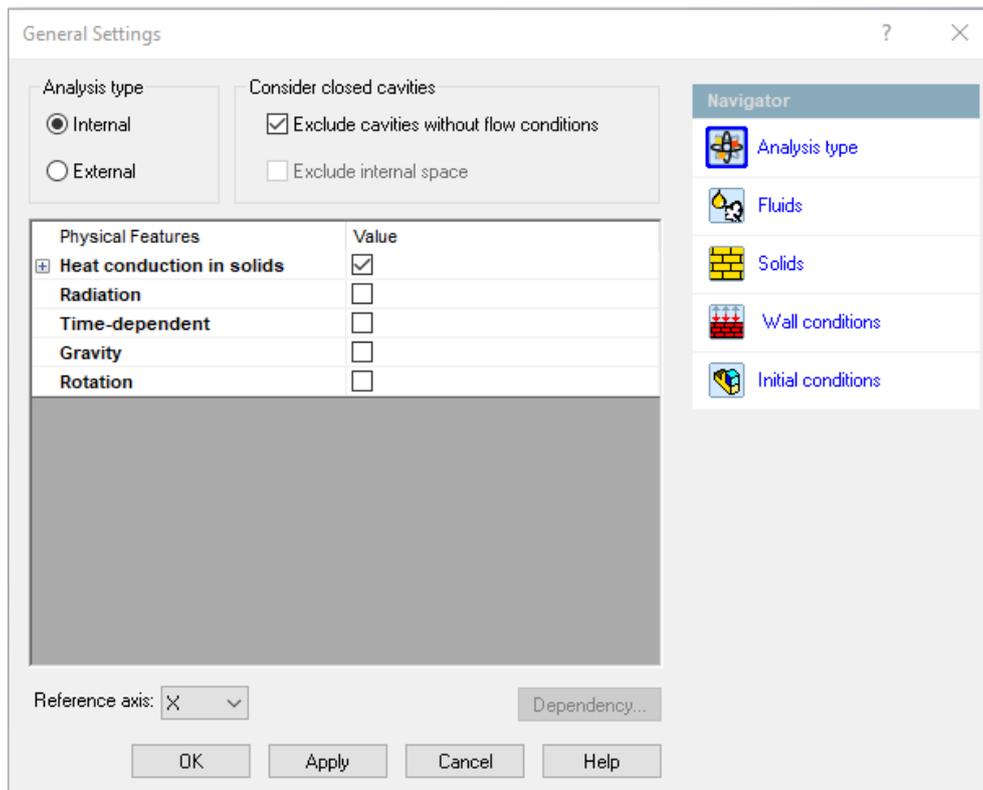


Figura 32

- **Paso 2:** añadir los fluidos que van a circular por el aparato, en este caso agua por ambos conductos.

TRABAJO FIN DE GRADO
“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”
GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

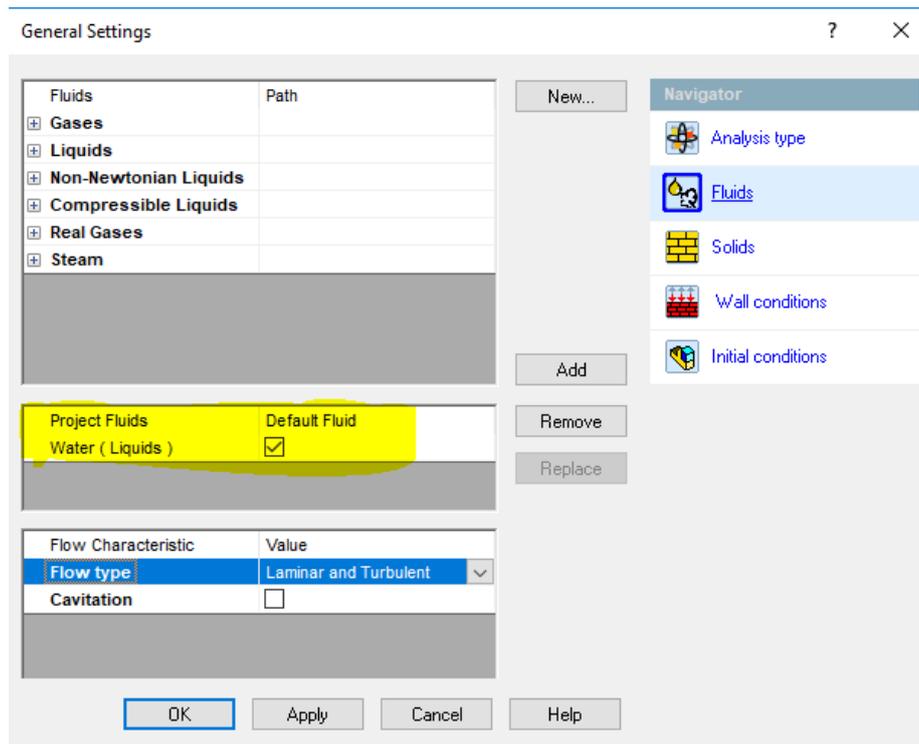


Figura 33

- **Paso 3:** añadir el material por defecto de los sólidos del intercambiador (en este caso se pone el cobre porque es el de los tubos, que son los más numerosos). Tras esto se deben cambiar los materiales del resto de partes que no son de cobre.

TRABAJO FIN DE GRADO
“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”
GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

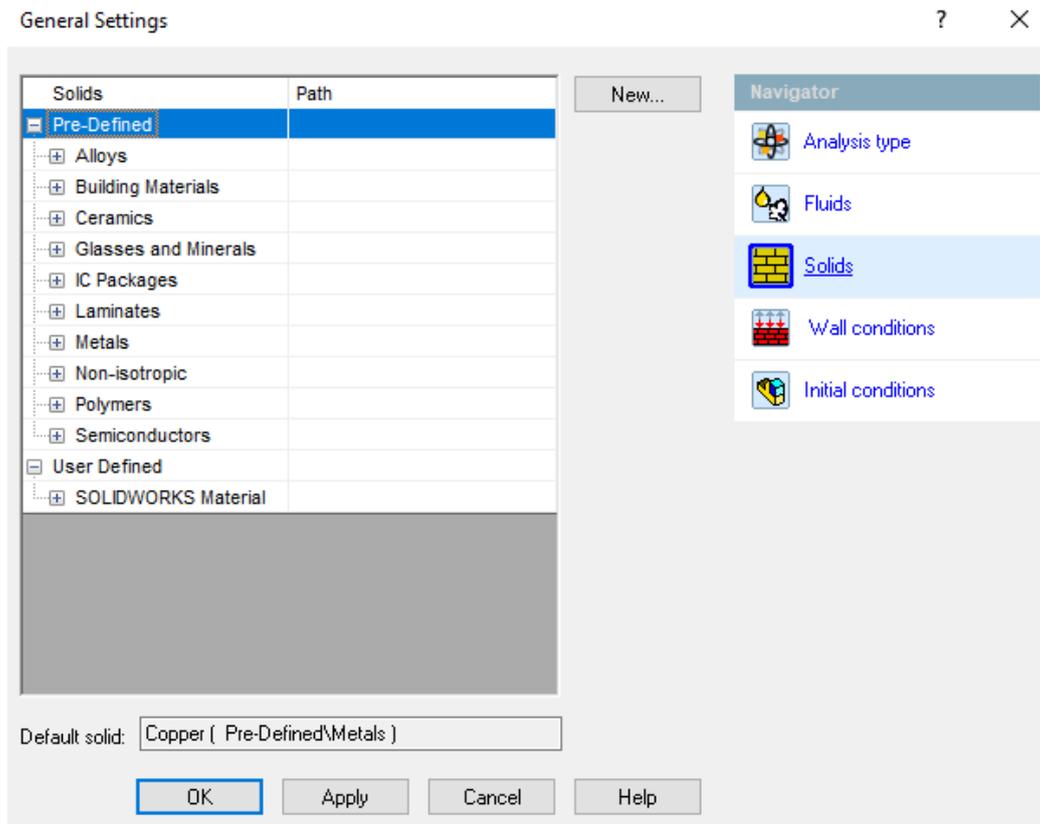


Figura 34: Definición del cobre como material por defecto

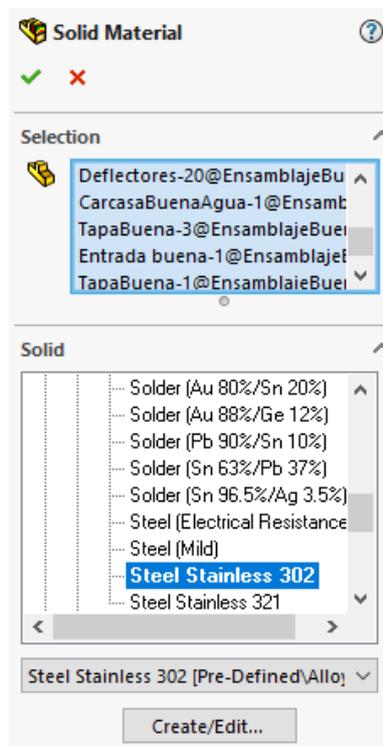


Figura 35: Cambio de algunos componentes a Steel Stainless 302

- **Paso 4:** definir la pared exterior de la carcasa como adiabática.

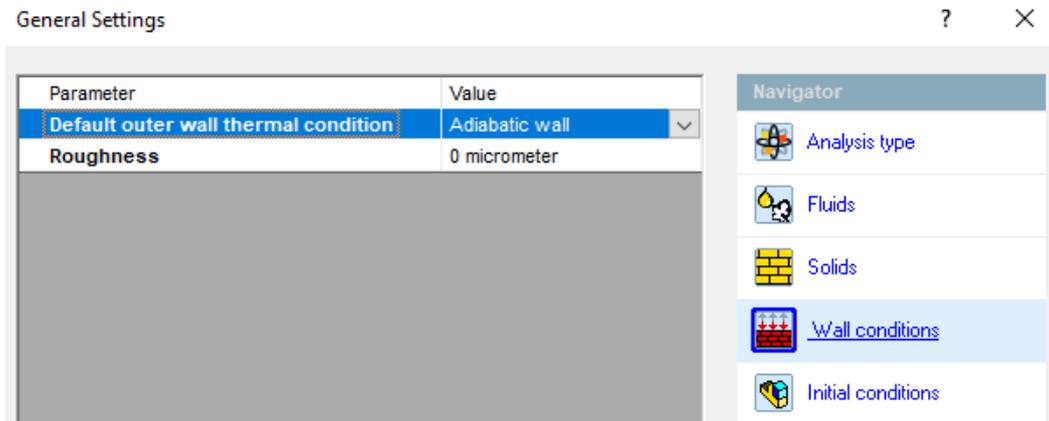


Figura 36

- **Paso 5:** definir las condiciones de contorno para la entrada y salida del agua.

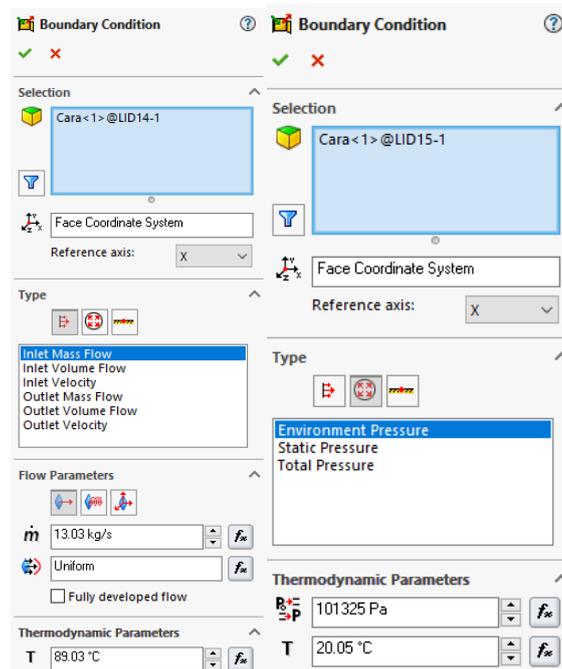


Figura 37: Ejemplo de condiciones de entrada y salida agua motor

- **Paso 6:** selección de la precisión de la malla e inicio de la simulación.

7.2. RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez pasan las horas necesarias para que el análisis CFD (Computational Fluid Dynamics) arroje los resultados, las opciones para mostrar los resultados son muy variadas.

Lo primero que se procedió a comprobar (ya que era el objetivo único de este intercambiador) fue la **temperatura** de los fluidos, para ver si se había transferido la cantidad de calor demandada del *agua motor* al *agua marina*.

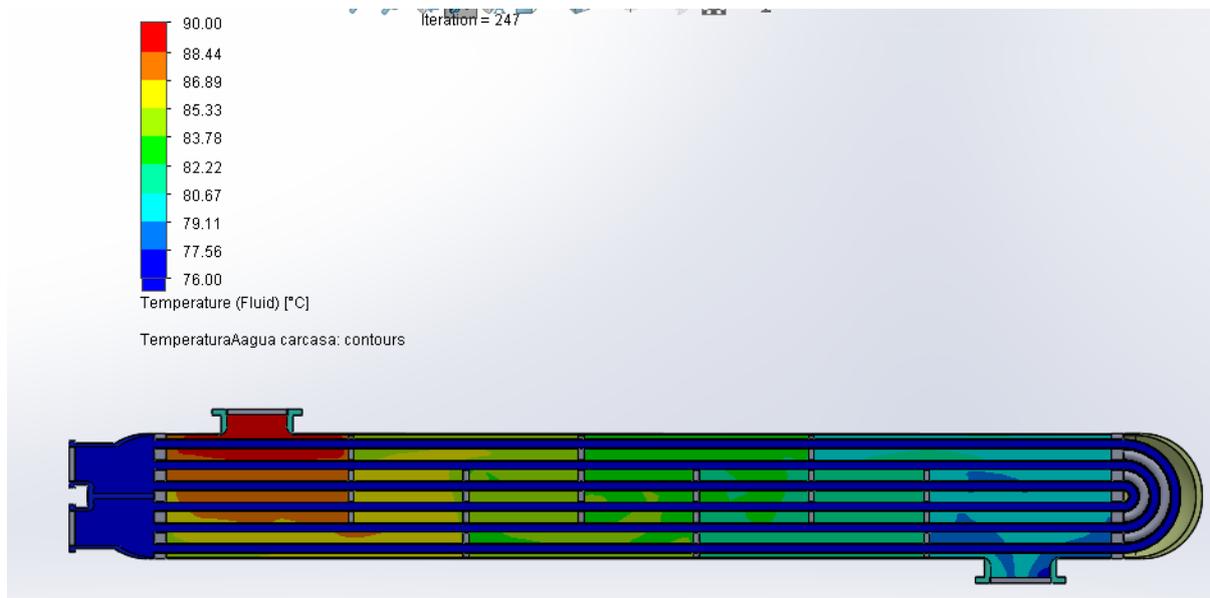


Figura 38: Temperatura del agua motor a lo largo de la carcasa

| Local Parameter | Minimum | Maximum | Average | Bulk Average | Surface Area [m ²] |
|--------------------------------------|---------|---------|---------|--------------|--------------------------------|
| Density (Fluid) [kg/m ³] | 971.84 | 997.46 | 973.75 | 972.50 | 0.0078 |
| Specific Heat (Cp) [J/(kg*K)] | 4181.2 | 4197.2 | 4195.4 | 4196.4 | 0.0078 |
| Temperature (Fluid) [°C] | 20.05 | 80.37 | 76.29 | 79.20 | 0.0078 |

Figura 39: Temperatura del agua motor a la salida

TRABAJO FIN DE GRADO
“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”
GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

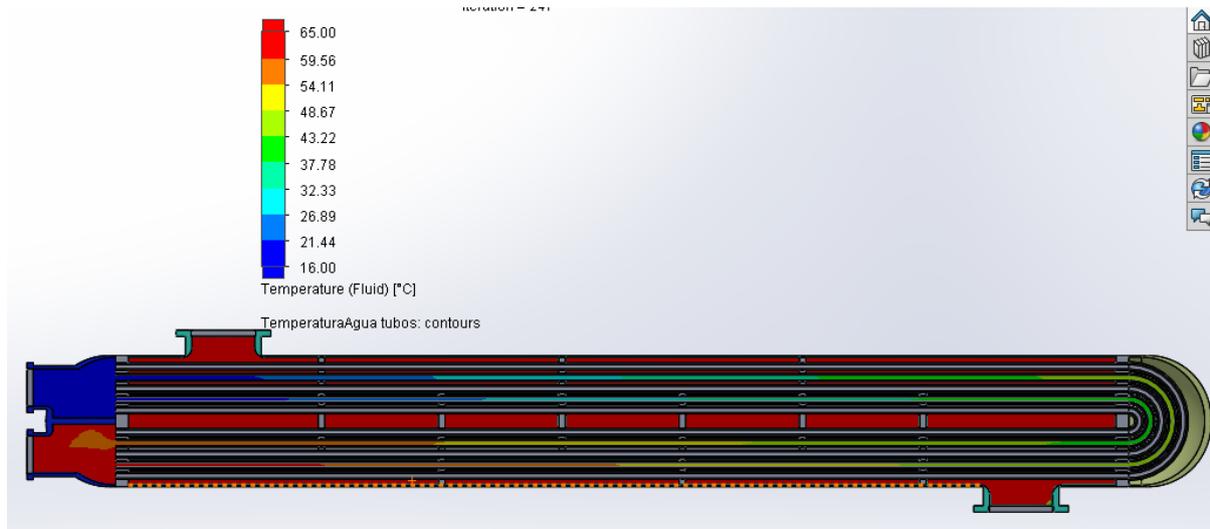


Figura 40: Cambios de temperatura del agua marina por los tubos

| Local Parameter | Minimum | Maximum | Average | Bulk Average | Surface Area [m ²] |
|--------------------------------------|---------|---------|---------|--------------|--------------------------------|
| Density (Fluid) [kg/m ³] | 981.05 | 983.05 | 982.32 | 982.32 | 0.0028 |
| Specific Heat (Cp) [J/(kg*K)] | 4185.0 | 4186.9 | 4185.7 | 4185.7 | 0.0028 |
| Temperature (Fluid) [°C] | 59.69 | 63.72 | 61.17 | 61.18 | 0.0028 |

Figura 41: Temperatura del agua marina a la salida

Como puede comprobarse, en la realidad (se entenderá por realidad el análisis), la temperatura del *agua motor* varía más de lo que se esperaba según los cálculos (se enfría hasta 76.29°C en vez de los 80°C que se esperaban). Esto se debe, sin duda, al impacto que tienen los deflectores en el flujo por la carcasa, que generan un flujo cruzado a los tubos y aumentan la velocidad del fluido respecto a la prevista, provocando un enfriamiento superior en el líquido.

Esto se puede comprobar si se echa un vistazo al calor intercambiado:

| Integral Parameter | Value | X-component | Y-component | Z-component | Surface Area [m ²] |
|-------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|--------------------------------|
| Mass Flow Rate [kg/s] | 13.0300 | | | | 0.0078 |
| Total Enthalpy Rate [W] | 1.988e+007 | | | | 0.0078 |

Figura 42: Calor que entra en la carcasa

| Integral Parameter | Value | X-component | Y-component | Z-component | Surface Area [m ²] |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------------------------|
| Mass Flow Rate [kg/s] | -13.0300 | | | | 0.0078 |
| Total Enthalpy Rate [W] | -1.936e+007 | | | | 0.0078 |

Figura 43: Calor que sale de la carcasa

TRABAJO FIN DE GRADO

“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Si restamos el **calor** que entra menos el que sale queda que el *agua motor* cede 520000 W, es decir 20 KW más de lo que se pretendía, cumpliendo perfectamente el objetivo.

| Integral Parameter | Value | X-component | Y-component | Z-component | Surface Area [m ²] |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------------------------|
| Mass Flow Rate [kg/s] | 2.7200 | | | | 0.0028 |
| Total Enthalpy Rate [W] | 3316373.577 | | | | 0.0028 |

Figura 44: Calor que entra en los tubos

| Integral Parameter | Value | X-component | Y-component | Z-component | Surface Area [m ²] |
|-------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------------------------|
| Mass Flow Rate [kg/s] | -2.7200 | | | | 0.0028 |
| Total Enthalpy Rate [W] | -3831981.120 | | | | 0.0028 |

Figura 45: Calor que sale de los tubos

Aquí se observa que el calor que sale es superior al que entra, lo cual explica la ganancia de temperatura. Sin embargo, al hacer la resta, se comprueba que dicha ganancia es de 515607.54 W, por lo que se deduce que hay aproximadamente 5 KW que cede el *agua motor* y no gana el *agua marina*, es decir, que se pierden por el camino.

A continuación, se puede calcular si los **coeficientes de transferencia de calor** que se calcularon sobre el papel se corresponden con la realidad. Se representan, para tomar como muestra, los $h_{cinterior}$ de 6 tubos del corte central:

TRABAJO FIN DE GRADO
“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”
GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

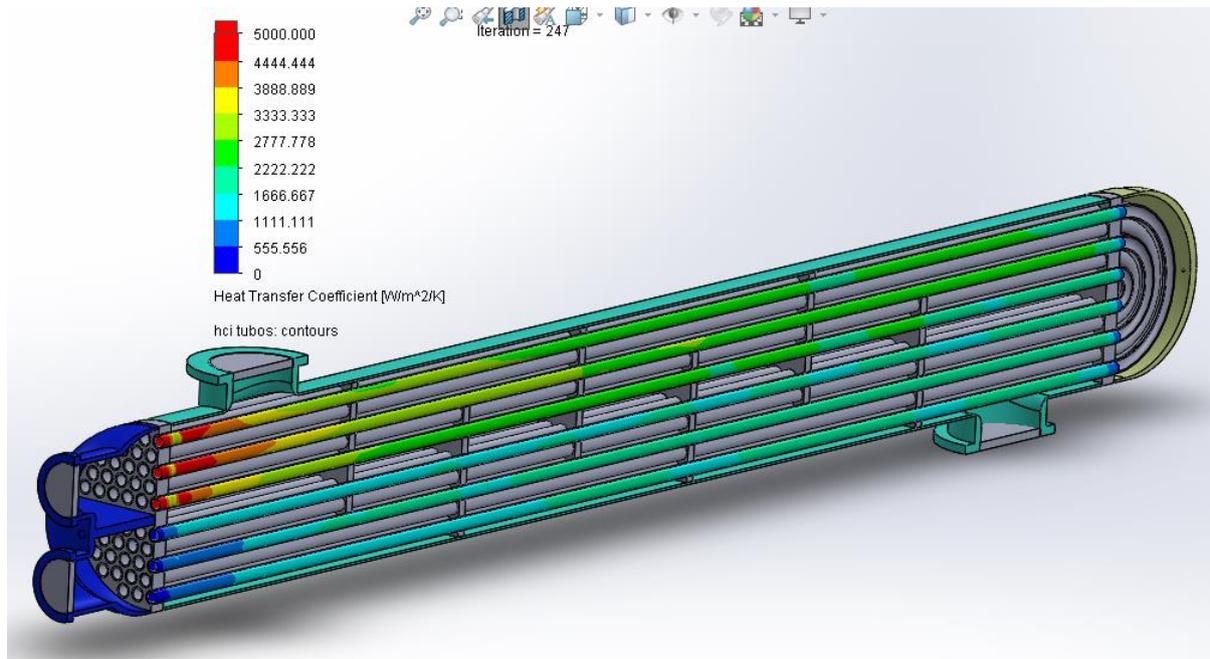


Figura 46

En esta gráfica se puede apreciar cómo el $h_{cinterior}$ medio de estos 6 tubos (en realidad son 3 en forma de U) sí que puede estar alrededor de los $3000 - 3500 W/m^2K$, lo que confirma los cálculos previos.

Asimismo, es importante tener en cuenta la **presión** a la que se debe someter al fluido a la entrada para que se produzca el flujo másico deseado. Por ello, se estudia mediante la siguiente gráfica y se hallan los valores exactos tanto para la carcasa como para los tubos.

TRABAJO FIN DE GRADO
“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”
GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

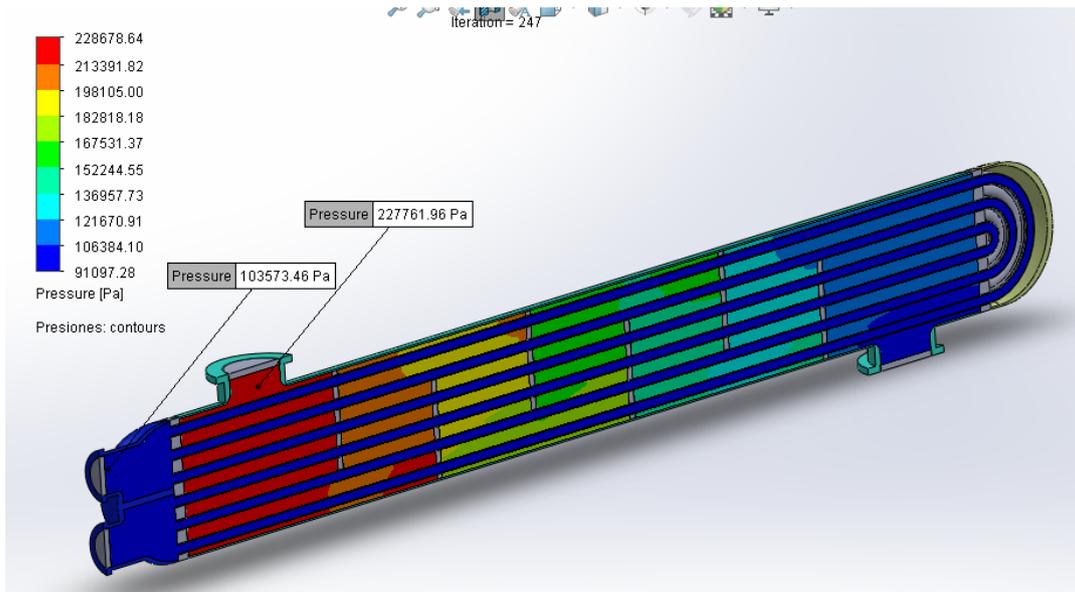


Figura 47

| Local Parameter | Minimum | Maximum | Average | Bulk Average | Surface Area [m ²] |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------------------------|
| Pressure [Pa] | 226646.48 | 227446.38 | 227024.81 | 227024.81 | 0.0078 |

Figura 48: Presión en la superficie de entrada de la carcasa

| Local Parameter | Minimum | Maximum | Average | Bulk Average | Surface Area [m ²] |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------------------------|
| Pressure [Pa] | 103567.24 | 103583.34 | 103573.44 | 103573.44 | 0.0028 |

Figura 49: Presión en la superficie de entrada de los tubos

Viendo los resultados, y teniendo en cuenta que a la salida se ha supuesto la presión atmosférica en ambos casos ($1atm = 101325 Pa$), los resultados nos dicen que la caída de presión en el *agua motor* es bastante elevada ya que ha de introducirse con una presión algo superior a las 2 atmósferas mientras que el *agua marina* sólo necesita a la entrada unos 2000 Pa más que la presión atmosférica para funcionar correctamente.

Una vez introducidos los fluidos con estas presiones, si todo fuese como en los cálculos previos, ya se sabrían las velocidades de circulación. Sin embargo, al no haber contado con los deflectores, se supone que el *agua motor* va a tener un comportamiento totalmente diferente del previsto a lo largo de su trayecto por la carcasa.

TRABAJO FIN DE GRADO

“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

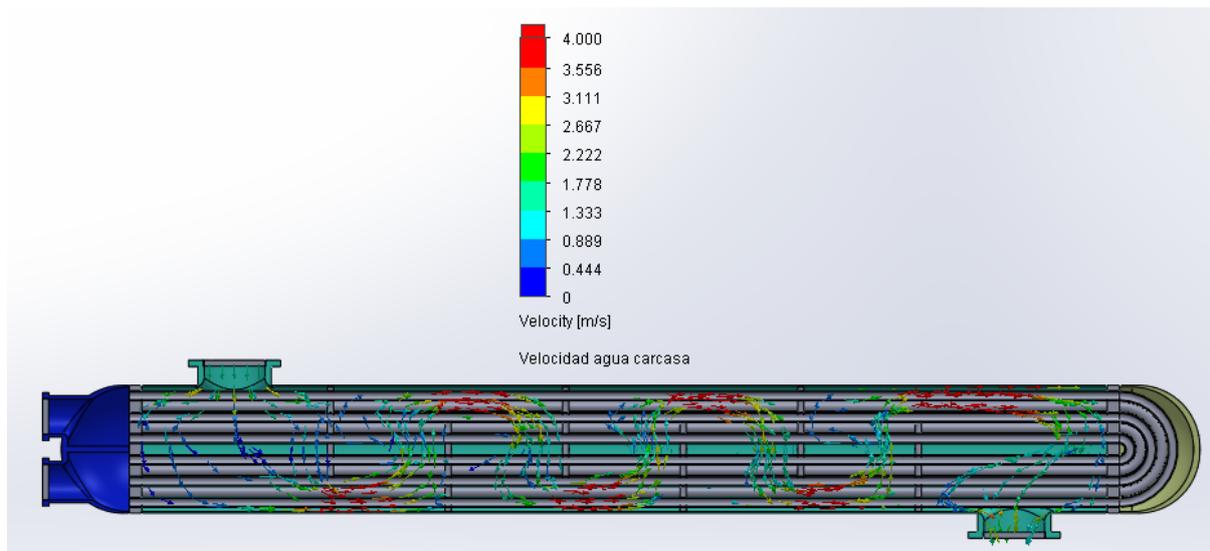


Figura 50

Como se puede comprobar, el *agua motor* gana muchísima velocidad en las zonas donde los deflectores provocan estrechamientos. Además, se observa que el área de intercambio es inferior al previsto ya que, al coger tanta velocidad, se salta los tramos de los tubos que quedan más pegados al deflector anterior.

Se podrían seguir hallando multitud de resultados como éstos ya que el programa ofrece opciones de los más variadas, pero con los aportados ya se puede comprobar la idoneidad del diseño para el fin que se necesita.

7.3. OTROS GRÁFICOS INTERESANTES

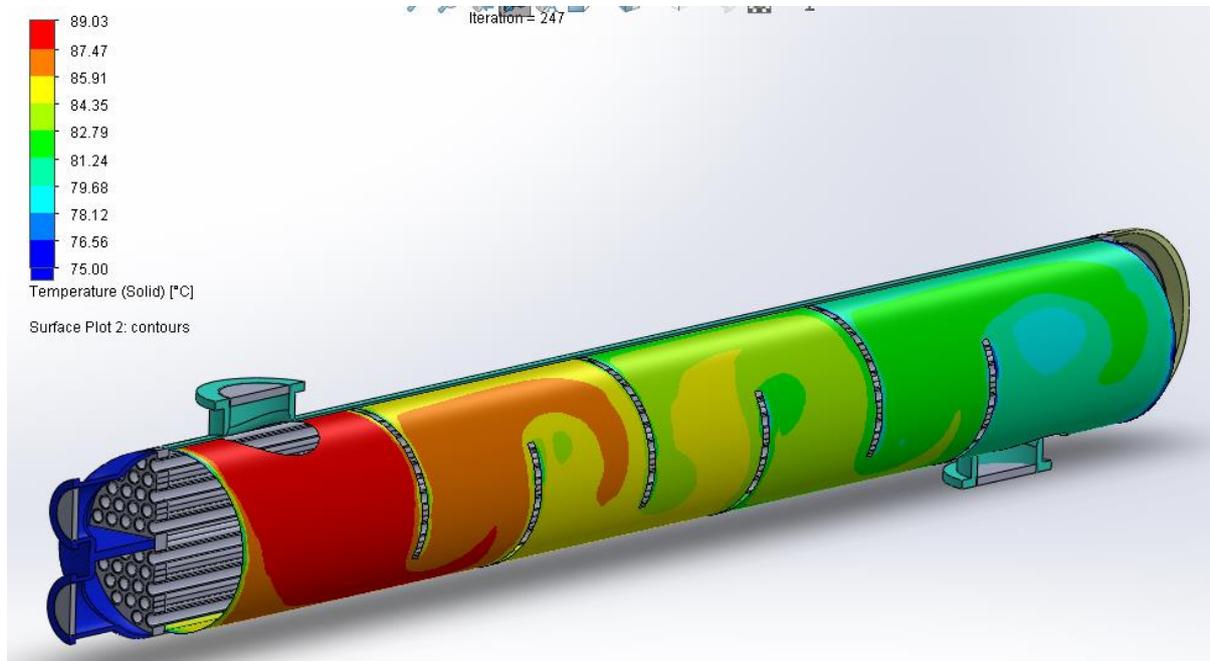


Figura 51: Temperatura de la carcasa (solid)

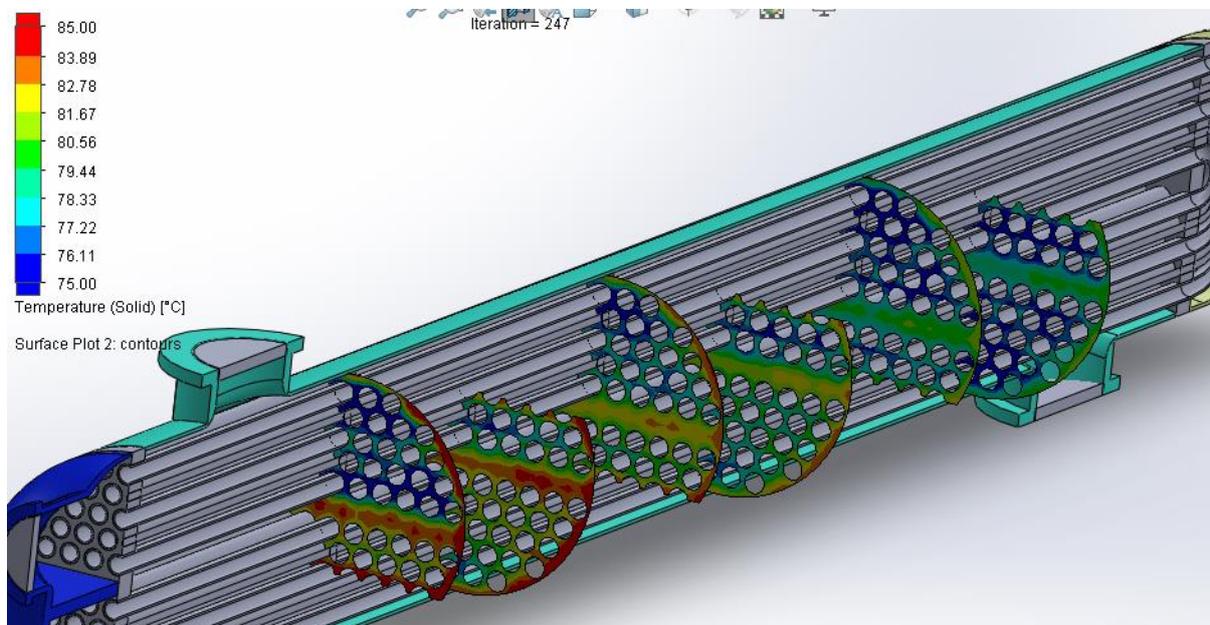


Figura 52: Temperatura de los deflectores

TRABAJO FIN DE GRADO
“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”
GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

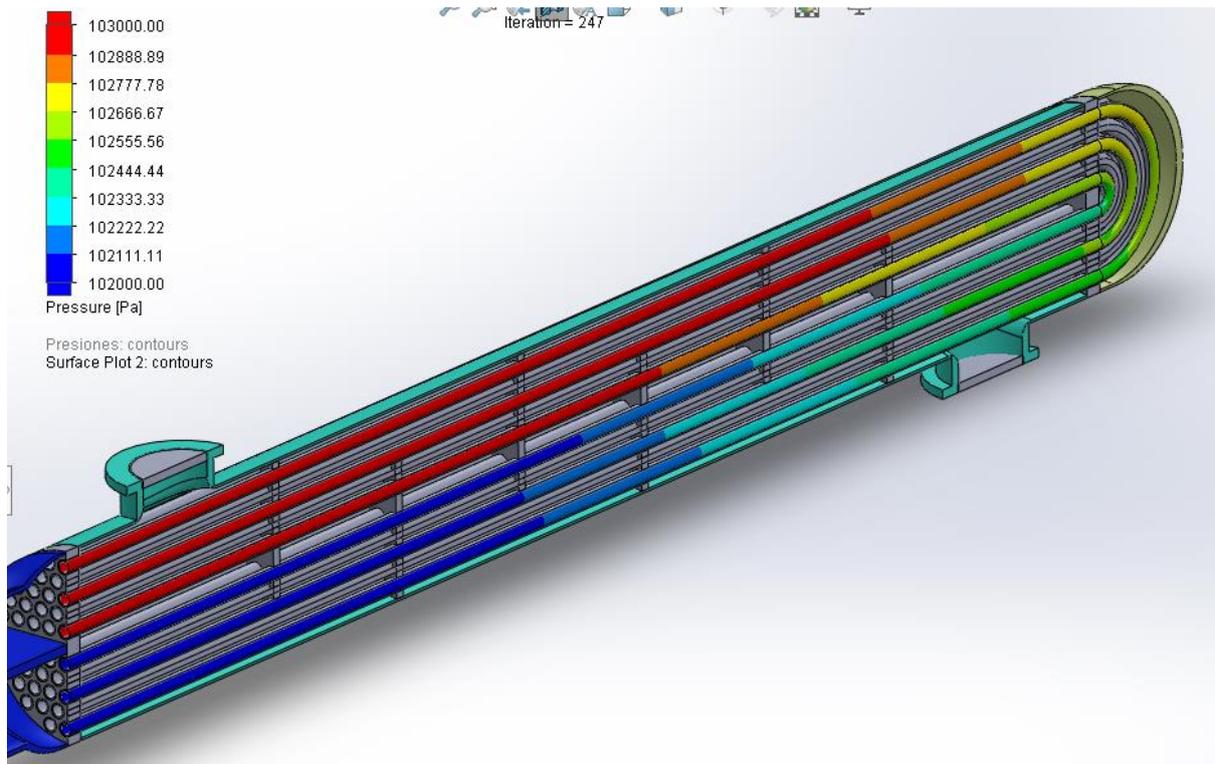


Figura 53: Presión en el interior de los tubos

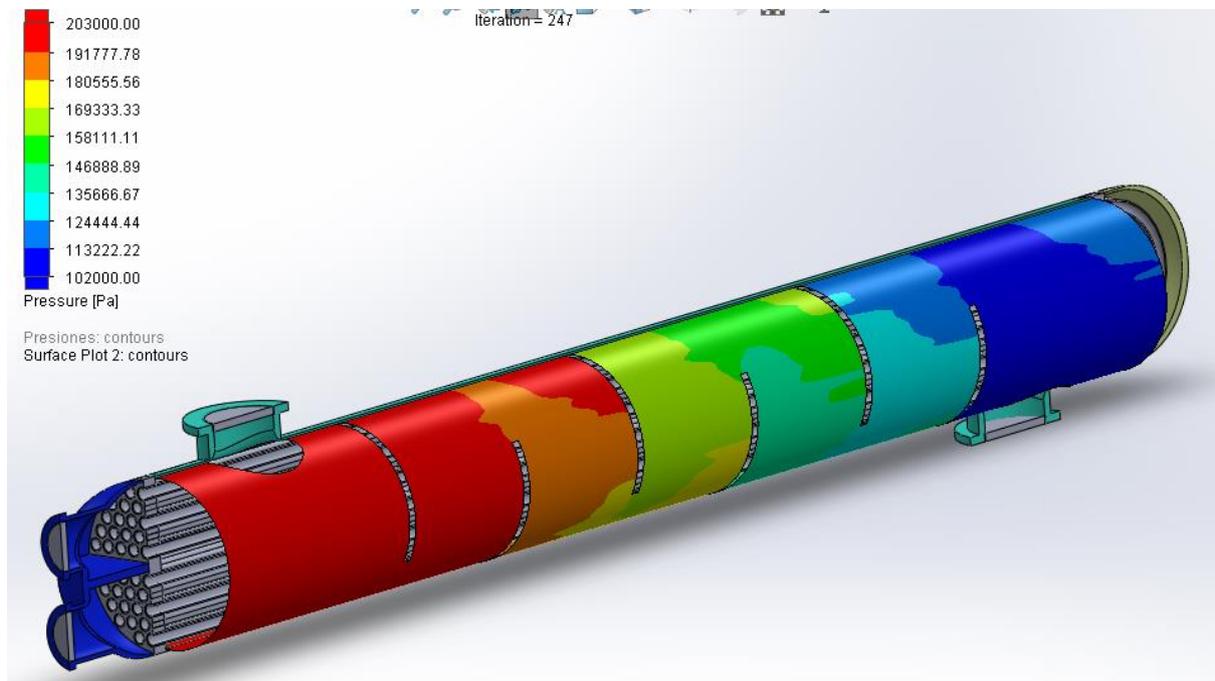


Figura 54: Presión a lo largo de la carcasa

8. PRESUPUESTO

8.1. PRESUPUESTO OFICINA TÉCNICA

8.1.1. OFICINA TÉCNICA

| ELEMENTO | CANTIDAD | PRECIO UNITARIO (€/HORA) | TOTAL (€) |
|------------------------|----------|--------------------------|---------------|
| <i>Oficina técnica</i> | 160h | 80 | 12800 |
| <i>Ingeniería</i> | 190h | 80 | 15200 |
| | | TOTAL | 28000€ |

8.1.2. LICENCIAS DE SOFTWARE

| ELEMENTO | CANTIDAD | PRECIO UNITARIO (€/Ud.) | TOTAL (€) |
|-----------------------------------|----------|--------------------------------|---------------|
| <i>Solidworks Standard</i> | 1 | 6600+1500 (suscripción anual) | 8100 |
| <i>Solidworks Flow Simulation</i> | 1 | 13995+3499 (suscripción anual) | 17494 |
| | | TOTAL | 25594€ |

8.1.3. NORMATIVA APLICABLE

| ELEMENTO | CANTIDAD | PRECIO UNITARIO (€/Ud.) | TOTAL (€) |
|---|----------|-------------------------|-------------|
| <i>TEMA (Standards of the Tubular Exchange Manufacturers Association)</i> | 1 | 403 | 403 |
| <i>ASME</i> | 1 | 443 | 443 |
| | | TOTAL | 846€ |

8.2. PRESUPUESTO DE MATERIALES

| ELEMENTO | CANTIDAD | MATERIAL | PRECIO UNITARIO (€/Kg.) | TOTAL (€) |
|---------------------------|----------|----------|-------------------------|----------------|
| <i>Cabezal de entrada</i> | 5.463 Kg | 302 SS | 2.50 | 13.65 |
| <i>Placa tubular (x2)</i> | 5.968 Kg | 302 SS | 2.50 | 14.92 |
| <i>Carcasa</i> | 62.57 Kg | 302 SS | 2.50 | 62.57 |
| <i>Cabezal final</i> | 3.961 Kg | Iron | 0.08 | 0.32 |
| <i>Deflectores (x6)</i> | 6.63 Kg | 302 SS | 2.50 | 16.57 |
| <i>Tubos (x38)</i> | 76.26 Kg | Copper | 6 | 457.56 |
| | | | TOTAL | 565.59€ |

8.3. PRESUPUESTO DE FABRICACIÓN

8.3.1. MANO DE OBRA

| TITULACIÓN | CANTIDAD | PRECIO UNITARIO (€/Kg.) | TOTAL (€) 500h |
|------------------------------|----------|-------------------------|----------------|
| <i>Jefe de Proyecto</i> | 1 | 80 | 40000 |
| <i>Ingeniero de Proyecto</i> | 1 | 80 | 40000 |
| <i>Técnico de control</i> | 1 | 70 | 35000 |
| <i>Oficial</i> | 1 | 70 | 35000 |
| <i>Operario cualificado</i> | 8 | 65 | 32500 |
| | | TOTAL | 147500€ |

8.3.2. OPERACIONES

| OPERACIÓN | CANTIDAD | PRECIO UNITARIO (€/h.) | TOTAL (€) |
|----------------------|----------|------------------------|-----------|
| <i>Oxicorte</i> | 10 | 60 | 600 |
| <i>Torneado</i> | 5 | 70 | 350 |
| <i>Plegado tubos</i> | 4 | 70 | 280 |
| <i>Rolado</i> | 4 | 70 | 280 |
| <i>Mecanizado</i> | 3 | 50 | 150 |

TRABAJO FIN DE GRADO*“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”*

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

| | | | |
|---|-----|--------------|----------------|
| <i>Soldadura perimetral placa tubos</i> | 10 | 80 | 800 |
| <i>Soldadura montaje</i> | 140 | 80 | 112000 |
| <i>Repaso de soldaduras</i> | 50 | 60 | 30000 |
| <i>Ensamblaje</i> | 250 | 20 | 50000 |
| | | TOTAL | 122180€ |

8.4. BALANCE FINAL DEL PRESUPUESTO

| SECCIONES A PRESUPUESTAR | IMPORTE |
|---------------------------------|---------------------|
| PRESUPUESTO DE OFICINA TÉCNICA | 54.440 € |
| PRESUPUESTO DE MATERIALES | 565,59 € |
| PRESUPUESTO DE FABRICACIÓN | 269.680 € |
| Total desglosado | 324.685,59 € |
| <i>CONCEPTO</i> | |
| (10% PEM) Gastos Generales | 32.468,56 € |
| (15% PEM) Beneficio Industrial | 4870.28 € |
| Base imponible | 37.338,84 € |
| <i>CONCEPTO</i> | |
| (21% PEM) IVA | 68.183,97 € |
| IVA | 392.869,56 € |
| PRESUPUESTO GENERAL | 430.208,40 € |

9. CONCLUSIÓN

Una buena eficiencia en un intercambiador de calor se obtiene a partir de un buen diseño y una acertada elección de los materiales para su fabricación. En este caso, como ya se ha explicado anteriormente, con la intención de poner unos límites al diseño, se ha decidido que su utilidad sea apoyar la refrigeración en el motor de un barco y que su tamaño se adapte al del espacio que hay disponible en el barco para él. Todo esto hace que su eficiencia se resienta un poco pero finalmente se ha podido comprobar que el intercambiador diseñado cumple con el objetivo requerido.

Si bien el objetivo último de este proyecto es la construcción completa del intercambiador, este trabajo tiene un alcance meramente teórico.

Originalmente, la primera idea fue que el líquido a refrigerar fuese aceite en vez de agua. Sin embargo, el programa de simulación de fluidos utilizado (Solidworks Flow Simulation) no permitía simular el fluido no newtoniano que intentaba crear como un flujo “laminar y turbulento”, sino solamente como un flujo “laminar”, arrojando resultados que se situaban totalmente fuera de rango. Así, viendo un reportaje del programa de televisión “Conexiones de la Ingeniería” sobre cómo se utilizaba el agua del mar para la ventilación de la Ópera de Sydney, surgió la idea de que algo parecido pudiese ser hecho para la refrigeración (mediante agua) del motor de un barco, posibilidad que adopté rápidamente ya que me permitía, además, acotar el tamaño que debía tener el intercambiador y fijar un punto de partida para los cálculos y el diseño.

Desde el punto de vista personal, este trabajo me ha servido para comprobar la utilidad de los conceptos estudiados en clase, fundamentalmente en Termodinámica e Ingeniería Térmica, en un proyecto comenzado desde cero. Además, me ha permitido introducirme en un campo de la ingeniería con muy diversas aplicaciones para industrias totalmente diferentes.

TRABAJO FIN DE GRADO

“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Finalmente, el aprendizaje en el manejo del programa Solidworks, con el cual he adquirido una gran soltura, ha sido una experiencia gratificante y que espero que sea de utilidad en el futuro.

10. BIBLIOGRAFÍA

- A.F. Mills. -TRANSFERENCIA DE CALOR. - ISBN 84-8086-194-0.- Ed McGraw-Hill/Irwin.INC., EE.UU.
- Saunders, e. A. D., 1988, *heat exchangers selection, design y construction*, New York, John Wiley & Sons, inc., pp. 3-83, 475-524.
- Teoría Ingeniería Térmica y de Fluidos (Pedro Fernández)
- Fundamentals of heat exchanger design
Ramesh K. Shah and Dusan P. Sekulic
WILEY
2003
- Manual para el cálculo de intercambiadores de calor y bancos de tubos aleteados
Yevgen Pysmennyy, Georgiy Polupan, Ignacio Carvajal Mariscal y Florencio Sánchez Silva
Editorial Reverté
2007
- Standards of the tubular exchanger manufacturers association (TEMA)
Eight edition.

TRABAJO FIN DE GRADO

"DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR"

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Enlaces a páginas web utilizadas:

- <http://www.ejemplos.co/10-ejemplos-de-conduccion-conveccion-y-radiacion/>
- <https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-564536439-radiador-de-aluminio-volkswagen-polo-2013-2014-2015-2016- JM>
- <https://www.pinterest.es/pin/508695720393553534/>
- <https://www.elcorteingles.es/electrodomesticos/A22065992-aire-acondicionado-split-1x1-inverter-lg-confort12set-con-3010-frigh-y-3268-kcalh/>
- http://guiamecanica.blogspot.com.es/2012/07/aire-acondicionado-y-climatizacion-del_19.html
- https://es.wikipedia.org/wiki/Intercambiador_de_calor_de_carcasa_y_tubos#/media/File:Esquema_intercambiador_de_calor.jpg
- <http://t-solucion.com/noticias/funcionamiento-del-intercambiador-de-calor-a-placas/>
- <http://www.frimont.com/contenido/productos/fmos.html>
- <http://www.ellipseco.com/portfolio/intercambiadores-en-espiral/>
- <http://www.monografias.com/docs113/dimensionamiento-intercambiadores-calor-tubulares/dimensionamiento-intercambiadores-calor-tubulares.shtml>
- <https://es.slideshare.net/yumardiaz/intercambiadores-decalortiposgeneralesyaplicaciones>
- <https://www.cenam.mx/sm2010/info/carteles/sm2010-c29.pdf>
- <http://www.tema.org/highlig8.html>
- [https://www.asme.org/products/courses/codigo-seccion-ix-soldadura-desarrollo-\(1\)](https://www.asme.org/products/courses/codigo-seccion-ix-soldadura-desarrollo-(1))
- https://www.alibaba.com/trade/search?fsb=y&IndexArea=product_en&CatId=&SearchText=iron+plate&viewtype=
- <https://www.merca2.es/precios-hierro/>
- <http://www.scrapmetalpricer.com/es/>
- http://personales.upv.es/vsoto/index_archivos/FTP/TC/Conveccion.pdf

TRABAJO FIN DE GRADO

“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

“DISEÑO Y CÁLCULO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”

GRADO INGENIERÍA TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES