



Centro Universitario de la Defensa En la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis y rediseño de una instalación con intercambiador de calor de doble tubo

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Santiago Hernández de Armijo González-Cela

DIRECTORES: Antón Cacabelos Reyes

CURSO ACADÉMICO: 2019-2020

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa En la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis y rediseño de una instalación con intercambiador de calor de doble tubo

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General / Infantería de Marina

RESUMEN

En este trabajo de fin de grado hemos realizado el análisis y rediseño de una instalación con intercambiador de calor con doble tubo que se encuentra en el laboratorio de motores de la Escuela Naval Militar. La idea principal de este rediseño y análisis, es elaborar una práctica de laboratorio para las prácticas de Termodinámica.

Para realizar y poder alcanzar este objetivo, hemos tenido que realizar diversas pruebas de mantenimiento, ya que la instalación estudiada es bastante antigua y lleva años en desuso. También se ha rediseñado alguno de los componentes de los que se constituye la instalación; principalmente el calentador de tubos y carcasa, en el que se ha sustituido los tubos interiores que realizaban la transferencia de calor por una resistencia eléctrica instantánea.

El intercambiador estudiado permite adoptar diferentes configuraciones y formas de trabajo. Dependiendo de la posición en la que se coloquen las llaves de tres vías de las que dispone la instalación, permiten o bloquean el paso del agua, permitiendo que la instalación trabaje con flujo paralelo o a contraflujo. Además, durante el desarrollo del trabajo, se ha estudiado de forma teórica cómo se comporta nuestra instalación variando los caudales de entrada en el intercambiador, tanto para flujo paralelo como contraflujo.

Finalmente, hemos desarrollado una práctica de laboratorio con el fin de que los alumnos que cursen la asignatura de Termodinámica y transmisión de calor puedan observar las diferencias existentes entre los cálculos teóricos aquí desarrollados, y los cálculos prácticos y toma de datos experimentales que realizar en el laboratorio.

PALABRAS CLAVE

Intercambiador de calor, temperatura, fluido, calor, transferencia de calor.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero comenzar agradeciendo el esfuerzo realizado por mi director de TFG, el Señor Cacabelos, por su incansable voluntad de realizar el trabajo propuesto pese a las vicisitudes que han ido surgiendo durante la elaboración del mismo.

En segundo lugar quiero recalcar la dedicación y tiempo invertidos por el grupo de mantenimiento de la Escuela Naval. Con especial mención al Sargento Primero Llamazares y al Capitán de Corbeta González Pastoriza. Ambos han conseguido, gracias a su disponibilidad y experiencia, que este trabajo saliera adelante en momentos difíciles.

Por último, quiero agradecer y dedicar este trabajo a un gran amigo y compañero cuya ausencia deja un inmenso vacío en la Escuela, la brigada y nuestras vidas. No hay forma de expresar el profundo dolor con el que escribo estas palabras. Cada momento y experiencia vivida durante estos cinco años han sido un regalo del que estaré eternamente agradecido. Lograste que toda alegría fuera infinitamente mejor a tu lado y que los momentos difíciles no lo fueran tanto. Con tu ejemplo, nos has enseñado mucho más de lo que puedes imaginar.

Al AF Gibert Guitart, que siempre me ha acompañado, animado y ayudado en estos duros, pero felices, cinco años de mi vida. Siempre te recordaremos con la alegría del que sabe que estás descansando en un lugar mejor. Gracias por servirme de inspiración y motivación. Sé que nos volveremos a encontrar algún día, la muerte no es el final.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Ecuaciones	5
1.1 Introducción	7
1.2 Objetivos	7
1.3 Metodología	7
2 Estado del arte	8
2.1 Introducción	8
2.1.1 Antecedentes	8
2.1.2 Conceptos básicos	8
2.2 Tipos de transferencia de calor	9
2.2.1 Conducción	9
2.2.2 Convección	12
2.2.3 Radiación	19
2.3 Intercambiadores de calor	20
2.3.1 Intercambiadores de doble tubo	23
2.3.2 Flujo paralelo	24
2.3.3 Contraflujo	25
2.3.4 Condiciones especiales de operación	26
3 Desarrollo	27
3.1 Introducción	27
3.1.1 Instalación inicial	27
3.1.2 Circuito frío	29
3.1.3 Vaso de expansión	29
3.1.4 Circuito caliente	30
3.1.5 Electrobomba centrífuga	31
3.1.6 Intercambiador de tubo y carcasa	32
3.2 Metodología	33
3.2.1 Pruebas de mantenimiento	33
3.2.2 Pruebas de estanqueidad	33
3.2.3 Bomba centrífuga	34
3.2.4 Limpieza interior del circuito y caudalímetros	35
3.3 Estudio de alternativas viables para la sustitución del calentador de vapor.	36

3.3.1 Caldera eléctrica	36
3.3.2 Resistencia eléctrica.....	37
3.4 Análisis del intercambiador	39
3.4.1 Régimen estacionario y régimen transitorio	39
3.4.2 Metodología NUT.....	40
4 Resultados	42
4.1 Descripción del apartado.....	42
4.1.1 Ensayo teórico	42
4.1.2 Suposiciones iniciales.....	42
4.1.3 Cálculos teóricos.....	43
4.1.4 Primer Caso: Caudal máximo en flujo paralelo y contraflujo	45
4.1.5 Segundo Caso: caudal medio en flujo paralelo y contraflujo	52
4.1.6 Tercer caso: caudal mínimo en flujo paralelo y contraflujo	55
5 Conclusiones y líneas futuras	57
5.1 Conclusiones	57
5.1.1 Conclusiones generales.....	57
5.1.2 Análisis de resultados	57
5.2 Líneas futuras	58
6 Bibliografía.....	59
Anexo I: Propiedades de agua saturada.....	61
Anexo II: Imagen ampliada del plano	62
Anexo III: Experiencia práctica: intercambiador de doble tubo	63
Introducción	63
Ensayos teóricos.....	64
Pasos para realizar la práctica:	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Transferencia de calor por conducción, convección y radiación.....	9
Figura 2-2 Ejemplo de conducción	9
Figura 2-3. Ejemplo sobre la Ley de Fourier	10
Figura 2-4 Resistencia térmica en un tubo	12
Figura 2-5 Ejemplo de convección.....	13
Figura 2-6 Capa límite hidrodinámica y térmica.....	15
Figura 2-7 Flujo laminar, zona de transición y flujo turbulento.....	16
Figura 2-8 Cálculo de Nu para flujo laminar.....	17
Figura 2-9 Capa límite en el interior de un tubo cilíndrico	18
Figura 2-10 Ejemplo de radiación térmica	20
Figura 2-11 Intercambiador de doble tubo	21
Figura 2-12 Intercambiador de tubos y coraza con aletas	22
Figura 2-13 Intercambiador de flujo cruzado	22
Figura 2-14 Intercambiadores de calor compactos.....	22
Figura 2-15 Esquema intercambiador de tubos concéntricos.....	24
Figura 2-16 Representación de las direcciones del flujo de fluidos en los intercambiadores paralelos	25
Figura 2-17 Representación de las direcciones del flujo de fluidos en contraflujo.....	25
Figura 2-18 Condiciones especiales de operación.....	26
Figura 3-1 Vista general del intercambiador de calor	28
Figura 3-2 Esquema de funcionamiento del intercambiador de calor	28
Figura 3-3 Diagrama resumen del circuito frío	29
Figura 3-4 Vaso de expansión	30
Figura 3-5 Ciclo resumen del fluido caliente	31
Figura 3-6 Electrobomba centrífuga Otral	32
Figura 3-7 Intercambiador de carcasa y tubos.....	33
Figura 3-8 Marca para la Prueba de estanqueidad positiva.....	34
Figura 3-9 Bomba centrífuga en mal estado.....	35
Figura 3-10 Comparativa de caudalímetro atascado con el caudalímetro limpio	36
Figura 3-11 Carcasa del intercambiador de carcasa y tubos	37
Figura 3-12 tubos del intercambiador de carcasa y tubos	38
Figura 3-13 Resistencia eléctrica de inmersión con termostato RIT-511C.....	38
Figura 3-14 Tapa inicial del calentador.....	39

Figura 3-15 Gráfica ε -NUT para flujo paralelo y contraflujo respectivamente.....	41
Figura 4-1 Datos fijos.....	44
Figura 4-2 Datos iniciales.....	44
Figura 4-3 Tabla A.6 y Gráfica NUT	44
Figura 4-4 Distintos caudales para el circuito de agua caliente	45
Figura 4-5 Datos iniciales.....	46
Figura 4-6 Propiedades agua fría saturada	46
Figura 4-7 Balance calentador 1º paso de agua.....	46
Figura 4-8 Propiedades agua fría y caliente para el 1º paso	46
Figura 4-9 Propiedades del flujo	47
Figura 4-10 Valores característicos	47
Figura 4-11 Balance intercambiador doble tubo 1º paso.....	47
Figura 4-12 Balance de energía 2º paso	48
Figura 4-13 Propiedades agua caliente y flujo en el 2º paso	48
Figura 4-14 Valores característicos 2º paso	48
Figura 4-15 Balance intercambiador doble tubo 2º paso agua caliente.....	49
Figura 4-16 Balance intercambiador de calor 3º paso.....	49
Figura 4-17 Balance de Energía	50
Figura 4-18 Datos para la gráfica con flujo paralelo.....	50
Figura 4-19 Gráfica para flujo paralelo	51
Figura 4-20 Gráfica a contraflujo	51
Figura 4-21 Datos iniciales para el segundo ensayo	52
Figura 4-22 Valores característicos	52
Figura 4-23 Balance de energía para el segundo paso	52
Figura 4-24 Balance total	53
Figura 4-25 Valores gráfica con flujo paralelo.....	53
Figura 4-26 Gráfica flujo paralelo	53
Figura 4-27 Gráfica a contraflujo	54
Figura 4-28 Balance total de energía para caudal mínimo	55
Figura 4-29 Gráfica flujo paralelo	55
Figura 4-30 Gráfica a contraflujo	56

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2-1 Ley de Fourier	10
Ecuación 2-2 Velocidad de transferencia de calor Ley de Fourier	10
Ecuación 2-3 Aplicación de ley de Fourier	10
Ecuación 2-4 Transferencia de calor en medio isotrópico	11
Ecuación 2-5 Cilindro hueco	11
Ecuación 2-6 Ley de Fourier aplicada a un cilindro.....	11
Ecuación 2-7 Distribución de temperaturas	12
Ecuación 2-8 Transferencia de calor	12
Ecuación 2-9 Resistencia térmica.....	12
Ecuación 2-10 Flujo local de calor	13
Ecuación 2-11 Transferencia global.....	13
Ecuación 2-12 Coeficiente de calor por convección	14
Ecuación 2-13 Tasa de transferencia de calor	14
Ecuación 2-14 Calor calculado con el coeficiente global de transferencia de calor	14
Ecuación 2-15 Número de Reynolds	15
Ecuación 2-16 Número de Nusselt	16
Ecuación 2-17 Número de Nusselt para flujo turbulento	16
Ecuación 2-18 Número de Prandtl	17
Ecuación 2-19 Flujo másico	17
Ecuación 2-20 Transferencia de calor por convección.....	18
Ecuación 2-21 Transferencia de calor por convección 2.....	18
Ecuación 2-22 Calor relacionado con la superficie cilíndrica.....	18
Ecuación 2-23 Relación del calor con la resistencia	19
Ecuación 2-24 Coeficiente global de transferencia de calor	19
Ecuación 2-25 Transferencia de calor por radiación	20
Ecuación 2-26 Coeficiente global de transferencia de calor	23
Ecuación 2-27 Transferencia de calor por unidad de tiempo	23
Ecuación 2-28 Transferencia de calor con diferencia de temperaturas media	23
Ecuación 2-29 Balance de temperaturas en flujo paralelo	24
Ecuación 2-30 Balance de temperaturas para flujo contraflujo.....	25
Ecuación 3-1 Tasa máxima de transferencia de calor	40
Ecuación 3-2 Capacidad calórica	40
Ecuación 3-3 Capacidad relativa	40

Ecuación 3-4 Cálculo del número NUT41

Ecuación 3-5 Eficiencia.....41

1.1 Introducción

En los buques de la Armada española, los intercambiadores de calor tienen un papel fundamental en el buen funcionamiento del mismo en aplicaciones como acondicionamiento de aire, calefacción, cámaras frigoríficas etc. Por este motivo, el estudio del funcionamiento de los intercambiadores de calor es vital, ya que facilitará que los alumnos estén familiarizados con este proceso en su vida futura como Oficiales de la Armada. Por este motivo, se ha realizado este trabajo, cuyo objetivo es realizar una práctica para los alumnos basada en este intercambiador de doble tubo.

1.2 Objetivos

El principal objetivo de este TFG es recuperar el intercambiador de calor que se encuentra en el laboratorio de motores para las prácticas de la asignatura Termodinámica y transmisión de calor. Esto lo conseguiremos mediante el análisis y rediseño de la instalación, ya que actualmente se encuentra inoperativa. El intercambiador que se pretende recuperar, se corresponde con un intercambiador de tubos concéntricos de la empresa ISI Impianti del año 1981. En esta instalación, se permite la opción de variar los caudales de entrada del circuito caliente incrementando la pérdida de carga mediante una válvula y, además, podemos cambiar indistintamente la forma de trabajo variando la posición de las llaves pertinentes, trabajando con flujo paralelo o a contraflujo. Por eso, estudiaremos diversos casos según los caudales y sentido del flujo de manera teórica. Gracias a este análisis y rediseño, los futuros alumnos del Centro Universitario de la Defensa podrán tener una experiencia práctica sobre los intercambiadores de calor donde comparar los resultados prácticos con el estudio teórico desarrollado en este trabajo.

1.3 Metodología

El presente trabajo está estructurado en tres partes bien diferenciadas. En una primera parte se enunciarán las principales leyes y ecuaciones de transmisión de calor necesarias para comprender el funcionamiento del intercambiador de calor. En la segunda parte, se realizará un estudio previo sobre el estado de la instalación con pruebas de mantenimiento, limpieza y puesta a punto de la instalación. Finalmente la tercera parte consta de un análisis de la instalación, donde se decidirá si sustituir el calentador de tubos y carcasa por una caldera eléctrica o una resistencia eléctrica instantánea. En esta parte también se realizarán los cálculos teóricos para los diferentes caudales de entrada.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

2.1.1 Antecedentes

A lo largo de la historia, el ser humano ha sido capaz de aprovechar los recursos de la naturaleza mediante el uso de la tecnología a su alcance. Uno de los recursos a partir del cual el ser humano se ha beneficiado durante su existencia, ha sido el aprovechamiento de la transferencia de calor que experimentan dos cuerpos a diferentes temperaturas. El uso de la energía que se depende en este proceso, ha sido crucial para el desarrollo de la sociedad actual. Con la evolución de la sociedad y, por tanto, la mejora de los procedimientos y el perfeccionamiento de las técnicas para aprovechar esta energía, en numerosos ámbitos se han ido creando dispositivos e instalaciones para aprovechar eficientemente este intercambio de energía. Uno de los dispositivos actuales más destacados son los intercambiadores de calor. Los intercambiadores de calor cobran gran importancia debido a que forman parte de nuestra vida cotidiana y contribuyen indudablemente a incrementar nuestra calidad de vida.

Actualmente, la comprensión del funcionamiento de instalaciones en las que se producen intercambios energéticos debido a la transferencia de calor, tiene importancia en muchas aplicaciones de ingeniería. Por tanto, representa una extensa parte de nuestra formación como oficiales de la Armada española en el Centro Universitario de la Defensa a lo largo de toda la carrera. Sin embargo, la Escuela Naval Militar no cuenta con una experiencia práctica de Termodinámica donde se pueda comprobar el funcionamiento y análisis de una instalación con un intercambiador de calor.

2.1.2 Conceptos básicos

Para comenzar y comprender las bases de este trabajo, se intentará explicar de forma sintetizada varias definiciones y conceptos básicos tales como Transferencia de calor, volumen de control, conservación de la energía, convección, conducción, radiación o termodinámica.

El estudio termodinámico trata las interacciones de un sistema con su alrededor cuando éstos se encuentran a distintas temperaturas. Sin embargo, la Termodinámica sólo estudia los estados iniciales y finales que se producen tras esta transferencia de energía. Esta transferencia de energía se conoce comúnmente como transferencia de calor.

Sin embargo, para poder analizar el caso práctico al que nos enfrentaremos en el laboratorio debemos identificar en primer lugar el volumen de control. Esto no es más que una región del espacio limitada a través de la cual se producen intercambios de energía y de materia.

Por lo tanto, para un volumen de control determinado, siempre que exista una diferencia de temperaturas entre distintos cuerpos habrá transferencia de calor entre los mismos. Esta transferencia de calor puede ocurrir de tres formas distintas denominadas conducción, convección y radiación; las cuales se explicarán brevemente a continuación centrándonos principalmente en la conducción y la convección, ya que son los procesos más relevantes en un intercambiador de calor.

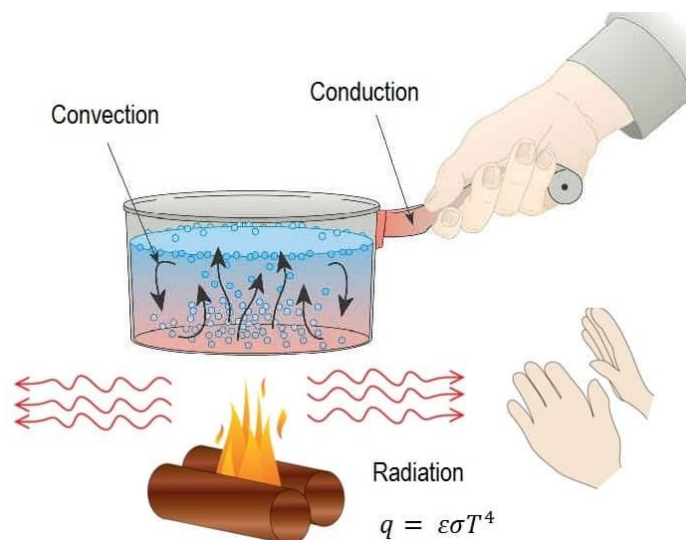


Figura 2-1. Transferencia de calor por conducción, convección y radiación

2.2 Tipos de transferencia de calor

2.2.1 Conducción

En este apartado se pretende exponer una breve explicación sobre los fundamentos en los que se basa la conducción y las fórmulas que se aplicarán.

La transferencia de calor por conducción se define como la transferencia de calor a través de un sólido o un fluido estacionario. Para hacernos una idea básica, esta transferencia de calor está relacionada con la actividad atómica y molecular de las partículas. Las moléculas que tienen una mayor energía o actividad atómica se asocian con las que tienen una mayor temperatura. Cuando estas moléculas entran en contacto con otras que tienen una actividad atómica menor, se produce un intercambio de energía, o lo que es lo mismo, una transferencia de calor. [1]

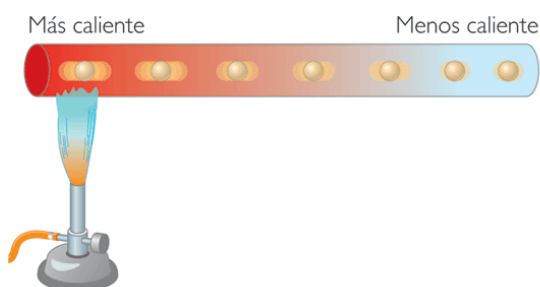


Figura 2-2 Ejemplo de conducción

La cantidad de energía intercambiada en el proceso de conducción se ajusta a la Ley de Fourier. La fórmula que se muestra debajo, implica que según la ley de Fourier, el flujo de calor es direccional. La dirección del flujo de calor para paredes planas e isotérmicas, será siempre normal al área de la sección transversal. Esta ecuación se expresa como:

$$q(x)'' = -k \frac{dT}{dx}$$

Ecuación 2-1 Ley de Fourier

También podremos expresar la velocidad a la que se produce esa transferencia de calor mediante la expresión:

$$q(x) = -kA \frac{dT}{dx}$$

Ecuación 2-2 Velocidad de transferencia de calor Ley de Fourier

Debemos decir que la ley de Fourier es fenomenológica, es decir, se desarrolla a partir de fenómenos más que derivarse de principios básicos. Por este motivo, vemos el modelo como una generalización basada en numerosas pruebas desarrolladas experimentalmente.

Sin embargo, otra forma de aplicar la ley de Fourier reescribiendo las ecuaciones anteriores, aceptando que la transferencia de calor es una cantidad vectorial, es:

$$q'' = -k \nabla T = -k \left(i \frac{dT}{dx} + j \frac{dT}{dy} + k \frac{dT}{dz} \right)$$

Ecuación 2-3 Aplicación de ley de Fourier

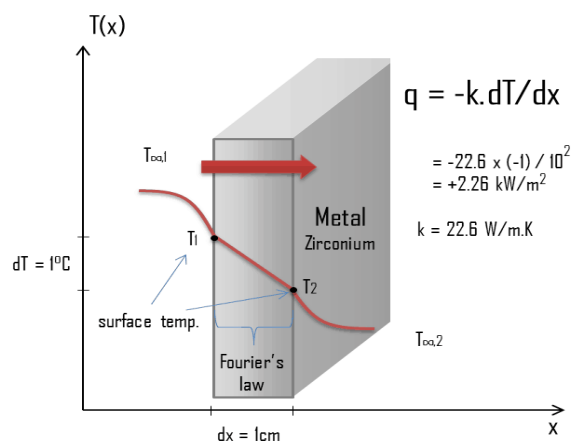


Figura 2-3. Ejemplo sobre la Ley de Fourier

Por lo tanto, si la pared no fuera plana, de la ecuación 2.3 sabremos que en un medio isotrópico, el flujo de calor se expresa en las tres direcciones de manera normal a la superficie mediante las siguientes expresiones:

$$q(x)'' = -k \frac{dT}{dx} \quad ; \quad q(y)'' = -k \frac{dT}{dy} \quad ; \quad q(z)'' = -k \frac{dT}{dz}$$

Ecuación 2-4 Transferencia de calor en medio isotrópico

En donde los símbolos que aparecen en las expresiones superiores se definen como:

- k: conductividad térmica (W/m·K)
- ∇ : operador nabla tridimensional
- A: área transversal

Habiendo visto estos fundamentos básicos, pasaremos a explicar la conducción en sistemas radiales, más específicamente el cilindro debido a que es el caso al que nos enfrentaremos en el laboratorio.

[2] En un cilindro hueco donde en su interior y exterior se exponen fluidos a diferentes temperaturas, en condiciones de estado estable y sin generación de calor, la ecuación de calor que se utilizara será:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{dT}{dr} \cdot \left(kr \frac{dT}{dr} \right) = 0$$

Ecuación 2-5 Cilindro hueco

Como vimos anteriormente según Fourier, también podremos expresar la velocidad a la que se produce esa transferencia de calor, la cual será constante en la dirección radial, mediante la ecuación:

$$q(r) = -KA \, dT/dr$$

Ecuación 2-6 Ley de Fourier aplicada a un cilindro

Realizando los cálculos necesarios sobre la ecuación 2.5 y aplicando las condiciones de frontera apropiadas, podremos calcular la distribución de temperaturas en el cilindro a través de la siguiente fórmula:

$$T(r) = \frac{(T_{s,1} - T_{s,2}) \cdot \ln(r/r_2)}{\ln(r_1/r_2)} + T_{s,2}$$

Ecuación 2-7 Distribución de temperaturas

Esta distribución de temperaturas será logarítmica y si aplicamos la ley de Fourier sobre la misma, obtendremos la siguiente ecuación para la transferencia de calor:

$$q(r) = \frac{2\pi Lk \cdot (T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln(r_2 / r_1)}$$

Ecuación 2-8 Transferencia de calor

Por lo tanto concluimos que la resistencia térmica en una pared cilíndrica será de la siguiente forma:

$$R_{t, cond} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk}$$

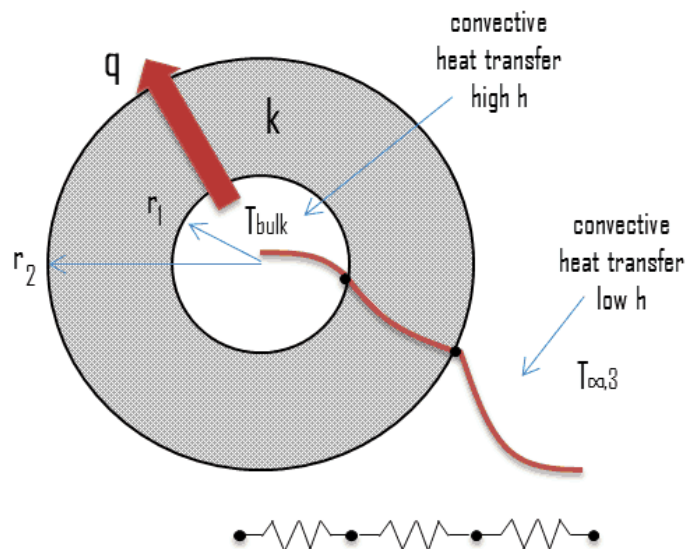
Ecuación 2-9 Resistencia térmica

Figura 2-4 Resistencia térmica en un tubo

Habiendo hecho un repaso muy general sobre los principios de la conducción, a continuación realizaremos el mismo proceso con la convección.

2.2.2 Convección

La convección es la transferencia de calor de una superficie a un fluido en movimiento. Es decir, tenemos transferencia de masa por convección lo cual es una característica muy diferenciada con respecto a la conducción. Esta característica complica mucho la metodología, ya que aparte de ser un problema de termodinámica, se incluyen muchos conceptos de mecánica de fluidos. Debemos saber

cómo se comportan los mismos desde el punto de vista del fluido y cómo afecta este comportamiento a la transferencia de calor. Por este motivo, normalmente se asumen una serie de suposiciones que no alteran significativamente los resultados y simplifican mucho los cálculos. También debemos saber que aunque el mecanismo de difusión contribuye a esta transferencia, predomina claramente el movimiento global de las partículas del fluido. En la práctica, el análisis de la transferencia de calor por convección se trata empíricamente. La mayoría de los problemas se pueden resolver utilizando los llamados números característicos, ya que son números adimensionales que se pueden utilizar para comparar una situación real. Además, la transferencia de calor por convección depende en gran medida de las propiedades como la viscosidad dinámica, la conductividad térmica, la densidad y el calor específico, la velocidad y flujo del fluido etc. [3]



Figura 2-5 Ejemplo de convección

Habiendo visto una definición sencilla de la convección, pasaremos a definir varios conceptos sencillos como hicimos en el apartado anterior.

Considerando un fluido con una velocidad y temperatura determinadas que fluye sobre una superficie de forma arbitraria, el flujo local de calor responde a la siguiente fórmula:

$$q'' = (T_s - T_\infty)$$

Ecuación 2-10 Flujo local de calor

Las condiciones punto a punto del flujo varían con la superficie por lo que debemos integrar para conseguir la transferencia global de calor. Por tanto, añadiendo un coeficiente de convección promedio, el calor global transferido queda como:

$$q = hAs \cdot (T_s - T_\infty)$$

Ecuación 2-11 Transferencia global

Al igualar las ecuaciones 2-10 y 2-11 anteriormente mencionadas, obtenemos que el coeficiente de calor por convección promedio se expresa como:

$$\hat{h} = \frac{1}{A_s} \int_0^{A_s} h \, dA_s$$

Ecuación 2-12 Coeficiente de calor por convección

En definitiva, a pesar de la complejidad de este fenómeno, se observa que la tasa de transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa por la ley de enfriamiento de Newton, la cual se citó anteriormente.

$$q = h \Delta T$$

Ecuación 2-13 Tasa de transferencia de calor

- A_s : superficie (m^2)
- h : coeficiente de convección ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}$)

El coeficiente de calor por convección, depende de las propiedades físicas del fluido y de la situación física, no es una propiedad del fluido. Este coeficiente, es un parámetro determinado experimentalmente cuyo valor depende de todas las variables que influyen en la convección anteriormente mencionadas.

Por otro lado, con sistemas compuestos suele ser conveniente trabajar con un coeficiente global de transferencia de calor, que se define con una expresión análoga a la ley de enfriamiento de *Newton*. La cual citamos a continuación:

“La tasa de pérdida de calor de un cuerpo es directamente proporcional a la diferencia en las temperaturas entre el cuerpo y su entorno, siempre que la diferencia de temperatura sea pequeña y la naturaleza de la superficie radiante siga siendo la misma.”

Este coeficiente global de transferencia de calor está profundamente relacionado con la resistencia térmica total. [4]

$$q = UA\Delta T$$

Ecuación 2-14 Calor calculado con el coeficiente global de transferencia de calor

Otros conceptos que debemos añadir, será el de las capas límite, tanto la hidrodinámica como la térmica; y también la condición de flujo laminar y turbulento

La capa límite hidrodinámica se caracteriza porque las partículas de un fluido al entrar en contacto con una superficie adquieren una velocidad nula debido a los esfuerzos cortantes. Esto provoca un retardo en las siguientes capas del fluido hasta llegar a ser insignificante a una cierta distancia de la superficie provocando dos regiones diferenciadas: la capa límite hidrodinámica con un espesor característico donde se aprecian los efectos de los esfuerzos cortantes y el flujo libre.

Con la capa límite térmica, ocurre un fenómeno similar ya que las partículas que se encuentra en contacto con la superficie alcanzan el equilibrio térmico a la temperatura a la que se encuentra la superficie, produciéndose el mismo efecto que en la capa hidrodinámica entre capas, dando lugar a un gradiente de temperaturas. El flujo de calor local, se obtiene mediante la aplicación de la ley Fourier ya

que como se dijo anteriormente, las partículas en contacto con la superficie no tienen velocidad por lo que solo se produce transferencia de energía por conducción. Existe una gran relación entre la capa límite térmica y el coeficiente de transferencia de calor por convección.

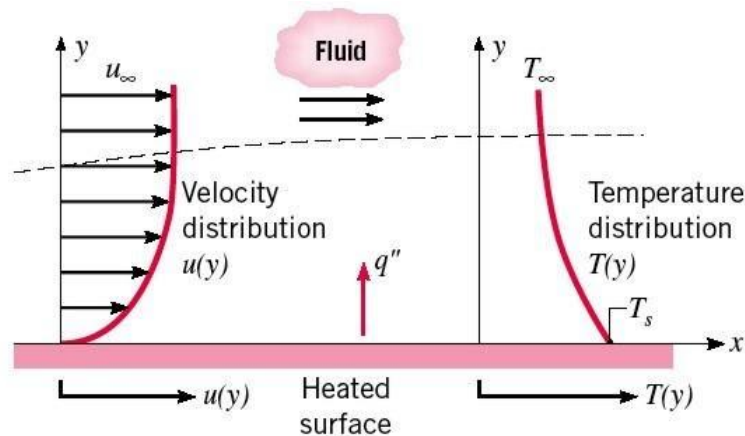


Figura 2-6 Capa límite hidrodinámica y térmica.

Por otro lado, es imprescindible determinar si la capa límite es laminar o turbulenta en cualquier análisis de convección. La principal diferencia entre ambos es si el movimiento del fluido es ordenado o irregular.

En un fluido que circula sobre una placa plana, la capa límite es laminar hasta que recorre una distancia en donde las perturbaciones que se producen, comienzan a amplificarse dando lugar a una zona de transición. Finalmente las perturbaciones provocan que la capa límite se vuelva completamente turbulenta como se muestra en la figura. Para calcular el comportamiento de la capa límite es razonable suponer que la transición comienza a una distancia x . Esta distancia se determina mediante el número de *Reynolds* el cual se expresa de la siguiente forma [5]:

$$Re_x = \frac{\rho u_\infty x}{\mu}$$

Ecuación 2-15 Número de Reynolds

- μ : viscosidad ($\text{Kg/s} \cdot \text{m}$)
- u_∞ : velocidad media (m/s)
- ρ : densidad (Kg/m^3)
- x : distancia (m)

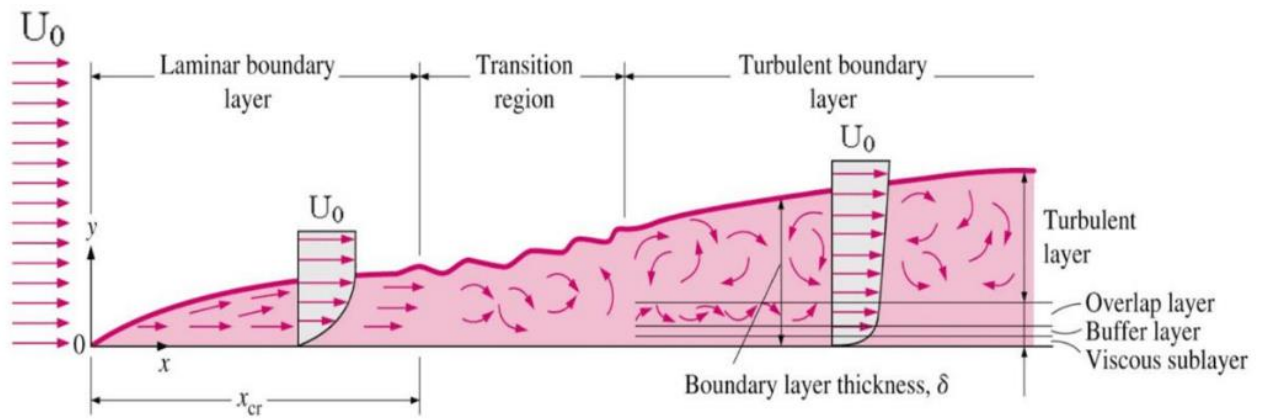


Figura 2-7 Flujo laminar, zona de transición y flujo turbulento

Normalmente, el coeficiente de convección para el flujo laminar es relativamente bajo en comparación con el coeficiente de convección para el flujo turbulento. Esto se debe a que el flujo turbulento tiene una capa de película fluida estancada más delgada en la superficie de transferencia de calor.

Otro número característico que cobra importancia en la convección, es el número de *Nusselt*. Éste es un número adimensional y se utiliza para describir la relación de la energía térmica por convección con la energía térmica por conducción del fluido. En nuestro análisis posterior, será un valor fundamental para calcular nuestros coeficientes de convección. Una forma para definir el número de *Nusselt* puede ser:

$$Nu = hL/k_f$$

Ecuación 2-16 Número de Nusselt

- h : coeficiente de convección ($\text{W/m}^2 \text{ K}$)
- L : longitud (m)
- k_f : conductividad térmica ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)

Sin embargo, para flujos turbulentos en intercambiadores de doble tubo el número de *Nusselt* se puede definir a través del número de *Reynolds* para fluidos que realizan la transferencia de calor como:

$$Nu = 0.023Re^{4/5} \cdot Pr^{0.4}$$

$$Nu = 0.023Re^{4/5} \cdot Pr^{0.3}$$

Ecuación 2-17 Número de Nusselt para flujo turbulento

Debemos reseñar que, si estamos analizando el fluido que pierde calor utilizaremos la primera fórmula, mientras que si se estudia el número de Nusselt para un fluido que absorbe calor, se utilizará la segunda.

En las expresiones anteriores, Pr es el número *Prandtl*, el cual se define como la relación de la viscosidad cinemática, también conocida como la difusividad de impulso, y la difusividad térmica. Por

lo tanto, es una propiedad fluida. El número Prandtl proporciona una medida de la eficacia relativa del impulso y el transporte de energía por difusión en las capas de límite térmico y de velocidad, respectivamente. Puede expresarse de la siguiente forma:

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{k}$$

Ecuación 2-18 Número de Prandtl

Para flujos laminares el número de *Nusselt* se puede interpolar de la siguiente tabla conociendo los datos de los diámetros.

D_i/D_o	Nu_i	Nu_o
0	—	3.66
0.05	17.46	4.06
0.10	11.56	4.11
0.25	7.37	4.23
0.50	5.74	4.43
≈ 1.00	4.86	4.86

Figura 2-8 Cálculo de *Nu* para flujo laminar

Ya conociendo los conceptos básicos que rigen la convección trataremos aspectos más concretos sobre la misma pero para el caso que nos atañe.

En el intercambiador que analizaremos, al estar el fluido confinado en el interior de los tubos, la capa límite se encuentra restringida, por lo que se considera la transferencia de calor por flujo interno. Esto significa, resumidamente, que la capa límite se encuentra en la línea central que atraviesa el tubo como se muestra en la siguiente figura. Además, al no haber flujo libre bien definido es necesario trabajar con la velocidad media la cual, si se multiplica por la sección y la densidad nos proporciona el flujo de masa como se muestra a continuación:

$$\dot{m} = \rho u_m A_c$$

Ecuación 2-19 Flujo másico

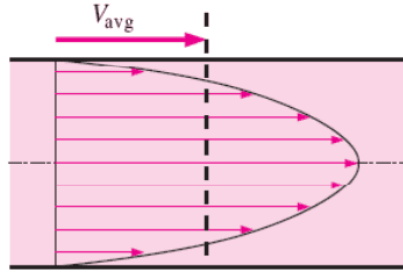


Figura 2-9 Capa límite en el interior de un tubo cilíndrico

Como se dijo anteriormente, el flujo está encerrado dentro del tubo completamente. Además, podemos aproximar que no se realiza trabajo a medida que se mueve dentro del flujo por ser despreciables los cambios de energía cinética y potencial, se conserva la energía. Dicho de otro modo, el calor por convección depende solo de la variación de la temperatura el flujo másico y el calor específico:

$$q_{conv} = \dot{m}c_p(T_{m,o} - T_{m,i})$$

Ecuación 2-20 Transferencia de calor por convección

Por otro lado, muchos de los procesos de transferencia de calor en la industria implican una combinación de conducción y convección. Con estos sistemas compuestos, a menudo es conveniente trabajar con un coeficiente global de transferencia de calor, el cual se define por una expresión análoga a la ley de enfriamiento de Newton, la cual se citó en el anteriormente:

$$q = U\Delta T$$

Ecuación 2-21 Transferencia de calor por convección 2

Este coeficiente global de transferencia de calor queda intrínsecamente relacionado con la resistencia térmica total, la cual depende de la geometría entre otros factores. Por lo tanto, para un cilindro podemos decir que:

$$q = \frac{\pi(T_{\infty,1} - T_{\infty,2})}{\frac{1}{2r_1h_1} + \frac{\ln(\frac{r_1}{r_2})}{2k} + \frac{1}{2r_2h_2}}$$

Ecuación 2-22 Calor relacionado con la superficie cilíndrica

La expresión anterior también se puede definir en términos de resistencia o de un cociente global de transferencia de calor de la siguiente forma:

$$q = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{tot}} = UA(T_{\infty,1} - T_{\infty,2})$$

Ecuación 2-23 Relación del calor con la resistencia

El coeficiente global de transferencia de calor, es una parte esencial y a menudo de las más inciertas en el análisis de cualquier intercambiador de calor. Como hemos visto anteriormente, se determina al tener en cuenta las resistencias térmicas de conducción y convección entre fluidos separados por una pared sin tener en cuenta las imperfecciones como impurezas, incrustaciones o películas. Esto podemos solucionarlo añadiendo una resistencia adicional denominada como factor de impureza. Sin embargo, y para simplificar los cálculos que realizaremos en el análisis de nuestro intercambiador, podemos realizar el cálculo de la transferencia global de calor en un intercambiador de doble tubo dependiendo únicamente de los factores de convección de los dos fluidos. Por este motivo podemos definirlos como:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}}$$

Ecuación 2-24 Coeficiente global de transferencia de calor

En donde los coeficientes de convección, se obtienen su vez del cociente entre el número de *Nusselt* y el producto de la conductividad por el diámetro del tubo. Como se puede observar en el la Ecuación 2-24 anteriormente mencionada.

Por último, veremos la diferencia entre régimen estacionario y transitorio. Este será un concepto fundamental para el posterior análisis del intercambiador de calor.

2.2.3 Radiación

La radiación térmica es la radiación electromagnética en la región infrarroja del espectro electromagnético, aunque parte de ella se encuentra en la región visible. El término radiación térmica se utiliza con frecuencia para distinguir esta forma de radiación electromagnética de otras formas, como ondas de radio, rayos X o rayos gamma. Se genera por el movimiento térmico de partículas cargadas en la materia y por lo tanto cualquier material que tenga una temperatura por encima del cero absoluto emite algo de energía radiante. La radiación térmica no requiere ningún medio para la transferencia de energía. De hecho, la transferencia de energía por radiación es más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre ninguna atenuación en el vacío. Por lo tanto, podemos sintetizar diciendo que la radiación es un intercambio neto de calor debido a la energía ondulatoria propagada a través del espacio entre dos superficies. [6]

A diferencia de la transferencia de calor por conducción o convección, que tiene lugar en la dirección de la disminución de la temperatura, la transferencia de calor por radiación térmica puede ocurrir entre dos cuerpos separados por un medio más frío que ambos cuerpos. Por ejemplo, la radiación solar llega a la superficie de la tierra después de pasar a través de capas frías de atmósfera a grandes altitudes. [6]

La velocidad de transferencia de calor por radiación, de un cuerpo a su entorno es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta y puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$q = \sigma \varepsilon T^4$$

Ecuación 2-25 Transferencia de calor por radiación

- Constante de Steffan-Boltzmann $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

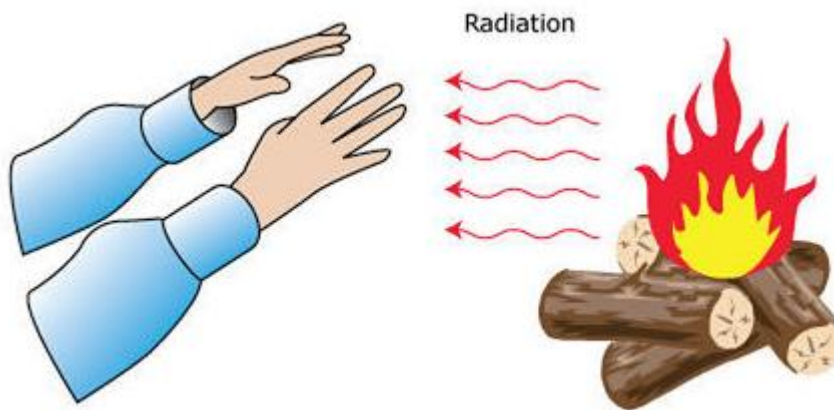


Figura 2-10 Ejemplo de radiación térmica

Sin embargo, en comparación con la conducción y la convección, la radiación no juega un papel importante en el caso de intercambiadores de calor. La conducción se produce cuando el calor del fluido de temperatura más alta pasa a través de la pared sólida. Para maximizar la transferencia de calor, la pared debe ser delgada y hecha de un material muy conductor. La transferencia de calor por convección en un intercambiador es la más destacada ya que, si aumentan los coeficientes de calor por convección aumenta el flujo de calor y consecuentemente el calor transmitido tanto por convección como por conducción. En régimen estacionario el flujo de calor tiene que ser el mismo. En el caso del intercambiador a contraflujo y flujo paralelo que estudiaremos en el laboratorio, la radiación térmica no resulta determinante en ningún caso, por lo que no ahondaremos más en el tema.

Habiendo definido muy resumidamente los conceptos anteriormente mencionados, en el siguiente apartado se estudiará más en detalle los tipos y funcionamiento de los intercambiadores de calor.

2.3 Intercambiadores de calor

[7]El proceso de intercambio de calor entre dos fluidos a diferentes temperaturas separados por una pared, es un tema recurrente en aplicaciones de ingeniería tales como calefacción, producción de potencia, acondicionamiento de aire, recuperación de calor de desecho y en algunos procesos químicos. Este proceso se realiza mediante intercambiadores de calor. A continuación, pasaremos a citar y explicar algunos de los distintos tipos de intercambiadores existentes más usados en la actualidad. Nos centraremos principalmente en el intercambiador de doble tubo a contraflujo y flujo paralelo debido a que se corresponde con la instalación de la que disponemos en el laboratorio y sobre

la que realizaremos un análisis y rediseño. Como se puede comprobar en la clasificación inferior, los distintos tipos de intercambiadores de calor pueden agruparse de acuerdo con el arreglo del flujo y el tipo de construcción principalmente. Seguidamente, se muestra la clasificación mencionada anteriormente:

- Intercambiadores de calor de doble tubo:
 1. Flujo paralelo.
 2. Contraflujo.
- Intercambiador de calor de flujo cruzado:
 1. Con aletas y ambos fluidos sin mezclar.
 2. Sin aletas con un fluido mezclado y el otro sin mezclar.
- Intercambiador de calor de tubos y coraza:
 1. Un sólo paso por tubos y coraza.
 2. Varios pasos por la coraza y por los tubos.
- Cubiertas de intercambiadores de calor compacto:
 1. Tubo con aletas:
 - a. Tubos planos, aletas de placa continuas.
 - b. Tubos circulares, aletas de placa continuas.
 - c. Tubos circulares, aletas circulares.
 2. Aletas de placa:
 - a. Un sólo paso.
 - b. Multipaso.

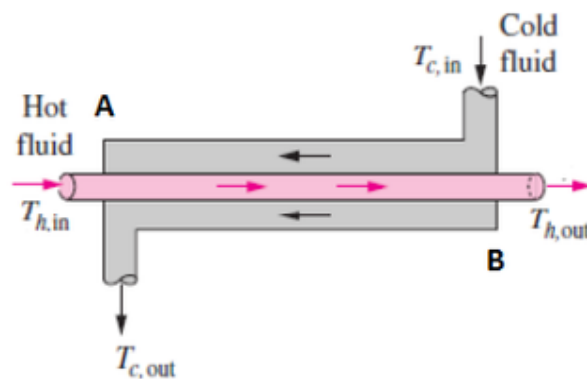


Figura 2-11 Intercambiador de doble tubo

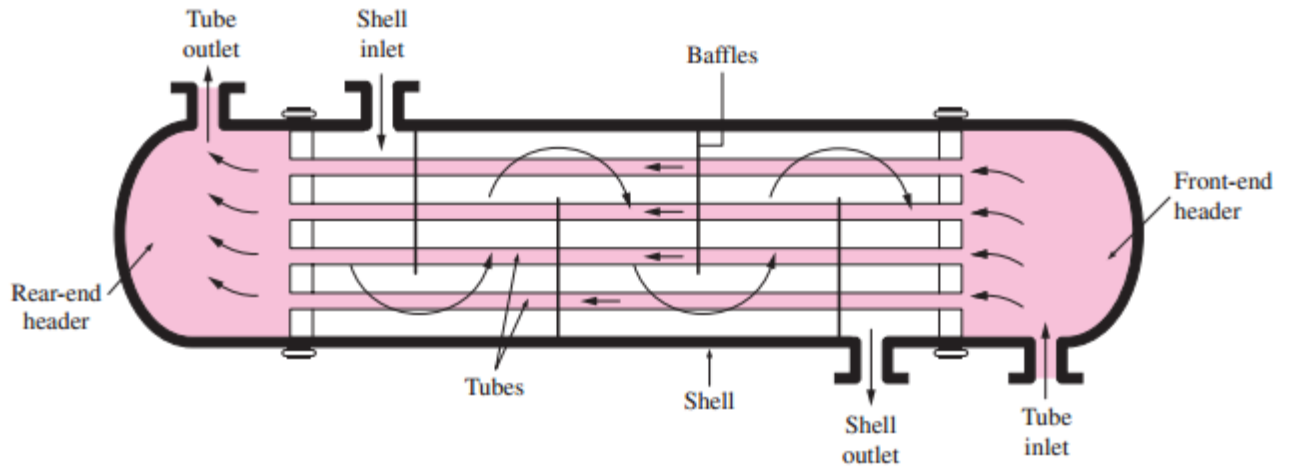


Figura 2-12 Intercambiador de tubos y coraza con aletas

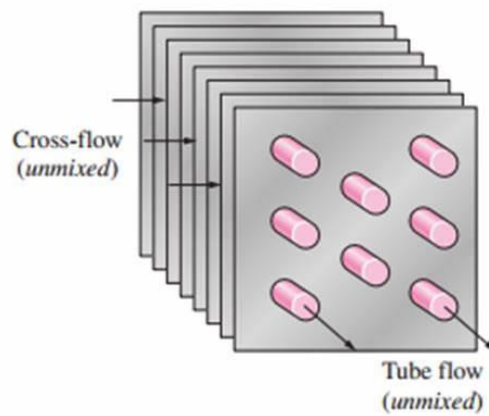


Figura 2-13 Intercambiador de flujo cruzado

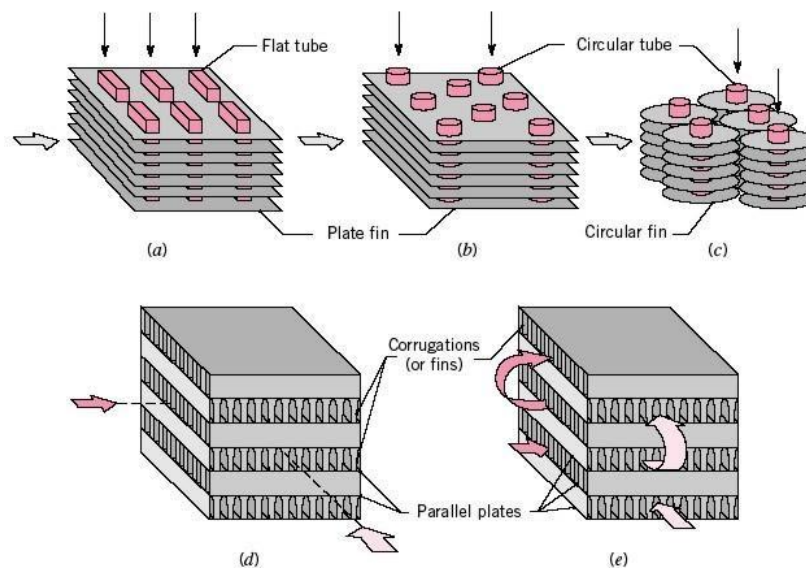


Figura 2-14 Intercambiadores de calor compactos

Como vimos en apartados anteriores, es fundamental a la vez que difícil determinar el coeficiente de calor global en un intercambiador de calor y hablamos de los efectos de las impurezas en la transferencia de calor. Por consecuencia de las mismas, el coeficiente global de transferencia de calor se expresa como:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_c A_c} = \frac{1}{U_h A_h}$$

Ecuación 2-26 Coeficiente global de transferencia de calor

En donde c y h se refieren a los fluidos frío y caliente, respectivamente. Podemos decir entonces, que el cálculo de UA no depende de del lado frío o caliente. Sin embargo el cálculo del coeficiente global depende si está basado en la superficie fría o caliente.

Por otro lado, es fundamental para diseñar el rendimiento de un intercambiador de calor relacionar la transferencia total de calor con las temperaturas de entrada y de salida, el coeficiente global de transferencia de calor, el área etc. De estas relaciones, podemos obtener balances de energía por unidad de tiempo que transmite un fluido según la siguiente expresión:

$$q = \dot{m}c_p(\Delta T)$$

Ecuación 2-27 Transferencia de calor por unidad de tiempo

Esta expresión, nos vale respectivamente para el fluido frío y caliente siempre y cuando no experimenten un cambio de fase. Sin embargo, el incremento de temperaturas varía con la posición en el intercambiador. Debido a esto, es necesario trabajar con una diferencia de temperaturas media, por lo que la ecuación de flujo queda de la siguiente forma:

$$q = UA\Delta T_m$$

Ecuación 2-28 Transferencia de calor con diferencia de temperaturas media

2.3.1 Intercambiadores de doble tubo

Los intercambiadores de calor de doble tubo son baratos tanto para el diseño como para el mantenimiento, por lo que son una buena opción para la pequeña industria. En estos intercambiadores un fluido fluye dentro del tubo y el otro fluido fluye en el exterior. Aunque son simples y baratos, su baja eficiencia junto con el alto espacio ocupado en grandes escalas, ha llevado a la industria moderna a utilizar intercambiadores de calor más eficientes como el de coraza o placas.

El intercambiador de calor sobre el que realizaremos nuestro trabajo consta de dos tubos concéntricos de diferentes diámetros. Además, consta de dos llaves que permiten el paso del fluido con flujo paralelo o a contraflujo. A continuación veremos la diferencia entre flujo paralelo y contraflujo.

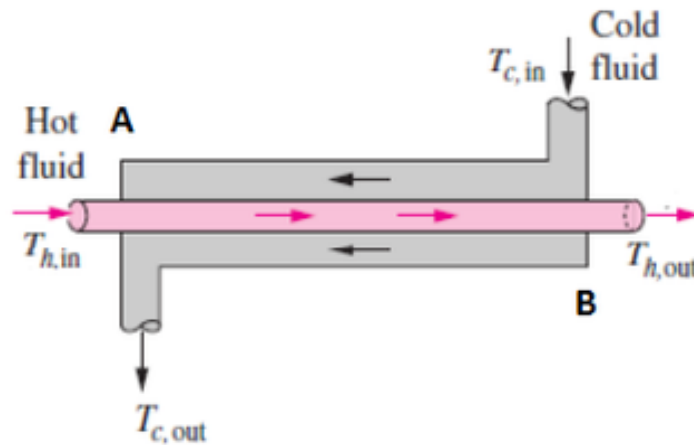


Figura 2-15 Esquema intercambiador de tubos concéntricos

2.3.2 Flujo paralelo

En la disposición de flujo paralelo, los fluidos fríos y calientes entran en el mismo extremo, fluyen en la misma dirección y salen en el mismo extremo. Como se puede apreciar en la imagen inferior donde se muestra una gráfica sintetizada sobre el flujo paralelo, inicialmente la diferencia de temperaturas es grande pero decae rápidamente aproximándose a cero de forma asintótica. Es importante resaltar que en flujo paralelo, la temperatura de salida del fluido frío jamás excederá a la del fluido caliente. Los análisis y balances de energía están sujetos a las siguientes suposiciones [7]:

- El intercambiador está aislado de sus alrededores, sólo intercambian calor el fluido caliente y frío.
- La conducción axial a lo largo de los tubos es insignificante.
- Los cambios de energía potencial y cinética son despreciables.
- Los calores específicos del fluido son constantes.
- El coeficiente global de transferencia de calor se mantiene constante.

De este modo, y teniendo en consideración la ecuación 2.24 podemos decir que para un intercambiador de flujo paralelo se cumple:

$$\Delta T_1 \equiv T_{h,1} - T_{c,1} = T_{h,i} - T_{c,i}$$

$$\Delta T_2 \equiv T_{h,2} - T_{c,2} = T_{h,o} - T_{c,o}$$

Ecuación 2-29 Balance de temperaturas en flujo paralelo

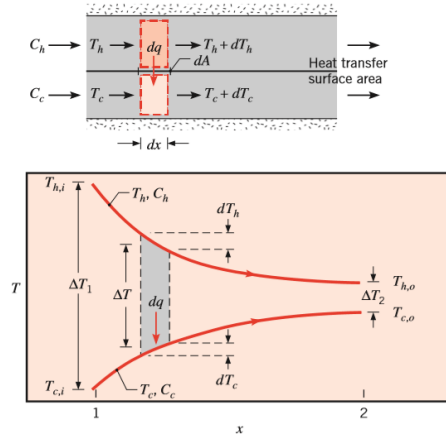


Figura 2-16 Representación de las direcciones del flujo de fluidos en los intercambiadores paralelos

2.3.3 Contraflujo

Por otro lado, en la disposición de contraflujo, los fluidos entran en los extremos opuestos, fluyen en direcciones opuestas y salen en extremos opuestos como se puede apreciar en la imagen que se muestra a continuación. En contraste con el flujo paralelo, esta configuración mantiene transferencia de calor entre las partes más calientes de los fluidos en un extremo, así como la transferencia entre las partes más frías en el otro. Debido a esto la diferencia de temperaturas conforme se avanza en la dirección del flujo, nunca será tan grande como en la región de entrada de un intercambiador de flujo paralelo. Al contrario que en la anterior disposición, en contraflujo, la temperatura final del fluido frío a la salida puede ser mayor que la temperatura del fluido caliente a la salida. [7]

Las suposiciones que enunciamos anteriormente para el flujo paralelo, deben cumplirse también en esta disposición de contraflujo. Existe una pequeña diferencia con respecto a la ecuación 2.23 debido a la dirección opuesta de ambos fluidos:

$$\Delta T_1 \equiv T_{h,1} - T_{c,1} = T_{h,i} - T_{c,o}$$

$$\Delta T_2 \equiv T_{h,2} - T_{c,2} = T_{h,o} - T_{c,i}$$

Ecuación 2-30 Balance de temperaturas para flujo contraflujo

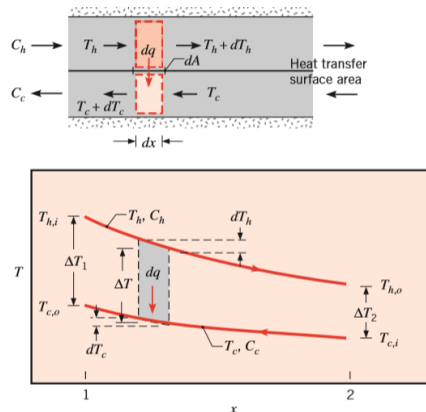


Figura 2-17 Representación de las direcciones del flujo de fluidos en contraflujo.

En condiciones comparables, se transfiere más calor en una disposición de contraflujo que en un intercambiador de calor de flujo paralelo. En el siguiente apartado veremos condiciones especiales de operación bajo las que un intercambiador de calor puede operar.

2.3.4 Condiciones especiales de operación

Existen ciertas condiciones especiales bajo las que puede trabajar un intercambiador. Una de ellas, es cuando el fluido caliente tiene una capacitancia térmica mucho mayor que el fluido frío, produciendo que la temperatura del fluido caliente se mantenga prácticamente constante. Lo mismo ocurre si el fluido caliente es un vapor de condensación, ya que esta se produce a temperatura constante por ser un cambio de fase. Y a la inversa, es decir, ahora es el líquido frío el que permanece a una temperatura constante cuando hablemos de un evaporador. El tercer caso especial se produce en contraflujo cuando ambos fluidos tienen la misma capacitancia térmica y, por lo tanto, la diferencia de temperaturas se vuelve una constante. [8]

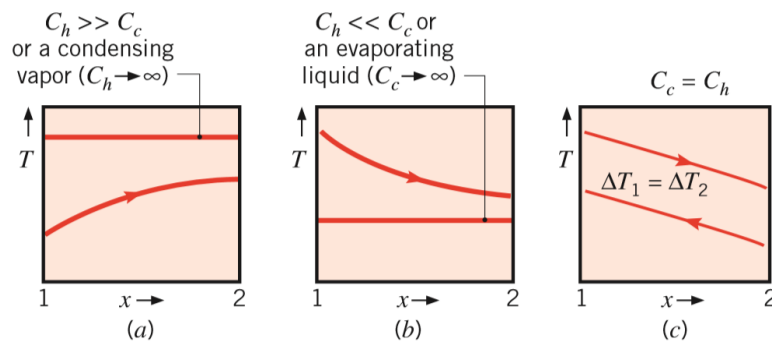


Figura 2-18 Condiciones especiales de operación

Una vez concluido el estado del arte, pasaremos al siguiente apartado en donde entraremos más en detalle y desarrollaremos el Trabajo de Fin de Grado en sí.

3 DESARROLLO

3.1 Introducción

3.1.1 Instalación inicial

Como se ha dicho a lo largo de todo el trabajo, los intercambiadores de calor tienen una función principal. Esta misión, es la transferencia de calor entre dos fluidos a diferentes temperaturas para el aprovechamiento de la energía térmica liberada en este proceso.

La instalación objeto de estudio de este trabajo, se utilizaba en el anterior plan de estudios para comprender mejor los procesos de transferencia de calor. La plataforma se corresponde con un intercambiador de calor del año 1981 de la empresa Isi-Impianti. El funcionamiento del intercambiador es relativamente sencillo de modo genérico, pero tiene varias peculiaridades que detallaremos más adelante.

En la Figura 3-2 se puede apreciar el esquema de funcionamiento del intercambiador de calor en estudio. En este esquema se puede apreciar una de las principales características constructivas que consiste en que el circuito del fluido que se pretende calentar es el que rodea al circuito de agua caliente de manera concéntrica y no al revés. También podemos apreciar termómetros en cada codo de la instalación y dos caudalímetros a ambos lados. Además, el intercambiador consta de varios componentes más característicos que a continuación describiremos.

En concreto, la instalación estudiada y analizada en este trabajo, básicamente consta de un intercambiador de doble tubo en su parte central, un vaso de expansión en la parte superior; un calentador de tubos y carcasa, una bomba eléctrica en el circuito caliente y las correspondientes válvulas y llaves para bloquear o permitir el paso de agua.

A continuación pasaremos a describir el funcionamiento y los componentes de la instalación inicial.



Figura 3-1 Vista general del intercambiador de calor

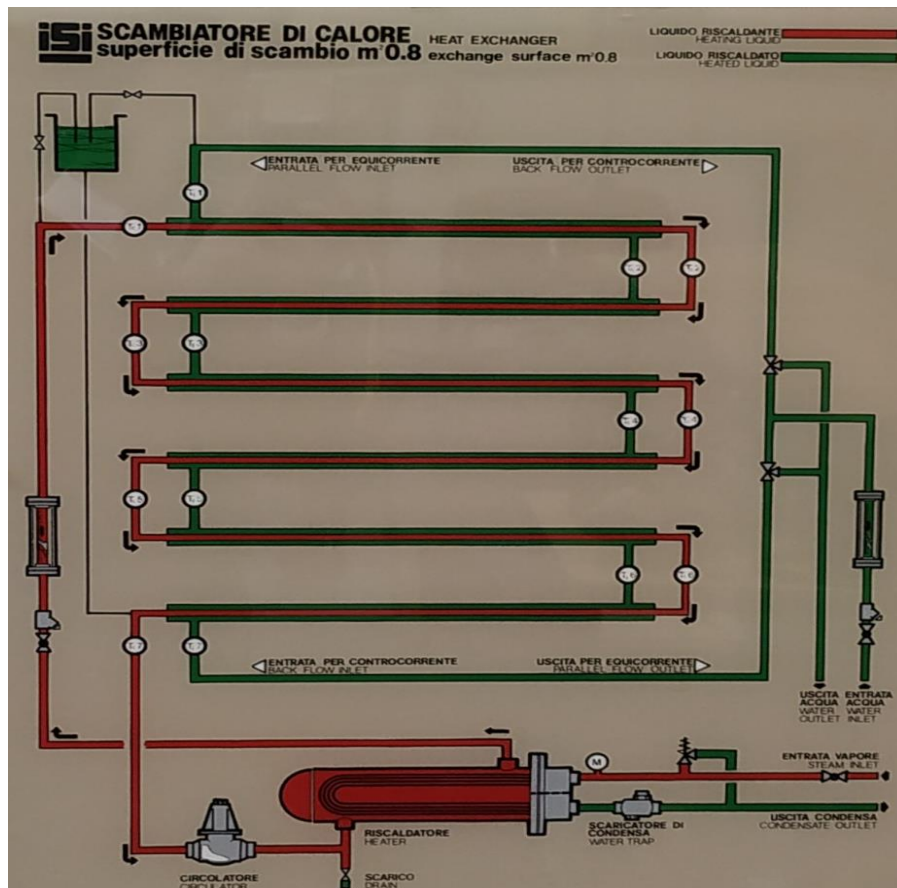


Figura 3-2 Esquema de funcionamiento del intercambiador de calor

3.1.2 Circuito frío

Una de las principales diferencias del circuito frío con el caliente, es que el circuito de agua fría es un circuito abierto mientras que el caliente no. En este apartado explicaremos el recorrido que realiza el agua desde que entra hasta que sale.

Empezando de derecha a izquierda, podemos encontrar en la parte baja la entrada de agua, con su correspondiente válvula, del circuito de agua frío. Como se puede apreciar en la imagen, el agua pasa por el caudalímetro y llega hasta la zona donde se encuentran las llaves apertura y cierre del paso del agua. Estas llaves nos permiten decidir si queremos trabajar con flujo paralelo o a contraflujo. Si queremos trabajar a contraflujo, debemos colocar ambas llaves de manera horizontal de manera que se puedan ver en las propias llaves la letra “C” de la palabra italiana “*Contracorrente*”. Para poner el flujo en paralelo, pondríamos ambas llaves en vertical quedando visible la letra “E” proveniente de la palabra italiana “*Equicorrente*”.

Si continuamos hacia la esquina superior izquierda encontraremos el vaso de expansión a presión atmosférica. El circuito está conectado con el vaso de expansión a través de la válvula situada a la derecha del mismo. Si queremos llenar el circuito frío de agua, deberemos dejar esta válvula abierta para que, al llenarse vaya expulsando el aire que hay en el interior del intercambiador.

En flujo paralelo, el agua fría comienza a recorrer la instalación desde la parte superior hasta la inferior, o viceversa si elegimos dirección a contraflujo, realizándose en la parte central la transferencia de calor del fluido caliente al frío.

Por último, el agua continúa su recorrido hacia la salida, la cual se encuentra situada de forma paralela a la entrada de agua. En el diagrama inferior, se muestra esquemáticamente el recorrido que realiza el agua fría.

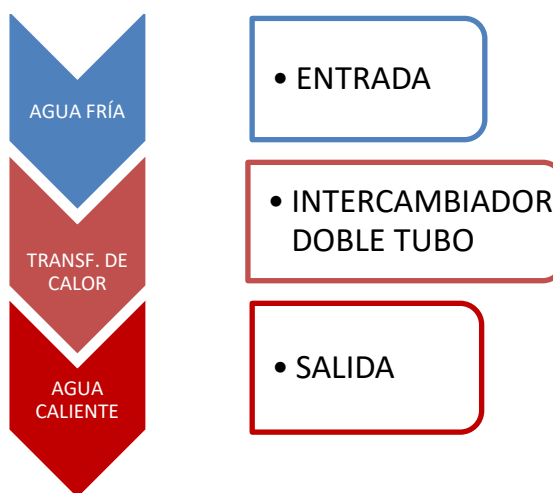


Figura 3-3 Diagrama resumen del circuito frío

3.1.3 Vaso de expansión

El vaso de expansión desempeña un papel fundamental para comprender el funcionamiento de este intercambiador de calor. Este dispositivo, tiene la función de liberar la presión del circuito cuando el fluido se expande a medida que se va calentando. Además, como se puede apreciar en el esquema

inferior, en esta instalación tiene otra función añadida de especial relevancia. El circuito de fluido frío y el circuito de fluido caliente están conectados entre sí por este vaso de expansión. Es decir, una vez queda cebado el circuito de fluido frío, comienza a expulsar el agua sobrante por la parte superior al vaso de expansión si mantenemos la válvula anteriormente mencionada abierta. Resumiendo, al vaso de expansión comienza a entrar agua del circuito frío. Si cerramos esta válvula, debemos llenar el circuito de agua caliente directamente desde el vaso de expansión.

Este proceso de llenado del circuito caliente, se realiza mediante un tubo en la parte inferior del vaso de expansión, que lo conecta con el circuito de agua caliente. Conforme comienza a entrar agua del circuito frío en el vaso de expansión, este se vacía por su apertura inferior. Gracias a este proceso simultáneo, se va cebando el circuito caliente por esta conexión, como se aprecia en la Figura 3-2. Dicho de otro modo, podemos cebar el circuito caliente con el agua sobrante del circuito frío pero no al contrario. Esto sucede por la geometría de la instalación, ya que como se dijo anteriormente, el agua que sobra una vez está lleno el circuito caliente vuelve a caer sobre el vaso de expansión si mantenemos abierta la válvula derecha superior abierta.



Figura 3-4 Vaso de expansión

3.1.4 Circuito caliente

Este circuito, es un circuito cerrado ya que el agua caliente que circula por él, es siempre la misma, no entra ni sale agua de este circuito una vez lo hemos cebado. Además este circuito, permite trabajar abierto a la atmósfera abriendo la válvula que lo conecta con el vaso de expansión. El agua caliente que entra en el vaso de expansión vuelve al circuito de agua caliente gracias a la conexión que se encuentra en la parte inferior del vaso.

Cabe destacar, que en el proceso de cebado el agua fría, sí puede pasar al circuito de agua caliente mediante el vaso de expansión pero no al contrario, debido a la geometría de la instalación, como se mencionó con anterioridad.

Como se dijo anteriormente, el circuito caliente comienza a llenarse desde el vaso de expansión. El agua cae hacia la zona donde se encuentra situada la bomba, en la parte inferior izquierda. En esta esquina, encontramos la bomba centrífuga con motor eléctrico de la empresa Otral la cual hace circular el agua de este. Una vez cebado el circuito caliente y con la bomba en funcionamiento, el agua circulada pasa al intercambiador de calor de tubos y coraza en la parte inferior derecha que realiza una función de calentador. Este intercambiador de calor iba conectado a una caldera de vapor en el pasado, de esta forma se calentaba el agua que circula por el circuito caliente. Posteriormente, el circuito caliente cuenta con una válvula que permite regular el caudal de dicho circuito y que cobrará especial relevancia a la hora de realizar los ensayos. Tras este paso, el agua pasa al intercambiador de calor de doble tubo para realizar la transferencia de calor con el fluido frío. A continuación, se muestra un esquema del ilustrativo del circuito caliente. Cabe destacar que si mantenemos la válvula del vaso de expansión abierta el agua pasará a la bomba desde la salida del intercambiador de doble tubo y desde el vaso de expansión

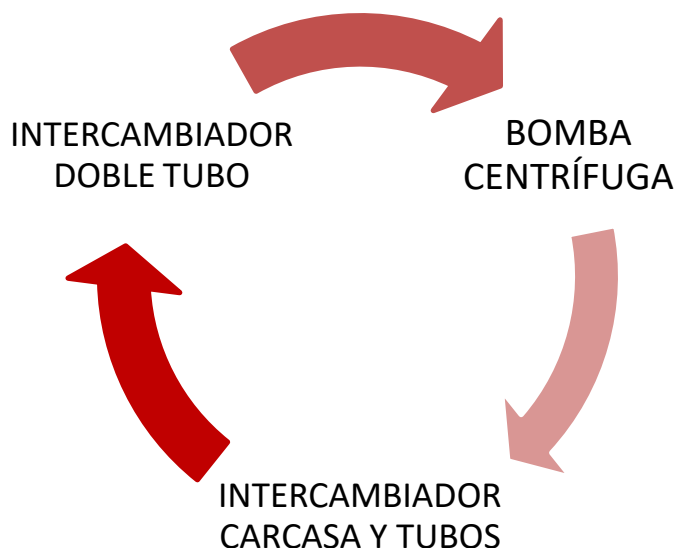


Figura 3-5 Ciclo resumen del fluido caliente

3.1.5 Electrobomba centrífuga

Esta bomba centrífuga fabricada por la empresa italiana Otral, tiene como misión principal recircular el agua del circuito caliente. Además, podemos obtener los siguientes datos de su placa de características:

- Motor eléctrico monofásico.
- Tensión: 220V.
- Potencia: 0,33 CV.
- Caudal: 600 L/h
- Altura: 5,612 m
- Corriente nominal: 2,7 A

A pesar de que en la placa quede reflejado un caudal de 600 litros por hora, en la práctica este caudal varía entre 600 y 1000 litros a la hora. Como se puede observar en la imagen inferior, la bomba tiene un panel de control con dos botones para su puesta en marcha y parada. Esta bomba no se puede

invertir el sentido de giro por lo que el agua siempre sigue el mismo sentido. Lo cual es lógico, ya que si se invierte el sentido de giro, parte del agua acabaría entrando en el vaso de expansión por la parte inferior del mismo debido a la conexión existente entre el circuito caliente y el vaso de expansión mostrada en la Figura 3-2.

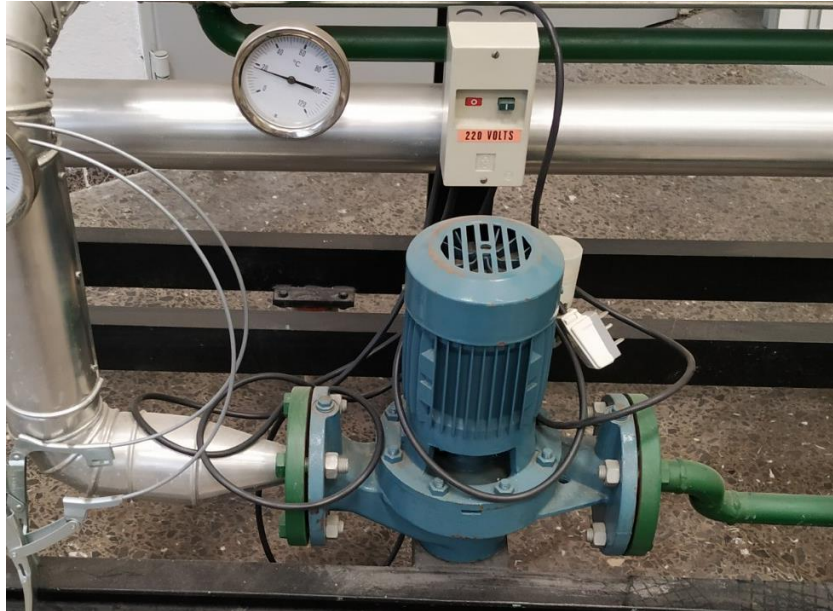


Figura 3-6 Electrobomba centrífuga Otral

3.1.6 Intercambiador de tubo y carcasa

En este apartado explicaremos por encima el intercambiador de carcasa y tubos, ya que será la parte que pretendemos sustituir. Este intercambiador, iba conectado a una caldera de vapor, el cual entraba al intercambiador y calentaba el agua bombeada del circuito caliente. Este agua caliente, pasa por el caudalímetro situado a la izquierda antes de pasar a la parte central donde se realiza una transferencia de calor al fluido frío para volver de nuevo a ser recirculado por la bomba.

Es evidente que este dispositivo tiene una importancia fundamental, ya que sin su presencia jamás podría calentarse el agua del circuito caliente. Sin embargo, este calentador contaba con una serie de inconvenientes. El inconveniente más destacado de este calentador en la actualidad es, precisamente, la inexistente caldera de vapor y, por tanto sus respectivas conexiones con la misma. Por este motivo, gran parte del esfuerzo y tiempo invertido en este trabajo, fue la elección de un dispositivo capaz de cumplir la función del calentador. En los siguientes apartados discutiremos qué opción escogimos y por qué.



Figura 3-7 Intercambiador de carcasa y tubos

Habiendo explicado resumidamente los componentes de nuestra instalación pasaremos a explicar la metodología que seguimos para realizar este trabajo.

3.2 Metodología

3.2.1 Pruebas de mantenimiento

Como se dijo en el anterior apartado, uno de los principales problemas a los que nos enfrentamos fue que no contábamos con ningún manual técnico sobre el mismo que nos ofreciera en detalle las características y el funcionamiento del intercambiador. Además todas las empresas implicadas en su fabricación, no existen actualmente. Otra de nuestras preocupaciones fue que no sabíamos el estado de la instalación, ya que era del año 1981 y no se conocía cuando fue la última vez en ser usada o en la que se le realizó algún tipo de mantenimiento. Por este motivo, tuvimos que realizar varias pruebas en distintas fases para ver el estado de la instalación. En este apartado desarrollaremos las pruebas que realizamos. Finalmente y tras realizar varias pruebas con el equipo de mantenimiento de la Escuela Naval, conseguimos determinar que el intercambiador, a pesar de los años que tiene, se encontraba en buen estado.

3.2.2 Pruebas de estanqueidad

Lo primero que teníamos que comprobar era la estanqueidad de la instalación. A simple vista, parecía en buen estado, pero llevaba muchos años sin que se le realizara mantenimientos. Para realizar esta prueba se nos plantearon dos opciones principalmente.

La primera de ellas, era fabricar una tapa para el calentador de manera que quedara estanco y así poder realizar la prueba. La acabamos desechando porque nos parecía demasiado complicado para que al final, esta tapa sólo sirviera para realizar esa prueba, sería de un solo uso.

La otra opción, más factible y la que finalmente escogimos por su simplicidad, era desmontar el calentador de vapor y unir con un tubo semirrígido la entrada y la salida del intercambiador y ajustarlo con unas abrazaderas. Esta opción resultó muy válida y útil ya que además, podíamos desmontarlo

fácilmente para vaciar el circuito caliente y limpiarlo si era oportuno. A continuación mostramos una serie de figuras en la que se muestra cómo se encuentra el circuito sin el calentador y con el tubo semirrígido en su lugar.

La prueba de estanqueidad, como esperábamos, resultó positiva. No había fugas en ninguna parte del circuito. El intercambiador se dejó durante dos días en el laboratorio lleno de agua y se marcó con un rotulador el nivel de la misma en el vaso de expansión. Como se muestra en las imágenes, el nivel de agua permanece prácticamente constante. La mínima variación que se observa de una imagen a la otra se debe a las burbujas de aire en su interior que acabaron liberándose, ya que como se dijo anteriormente, no se apreciaron goteras, fugas, ni restos de agua al cabo de los dos días en las inmediaciones del intercambiador.



Figura 3-8 Marca para la Prueba de estanqueidad positiva

3.2.3 Bomba centrífuga

Respecto a la bomba centrífuga, lo primero que tuvimos que hacer fue cambiar la conexión del enchufe ya que se correspondía con un enchufe tipo americano. A continuación comprobamos si funcionaba la bomba conectándola a la red eléctrica. De esta prueba, concluimos que el motor eléctrico funcionaba correctamente pero sin embargo el eje no giraba. Por este motivo y como se muestra en la siguiente figura, tuvimos que desmontarla para lijar el interior ya que estaba repleta de impurezas. Una vez realizada la limpieza y mantenimiento interior del impulsor y su correspondiente cámara, tuvimos problemas al volver a montarla sobre la instalación. Esto fue debido a que fue muy costoso alinearla correctamente para que no hubiera demasiada fricción en su interior y pudiera girar libremente.



Figura 3-9 Bomba centrífuga en mal estado

3.2.4 Limpieza interior del circuito y caudalímetros.

Una vez el circuito estuvo cebado y con la bomba en funcionamiento, tanto el circuito de agua fría como el de agua caliente comenzaron a llenarse impurezas y el agua se volvió muy turbia. El circuito de agua fría resultó fácil de limpiar ya que es un circuito abierto y todas las impurezas acabaron expulsándose. Sin embargo, en el circuito de agua caliente las impurezas acabaron atascando el caudalímetro. Por este motivo tuvimos que vaciar de nuevo el circuito, y montar las mangueras de tal forma que pudiéramos cebar el circuito caliente en su sentido contrario. Tras varios intentos, conseguimos al fin desatascar el caudalímetro y llenar ambos circuitos de agua limpia.

Una vez realizadas todas las pruebas de mantenimiento y puesta a punto de la instalación, explicaremos cuál fue el dispositivo escogido para sustituir el intercambiador de calor.



Figura 3-10 Comparativa de caudalímetro atascado con el caudalímetro limpio

3.3 Estudio de alternativas viables para la sustitución del calentador de vapor.

Como se dijo en la descripción de la instalación inicial, para calentar el agua del circuito caliente, la instalación empleaba un calentador de tubos y coraza. Este intercambiador de calor iba conectado a una caldera de vapor en el pasado. La idea fundamental para llevar a cabo nuestro trabajo, es rediseñar la instalación para acoplar un dispositivo sustituyendo al intercambiador de coraza y tubos. En los siguientes apartados discutiremos sobre cuál fue la opción escogida y el motivo de su elección para sustituir al calentador. Se estudiaron principalmente dos opciones: una caldera instantánea eléctrica y una resistencia eléctrica.

3.3.1 Caldera eléctrica

Como se ha repetido anteriormente, la idea inicial del proyecto era sustituir el calentador por una pequeña caldera eléctrica instantánea. El agua saldría de la bomba y entraría en la caldera calentándose rápidamente. Posteriormente, el agua caliente saldría de la caldera realizando una transferencia de calor en el intercambiador de doble tubo.

Durante todo el periodo del que disponíamos para la realización del trabajo, se estuvo pensando qué caldera sería la idónea para cumplir esta función. Se miraron diversas páginas web y también contactamos con distintas empresas como Junkers o Bosch para saber si disponían de calderas instantáneas eléctricas cuyas características fueran compatibles con nuestra instalación. Finalmente, encontramos una caldera que se ajustaba a nuestras necesidades en términos de potencia. Se estuvo barajando, y estuvo a punto de ser nuestra elección final, la compra de una caldera instantánea de 6 KW o 18 KW de la empresa Junkers. Sin embargo finalmente nos retractamos por dos inconvenientes principales.

El primero de los inconvenientes que se nos presentaban y, el de mayor peso, era el económico. También suponía un problema el montaje de la instalación, debido a la complejidad que suponía

establecer y conectar las entradas y salidas de agua de la caldera con la instalación. Además, un inconveniente igual de importante era el límite impuesto en la temperatura de impulsión que nos impedía aprovechar la potencia disponible en la caldera y nos limitaba el rango de actuación. La instalación de la caldera no era tan sencilla como imaginamos en un principio, ya que requiere mayor espacio y presente el inconveniente de la temperatura de impulsión limitada. Una vez nos dimos cuenta de que sustituir el calentador por una caldera eléctrica era un objetivo bastante inalcanzable por las vicisitudes que se nos presentaron, comenzamos a buscar alternativas investigando resistencias eléctricas.

3.3.2 Resistencia eléctrica

Aunque en un principio no era nuestra primera opción, escoger una resistencia eléctrica en vez de una caldera eléctrica resultó una buena elección por varios motivos. Una de las principales ventajas que nos ofrecía esta resistencia eléctrica, era el aprovechamiento de la carcasa del calentador inicial. Esto suponía que no hacía falta conseguir tubos adicionales para conectarla con el resto del intercambiador. Además, económicamente hablando, el conjunto de resistencia más instalación tenía un precio más asequible en comparación con la caldera y su instalación.

Por otro lado, la resistencia eléctrica también presentaba una serie de inconvenientes. El inconveniente más reseñable, era que debíamos diseñar una tapa para acoplar la resistencia al calentador. Este percance, que no estaba programado, nos supondría un pequeño retraso en el transcurso del trabajo. La idea inicial era bastante sencilla, en vez de los tubos usados en el pasado, introduciríamos dentro de la carcasa la resistencia eléctrica. A continuación se muestran dos imágenes del intercambiador desmontado.



Figura 3-11 Carcasa del intercambiador de carcasa y tubos



Figura 3-12 tubos del intercambiador de carcasa y tubos

Finalmente y como queda reflejado en la siguiente imagen, escogimos una resistencia eléctrica de la empresa Asturgó S.L. de 15000 W, de potencia para conseguir un salto de temperaturas que fuera acorde con la práctica que queríamos realizar. Para realizar la tapa tuvimos que tomar medidas y diseñar la pieza a partir de la parte donde se encontraba la entrada de los tubos anteriormente. Una vez realizados los planos, se mandaron al taller de la Escuela Naval donde nos fabricaron dicha tapa.

A continuación nombraremos las características principales de la resistencia de inmersión seleccionada:

- Denominación: RIT-511C
- Potencia: 15000W
- Rosca: GAS de 2,5"
- Longitud: 570 mm
- Trifásica



Figura 3-13 Resistencia eléctrica de inmersión con termostato RIT-511C

Para poder acoplar la resistencia a nuestra instalación tuvimos que diseñar una tapa de acero mediante la cual aseguraríamos la estanquidad de la instalación y la integración de la resistencia seleccionada en el antiguo alojamiento del calentador de carcasa y tubos. En la siguiente figura se puede observar el diseño inicial para poder acoplar la resistencia a la carcasa del calentador.

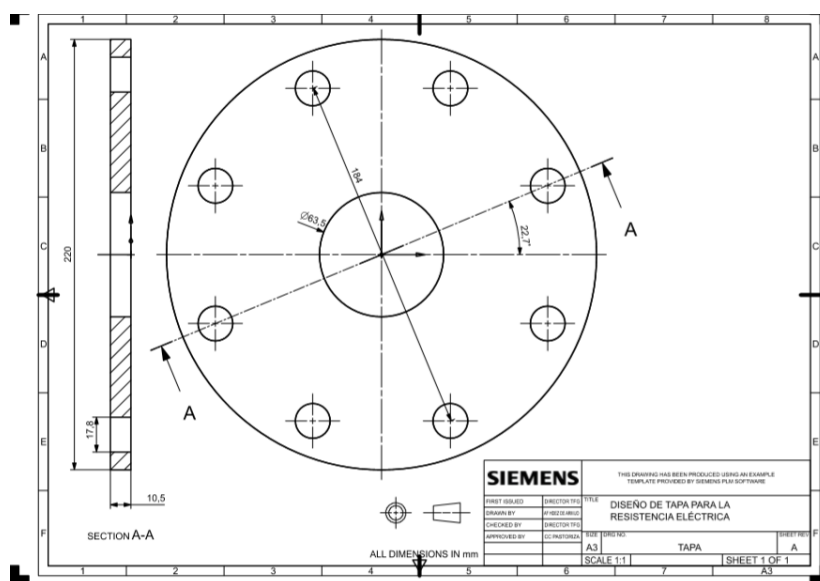


Figura 3-14 Tapa inicial del calentador

Una vez descritas todas las pruebas de mantenimiento y el proceso de selección de nuestra resistencia eléctrica con sus respectivos planos, pasaremos al siguiente apartado donde explicaremos la metodología que seguiremos para realizar nuestros ensayos teóricos.

3.4 Análisis del intercambiador

3.4.1 Régimen estacionario y régimen transitorio

Para comenzar con el análisis de nuestro intercambiador, es fundamental tener clara la diferencia entre régimen estacionario y régimen transitorio. A continuación se tratará de explicar ambos conceptos.

[8] Los problemas de transferencia de calor a menudo se clasifican como estacionarios o transitorios. El término estacionario implica que no hay cambio con el tiempo en cualquier punto dentro del medio, en tanto que transitorio implica variación con el tiempo o dependencia con respecto al tiempo. Por lo tanto, la temperatura o el flujo de calor permanecen inalterados con el transcurso del tiempo durante la transferencia de calor estacionaria a través de un medio, en cualquier ubicación, aunque las dos cantidades pueden variar de una ubicación a otra.

Durante la transferencia de calor transitoria, la temperatura normalmente varía tanto con el tiempo como con la posición. En el caso especial de variación con el tiempo pero no con la posición, la temperatura del medio cambia uniformemente con el tiempo. Los sistemas con una transferencia de calor de este tipo se llaman sistemas de parámetros concentrados o de resistencia interna despreciable.

La mayoría de los problemas de transferencia de calor que se encuentran en la práctica son de naturaleza transitoria, pero suelen analizarse bajo condiciones que se suponen estacionarias, ya que los procesos estacionarios son más fáciles de analizar.

Por otro lado, para diseñar o predecir el rendimiento de un intercambiador de calor, es esencial relacionar la tasa total de transferencia de calor con valores como las temperaturas del fluido de entrada y salida, el coeficiente de transferencia de calor general y el área de superficie total para la transferencia de calor. Dos de estas relaciones pueden obtenerse fácilmente aplicando equilibrios energéticos generales a los fluidos calientes y fríos.

Siendo conocidas las características de potencia de nuestra resistencia, el caudal que puede mover de la bomba, y la temperatura de entrada de agua fría en nuestra instalación podemos realizar un cálculo mediante la metodología NUT para determinar las expresiones del balance de energía.

3.4.2 Metodología NUT

[9]Existen diferentes métodos para el cálculo de intercambiadores de calor. El método de diferencias de temperatura logarítmica media (DTML) de análisis de intercambiadores de calor es un sencillo de utilizar pero requiere que se conozcan las temperaturas de entrada de los fluidos y que las temperaturas de salida se especifique o se determinen fácilmente a partir de las expresiones de balance de energía. Sin embargo, si sólo se conocen las temperaturas de entrada, el uso del método DTML requiere un procedimiento iterativo engorroso. Por lo tanto, es preferible emplear un enfoque alternativo llamado método de eficacia-NUT.

Para definir la eficacia de un intercambiador de calor, primero debemos determinar la tasa máxima de transferencia de calor posible para el intercambiador. Esta tasa de transferencia de calor podría, en principio, lograrse en un intercambiador de calor de longitud infinita tanto en flujo paralelo, como en contraflujo. En un intercambiador de este tipo, uno de los fluidos experimentaría la máxima diferencia de temperatura posible, la cual es proporcional a la capacidad mínima. Es decir:

$$q_{max} = C_{min} \cdot (\Delta T_{max})$$

Ecuación 3-1 Tasa máxima de transferencia de calor

En donde la capacidad es el valor correspondiente al valor del producto entre el flujo másico de un fluido por el calor específico del mismo. Para conocer la capacidad mínima, debemos hacer esta operación para los dos fluidos para averiguar mediante una comparación, cuál de los fluidos tiene la capacidad máxima y cual tiene la capacidad mínima:

$$C = \dot{m} \cdot c_p$$

Ecuación 3-2 Capacidad calórica

Además, cobra especial relevancia la capacidad relativa para el análisis del intercambiador por el método NUT. Esta capacidad relativa es el cociente entre la capacidad mínima y la capacidad máxima.

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$

Ecuación 3-3 Capacidad relativa

Conociendo estos datos, ahora pasaremos a calcular también el valor del número NUT, ya que conocemos el área de intercambio y podemos conocer el coeficiente global de transferencia de calor mediante la Ecuación 2-24. Este número se define como:

$$NUT = \frac{UA}{C_{min}}$$

Ecuación 3-4 Cálculo del número NUT

Por otro lado, para el cálculo del calor real, contamos con las gráficas presentadas en la Figura 3-15, de donde podemos obtener el valor de la eficiencia con los datos obtenidos de las Ecuaciones 3-3 y 3-4. Despejando de la siguiente fórmula, obtenemos el valor del calor real:

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}}$$

Ecuación 3-5 Eficiencia

El cálculo del coeficiente global de transferencia de calor ya se estudió en el punto 2.2 y el área de intercambio es conocida, ya que se nos proporciona en el esquema del intercambiador de calor. Con los valores del número NUT y la capacidad relativa y, dependiendo si estamos en flujo paralelo o contraflujo, podemos entrar en la gráfica que a continuación se muestra y sacar la eficiencia. Teniendo el valor de la eficiencia podemos sacar el valor de la transferencia de calor real y a partir de este dato calcular todos los demás datos; incluidas la temperaturas de entrada y salida de los dos fluidos.

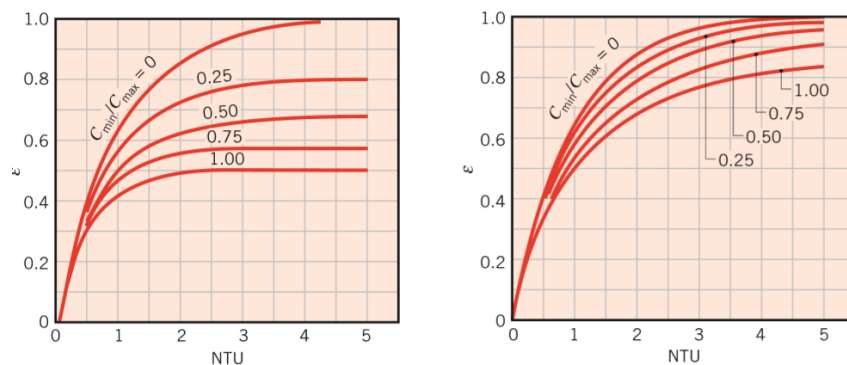


Figura 3-15 Gráfica ε -NUT para flujo paralelo y contraflujo respectivamente

Habiendo descrito la metodología en la que nos basaremos para realizar los cálculos, pasaremos a realizar los ensayos de manera teórica variando las características de los datos iniciales y analizándolos resultados.

4 RESULTADOS

4.1 Descripción del apartado

4.1.1 Ensayo teórico

La idea principal de este ensayo teórico es simular el comportamiento de nuestra instalación para determinar cómo será el balance de energías para distintos datos iniciales. Para la realización de nuestros ensayos hemos creado una serie de hojas de cálculo en Excel para estudiar el funcionamiento de nuestro intercambiador de calor. Cabe destacar que nos hemos basado en los procedimientos de la metodología NUT la cual hemos citado en el apartado anterior donde hemos descrito sus fundamentos. Antes de comenzar, explicaremos cómo hemos realizado las hojas de cálculo y las suposiciones iniciales que hemos realizado.

4.1.2 Suposiciones iniciales

[10] Los intercambiadores de calor suelen operar durante largos periodos sin cambios en sus condiciones de operación. Por lo tanto, se pueden considerar como aparatos de flujo estacionario. Como tales, el gasto de masa de cada fluido permanece constante y las propiedades de los fluidos, como la temperatura y la velocidad, en cualquier entrada o salida, siguen siendo las mismas. Asimismo, las corrientes de fluido experimentan poco o ningún cambio en sus velocidades y elevaciones y, como consecuencia, los cambios en la energía cinética y en la potencial son despreciables. En general, el calor específico de un fluido cambia con la temperatura; pero, en un intervalo específico de temperaturas, se puede considerar como una constante en algún valor promedio, con poca pérdida en la exactitud. La conducción axial de calor a lo largo del tubo suele ser insignificante y se puede considerar despreciable. Por último, se supone que la superficie exterior del intercambiador de calor está perfectamente aislada, de modo que no se tiene pérdida de calor hacia el medio circundante y cualquier transferencia de calor sólo ocurre entre los dos fluidos. Las idealizaciones que acaban de describirse se logran muy aproximadamente en la práctica y simplifican mucho el análisis de un intercambiador de calor con poco sacrificio de la exactitud. Por lo tanto son de uso común.

Para simplificar los cálculos de nuestro ensayo teórico, hemos realizado una serie de suposiciones iniciales. Gracias a estas, hemos sido capaces de poder realizar una pequeña simulación teórica, la cual habrá que contrastar de manera práctica en laboratorio.

Las principales suposiciones que hemos asumido podemos resumirlas en:

- Se trabaja en régimen estacionario:

Como se vio en apartados anteriores, es indispensable determinar el régimen en el que se está trabajando. Prácticamente, todos los procesos térmicos ocurren en un régimen transitorio. Sin embargo, para evitar cálculos engorrosos, podemos aproximar que nuestro intercambiador trabaja en régimen estacionario ya que los resultados apenas se ven afectados.

- Se trabaja en condiciones adiabáticas, no hay intercambio de calor con el entorno:

A pesar de que realmente estas pérdidas existen, podemos asumir que no tiene excesiva relevancia a la hora de calcular nuestro balance de energía. Esta suposición simplifica enormemente los cálculos, ya que se desprecian en todo momento las pérdidas que pueda haber hacia el exterior debido a la radiación y conducción. Básicamente estamos asumiendo que nuestra instalación es completamente hermética y no permite la transferencia de calor al exterior. Esto se traduce en que la temperatura del fluido caliente, a la salida del intercambiador de doble tubo, es la misma con la que entra en el calentador de carcasa y resistencia eléctrica.

- Cambios de Energía Potencial y Cinemática despreciables:

Dicho de otro modo, estamos asumiendo que el cambio de Energía Mecánica puede aproximarse a cero. Realmente, sí se producen estos cambios de energía a lo largo del recorrido del fluido debido a cambios de altura y velocidades del fluido dentro de la instalación.

- Resistencia térmica del material y efectos de las impurezas insignificantes:

Para realizar nuestros cálculos, no tendremos en cuenta la resistencia térmica del material ni las imperfecciones internas de los tubos, los tomaremos como ideales.

- Temperatura ambiente del agua a 15°C.
- Flujo interno del tubo y condiciones térmicas completamente desarrolladas.
- Espesor de la superficie de intercambio despreciable.

Habiendo hecho un repaso sobre las hipótesis supuestas, pasaremos a realizar nuestros cálculos con la hoja de Excel.

4.1.3 Cálculos teóricos.

Como se dijo en apartados anteriores partiremos de las suposiciones iniciales anteriormente mencionadas y a partir de ellas utilizaremos la metodología NUT. Además, tendremos unos datos de partida fijos para comenzar nuestros cálculos.

En primer lugar, conocemos la potencia de nuestra resistencia eléctrica RIT-511C colocada en el calentador de agua, cuyo valor es 15000W. Otro dato que conocemos es el diámetro del tubo del circuito caliente y el del tubo del circuito frío. Además conocemos nuestra superficie de intercambio de calor ya que se nos proporciona en el esquema general de la instalación. La longitud de intercambio es conocida a partir de la superficie de intercambio y los diámetros de los tubos. Y, por último, tomaremos la densidad del agua como un valor constante ya que no varía significativamente los

resultados y además simplifica los cálculos. A continuación se muestra una imagen con los datos fijos de nuestra instalación.

Datos fijos	
A intercambio(m2)	0,8
D int(m)	0,0254
D ext(m)	0,036
Densidad agua(Kg/m3)	1000
Potencia (W)	15000
Lintercambio(m)	10,0

Figura 4-1 Datos fijos

Datos Iniciales	
Características	VALOR
Caudal Agua Caliente(L/h)	1000
Caudal Agua fría(L/h)	600
T entrada (° C)	15

Figura 4-2 Datos iniciales

Por otro lado debemos determinar unos datos iniciales para realizar los cálculos. Los únicos valores que conocemos inicialmente son la temperatura del agua proveniente de la red de suministro del edificio Isaac Peral y los caudales de agua fría y caliente gracias a los caudalímetros de ambos circuitos. Esta temperatura de agua fría puede variar según la estación del año o incluso si lo seleccionamos en la propia llave del grifo. Sin embargo, para los cálculos utilizaremos una temperatura de 15°C sistemáticamente. Arriba se muestra una figura con los datos iniciales que hay que rellenar a mano para comenzar los cálculos.

Debemos destacar que hemos utilizado varias tablas para poder comenzar los cálculos. Concretamente, hemos utilizado una tabla de propiedades del agua saturada a distintas temperaturas y también hemos usado la gráfica NUT para flujo paralelo y contraflujo.

TABLE A.6 Thermophysical Properties of Saturated Water^a

Temperature, <i>T</i> (K)	Pressure, <i>p</i> (bars) ^b	Specific Volume (m ³ /kg)		Heat of Vaporization, <i>h</i> _{fg} (kJ/kg)	Specific Heat (kJ/kg · K)		Viscosity (N · s/m ²)		Thermal Conductivity (W/m · K)		Prandtl Number		Surface Tension, <i>σ</i> · 10 ³ (N/m)	Expansion Coefficient, <i>β</i> · 10 ⁶ (K ⁻¹)	Temperature, <i>T</i> (K)
		<i>v</i> · 10 ³	<i>v</i> _g		<i>c</i> _p	<i>c</i> _g	<i>μ</i> _g · 10 ³	<i>μ</i> _l · 10 ³	<i>k</i> · 10 ³	<i>k</i> _g · 10 ³	<i>Pr</i>	<i>Pr</i> _g			
273.15	0.00611	1.000	206.3	2502	4.217	1.854	1750	8.01	569	18.2	12.99	0.815	75.5	-68.05	273.15
275	0.00697	1.000	181.7	2497	4.211	1.855	1740	8.02	574	18.3	12.22	0.817	75.3	-32.74	275
280	0.00990	1.000	130.4	2485	4.198	1.858	1422	8.29	582	18.6	10.26	0.825	74.8	46.04	280
285	0.01387	1.000	99.4	2473	4.189	1.861	1225	8.49	590	18.9	8.81	0.833	74.3	114.1	285
290	0.01917	1.001	69.7	2461	4.184	1.864	1080	8.69	598	19.3	7.56	0.841	73.7	174.0	290
295	0.02617	1.002	51.94	2449	4.181	1.868	940	8.89	606	19.5	6.62	0.849	72.7	227.5	295
300	0.03531	1.003	39.13	2438	4.179	1.872	855	9.09	613	19.6	5.83	0.857	71.7	276.1	300
305	0.04712	1.005	29.74	2428	4.178	1.877	769	9.29	620	20.1	5.20	0.865	70.9	320.6	305
310	0.06221	1.007	22.93	2414	4.178	1.882	695	9.49	628	20.4	4.62	0.873	70.0	361.9	310
315	0.08132	1.009	17.82	2402	4.179	1.888	631	9.69	634	20.7	4.16	0.883	69.2	400.4	315
320	0.1053	1.011	13.98	2390	4.180	1.895	577	9.89	640	21.0	3.77	0.894	68.3	436.7	320
325	0.1351	1.013	11.06	2378	4.182	1.903	528	10.09	645	21.3	3.42	0.901	67.5	471.2	325
330	0.1719	1.016	8.82	2366	4.184	1.911	489	10.29	650	21.7	3.15	0.908	66.6	504.0	330
335	0.2167	1.018	7.09	2354	4.186	1.920	450	10.49	656	22.0	2.88	0.916	65.8	535.5	335
340	0.2713	1.021	5.74	2342	4.188	1.930	420	10.69	660	22.3	2.66	0.925	64.9	566.0	340
345	0.3372	1.024	4.683	2329	4.191	1.941	389	10.89	664	22.6	2.45	0.933	64.1	595.4	345
350	0.4163	1.027	3.846	2317	4.195	1.954	358	11.09	668	23.0	2.29	0.942	63.2	624.2	350
355	0.5100	1.030	3.180	2304	4.199	1.968	343	11.29	671	23.3	2.14	0.951	62.3	652.3	355
360	0.6209	1.034	2.645	2291	4.203	1.983	325	11.49	674	23.7	2.02	0.960	61.4	679.9	360
365	0.7514	1.038	2.212	2278	4.209	1.999	306	11.69	677	24.1	1.91	0.969	60.5	707.1	365
370	0.9040	1.041	1.861	2265	4.214	2.017	289	11.89	679	24.5	1.80	0.978	59.5	728.7	370
375	1.0815	1.045	1.574	2252	4.217	2.039	279	12.02	680	24.8	1.76	0.984	58.9	750.1	375
380	1.2869	1.049	1.337	2239	4.226	2.057	260	12.29	683	25.4	1.61	0.999	57.6	788	380

Chapter 11 ■ Heat Exchangers

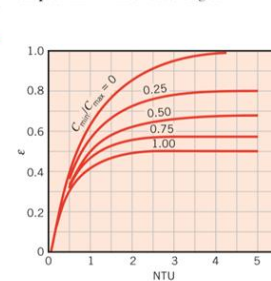


FIGURE 11.10 Effectiveness of a parallel-flow heat exchanger (Equation 11.28).

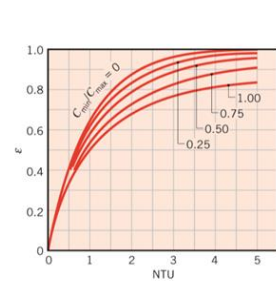


FIGURE 11.11 Effectiveness of a counterflow heat exchanger (Equation 11.29).

Figura 4-3 Tabla A.6 y Gráfica NUT

La metodología de ensayo, se basa principalmente en la variación del caudal del circuito caliente a través de la válvula que se encuentra a la salida de la bomba. Hemos seleccionado caudales de 400,

600 y 1000 litros por hora para realizar tres pruebas a la hora de comprobar nuestro balance de energía. Estos caudales junto con el caudal y la temperatura de entrada de agua bastarán para comenzar nuestro ensayo. El primer caudal de agua caliente que escogeremos será de 1000 litros por cada hora. Debemos señalar que todos los ensayos se harán en flujo paralelo y contraflujo, ya que según la disposición variaría el valor de la eficiencia sacado de la gráfica NUT. En la imagen inferior, se muestra la selección de varios caudales en el laboratorio, los cuales escogimos para realizar nuestros cálculos.

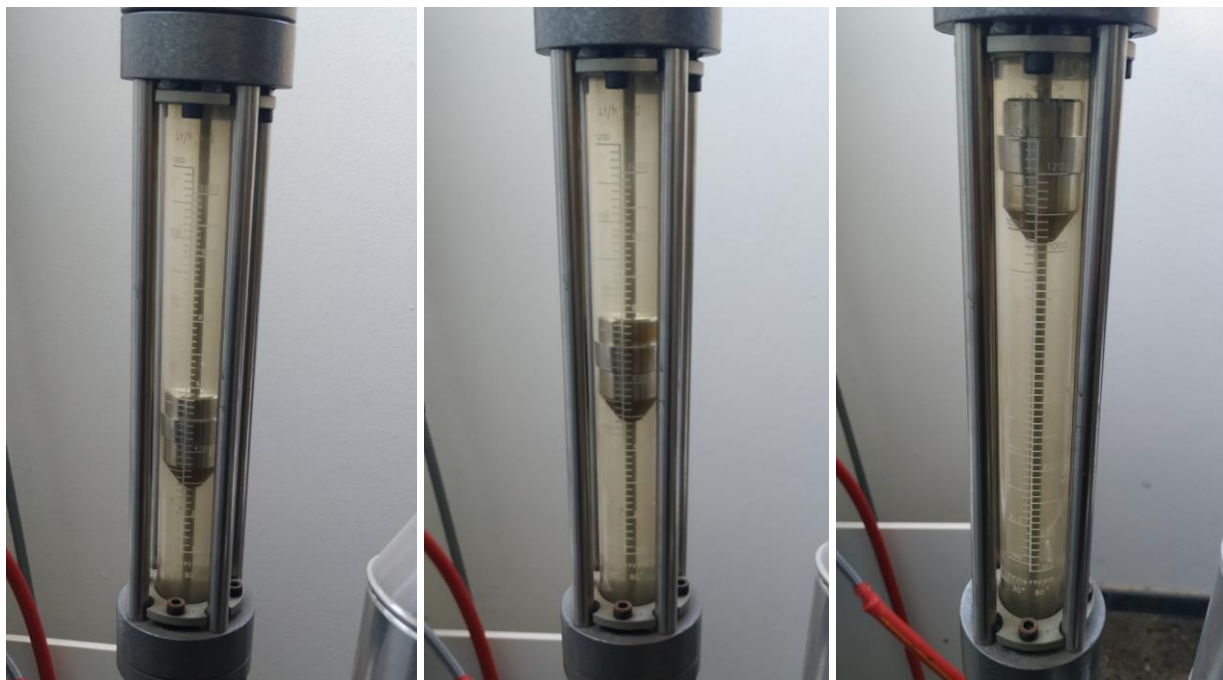


Figura 4-4 Distintos caudales para el circuito de agua caliente

A continuación se pasará a explicar el funcionamiento de las hojas de cálculo que simulan el comportamiento de nuestro intercambiador.

4.1.4 Primer Caso: Caudal máximo en flujo paralelo y contraflujo

Para realizar este ensayo, diremos que el caudal es máximo cuando la válvula reguladora del caudal se encuentra en su máxima apertura. Posteriormente, se simularán tres pasos de agua para que el balance de energía adquiera un valor estable. En el primer y segundo paso de agua no queda reflejada la capacidad de nuestro intercambiador, ya que las temperaturas de entrada de agua caliente al intercambiador de doble tubo, no adquieren un valor estable hasta que se han producido varios pasos de agua. Dicho de otro modo, el agua caliente no adquiere su capacidad total para la transferencia de calor desde el inicio, ya que se va calentando progresivamente en cada ciclo hasta obtener un valor de temperatura constante a la salida del calentador, la cual es igual a la de entrada en el intercambiador de calor de doble tubo.

Como se dijo anteriormente, lo primero que debemos hacer es seleccionar los datos iniciales que se encuentran marcados en color amarillo. Posteriormente, debemos rellenar la Tabla 2 correspondiente a las propiedades del agua a la temperatura inicial seleccionada. (15°C) Los valores para interpolar los sacaremos de la tabla A.6 mostrada en apartado anterior.

Datos Iniciales	
Características	VALOR
Caudal Agua Caliente(L/h)	1000
Caudal Agua fría(L/h)	600
T entrada (° C)	15

Figura 4-5 Datos iniciales

TABLA2. Propiedades agua saturada					
Fluido	T (°C)	μ (N*s/m2)	Pr	Cp (J/K* Kg)	k (W/m*K)
Agua fría	12	0,00123	8,810	4189	0,590
	17	0,00108	7,560	4184	0,598
	15	0,00114	8,060	4186	0,595

Figura 4-6 Propiedades agua fría saturada

Con estos datos pasaremos a realizar el balance de energía en el calentador en la Tabla 1. Sabemos la temperatura de entrada, el caudal, el calor específico y la potencia de la resistencia eléctrica. Si hacemos un balance de energía, utilizando las ecuaciones pertinentes, podemos calcular a qué temperatura sale el agua del calentador. Esta temperatura de salida del calentador será la temperatura de entrada, para el primer paso de agua, al intercambiador de doble tubo.

TABLA 1. Intercambiador de calor tubos y carcasa				
Fluido	$\dot{Q}$ (L/h)	T (°C) entrada	T (°C) salida	$\dot{m}$ (Kg/s)
Agua caliente(1º paso)	1000	15	27,925	0,2778

Figura 4-7 Balance calentador 1º paso de agua

Una vez conocemos la temperatura de entrada de agua caliente al intercambiador de doble tubo, para el primer paso de agua, realizamos el mismo proceso que realizamos para el agua fría, rellenando la Tabla 2 para el agua caliente. Es necesario recordar que las celdas amarillas se rellenarán con datos de la tabla A.6 reflejada en el anexo I.

TABLA2. Propiedades agua saturada					
Fluido	T (°C)	μ (N*s/m2)	Pr	Cp (J/K* Kg)	k (W/m*K)
Agua fría	12	0,00123	8,810	4189	0,590
	17	0,00108	7,560	4184	0,598
	15	0,00114	8,060	4186	0,595
Agua caliente	27	0,00855	5,830	4179	0,613
	32	0,00769	5,200	4178	0,620
	27,92484442	0,00839	5,71347	4178,81503	0,61429

Figura 4-8 Propiedades agua fría y caliente para el 1º paso

Una vez hemos sacado estos datos, debemos calcular en la Tabla 4 los valores característicos del flujo, tanto el frío como el caliente. Estos datos nos sirven para averiguar otros valores característicos

del intercambiador de calor para realizar el balance de energía. A continuación se muestra las imágenes de ambas tablas. Destacar que el valor de la eficiencia lo sacaremos de las gráficas NUT.

TABLA4. Propiedades del flujo

Fluido	Re	TIPO DE FLUJO	Nu	h (W/m ² *K)
Agua fría	3038,5645		32,389	1817,447
	LAMINAR	NO	4,607	
	TRANSICIÓN	SI		
	TURBULENTO	NO		
Agua caliente	16602,9093		92,245	2230,942
1º paso	LAMINAR	NO	5,378	
	TRANSICIÓN	NO		

Figura 4-9 Propiedades del flujo

1º Paso de agua: VALORES CARACTERÍSTICOS

U (W/m ² *K)	Cr	Qmax	NUT	Q	ε
1001,538794	0,60103	9017,233	1,148	5550,485	0,615541934

Figura 4-10 Valores característicos

Debemos resaltar que en estos ensayos de flujo paralelo, los valores y propiedades características del fluido frío se mantendrán constantes, ya que solo variaremos el caudal del fluido caliente. Con todos estos datos, podemos realizar el primer balance de energía para el intercambiador de doble tubo para el primer paso de agua, el cual se muestra en la Tabla 3. Este primer balance, no es indicador de la capacidad de nuestra instalación, sino que sirve para realizar los siguientes pasos.

TABLA 3. Intercambiador doble tubo

Fluido	T entrada (° C)	T salida (° C)	ṁ (Kg/s)	C (J/s*K)
Agua fría (1ºpaso)	15	22,956	0,1667	697,667
Agua caliente (1º paso)	27,925	23,143	0,2778	1160,782

Figura 4-11 Balance intercambiador doble tubo 1º paso

Con las suposiciones que realizamos en los apartados anteriores, la temperatura de salida en el intercambiador de calor de doble tubo de agua caliente (23,143°C), será la misma con la que entrará en el intercambiador con la resistencia eléctrica para volver a calentarse. Con la potencia, la capacidad y la nueva temperatura de entrada al calentador, ya podemos calcular la temperatura a la salida del mismo. Como se muestra en la siguiente figura, realizamos el mismo proceso que para el primer paso de agua, calculando la temperatura de salida del calentador, la cual será la de entrada del intercambiador de doble tubo.

TABLA 1. Intercambiador de calor tubos y carcasa

Fluido	$\dot{C}$ (L/h)	T (°C) entrada	T (°C) salida	$\dot{m}$ (Kg/s)
Agua caliente(1º paso)	1000	15	27,925	0,2778
Agua caliente(2º paso) Supuesta	1000	23,143	36,068	0,2778
Agua caliente (2º paso) calculada	1000	23,143	36,068	0,2778
ERROR ITERACIÓN	0,00000	¿ASUMIBLE?	SI	

Figura 4-12 Balance de energía 2º paso

A continuación realizamos el mismo proceso que para el primer paso de agua, rellenando las celdas naranjas para el segundo paso de agua caliente para poder calcular los valores característicos.

TABLA2. Propiedades agua saturada

Fluido	T (°C)	μ (N*s/m ²)	Pr	Cp (J/K* Kg)	k (W/m*K)
Agua fría	12	0,00123	8,810	4189	0,590
	17	0,00108	7,560	4184	0,598
	15	0,00114	8,060	4186	0,595
Agua caliente 1º paso	27	0,00086	5,830	4179	0,613
	32	0,00077	5,200	4178	0,620
	27,92484442	0,00084	5,71347	4178,81503	0,61429
Agua caliente 2º paso y Sigüientes	32	0,00077	5,200	4178	0,620
	37	0,00070	4,620	4178	0,628
	36,068	0,00071	4,72811	4178,00000	0,62651

TABLA4. Propiedades del flujo

Fluido	Re	TIPO DE FLUJO	Nu	h (W/m*K)
Agua fría	3038,5645		32,389	1817,447
	LAMINAR	NO	4,607	
	TRANSICIÓN	SI		
Agua caliente 1º paso	16602,9093		92,245	2230,942
	LAMINAR	NO	5,378	
	TRANSICIÓN	NO		
Agua caliente 2º paso	19655,06299		99,750	2412,441
	LAMINAR	NO	5,378	
	TRANSICIÓN	NO		
	TURBULENTO	SI		

Figura 4-13 Propiedades agua caliente y flujo en el 2º paso**2º Paso de agua: VALORES CARACTERÍSTICOS**

U (W/m ² *K)	Cr	Qmax	NUT	Q	E
1036,548441	0,60115	24321,237	1,189	15000,001	0,616744964

Figura 4-14 Valores característicos 2º paso

Tras sacar los valores característicos podemos realizar el balance en el intercambiador de doble tubo. Este segundo balance es más relevante que el anterior pero no es, todavía, indicador de la capacidad total de la instalación ya que estamos realizando un proceso iterativo. Es por ello que es necesario realizar un tercer balance en donde la temperatura de salida del intercambiador de calor de doble tubo vuelve a ser la de entrada del calentador.

TABLA 3. Intercambiador doble tubo				
Fluido	T entrada(° C)	T salida (° C)	m (Kg/s)	C (J/s*K)
Agua fría (1º paso)	15	22,956	0,1667	697,667
Agua caliente (1º paso)	27,925	23,143	0,2778	1160,782
Agua fría (2º paso y siguientes)	15	27,994	0,1667	697,667
Agua caliente (2º paso y siguientes)	36,068	28,257	0,2778	1160,556

Figura 4-15 Balance intercambiador doble tubo 2º paso agua caliente

Volveremos a realizar el mismo proceso ya que el agua de entrada del calentador tendrá la misma temperatura que la de salida del intercambiador de doble tubo. Por lo tanto volvemos a sustituirla. En el tercer paso de agua vemos como los valores se van estabilizando. Cada vez que aplicamos el método de iteración directa por sustitución, el error se vuelve más pequeño.

TABLA 1. Intercambiador de calor tubos y carcasa				
Fluido	Ĉ (L/h)	T (°C) entrada	T (°C) salida	m (Kg/s)
Agua caliente(1º paso)	1000	15	27,925	0,2778
Agua caliente(2º paso) Supuesta	1000	23,143	36,068	0,2778
Agua caliente (2º paso) calculada	1000	23,143	36,068	0,2778
ERROR ITERACIÓN	0,00000	¿ASUMIBLE?	SI	
Agua caliente (3º paso) calculada	1000	28,257	41,182	0,2778

TABLA 3. Intercambiador doble tubo				
Fluido	T entrada(° C)	T salida (° C)	m (Kg/s)	C (J/s*K)
Agua fría (1º paso)	15	22,956	0,1667	697,667
Agua caliente (1º paso)	27,925	23,143	0,2778	1160,782
Agua fría (2º paso y siguientes)	15	27,994	0,1667	697,667
Agua caliente (2º paso y siguientes)	36,068	28,257	0,2778	1160,556

Figura 4-16 Balance intercambiador de calor 3º paso

Si ahora sustituimos la temperatura del agua caliente del 3º paso realizando el mismo proceso, seguiremos iterando hasta que veremos que finalmente el balance de energías para este caudal, queda como se muestra en la imagen inferior. La temperatura de entrada al calentador se mantiene estable en torno a los 50° C para este caudal determinado.

TABLA 1. Intercambiador de calor tubos y carcasa

Fluido	$\dot{C}$ (L/h)	T (°C) entrada	T (°C) salida	$\dot{m}$ (Kg/s)
Agua caliente(1º paso)	1000	15	27,925	0,2778
Agua caliente(2º paso) Supuesta	1000	23,143	36,068	0,2778
Agua caliente (2º paso) calculada	1000	23,143	36,068	0,2778
ERROR ITERACIÓN	0,00000	¿ASUMIBLE?	SI	
Agua caliente (3º paso) calculada	1000	36,936	49,861	0,2778

TABLA 3. Intercambiador doble tubo

Fluido	T entrada (°C)	T salida (°C)	$\dot{m}$ (Kg/s)	C (J/s*K)
Agua fría (1º paso)	15	22,956	0,1667	697,667
Agua caliente (1º paso)	27,925	23,143	0,2778	1160,782
Agua fría (2º paso y siguientes)	15	36,500	0,1667	697,667
Agua caliente (2º paso y siguientes)	49,861	36,936	0,2778	1160,556

Figura 4-17 Balance de Energía

A continuación mostramos una gráfica realizada en función del área de intercambio de calor en donde se observan, para flujo paralelo, la variación de temperaturas.

VALORES GRÁFICA					
PUNTO	AGUA FRÍA	AGUA CALIENTE	Q(W)	A(m2)	L(m)
ENTRADA	15	49,823	0	0	0
	20	46,818	3488,333333	0,186044444	2,3326702
	22	45,615	4883,666667	0,260462222	3,26573828
	25	43,812	6976,666667	0,372088889	4,665340399
	30	40,807	10465	0,558133333	6,998010599
	33	39,004	12558	0,66976	8,397612719
SALIDA	36,500	36,900	15000	0,8	10,03059331

Figura 4-18 Datos para la gráfica con flujo paralelo

De la imagen superior debemos destacar que los cálculos se han determinado a partir de varias temperaturas en el fluido frío. A partir de estas, se ha hecho un balance particular para calcular la tasa de calor para ese salto de temperatura concreto y poder calcular así la temperatura del fluido caliente, como se muestra en la imagen superior. La tabla muestra el caso concreto para flujo paralelo pero como se dijo anteriormente, la única diferencia con el contraflujo estará en el valor de la eficiencia. El resultado de esta tabla son una serie de gráficas que muestran de manera ilustrativa la evolución de las temperaturas de ambos circuitos.

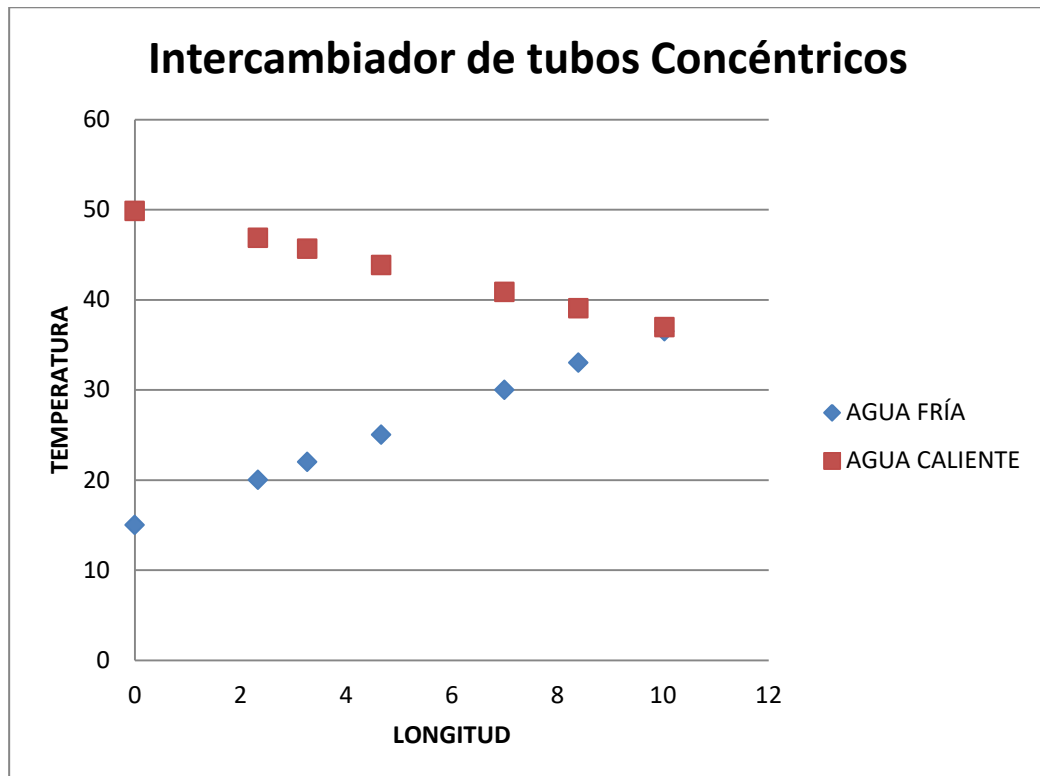


Figura 4-19 Gráfica para flujo paralelo

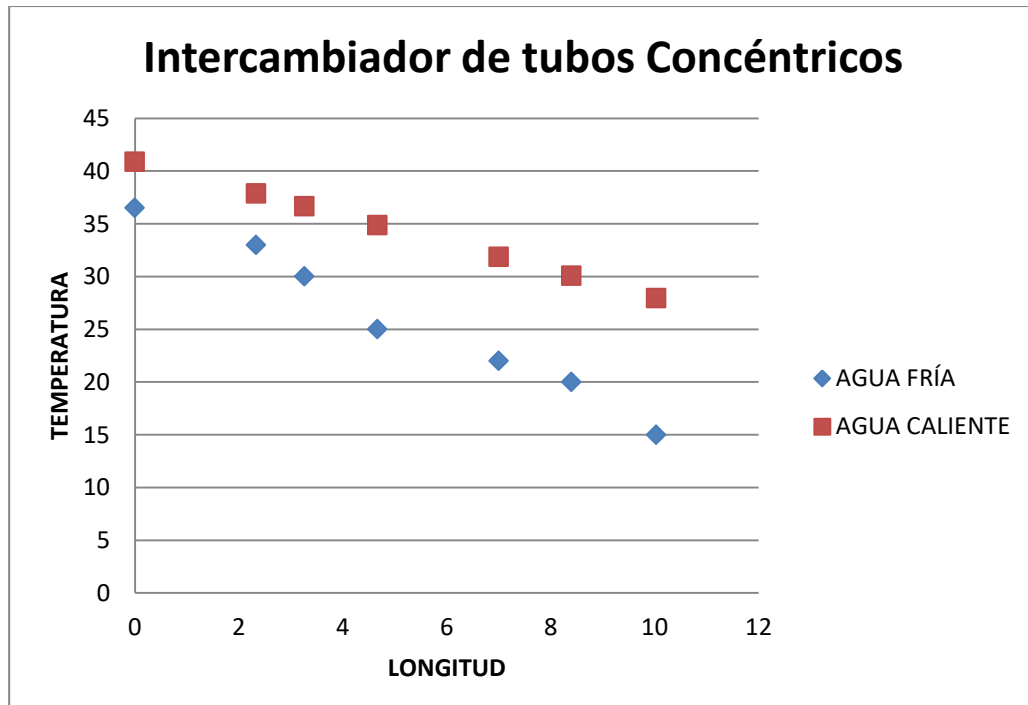


Figura 4-20 Gráfica a contraflujo

Debemos destacar que tanto en flujo paralelo como en contraflujo, la pendiente que indica la variación de temperaturas, es más pronunciada en el agua fría. Esto es debido a que hay más caudal de agua caliente.

4.1.5 Segundo Caso: caudal medio en flujo paralelo y contraflujo

A continuación realizaremos el mismo procedimiento para un caudal menor. Como se puede apreciar en la siguiente imagen, el caudal de circuito de agua caliente será ahora de 600 litros por hora y no 1000 como en el apartado anterior. A partir de estos datos comenzaremos el segundo ensayo.

Datos Iniciales	
Características	VALOR
Caudal Agua Caliente(L/h)	600
Caudal Agua fría(L/h)	600
T entrada (° C)	15

Figura 4-21 Datos iniciales para el segundo ensayo

Una vez tenemos los datos iniciales de partida, realizamos los mismos procesos que en el apartado anterior. Tendremos que rellenar la tabla de propiedades del agua para el primer paso y segundo paso, tanto para el agua fría como para el agua caliente. En la tabla inferior, se muestra el primer y segundo paso de agua para las propiedades del agua con los que se calcula la temperatura del agua caliente para el tercer paso de agua.

TABLA2. Propiedades agua saturada					
Fluido	T (°C)	μ (N*s/m ²)	Pr	Cp (J/K* Kg)	k (W/m*K)
Agua fría	12	0,00123	8,810	4189	0,590
	17	0,00108	7,560	4184	0,598
	15	0,00114	8,060	4186	0,595
Agua caliente	37	0,00070	4,620	4178	0,628
	42	0,00063	4,160	4179	0,634
	36,53110048	0,00070	4,66314	4177,90622	0,62744
Agua caliente	47	0,00058	3,770	4180	0,640
	52	0,00053	3,420	4182	0,645
	47,388	0,00057	3,74283	4180,15528	0,64039

Figura 4-22 Valores característicos

El resultado que obtenemos del balance de energía del intercambiador, queda reflejado en las casillas turquesa de la tabla 3. Además hemos realizado una simulación gráfica de cómo sería el gradiente de temperaturas a lo largo del tubo. Debemos destacar que al reducir el caudal de agua caliente, el calentador es capaz de calentar más dicho agua. Tenemos la misma potencia pero menor caudal y por este motivo el agua sale del mismo con mayor temperatura. Sin embargo atendiendo a las fórmulas que vimos en los primeros apartados, tiene menos capacidad calórica. En la imagen inferior se muestra el balance para el segundo paso de agua.

TABLA 3. Intercambiador doble tubo					
Fluido	T entrada(° C)	T salida (° C)	$\dot{m}$ (Kg/s)	C (J/s*K)	
Agua fría (1º paso)	15	25,638	0,1667	697,667	
Agua caliente (1º paso)	36,521	25,862	0,1667	696,317	
Agua fría (2º paso y siguientes)	15	31,058	0,1667	697,667	
Agua caliente (2º paso y siguientes)	47,373	31,300	0,1667	697,057	

Figura 4-23 Balance de energía para el segundo paso

Si continuamos iterando por sustitución del agua de salida del calentador como agua de entrada del intercambiador, como se vio en apartados anteriores, tenemos a continuación el balance total de la instalación. La temperatura del fluido caliente se estabiliza en torno a los 60°C para este caudal en flujo paralelo.

Fluido	$\dot{C}$ (L/h)	T (°C) entrada	T (°C) salida	$\dot{m}$ (Kg/s)
Agua caliente(1º paso)	600	15	36,521	0,1667
Agua caliente(2º paso) Supuesta	600	25,862	47,373	0,1667
Agua caliente (2º paso) calculada	600	25,862	47,381	0,1667
ERROR ITERACIÓN	0,00854	¿ASUMIBLE?	SI	
Agua caliente (3º paso) calculada	600	36,824	58,343	0,1667

TABLA 3. Intercambiador doble tubo

Fluido	T entrada(° C)	T salida (° C)	$\dot{m}$ (Kg/s)	C (J/s*K)
Agua fría (1º paso)	15	25,638	0,1667	697,667
Agua caliente (1º paso)	36,521	25,862	0,1667	696,317
Agua fría (2º paso y siguientes)	15	36,500	0,1667	697,667
Agua caliente (2º paso y siguientes)	58,343	36,824	0,1667	697,057

Figura 4-24 Balance total

VALORES GRÁFICA					
PUNTO	AGUA FRÍA	AGUA CALIENTE	Q(W)	A(m2)	L(m)
ENTRADA	15	58,383	0	0	0
	16	57,382	697,6666667	0,037208889	0,46653404
	18	55,379	2093	0,111626667	1,399602121
	24	49,370	6279	0,33488	4,198806363
	28	45,365	9069,666667	0,483715556	6,064942524
	33	40,358	12558	0,669760001	8,397612725
SALIDA	36,500	36,852	14999,99999	0,8	10,03059331

Figura 4-25 Valores gráfica con flujo paralelo

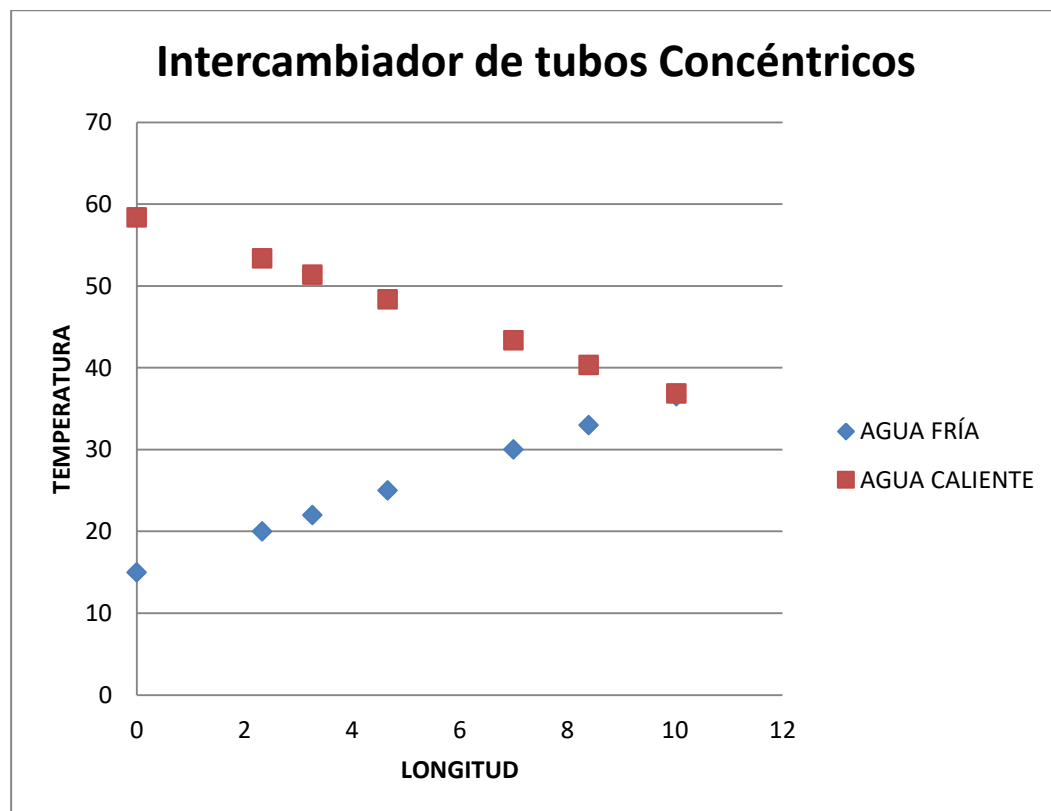


Figura 4-26 Gráfica flujo paralelo

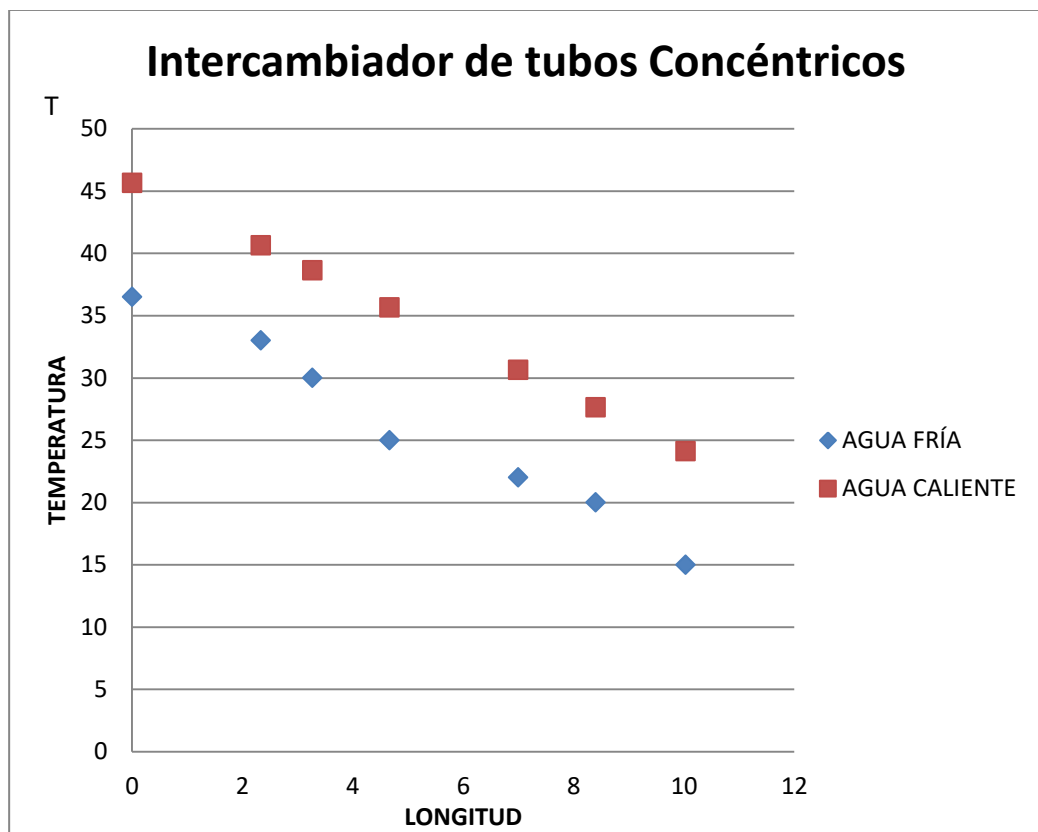


Figura 4-27 Gráfica a contraflujo

Respecto al anterior ensayo, podemos decir que en el flujo paralelo el gradiente de temperaturas tiende a ser simétrico y tiende a ser paralelo en modo a contraflujo. Esto es debido a que son los mismos caudales.

En el siguiente apartado, analizaremos nuestro último caso de estudio, el cual será para un caudal mínimo permitido por la válvula del circuito caliente.

4.1.6 Tercer caso: caudal mínimo en flujo paralelo y contraflujo

Como se dijo con anterioridad, el caudal mínimo regulable por la válvula que se encuentra a la salida del calentador, se corresponde con 400 litros a la hora. También se explicó en anteriores apartados la obtención del balance total de energía, por lo que en este apartado sólo mostraremos las imágenes sacadas de nuestra hoja de cálculo.

TABLA 1. Intercambiador de calor tubos y carcasa				
Fluido	$\dot{C}$ (L/h)	T (°C) entrada	T (°C) salida	$\dot{m}$ (Kg/s)
Agua caliente(1º paso)	400	15	47,312	0,1111
Agua caliente(2º paso) Supuesta	400	28,022	60,326	0,1111
Agua caliente (2º paso) calculada	400	28,022	60,298	0,1111
ERROR ITERACIÓN	-0,02831	¿ASUMIBLE?	SI	
Agua caliente (3º paso) calculada	400	36,698	68,974	0,1111

TABLA 3. Intercambiador doble tubo				
Fluido	T entrada(° C)	T salida (° C)	$\dot{m}$ (Kg/s)	C (J/s*K)
Agua fría (1º paso)	15	27,836	0,1667	697,667
Agua caliente (1º paso)	47,312	28,022	0,1111	464,222
Agua fría (2º paso y siguientes)	15	36,500	0,1667	697,667
Agua caliente (2º paso y siguientes)	68,974	36,698	0,1111	464,741

Figura 4-28 Balance total de energía para caudal mínimo

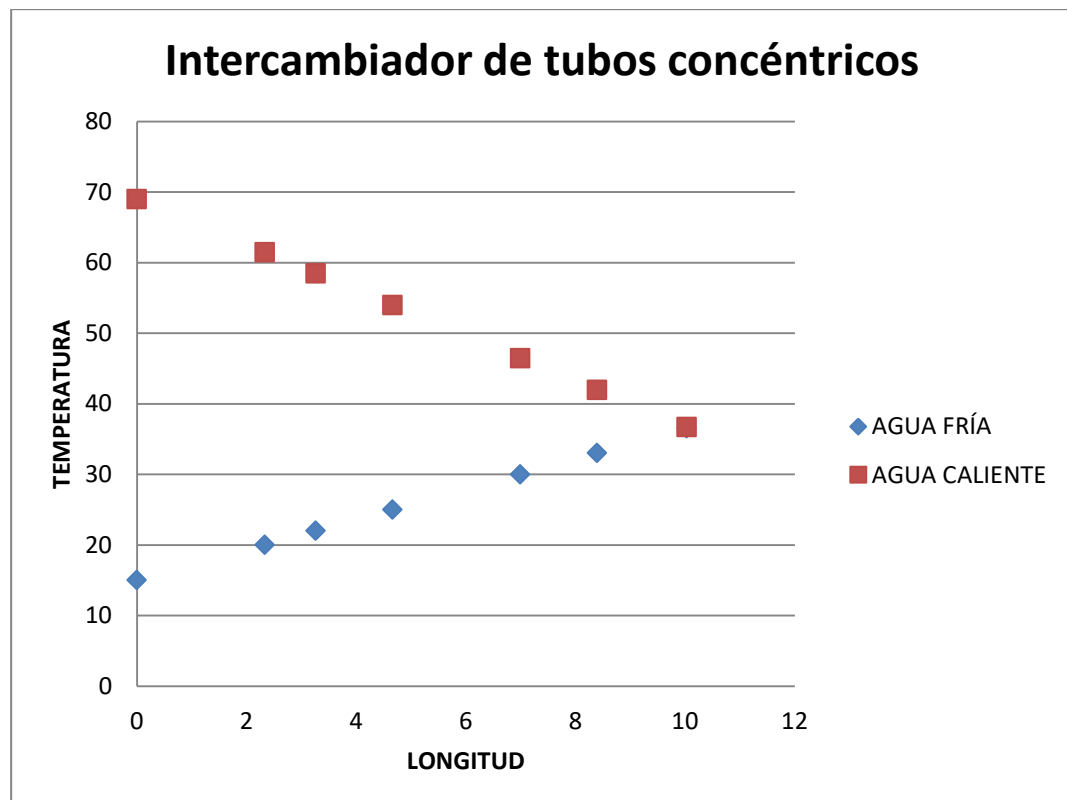


Figura 4-29 Gráfica flujo paralelo

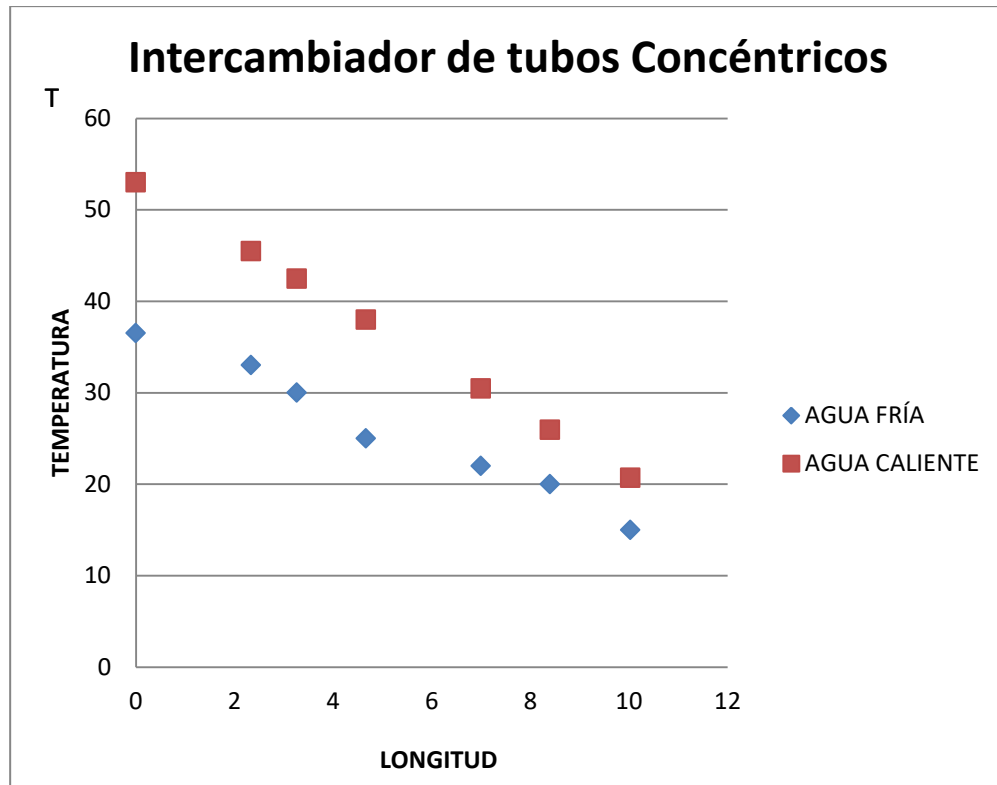


Figura 4-30 Gráfica a contraflujo

En este último caso podemos ver con en nuestra instalación el gradiente de temperaturas del fluido caliente es más pronunciado tanto para el modo paralelo como en contraflujo.

Habiendo visto un pequeño análisis sobre nuestra instalación para distintos caudales pasaremos a explicar las conclusiones que hemos podido sacar del conjunto del proyecto.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

En los siguientes apartados, se pretende plasmar tanto las conclusiones como las líneas futuras. Empezaremos desarrollando nuestras conclusiones desde un punto de vista general, del trabajo en su totalidad, hasta un punto de vista particular, discutiendo el análisis de resultados.

5.1.1 Conclusiones generales

En primer lugar, en la parte práctica que hemos realizado ha quedado patente que es imprescindible contar con buen material de laboratorio. Salvo en contadas ocasiones en las que hemos tenido que pedir ayuda al equipo de mantenimiento de la escuela, hemos podido desmontar y volver a montar los componentes de la instalación sin ninguna dificultad.

En segundo lugar, una de las principales conclusiones que podemos deducir de este trabajo es la importancia de realizar un estudio previo exhaustivo sobre las características que queremos tener en nuestra instalación. El diseño preliminar del sistema nos ha permitido evaluar las necesidades energéticas para conseguir un correcto funcionamiento del intercambiador y del banco de ensayos experimental. Una vez evaluadas estas necesidades, nos ha permitido investigar en las posibilidades existentes en el mercado que nos permitiesen cubrir las demandas energéticas del sistema. En base a estas posibilidades y los criterios de selección establecidos, nos ha permitido esclarecer las ventajas de seleccionar la resistencia eléctrica trifásica RIT-511 C del fabricante Asturgó S.L. frente a la caldera eléctrica instantánea del fabricante Junkers. Los estudios realizados en este trabajo nos han facilitado la toma de decisiones para asegurar los objetivos impuestos a la instalación y el ahorro de tiempo y costes en el rediseño realizado sobre la instalación de transmisión de calor.

5.1.2 Análisis de resultados

De las conclusiones de los ensayos podemos determinar que, como era de esperar, los caudales desempeñan un papel fundamental en la transferencia de calor por convección. Cuanto menor caudal de agua caliente, la temperatura de salida del calentador se incrementa. Esta afirmación resulta evidente si nos referimos a la Ecuación 2-20, ya que la potencia de la resistencia eléctrica, la temperatura de agua de entrada y el calor específico se mantienen constantes, mientras que el flujo másico ha disminuido. Son inversamente proporcionales. Dicho de otro modo, es fundamental la capacidad calórica en ambos fluidos.

Como podemos observar también, los caudales son especialmente relevantes para el cálculo de nuestros valores característicos como el número de *Reynolds* y *Nusselt* ya que están directamente relacionados con el coeficiente global de transferencia de calor, cuyo valor es crucial para el cálculo de la transferencia de calor.

La importancia de los caudales queda patente también en las gráficas donde se muestra de manera ilustrativa la evolución de las temperaturas que siguen ambos fluidos.

5.2 Líneas futuras

El desarrollo de la práctica para los futuros alumnos de la Escuela Naval, permitirá que puedan comparar la diferencia entre el análisis teórico tratado en este trabajo y la experiencia real que podrán realizar en el laboratorio.

A partir de este momento el Centro Universitario de la Defensa y la Escuela Naval contarán con una instalación que ha sido recuperada y rediseñada para impartir clases en el laboratorio.

Para finalizar las líneas futuras, resaltar que se ha elaborado un borrador del posible guion que hemos elaborado para la realización de una posible práctica dentro de la asignatura Termodinámica y transmisión de calor. Este guion se encuentra encuadrado en el Anexo III del presente trabajo.

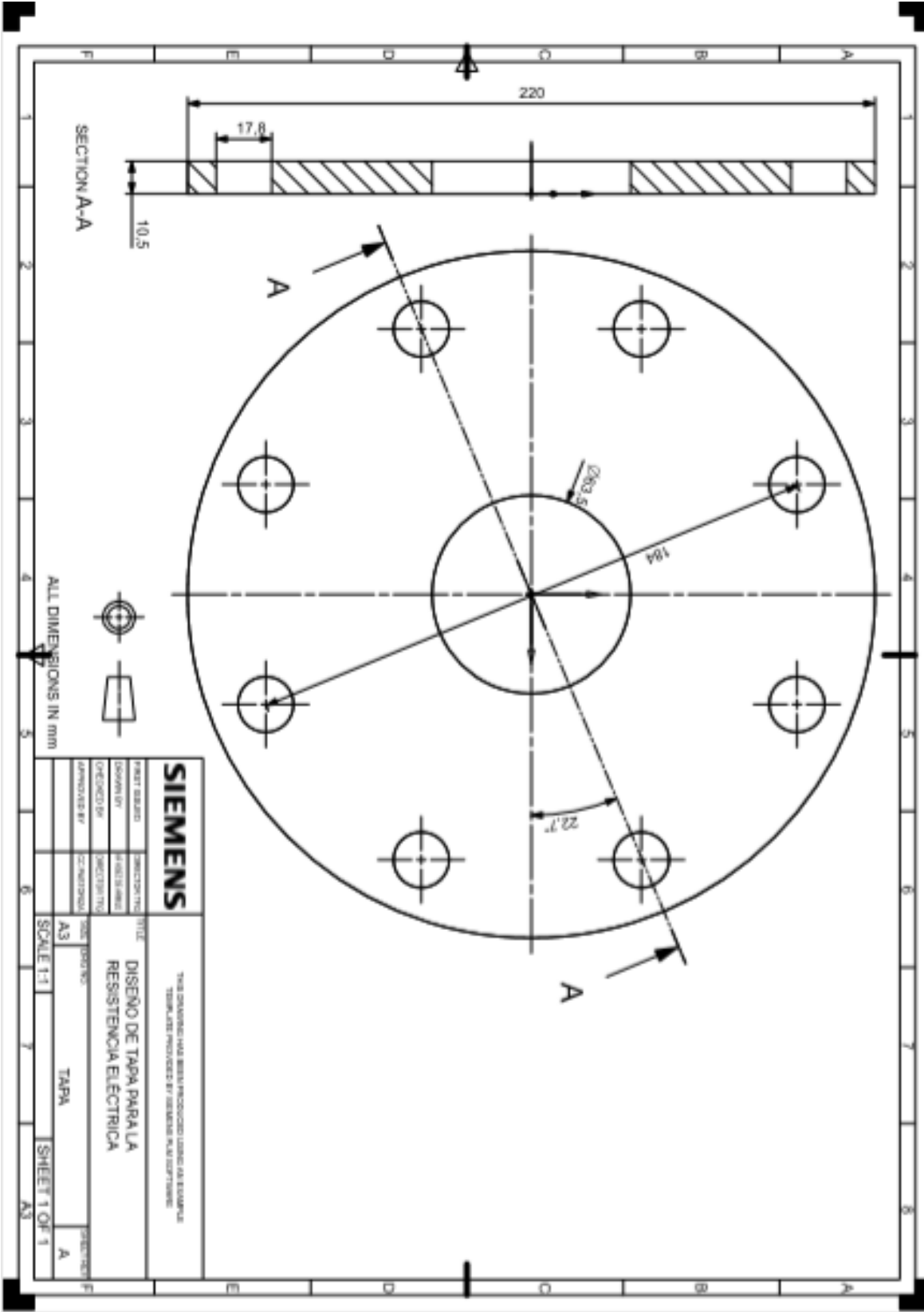
6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. P. Incropera, de *Fundamentos de transferencia de calor* , Capítulo 2.1.
- [2] F. P. Incropera, de *Fundamentos de transferencia de calor*, 1999.
- [3] Y. A. C. M.-H. Education, de *Heat and Mass Transfer*, 2011.
- [4] F. P. Incropera, «Introducción a la convección,» de *Fundamentos de transferencia de calor*.
- [5] C. P. Kothandaraman., de *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 2006.
- [6] *U.S. Department of Energy, Thermodynamics, Heat Transfer and Fluid Flow*.
- [7] F. P. Incropera, «Intercambiadores de Calor,» de *Fundamentos de transferencia de calor* .
- [8] F. P. Incropera, «Condiciones especiales de operación,» de *Fundamentos de transferencia de calor*.
- [9] Y. A. Cengel, «Introducción a la transferencia de calor,» de *Transferencia de calor y masa*.
- [10] F. P. Incropera, «Análisis del intercambiador de calor: método NUT,» de *Fundamentos de Transferencia de Calor*.
- [11] Y. A. Cengel, «Intercambiadores de Calor,» de *Transferencia de calor y masa*.

ANEXO I: PROPIEDADES DE AGUA SATURADA

Tempera- ture, T (K)	Pressure, p (bars) ^b	Specic Volume (m ³ /kg)		Heat of Vapor- ization, h_g (kJ/kg)	Specic Heat (kJ/kg · K)		Viscosity (N · s/m ²)		Thermal Conductivity (W/m · K)		Prandtl Number		Surface Tension, $\sigma \cdot 10^3$ (N/m)	Expansion Coef- ficient, $\beta \cdot 10^6$ (K ⁻¹)
		$v \cdot 10^3$	v_g		c_p	$c_{p,g}$	$\mu \cdot 10^6$	$\mu_g \cdot 10^6$	$k \cdot 10^3$	$k_g \cdot 10^3$	Pr	Pr_g		
273.15	0.00611	1.000	206.3	2502	4.217	1.854	1750	8.02	569	18.2	12.99	0.815	75.5	-68.05
275	0.00697	1.000	181.7	2497	4.211	1.855	1652	8.09	574	18.3	12.22	0.817	75.3	-32.74
280	0.00990	1.000	130.4	2485	4.198	1.858	1422	8.29	582	18.6	10.26	0.825	74.8	46.04
285	0.01387	1.000	99.4	2473	4.189	1.861	1225	8.49	590	18.9	8.81	0.833	74.3	114.1
290	0.01917	1.001	69.7	2461	4.184	1.864	1080	8.69	598	19.3	7.56	0.841	73.7	174.0
295	0.02617	1.002	51.94	2449	4.181	1.868	959	8.89	606	19.5	6.62	0.849	72.7	227.5
300	0.03531	1.003	39.13	2438	4.179	1.872	855	9.09	613	19.6	5.83	0.857	71.7	276.1
305	0.04712	1.005	29.74	2426	4.178	1.877	769	9.29	620	20.1	5.20	0.865	70.9	320.6
310	0.06221	1.007	22.93	2414	4.178	1.882	695	9.49	628	20.4	4.62	0.873	70.0	361.9
315	0.08132	1.009	17.82	2402	4.179	1.888	631	9.69	634	20.7	4.16	0.883	69.2	400.4
320	0.1053	1.011	13.98	2390	4.180	1.895	577	9.89	640	21.0	3.77	0.894	68.3	436.7
325	0.1351	1.013	11.06	2378	4.182	1.903	528	10.09	645	21.3	3.42	0.901	67.5	471.2
330	0.1719	1.016	8.82	2366	4.184	1.911	489	10.29	650	21.7	3.15	0.908	66.6	504.0
335	0.2167	1.018	7.09	2354	4.186	1.920	453	10.49	656	22.0	2.88	0.916	65.8	535.5
340	0.2713	1.021	5.74	2342	4.188	1.930	420	10.69	660	22.3	2.66	0.925	64.9	566.0
345	0.3372	1.024	4.683	2329	4.191	1.941	389	10.89	664	22.6	2.45	0.933	64.1	595.4
350	0.4163	1.027	3.846	2317	4.195	1.954	365	11.09	668	23.0	2.29	0.942	63.2	624.2
355	0.5100	1.030	3.180	2304	4.199	1.968	343	11.29	671	23.3	2.14	0.951	62.3	652.3
360	0.6209	1.034	2.645	2291	4.203	1.983	324	11.49	674	23.7	2.02	0.960	61.4	697.9
365	0.7514	1.038	2.212	2278	4.209	1.999	306	11.69	677	24.1	1.91	0.969	60.5	707.1
370	0.9040	1.041	1.861	2265	4.214	2.017	289	11.89	679	24.5	1.80	0.978	59.5	728.7
373.15	1.0133	1.044	1.679	2257	4.217	2.029	279	12.02	680	24.8	1.76	0.984	58.9	750.1
375	1.0815	1.045	1.574	2252	4.220	2.036	274	12.09	681	24.9	1.70	0.987	58.6	761
380	1.2869	1.049	1.337	2239	4.226	2.057	260	12.29	683	25.4	1.61	0.999	57.6	788
385	1.5233	1.053	1.142	2225	4.232	2.080	248	12.49	685	25.8	1.53	1.004	56.6	814
390	1.794	1.058	0.980	2212	4.239	2.104	237	12.69	686	26.3	1.47	1.013	55.6	841
400	2.455	1.067	0.731	2183	4.256	2.158	217	13.05	688	27.2	1.34	1.033	53.6	896
410	3.302	1.077	0.553	2153	4.278	2.221	200	13.42	688	28.2	1.24	1.054	51.5	952
420	4.370	1.088	0.425	2123	4.302	2.291	185	13.79	688	29.8	1.16	1.075	49.4	1010
430	5.699	1.099	0.331	2091	4.331	2.369	173	14.14	685	30.4	1.09	1.10	47.2	

ANEXO II: IMAGEN AMPLIADA DEL PLANO



ANEXO III: EXPERIENCIA PRÁCTICA: INTERCAMBIADOR DE DOBLE TUBO



Vista general de la instalación

Introducción

En esta práctica se pretende estudiar el comportamiento de la instalación con intercambiador de doble tubo Isi-Implanti del año 1981 mediante la variación de los caudales de entrada de agua caliente en el intercambiador. La instalación está formada por diversos componentes entre los que destacamos:

- Calentador con resistencia eléctrica instantánea.
- Intercambiador de calor de doble tubo.
- Electrobomba centrífuga Otral.
- Vaso de expansión.
- Válvula reguladora de caudal.

En esta práctica utilizaremos conceptos y definiciones vistas con anterioridad en clase tales como el número de Reynolds, el número de Nusselt o el coeficiente global de transferencia de calor en otros.

Para realizar esta experiencia seleccionaremos, mediante la válvula reguladora de caudal a la salida del calentador un caudal de 600 y 1000 litros por hora con flujo paralelo y contraflujo para realizar un total de cuatro ensayos. Para estos caudales el flujo será siempre turbulento. En la parte final de la práctica se encuentra un formulario para poder realizar los ensayos teóricos.

Ensayos teóricos

Suposiciones iniciales:

- El intercambiador se encuentra aislado de sus alrededores, solo hay intercambio de calor entre el fluido caliente y frío.
- La conducción axial a lo largo de los tubos es insignificante.
- Cambios de energía cinética y potencial despreciables.
- Calores específicos del fluido constantes.
- El coeficiente global de transferencia de calor constante
- Diámetro interior = 0,0025 m
- Diámetro exterior = 0,0036 m
- Densidad del agua constante = 1000 Kg/m³

Para determinar el balance de energía del intercambiador, utilizaremos el método de eficiencia-NUT, ya que partiremos de las temperaturas de entrada al intercambiador de calor. A continuación se muestran los pasos que habrá que seguir:

1. Medir la temperatura de entrada en el intercambiador de doble tubo tanto de agua como de agua caliente. En los primeros ciclos, la temperatura del circuito caliente variará de forma considerable debido a que no ha llegado a su punto de trabajo. Esperar hasta que adquiera un valor estable.
2. Calcular el coeficiente global de transferencia de calor.
3. Calcular la transferencia de calor máxima.
4. Calcular la eficiencia según sea flujo paralelo o contraflujo.
5. Calcular la transferencia de calor real y rellenar la tabla

FLUJO PARALELO 600 l/h

U (W/m ² K)	Cr	Qmax(W)	NUT	ε	Q(W)

CIRCUITO	CAUDAL (l/h)	T entrada (°C)	ṁ (Kg/s)	C (J/s*K)	T salida
FRÍO					
CALIENTE					

CONTRAFLUJO 600 l/h

U (W/m ² K)	Cr	Qmax(W)	NUT	ϵ	Q(W)

CIRCUITO	CAUDAL (l/h)	T entrada (°C)	$\dot{m}$ (Kg/s)	C (J/s*K)	T salida
FRÍO					
CALIENTE					

FLUJO PARALELO 1000 l/h

U (W/m ² K)	Cr	Qmax(W)	NUT	ϵ	Q(W)

CIRCUITO	CAUDAL (l/h)	T entrada (°C)	$\dot{m}$ (Kg/s)	C (J/s*K)	T salida
FRÍO					
CALIENTE					

CONTRAFLUJO 1000 l/h

U (W/m ² K)	Cr	Qmax(W)	NUT	ϵ	Q(W)

CIRCUITO	CAUDAL (l/h)	T entrada (°C)	$\dot{m}$ (Kg/s)	C (J/s*K)	T salida
FRÍO					
CALIENTE					

Pasos para realizar la práctica:

1. Colocar las llaves de entrada del circuito frío para trabajar en equicorriente, debe quedar visible la letra “E”.
2. Poner en marcha la bomba centrífuga y el calentador.
3. Debemos regular la válvula a la salida del calentador hasta conseguir en el caudalímetro el valor deseado.
4. A continuación debemos medir la temperatura de salida del calentador hasta que este tome un valor estable. En los primeros ciclos, esta temperatura variará de forma considerable debido a que no ha llegado a su punto de trabajo.
5. Medir la temperatura de entrada y salida del intercambiador de doble tubo.
6. Realizar el balance de energías y rellenar la tabla.
7. Dibujar gráfica correspondiente
8. Realizar el mismo proceso para contraflujo colocando las llaves de entrada en la posición de contraflujo. Letra visible “C”.

FLUJO PARALELO 600 l/h

CIRCUITO	CAUDAL(L/h)	T entrada(°C)	T salida (°C)	Q (W)
FRÍO				
CALIENTE				

FLUJO CONTRACORRIENTE 600l/h

CIRCUITO	CAUDAL(L/h)	T entrada(°C)	T salida (°C)	Q (W)
FRÍO				
CALIENTE				

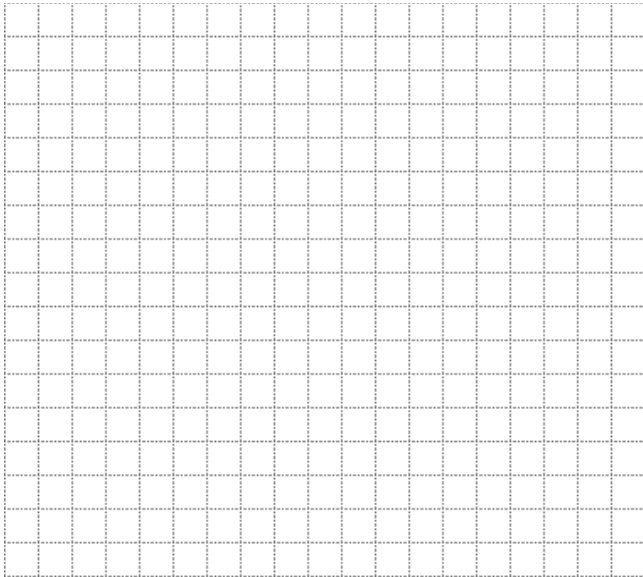
FLUJO PARALELO 1000 l/h

CIRCUITO	CAUDAL(L/h)	T entrada(°C)	T salida (°C)	Q (W)
FRÍO				
CALIENTE				

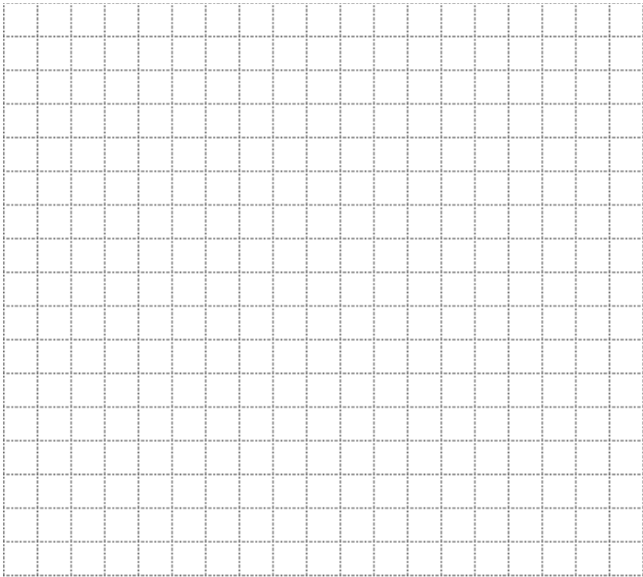
FLUJO CONTRACORRIENTE 1000 l/h

CIRCUITO	CAUDAL(L/h)	T entrada(°C)	T salida (°C)	Q (W)
FRÍO				
CALIENTE				

CAUDAL 600 L/h

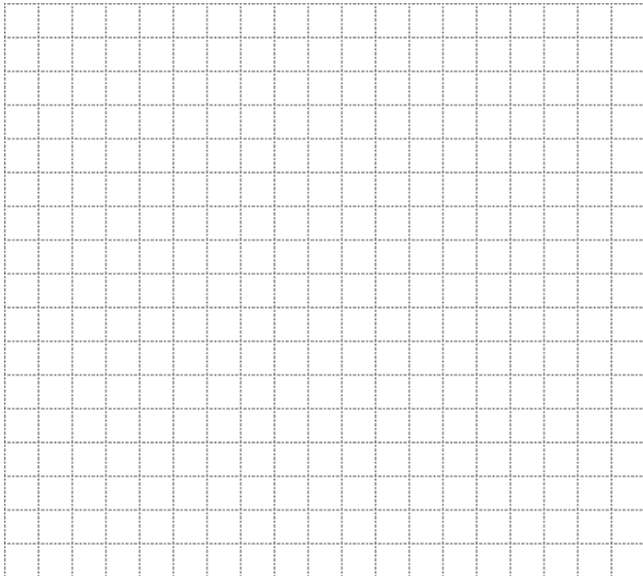


FLUJO PARALELO

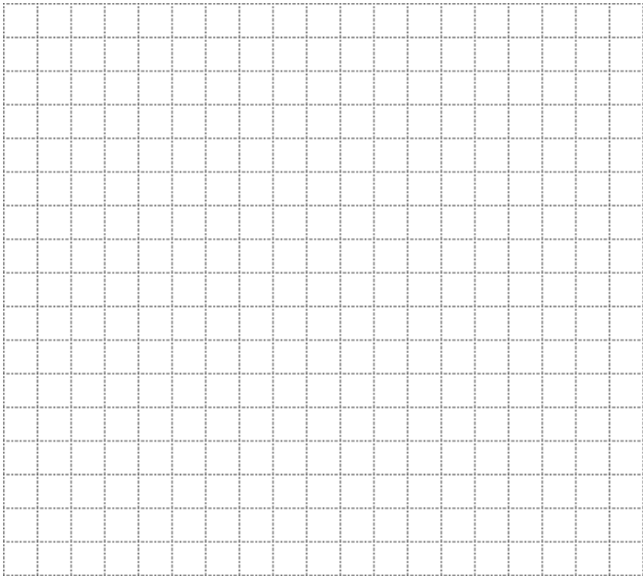


CONTRAFLUJO

CAUDAL 1000 L/h



FLUJO PARALELO



CONTRAFLUJO

Preguntas:

1. ¿Cómo afecta el caudal a la transferencia de calor? ¿Y a la temperatura de entrada del intercambiador?

2. ¿A qué cree que se puede deber las diferencias entre el ensayo teórico y la experiencia práctica?

3. ¿Tiene sentido que en flujo paralelo la temperatura de salida del circuito frío del intercambiador sea mayor a la del circuito caliente? ¿Por qué?

Fórmulas

El número de Reynolds:

$$Re_x = \frac{\rho u_{\infty} \cdot x}{\mu}$$

- μ : viscosidad (Kg/s · m)
- u_{∞} : velocidad media (m/s)
- ρ : densidad (Kg/m³)
- x : distancia (m)

Expresión general del número de Nusselt, de donde podemos sacar los coeficientes de convección para cada fluido y para flujos turbulentos respectivamente como:

$$Nu = hL/k_f$$

$$Nu = 0.023 Re^{4/5} \cdot Pr^{0.4}$$

$$Nu = 0.023 Re^{4/5} \cdot Pr^{0.3}$$

- h : coeficiente de convección (W/m² K)
- L : longitud (m)
- k_f : conductividad térmica (W/m · K)
- Pr : número de Prandtl

Coeficiente global de transferencia de calor y el numero NUT respectivamente como:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}}$$

$$NUT = \frac{UA}{C_{min}}$$

La capacidad calórica y la capacidad relativa:

$$C = \dot{m} \cdot C_p$$

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$

La tasa de calor máxima y tasa de calor real respectivamente:

$$q_{max} = C_{min} \cdot (\Delta T_{max})$$

$$q = C \cdot (\Delta T)$$

La eficiencia podemos definirla de forma general, para flujo paralelo y contraflujo respectivamente como:

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}}$$

$$\varepsilon = \frac{1 - 10^{[-NUT(1+Cr)]}}{1+Cr}$$

$$\varepsilon = \frac{1 - 10^{[-NUT(1-Cr)]}}{1 - Cr \cdot 10^{[-NUT(1-Cr)]}}$$