

UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO / EUSKAL HERRIKO UNIBERTSITATEA

**ESCUELA DE INGENIERÍA DE BILBAO - SECCIÓN DE NÁUTICA
Y MÁQUINAS NAVALES**

ESTUDIO TÉCNICO PARA DETERMINAR LA CONVENIENCIA DE SUSTITUIR UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE PLACAS POR UNO EN ESPIRAL

**TRABAJO DE FIN DE GRADO
GRADO EN MARINA**

ENERO DE 2017, PORTUGALETE

AUTOR: JOSEBA ARANDA MARTÍN

DIRECTOR: SENDOA ALDEKOA

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS.

Quiero dedicar el presente trabajo; a mi padre, madre y hermana, por darme la oportunidad de cursar todos los estudios que he realizado para poder llegar a este punto, y por su apoyo incondicional en cada una de las etapas que han formado mi educación.

Me gustaría que estas líneas sirvieran para agradecer; a mis compañeros de la Escuela Técnica Superior de Náutica y Máquinas Navales, los señores; Iker Méndez, Joshue Folguéira, Xabier Encinas, e Ignacio Abaitua, por su compañerismo, su amistad y su apoyo en los estudios cursados en esta institución. En especial, agradecer a mi compañero y amigo el Sr. Jon Azkue Cuesta, no solo por su apoyo en la formación universitaria, sino por el apoyo en todos los estudios realizados anteriormente, y su amistad incondicional a lo largo de toda la vida.

Agradecer también a mis compañeros de la compañía Trasmediterránea, donde he cumplido con el período de prácticas, por darme la oportunidad de conocerlos y trabajar codo con codo con ellos.

Igualmente quisiera incluir en este apartado a mi director del Trabajo Fin de Grado Sendoa Aldekoa, por orientarme en la realización de dicho Trabajo.

Para finalizar, deseo expresar mi más sincero agradecimiento, al Dr. Isaac Garrucho, director técnico de la compañía Sedical, por su implicación en la aportación de datos e ideas para el desarrollo de este trabajo.

ÍNDICE.

	<u>Pág.</u>
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ESTADO DEL ARTE	3
CAPÍTULO 3: OBJETIVOS	9
CAPÍTULO 4: FUNDAMENTO TEÓRICO	11
4.1. LA TRANSFERENCIA DE CALOR.....	11
4.1.1 LA TERMODINÁMICA Y LA TRANSFERENCIA DE CALOR	11
4.1.2 FUNDAMENTOS HISTÓRICOS	14
4.1.3 ÁREAS DE APLICACIÓN.....	21
4.2. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	24
4.2.1 CONDUCCIÓN	24
4.2.1.1 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.....	27
4.2.2 CONVECCIÓN	35
4.2.3 RADIACIÓN.....	39
4.3. INTERCAMBIADORES DE CALOR	45
4.3.1 CLASIFICACIÓN GENÉRICA	46
4.3.1.1. REGENERATIVOS	46
4.3.1.2. TIPO ABIERTO	47
4.3.1.3. CERRADOS O RECUPERADORES	48
4.3.2. TIPOS DE INTERCAMBIADORES CERRADOS	49
4.3.2.1. INTERCAMBIADORES DE DOBLE TUBO.....	49
4.3.2.2. INTERCAMBIADORES COMPACTOS	50
4.3.2.3. INTERCAMBIADORES DE CASCO Y TUBOS/ MULTITUBULAR	52
4.3.2.4. INTERCAMBIADORES DE PLACAS Y ARMAZÓN.....	53
4.3.2.5. INTERCAMBIADORES DE ESPIRAL.....	73
CAPÍTULO 5: METODOLOGÍA.....	85
5.1. INTERCAMBIADORES DE CALOR A BORDO DE UN BUQUE	85
5.2. SUSTITUCIÓN DE UN INTERCAMBIADOR PARA UN SISTEMA DADO	92
5.2.1. DESCRIPCIÓN DE ENFRIAMIENTO DE ACEITE	94
CAPÍTULO 6: DESARROLLO.....	97
6.1. DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE PLACAS	97
6.2. DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR EN ESPIRAL	102
7. CONCLUSIONES	109
8. ÍNDICE DE FIGURAS	117
9. BIBLIOGRAFÍA	129

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.

En el sector marino, así como en la industria y otras aplicaciones, el efecto de la transferencia de calor, al igual que el equipo que la lleva a cabo son esenciales para el desarrollo de los diferentes procesos. Estos equipos son utilizados como enfriadores, calentadores, regeneradores, calderas y también para efectuar los cambios de estado de los fluidos, como en el caso de los condensadores y evaporadores. Son empleados en diversos sectores para el enfriamiento de aire, de aceite y para la refrigeración de motores, entre otros. En la industria de tratamiento de superficies, por ejemplo, se emplean para el calentamiento de la solución desengrasante, y también se encuentran como enfriadores del agua de aclarado y calentadores. El uso de estos equipos es notable en centrales energéticas, en la industria alimentaria para la fabricación de lácteos y bebidas, y en la industria química para el control de las temperaturas en los procesos químicos. Otras aplicaciones que igualmente disponen de intercambiadores son; la industria farmacéutica, la petrolífera, la automovilística, la cosmética, en la biotecnologías y en las energías renovables. Por lo que, se mire dónde se mire, es fácil encontrarse con estos dispositivos.

Existe una amplia gama de tipos y modelos de equipos de transferencia de calor. La complejidad de los intercambiadores reside en la investigación de nuevas formas de intercambio de calor así como de nuevos equipos, y en la elección de los diferentes tipos de intercambiador para cada proceso. En estos ámbitos se busca la máxima eficiencia del equipo, además de una mayor resistencia de los materiales a la corrosión y al paso del tiempo, y todo ello al menor costo posible.

Es evidente que todo trabajador que se encuentre rodeado de estos equipos ya sea un operador, como un distribuidor, fabricante o maquinista naval, debe tener un amplio conocimiento sobre la transferencia de calor y de los equipos que los realizan, con el fin de desarrollar eficientemente sus competencias laborales.

Este trabajo contiene unas nociones básicas sobre la transferencia de calor, así como de su historia, con el objetivo de introducir al lector en la materia. A continuación se caracterizan los distintos tipos de intercambiadores de calor que pueden encontrarse en cualquier instalación actual, y se plantean las diferentes aplicaciones de los mismos, mostrando también las ventajas de cada uno. Después se expondrán unos ejemplos de las funciones y de la relevancia de estos equipos basándose en la disposición de la máquina del buque “Sorolla” de la compañía Tramediterránea. Le seguirá un ejercicio en el que se muestra como realizar la elección de un tipo de intercambiador para un sistema dado, explicando previamente las características del sistema y su función. El ejercicio se realizará gracias a unas hojas de cálculo de rendimientos y diseño, que mostrarán finalmente, cuál de los dos tipos de intercambiadores que se comparan, es el más adecuado para ese sistema. El trabajo finalizará con unas conclusiones propias basadas en los conceptos teóricos, en la relevancia de los intercambiadores a bordo y en los datos obtenidos en el ejercicio.

CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRAFICA Y ESTADO DEL ARTE.

Los intercambiadores de calor son equipos que han obtenido gran relevancia en la historia de la tecnología y se ha experimentado con ellos desde los inicios de las investigaciones del comportamiento del calor, hasta las tecnologías de hoy en día. En los procesos de la transferencia térmica entre fluidos se busca la forma de crear equipos que adquieran un gran rendimiento sin que ello suponga un gran gasto energético. Para ello se buscan nuevas formas y materiales, con el fin de evolucionar en la materia y conseguir los objetivos propuestos en todos los ámbitos.

Luis Correas y Patrick Perrin publicaron una patente de un invento con nombre EP 1493903A1 [1], en la fecha 16 de octubre de 2003, con el motivo de mejorar el diseño de un intercambiador de placas y atribuir al equipo de ventajas adicionales en el proceso de enfriamiento del aceite de motor. El documento presenta la instalación de un filtro de papel, también llamado eco-filtro, colocado parcialmente dentro del intercambiador. El filtro se alojará en unos orificios que disponen las placas y quedará instalado perpendicular ellas. Con este diseño se pretende que el fluido a refrigerar pierda el exceso de temperatura al recorrer las placas del intercambiador, cediéndoselo al fluido refrigerante que recorre las placas contiguas. Además del intercambio térmico, el aceite antes de efectuar su salida del equipo, penetrará en el filtro librándose así, de partículas solidas tales como la carbonilla, y entrará limpio de nuevo al motor. Por otra parte, el diseño presenta una solución al problema del espacio y peso de la instalación, dado que el filtrado se realiza en el propio proceso de enfriamiento y las placas del equipo realizan el papel de cubierta del filtro.

El 30 de abril de 2014 se publicó una patente en la concesión europea bajo el número de EP 2365270 [2] del inventor Ralf Blomgren y adquirida por la empresa Alfa Laval Corporate AB, en la que plantea un nuevo diseño de un intercambiador de calor en espiral. La invención se refiere a un equipo que permite realizar el intercambio térmico entre dos fluidos que circulan dentro de canales enrollados entre sí, de manera que cada fluido disponga de su propio canal y transfiera la energía térmica por la chapa que separa ambos fluidos. La parte innovadora que plantea esta invención es el diseñar la chapa que define los canales y hacen contacto con los fluidos de forma corrugada con el fin de aumentar la potencia de intercambio térmico.

En numerosas ocasiones el ensuciamiento presenta un problema que afecta al buen funcionamiento del intercambiador de calor, por ello es importante que el intercambiador presente un diseño de fácil acceso para facilitar las labores de limpieza. Como solución a este problema, Boualem Oudjedi y Pascal Maure presentan una patente con fecha de concesión europea del 26 de Mayo de 2010 y con número de solicitud E07122869 [3]. Esta invención persigue un intercambiador de calor en espiral cuyo diseño consta de una carcasa dispuesta de forma flexible al bloque de espiral y no soldada como se establece normalmente. La carcasa encierra y sella el bloque de espiral mediante bridas, permitiendo que al aflojarlas pueda extraerse el bloque de espiral para su limpieza o para su sustitución. Otra de las ventajas que ofrece este invento es posibilitar un aumento de la capacidad de intercambio o aumentar longitud térmica fácilmente.

La selección de materiales o compuestos para la fabricación de los intercambiadores de calor es un punto muy importante, debido a que el equipo se expone en numerosas ocasiones a altas temperatura y presiones o se hace uso de ciertos fluidos que provocan corrosión y desgaste en su interior. En instalaciones térmicas de craqueo por ejemplo, las sustancias salen de los hornos industriales a una alta temperatura y presión, debiendo realizarse un

enfriamiento de la misma en un periodo de tiempo corto. Esto provoca desgaste y corrosión por causa de los cambios térmicos y partículas de choque por la alta velocidad del gas. Para hacer frente a este problema se realizan revestimientos cerámicos refractarios que se fijan al interior de los tubos del intercambiador tubular por medio de soldadura. En estos casos normalmente el intercambiador tubular se fabrica con materiales metálicos de alta resistencia como el acero. Dado que el material del intercambiador y del revestimiento no tienen las mismas propiedades, se originan problemas de dilataciones y otras consecuencias derivadas de los cambios de temperatura. Además, la unión de los dos materiales resulta ser un proceso costoso y complejo. El 28 de Julio de 2011, el Dr. Christoph Gillessen, Helmut Schielke, Marco Heisterkamp, Werner Oelmann y Oliver Schwarz presentaron una patente con número de solicitud europea 06762346 .2 [4], en la que proponen un revestimiento fabricado con el mismo material que el intercambiador tubular y extraíble, para su sustitución cuando ello lo requiera, como solución a los inconvenientes de los revestimientos convencionales.

Los intercambiadores de calor se utilizan en diferentes ámbitos. No solo en procesos químicos o para enfriamiento de aceites, sino también, en procesos alimenticios para producción de productos lácteos, bebidas destiladas o fermentadas. Ángel José Enrique Soto Porrua y Jose Morales Cervantes proponen el 3 de octubre de 2002 con número de publicación EP1591516A1 [5], un intercambiador para enfriamiento en los procesos de estos productos. La invención presenta un intercambiador de tubos instalados verticalmente dentro de un depósito por donde circulará un refrigerante por el interior de los tubos que enfriará el fluido depositado en el tanque.

En plantas térmicas u otros procesos que se realizan en otros sectores, el fluido utilizado como refrigerante se compone por una mezcla de varias sustancias con el fin de generar un único fluido con las mejores propiedades termodinámicas. La patente P201400309 [6] presentada por María Teresa de

Miguel Gamo, Gustavo García Martín, María Isabel Lasanta Carrasco y Francisco Javier Perez Trujillo, para la Universidad Computense de Madrid el día 21 de agosto de 2014, manifiesta la invención de un fluido caloportador compuesto a partir de varios elementos inorgánicos salinos con buenas propiedades térmicas y bajo nivel de corrosión, con el fin aumentar el rendimiento de transferencia térmica en los procesos.

Hoy en día gran parte de los avances tecnológicos tratan sobre las energías renovables. El fin de la contaminación y la búsqueda de alternativa para las fuentes de energía fósiles contaminantes es el objetivo principal. Felipe Sánchez Banda redacta una noticia el 17 de agosto de 2016 mediante la Agencia Informativa Conacyt [7], en la que informa sobre la colaboración entre el gobierno municipal de la ciudad de Saltillo y la empresa Ideal Saneamiento, para construir una instalación de generación de energía eléctrica a partir del biogás obtenido del procesamiento de las aguas residuales. Con ello se pretende abastecer a la planta de tratamiento de aguas, de energía generada en la misma hasta un 70-80%, logrando así, un ahorro energético notable. El biogás se obtiene mediante un proceso de digestión anaerobia [8] de los lodos que se origina con el tiempo al depositar la sustancia en un recipiente a una temperatura y presión controlada. Uno de los elementos que se obtiene en el proceso de digestión es el metano que es la fuente con la que se genera energía eléctrica. El mantener los lodos a una temperatura controlada es un punto importante del proceso, dado que a mayor temperatura es inversamente proporcional al tiempo de digestión, para ello se requiere un intercambiador de calor que controle la temperatura del recipiente.

Otra de las nuevas técnicas relacionadas con el ámbito de las energías renovables en las que el uso del intercambiador de calor es esencial para el desarrollo del proceso, es la energía geotérmica [9]. La Agencia Iberoamericana Para la Difusión de la Ciencia y la Tecnología recoge y publica el 05 de Mayo de 2010 en Valparaíso (Chile) la noticia [10] de nuevas investigaciones que pretenden crear sondas geotérmicas más eficientes que

las actuales y promover la inserción de esta tecnología en países con gran potencia geotérmica. En este caso el intercambiador de calor se presenta con el nombre de “sonda geotérmica” que se aloja en el interior de la tierra mediante una perforación y absorbe el calor terrestre para conducirlo a un espacio mediante un fluido caloportador que recorre la sonda.

Una planta de energía termosolar [11] de cilindros parabólicos fue puesta en marcha en 2010 por Acciona energía y Mitsubishi Corporate en Majadas de Tiétar (Cáceres) [12]. Un espacio de 135 hectáreas lleno de espejos solares reflejan la radiación térmica solar a una serie de tubos instalados en los espejos, que mediante un flujo caloportador recogen la energía térmica para generar vapor, y así, mover una turbina solidaria a un generador eléctrico capaz de suministrar energía eléctrica a 30.000 hogares. Una vez más un ejemplo de una técnica innovadora para la generación de energía limpia en la que se hace uso del intercambiador de calor y de los conceptos de la transferencia térmica.

CAPÍTULO 3: OBJETIVOS.

- ✓ Adquirir los conocimientos básicos de la transferencia de calor donde se incluyen; conceptos, antecedentes, aplicaciones y los diferentes métodos de transferencia térmica.
- ✓ Conocer los intercambiadores de calor; su clasificación, los tipos de equipos que pueden encontrarse actualmente, las características que los definen, sus aplicaciones principales y mantenimientos.
- ✓ Exponer la relevancia que poseen los equipos de intercambio de calor a bordo, tomando como ejemplo la disposición de la sala de máquinas del buque “Sorolla”, y explicando su aportación y el proceso en el que intervienen.
- ✓ Efectuar un ejercicio demostrando la importancia que tiene una correcta elección de un tipo de intercambiador para el sistema de refrigeración del aceite lubricante de los motores principales del buque “Sorolla”, usando hojas de cálculo con los parámetros que satisfacen las necesidades requeridas del sistema.
- ✓ Estudiar la posibilidad de sustitución de intercambiadores de placas por intercambiadores en espiral, en el buque “Sorolla”.
- ✓ Finalizar el estudio con unas conclusiones sobre el tema desarrollado, expresando las aportaciones didácticas que ofrecen los datos redactados y realizando una reflexión sobre la elección del tipo de intercambiador en el ejercicio.

CAPÍTULO 4: FUNDAMENTO TEÓRICO.

4.1. LA TRANSFERENCIA DE CALOR.

4.1.1. La termodinámica y la transferencia de calor.

La termodinámica es el estudio global de la energía y su comportamiento [13]. Existen diferentes tipos de energía, como pueden ser: la energía térmica, la eléctrica, la mecánica, la electromagnética, la nuclear.... Este trabajo se centrará únicamente en la energía térmica, concretamente en el estudio de la transferencia de calor.

El calor es la energía en tránsito que contiene un material debido a una propiedad de éste, llamado temperatura. Esta energía, se transfiere de un medio a otro como resultado de una diferencia en la temperatura. Debido a que las fuentes de energía se encuentran repartidas por todas partes, el calor se genera universalmente y su transferencia es un fenómeno corriente.

Es muy común confundir la termodinámica con la transferencia de calor, ya que ambos se rigen por las mismas leyes y contienen conceptos similares, es más, puede decirse que una depende de la otra, pero difieren en la forma de estudio. Ambas tratan de la conservación del equilibrio de energía térmica entre dos elementos en los que existe una diferencia de la misma. Esta energía se cederá del elemento que mayor energía contenga al de menor.

La termodinámica se centra únicamente en el estudio de la cantidad de transferencia de calor, sin importarle el tiempo que transcurrirá en el proceso de transferencia; es decir, un análisis termodinámico muestra cuánto calor debe transferirse para que se realice un cambio de estado específico para cumplir el principio de conservación de la energía. La transferencia de calor, sin embargo, estudia la velocidad (transferencia por unidad de tiempo) en la que se

produce un cambio de energía térmica [13], es decir, el tiempo que transcurre cuando un elemento cede su calor a otro y se completa la transferencia, quedando los elementos en equilibrio con la misma temperatura.

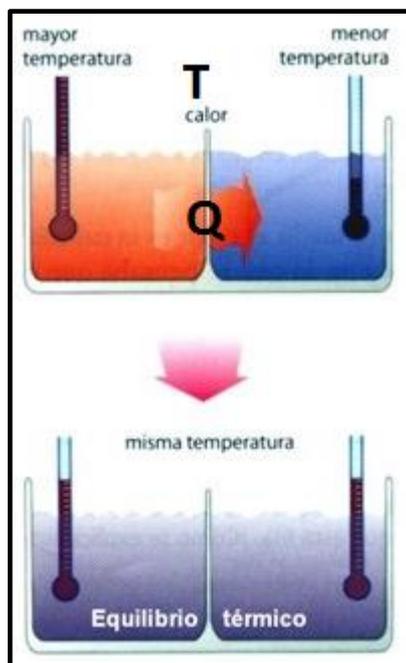


Figura 1. Proceso de transferencia de calor, hasta un estado de equilibrio.

Para mayor comprensión de la diferencia entre estos dos tipos de estudio, puede ponerse el ejemplo de un termo (figura 2). Teniendo un café vertido en un termo a una temperatura de 80°C, baja a 60°C. Un estudio termodinámico determinará qué cantidad de energía, en forma de calor, ha cedido el café al ambiente y su comportamiento, ya que éste se encuentra a una temperatura significativamente inferior. El dato obtenido no resulta de interés para un fabricante de termos ni para su comprador, sin embargo, si lo es, el que se obtiene en un estudio de transferencia de calor, que como ya se ha mencionado anteriormente, es el tiempo. Con este dato, podrá comprobarse si el termo es eficiente o no, ya que cuanto más tiempo transcurra en perder los 20°C, mayor será su eficiencia. Para controlar el tiempo y lograr que éste sea el mayor posible, el diseñador deberá experimentar con diferentes materiales y

formas, para crear un buen aislante y perder el menor calor posible por unidad de tiempo al exterior.

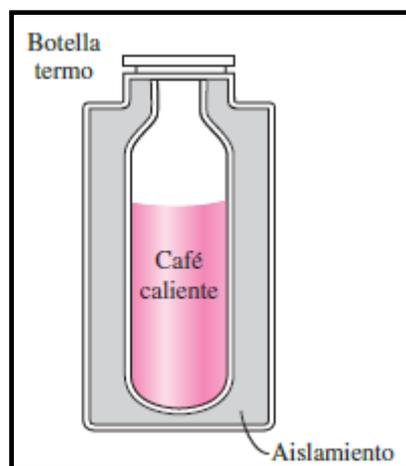


Figura 2. Representación de un termo.

La termodinámica se basa en los estados de equilibrio y en los cambios de equilibrio de un estado a otro. Por otra parte, la transferencia de calor, se ocupa de los sistemas en los que existe una carencia de equilibrio térmico y por lo tanto hay un fenómeno de no equilibrio [13]. Por lo que, el estudio de la transferencia de calor, no puede apoyarse sólo en los principios de la termodinámica, sin embargo, las leyes de la termodinámica ponen la estructura inicial.

El requisito básico para la transferencia de calor es la existencia de una diferencia de temperatura, no puede haber una transferencia neta de calor entre dos medios que están a la misma temperatura, esta diferencia de temperatura es la fuerza impulsora para la transferencia de calor. La velocidad de la transferencia de calor en una dirección concreta dependerá de la diferencia de temperatura por unidad de longitud de los materiales; a mayor gradiente de temperatura, mayor será la velocidad de la transferencia de calor.

4.1.2 Fundamentos históricos.

Los efectos del calor no son un fenómeno nuevo, sino que desde siempre el ser humano los ha percibido, y resulta ser uno de los temas más estudiados. No resulta difícil suponer que el calor es un elemento natural que se cede y se adquiere, como de una sustancia imaginaria se tratase, ya que este elemento se experimenta cada día por las personas; el cuerpo humano adquiere y cede calor continuamente.

En la historia se han realizado diversos experimentos e hipótesis, algunos de ellos relevantes para la comprensión del concepto calor y del fenómeno de la transferencia de calor. Las primeras investigaciones se realizaron en el siglo XVIII por los químicos de la época. Con el fin de comprender mejor el fenómeno de la combustión, comenzaron a estudiar el calor y de cómo se comportaba con el aire y el combustible, que como se sabe, es el origen de una combustión [14].

En el año 1718 el químico alemán Georg Stahl, como resultado de sus investigaciones, planteó la teoría del flogisto [14]. Su propuesta fue, que todo cuerpo combustible contenía una sustancia llamada flogisto, y que ésta se perdía cuando los cuerpos ardían. Propuso que la ceniza y los restos de los elementos una vez calcinados carecían de este elemento y que por ello no podrían volver a arder. Esta teoría fue rechazada en el año 1777 por el químico Antoine Lavoisier [15], ya que después de haber realizado experimentos con distintos metales, dio con alguno, que una vez calcinados los residuos tenían mayor peso que el metal al inicio. Con estos resultados el químico comenzó a crear su propia teoría del calor llamada teoría del calórico.

Según Lavoisier (figura 3), el calórico resulta ser un fluido elástico, real o hipotético cuya acumulación produce la sensación de calor [14]. Esta teoría expone que el calórico no puede ser creado ni destruido, que éste, carece de olor y color, que se transfiere de un cuerpo a otro a través de los poros de los elementos y el contacto. Ésta fue la conclusión que extrajo del ejemplo: de que al meter una cuchara metálica en un vaso de agua caliente, y al extraerla a continuación, se percibe una sensación de calor. De manera que si se agrega calórico a una materia, ésta aumenta de temperatura, y cuando se extrae disminuye, por lo que se interpreta, que un cuerpo frío simplemente representa una carencia de este fluido.

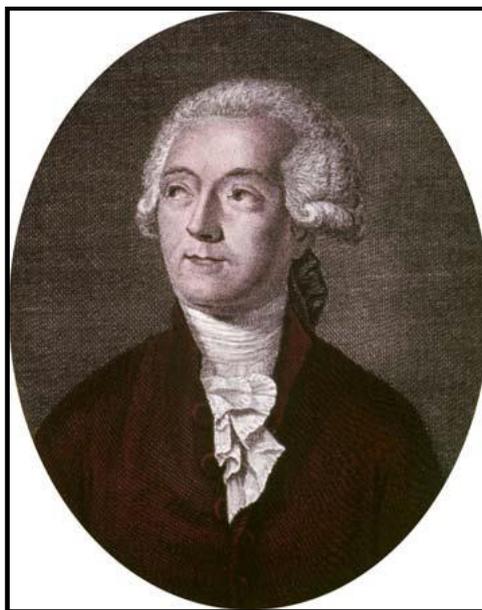


Figura 3. Antoine Lavoisier.

Cuando un cuerpo no podía contener más calórico, de manera similar, a cuando no se puede disolver más sal en un vaso de agua, se decía que el cuerpo estaba saturado con calórico. Esta interpretación dio nombre a los términos líquido saturado o vapor saturado actualmente muy conocidos y utilizados.

La idea de que el calor es energía, hoy en día está más que experimentada, fue expuesta por el científico norteamericano Benjamin Thompson [16] en 1798, que trabajaba en una fábrica de tubos de cañón. Benjamin al perforar las piezas de metal en la fabricación de los cañones, observó que éstas se calentaban, y esto le llevó a pensar que sucedía como consecuencia de una fricción que se producía durante el barrenado. Por lo tanto, la energía empleada en la realización de dicho trabajo era transmitida a las piezas produciendo el aumento de temperatura.

Thompson fue uno de los científicos que puso en duda la hipótesis del calórico, respaldado por su experiencia, afirmó que era imposible que el calor no pudiera ser creado o destruido, ya que la fuente de calor por fricción era inagotable, y que si algo era capaz de crearse ilimitadamente, difícilmente podía ser una sustancia. Otra de las discrepancias que tenía el científico norteamericano sobre la teoría, fue que el calórico se consideraba como una sustancia de masa nula, sin embargo, Benjamín alegaba que esa teoría carecía de lógica, ya que el calórico se establecía como sustancia, y toda sustancia se considera materia, y la materia por definición posee cierta masa, y si el calórico tenía carencia de masa, no podía ser materia.

El científico Benjamin Thompson no fue el único en desacreditar la teoría del calórico [14]. A raíz de las conclusiones de este científico, de que el calor era energía y que se generaba con fricción, comenzaron a desarrollarse otras teorías y experimentos relacionando; el calor, la energía, y el trabajo mecánico. El investigador más popular y cuyo experimento tuvo mayor éxito, sin duda, fue el inglés James P. Joule [17].

Su experimento (figuras 4 y 5) trataba de dejar caer desde cierta altura, un cuerpo de peso conocido, atado a una cuerda, de manera que mientras el peso caía accionaba un sistema de paletas sumergidas en un recipiente de agua térmicamente aislado [18]. Las paletas al girar, agitaban el agua y debido a la

fricción entre ellas y el agua, el peso caía prácticamente con velocidad constante, por tanto, su energía cinética no variaba. Joule comprobó que la energía potencial perdida por el peso al caer se transformaba en el trabajo que desarrollaban las paletas, y ese trabajo, en energía interna del agua debido al movimiento de fricción que realizaban las paletas sumergidas. De este modo el agua sufría un aumento de temperatura debido a esa energía interna, que se confirma gracias a un termómetro instalado en el recipiente de agua.

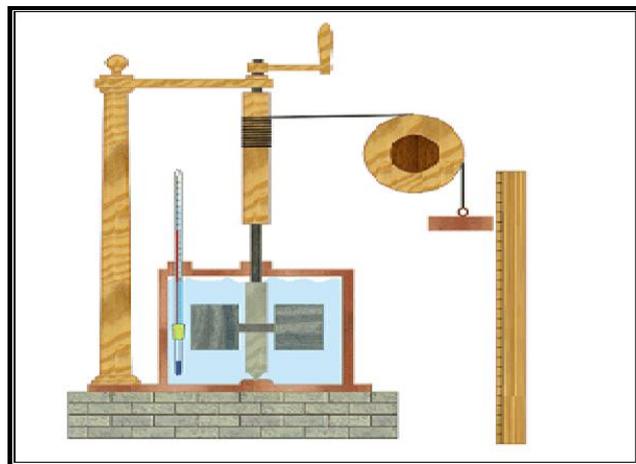


Figura 4. Experimento de Joule antes de dejar caer el cuerpo.

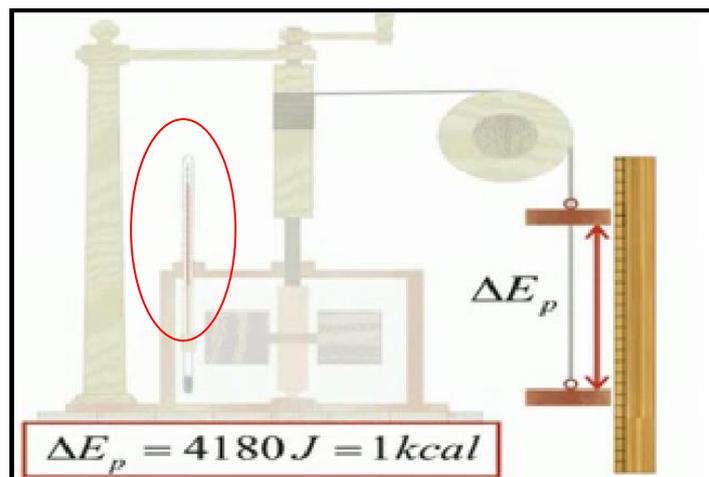
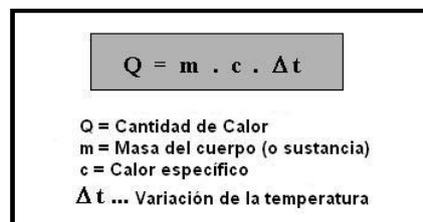


Figura 5. Experimento de Joule, después de dejar caer el cuerpo.

Conociendo el peso del cuerpo y la altura a la que cae, Joule pudo calcular la energía potencial perdida por el cuerpo ($E_p = m \cdot g \cdot h$). Por otra parte conociendo el valor de la masa del agua en el interior del recipiente, y con el dato de aumento de temperatura, se calculó la cantidad de energía térmica transferida al agua ($\Delta Q = mc\Delta t$). Al comprobar estos valores, Joule descubrió la relación de cuántas unidades de energía mecánica equivalen a una unidad de calor. La razón de la importancia y el éxito de este experimento fue la confirmación de las hipótesis de Thompson de la relación entre el trabajo y el calor, y demostró, en la práctica, que el calor es una forma de energía.



$Q = m \cdot c \cdot \Delta t$

Q = Cantidad de Calor
m = Masa del cuerpo (o sustancia)
c = Calor específico
 Δt ... Variación de la temperatura

Figura 6. Formula de Joule para calcular la energética térmica.

En la siguiente tabla (1), se muestran las diferencias más significativas entre las teorías del calor; como sustancia y como energía [19].

CALOR COMO ENERGIA (TEORIA DE JOULE).	CALOR COMO SUSTANCIA (TEORIA CALORICA).
Propone al calor como un tipo de energía en tránsito.	Propone al calor como un fluido (calórica).
La transferencia de calor hacia un cuerpo genera un aumento en la energía de sus átomos y partículas. Por lo tanto un cuerpo no tiene calor.	Los cuerpos con mayor temperatura, traspasan calórica a los de menor.
El aumento de energía interna de un cuerpo, puede ser generado por un trabajo y viceversa.	El calórico es una sustancia ingenerable e indestructible.
La temperatura depende del movimiento molecular de un cuerpo.	La temperatura depende de la cantidad de calórico de un cuerpo.

Tabla 1. Comparación de los conceptos entre las teorías del calor; como energía y como sustancia

Ambas teorías mencionadas anteriormente, a pesar de que muchos de sus conceptos no eran totalmente aceptados, dieron luz a la definición completa del concepto de calor que conocemos actualmente. Finalmente, la teoría cinética molecular de los gases [19] aportó su granito de arena para completar un mayor conocimiento del calor.

La teoría cinética molecular consiste en que los gases están formados por pequeñas moléculas con un gran espacio entre sí, y que no existe atracción alguna entre ellas. Indica que las moléculas se encuentran en constante movimiento y de forma desordenada y que este movimiento se denomina como energía cinética. Como consecuencia de este movimiento, las moléculas chocan entre sí y con las paredes del recipiente que las contiene, sin embargo, el choque se considera elástico y no existe ganancia ni pérdida de energía cinética. Esta teoría sostiene que la energía cinética de las moléculas es directamente proporcional a la temperatura. Con ello se explica el concepto de energía interna de los elementos, ya que al aumentar la temperatura del cuerpo, aumenta proporcionalmente la velocidad de movimiento de las moléculas y, con ello, su energía cinética. Este movimiento molecular es la raíz de los cambios de estado de las materias en relación a la temperatura.

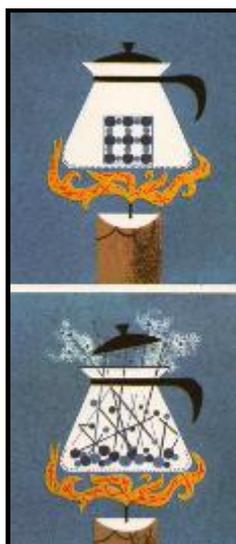


Figura 7. Aumento del movimiento molecular debido a la temperatura.

Con la interpretación de todas estas teorías, finalmente, hoy en día el calor se define como una energía en tránsito que los cuerpos almacenan en su interior como energía interna, y que depende de la estructura del cuerpo y de su movimiento molecular. La transferencia de calor ocurre por el contacto de dos cuerpos que se encuentran a distinta temperatura, y el calor se transfiere del cuerpo más caliente al más frío [13].

4.1.3. Áreas de aplicación.

La transferencia de calor ha sido, durante años, uno de los temas más estudiados y experimentados de la sociedad, ya que muchos de los elementos utilizados en la vida cotidiana, así como en la industria y en la ingeniería, se establecen en el principio de la energía de transferencia térmica [13].

Es muy común encontrar ejemplos de la transferencia de calor, así como sus efectos y sensaciones, es más, el más sencillo de todos ellos lo encontramos en las personas; el cuerpo humano es una fuente de calor muy potente, éste emite calor constantemente a su alrededor. Cuanto mayor calor contenga el cuerpo, mayor es la velocidad de transferencia de calor. Un ejemplo de ello (figura 8), es cuando una persona realiza una actividad física, la temperatura de su cuerpo aumenta considerablemente, a continuación, la pierde rápidamente, ya que la temperatura ambiente es inferior a la de su cuerpo, de ahí la importancia de abrigarse siempre después del ejercicio.

Tan común es el aumento de temperatura del cuerpo debido a un esfuerzo, como la pérdida en los meses de invierno [20]. Las personas invierten tiempo a buscar y comprar abrigos de la mayor calidad y eficiencia posible, con el fin de controlar la velocidad de transferencia de calor del cuerpo al ambiente frío. De la misma manera, en verano se utilizan ropajes cortos y frescos para impedir el aumentar al cuerpo de calor innecesariamente.

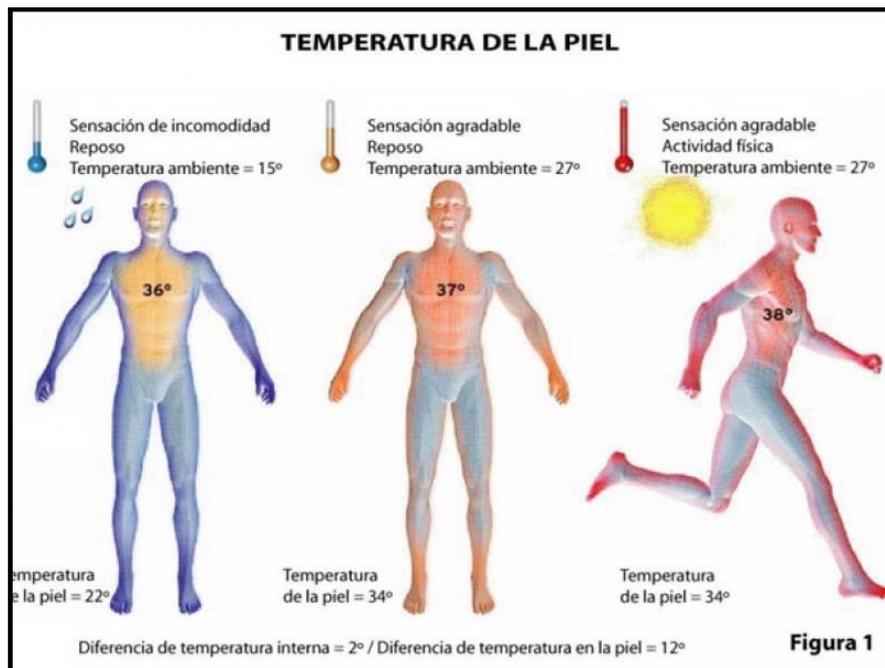


Figura 8. Perdida y aumento de la temperatura en el cuerpo humano, por esfuerzo físico y ambiente frío.

En la vida doméstica muchos de los electrodomésticos y maquinarias que contienen los domicilios se han diseñado en toda su totalidad o parte de ella aplicando los principios de la transferencia de calor, ejemplos de ello se encuentran en; el sistema de calefacción, el de aire acondicionado, las estufas, las neveras etc.

El fenómeno de transferencia de calor representa también un papel relevante en procesos industriales y ambientales. No existe ninguna aplicación de esta área en el que no se emplee la transferencia de energía térmica de alguna manera, en la generación de potencias eléctricas, en la combustión de los combustibles fósiles, en fuentes de energía geotérmicas. La transferencia de calor se encuentra presente también en los diseños de calentamiento de espacios convencionales o de agua, en el diseño de incineradoras y de equipo de almacenamiento criogénico.

4.2 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

Tal y como se ha mencionado anteriormente, el calor es una tipo de energía en tránsito que se puede transferir de un sistema a otro gracias a una diferencia de temperaturas. Un análisis de transferencia de calor, estudia la velocidad del proceso de de transferencia de energía térmica. Esta transferencia siempre se produce del medio que tiene la temperatura más alta hacia el de más baja, y el proceso se detiene cuando ambos medios contienen la misma temperatura y el sistema se encuentra en equilibrio.

Existen tres mecanismos de transferencia de calor; transferencia por radiación [13], por convección [13] y por conducción [13]. Aunque cada uno realiza el intercambio de distinta manera, los tres necesitan una diferencia térmica para su proceso y los tres cumplen con las leyes de conservación de energía.

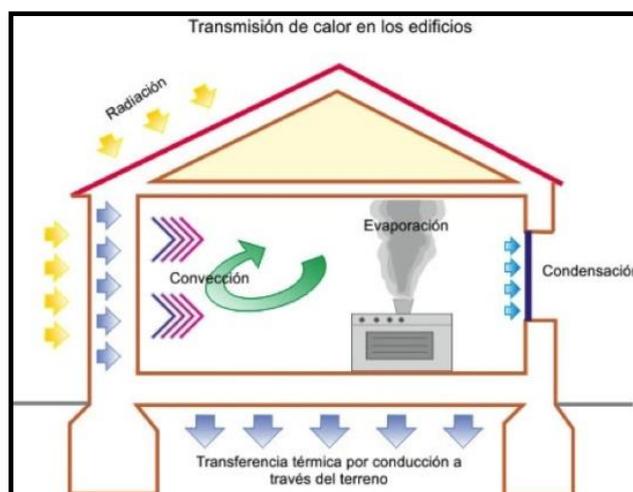


Figura 10. Métodos de transferencia de calor.

4.2.1. Conducción.

La palabra conducción se encuentra en el ámbito de actividad molecular. La conducción se considera como la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las de menos energéticas de una sustancia, debido a las

interacciones entre las mismas. La conducción puede llegar a darse en sólidos líquidos o gases. En los dos últimos, la transferencia ocurre debido a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos, sin embargo, la transferencia la causa una combinación de vibraciones de las moléculas en una retícula y un transporte de energía de los electrones libres. La transferencia de calor de un medio solido a otro depende de la configuración geométrica de éstos, así como de su espesor, del material del que se compone y de la diferencia de temperatura que exista entre ambos.

Un ejemplo común de una transferencia por conducción es la pérdida de calor de una habitación al exterior cuando es invierno. La pérdida de calor puede reducirse cuanto más gruesa sea la pared, o dependiendo del aislamiento del material de construcción de la misma, en cualquier caso, la transferencia ocurrirá a mayor velocidad cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre el interior y exterior. En la figura 11, se representa el comportamiento de la transferencia, así como la dirección de la pérdida de calor del ejemplo anterior.

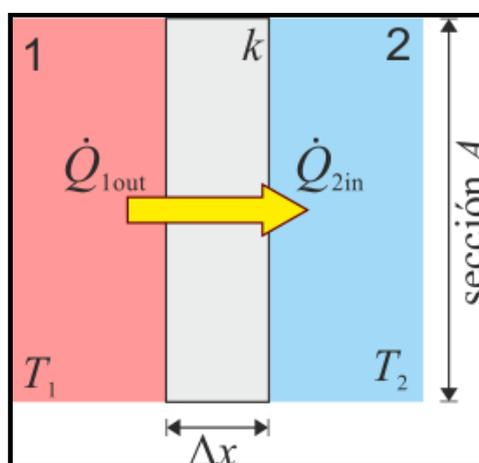


Figura 11. Transferencia de calor del interior de un edificio al exterior.

Es posible cuantificar los procesos de transferencia de calor mediante ecuaciones. Esta ecuación sirve para calcular la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo. La ecuación que simboliza el método de

conducción se conoce como ley de Fourier [21], para una pared plana unidimensional [13].

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -kA \frac{dT}{dx}$$

Figura 12. Ecuación de Fourier para una pared plana.

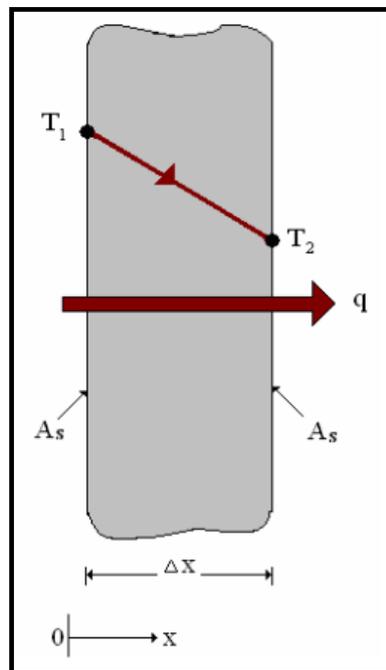


Figura 13. Representación de una pared plana.

El flujo de calor o transferencia de calor por unidad de área q_c , es la velocidad con que se transfiere el calor en la dirección X por área unitaria perpendicular a la dirección de transferencia, y es proporcional al gradiente de temperatura dt/dx en esta dirección. La constante k , es una propiedad de transporte llamada conductividad térmica, y es una característica del material, en este caso de la pared. El signo menos (-) es una consecuencia del hecho de que el calor se transfiere en la dirección de la temperatura decreciente. En las condiciones de estado estable que se muestran en la figura anterior (figura 13),

donde la distribución de la temperatura es lineal, el gradiente de temperatura se expresa de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Figura 14. Formula de Fourier en condiciones estables.

Donde Δx es el grosor de la pared.

4.2.1.1. Conductividad térmica.

La conductividad térmica al igual que el calor específico, es una propiedad que contienen los materiales en la transferencia de calor [13]. De la misma manera que el calor específico C_p expresa la capacidad de un cuerpo para almacenar energía en su interior, la conductividad es la capacidad de un cuerpo para conducir calor. Por ejemplo la conductividad térmica del agua es de $K=0,608$ W/m · °C, y la del hierro $K=80,2$ W/m · °C, a una temperatura ambiente el hierro puede verse que es casi 100 veces más rápido que el agua a la hora de transferir el calor. Por tanto, el agua es peor conductora que el hierro a pesar de que es un medio excepcional para almacenar energía térmica ya que tiene mayor calor específico que el otro elemento. La ecuación que define la conductividad térmica, es la misma que la que define la velocidad de conducción en la transferencia de calor en condiciones estacionarias.

A la hora de diseñar un circuito que contenga un intercambiador de calor, una construcción de viviendas, un proceso industrial, o cualquier elemento de uso cotidiano, la consideración de la conductividad térmica de los materiales es de vital importancia, ya que dependiendo del sistema, se requerirá mayor conductividad o menor. Un valor alto para la conductividad térmica significa que

el elemento transferirá el calor con mayor velocidad, por otro lado, un valor bajo representara que el material es un buen aislante. A continuación se muestra (figura 15) una tabla con valores de conductividad térmica y se podrá comprobar qué materia tiene mayor resistencia a la transferencia de calor y cuál menor.

Material	Conductividad térmica [W/(m·K)]
Metales	35 (plomo) 381 (cobre)
Hormigón	1,63 - 2,74
Agua	0,60 (líquida) - 2,50 (hielo)
Mortero de cemento	0,35 - 1,40
Ladrillo macizo	0,72 - 0,90
Bloques de hormigón	0,35 - 0,79
Ladrillo hueco	0,49 - 0,76
Enlucidos de yeso	0,26 - 0,30
Ladrillo multialveolar	0,20 - 0,30
Maderas, tableros	0,10 - 0,21
Hormigón celular	0,09 - 0,18
Aislamientos	0,026 - 0,050
Aires (sin convección)	0,026

Figura 15. Conductividad térmica en diferentes materiales.

Se sabe que el calor, al igual que la temperatura, es la energía cinética que poseen los átomos y moléculas de una materia debido a su movimiento, y que ese movimiento variará dependiendo del estado en el que se encuentre esa materia o sustancia.

El mecanismo de la conductividad térmica en los gases se explica a nivel molecular, con conceptos básicos de la teoría cinética de los gases. Las moléculas de los gases se encuentran en un continuo movimiento de forma aleatoria y chocando entre sí. La velocidad de este movimiento molecular depende de su temperatura, es decir, si una molécula se mueve en un rango mayor de temperatura lo hará a mayor velocidad. Cuando una molécula que se

encuentra en un rango de mayor temperatura y, por tanto, mayor velocidad choca con otra más lenta cediendo parte de su energía, y aumenta la energía y velocidad de la molécula de menor energía. De esta manera se desarrolla la transferencia de calor de la región de mayor temperatura a la de menor. Por tanto, cuanto más rápido se muevan las moléculas, más rápido transmitirán la energía.

Estudios experimentales [22] concluyen que la conductividad térmica de los gases es proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura absoluta T , e inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la masa molar, por tanto, la conductividad térmica de un gas es mayor a temperaturas elevadas y disminuye cuanto mayor masa molar tiene. Como el espacio entre moléculas de un fluido en estado gaseoso es considerablemente mayor al tamaño molar del mismo, la conductividad térmica es independiente a la presión a la que se encuentre. A continuación, la gráfica (figura 16) muestra varios ejemplos en los que se demuestra cómo la conductividad térmica depende de la temperatura.

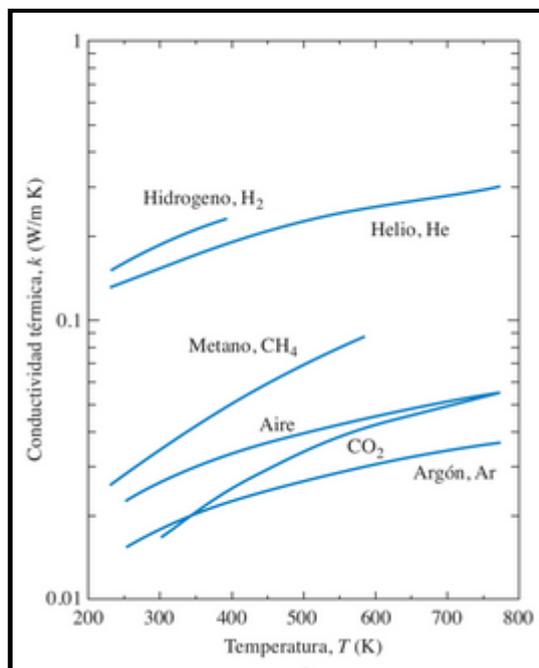


Figura 16. Gráfica de la conductividad térmica de los materiales en estado gaseoso, según la temperatura.

El mecanismo de conductividad en los fluidos en estado líquido es similar al de los gases [22], aunque por las condiciones moleculares resulta más complejo de describir por el hecho de que las moléculas están más cerca entre si y ejercen mayor fuerza intermoleculares. Se considera que los valores de la conductividad térmica de una sustancia en estado líquido se encuentran entre la de los sólidos y gases, ya que normalmente las sustancias en estado sólido adquieren mayor conductividad térmica y la gaseosa menor.

A diferencia de la conductividad térmica en las sustancias gaseosas, la mayoría de los líquidos adquieren un valor mayor cuanto menor sea su temperatura, siendo el agua una notable excepción. Como norma general, la conductividad térmica de los líquidos al igual que en los gases, disminuyen con el aumento del peso molar. Las sustancias en estado líquido suelen ser insensibles a un cambio de presión excepto cerca del punto crítico.

Para fines ingenieriles, los metales en estado líquido adquieren mayor protagonismo e interés ya que éstos normalmente adquieren valores de conductividad más altos que el resto de las sustancias líquidas. Por ejemplo, el mercurio y el sodio en estado líquido presentan una velocidad de transferencia realmente interesante para plantas eléctricas o en fábricas.

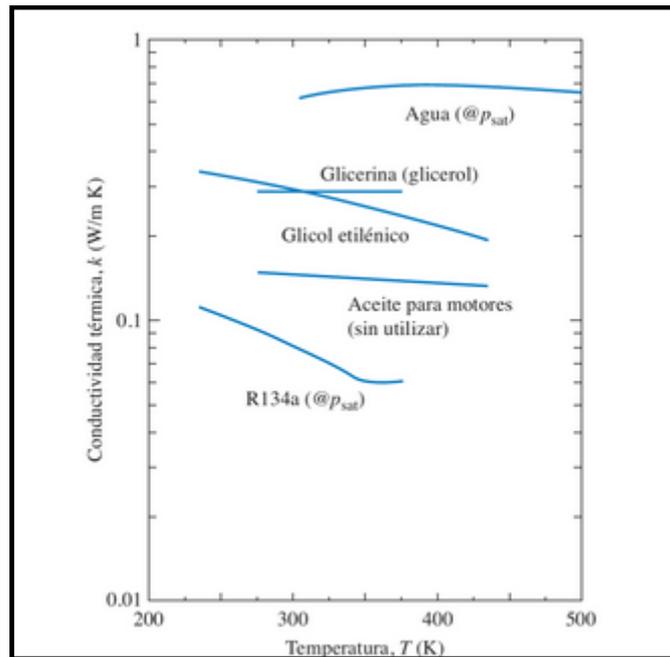


Figura 17. Gráfica de la conductividad térmica de los materiales en estado líquido, según la temperatura.

De acuerdo con la teoría de materiales sólidos [22], éstos se componen de electrones libres y átomos en una disposición periódica reticular. El método de transferencia en los sólidos se realiza mediante vibraciones inducidas por los movimientos de vibración de las moléculas, y la energía transportada por medio del flujo de electrones libres.

La conductividad de los sólidos se debe a la suma del flujo de electrones libres y a las vibraciones de las retículas. Los elementos metálicos puros deben principalmente su gran conductividad al flujo de electrones libres, éstos transportan una carga eléctrica de la misma manera que transportan energía térmica de una región de mayor temperatura a una de menor, por lo tanto, los sólidos metálicos puros se consideran buenos conductores eléctricos así como malos aislantes. También existen otros sólidos no metales llamados sólidos cristalinos, en los que predominan las vibraciones de la retícula, y la transferencia térmica, en estos casos dependerá de la manera en que las moléculas estén dispuestas.

Las aleaciones son otro de los materiales utilizados en los procesos de transferencia de calor pero, así como los metales puros contienen un alto valor de conductividad térmica, las aleaciones no obtienen valores tan altos. Al mezclar dos metales para formar una aleación se introducen moléculas ajenas de un metal a otro, esto hace que la estructura del metal puro cambie y sus propiedades conductivas también. Por ejemplo, la aleación de constantano; [13] que se forma a partir de un 55% de cobre y un 45% de níquel, tiene una conductividad de $23 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ a 300K, cuando los metales puros del cobre y níquel alcanzan valores de $401 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ y $91 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, respectivamente en las mismas condiciones.

La variación de la conductividad térmica en algunos materiales se considera despreciable dentro de unos rangos de temperatura, sin embargo, como norma general, la conductividad varía con la temperatura en los sólidos como muestra la siguiente tabla.

$T, \text{ K}$	COBRE (conductividad térmica $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$)	ALUMINIO (conductividad térmica $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$)
100	482	302
200	413	237
300	401	237
400	393	240
600	379	231
800	366	218

Tabla 2. Variación de la conductividad térmica del cobre y aluminio con la temperatura.

La siguiente gráfica (figura 18) representa la variación de la conductividad térmica de las diferentes sustancias en diferentes estados, incluyendo la inmensa y famosa conductividad térmica del diamante.

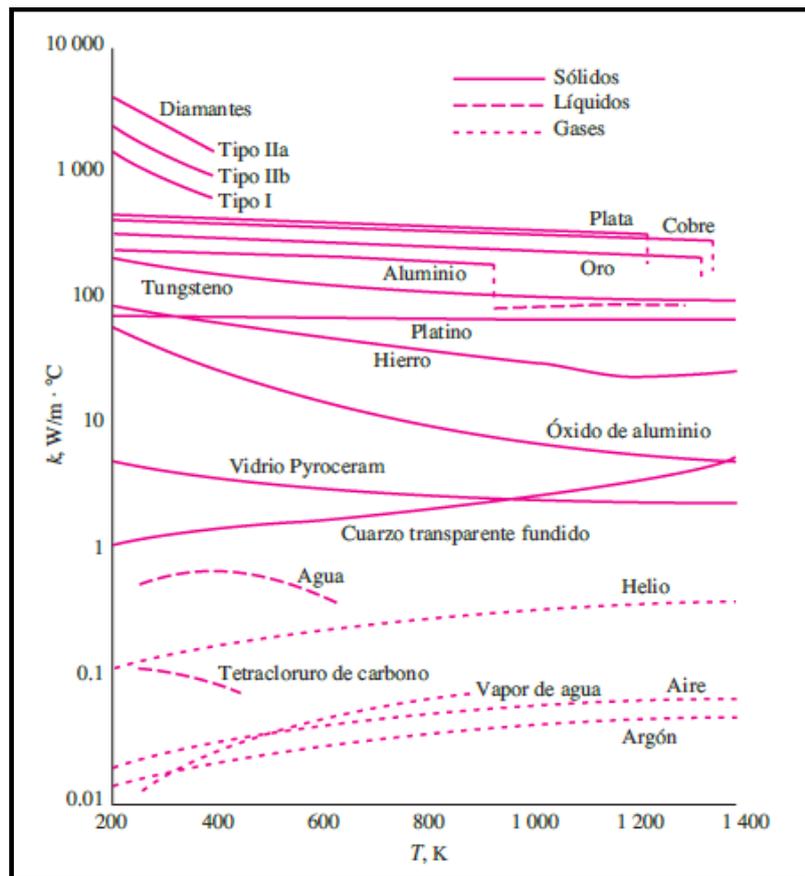


Figura 18. Variación de la conductividad térmica de diversos sólidos, líquidos y gases, con la temperatura.

En los análisis de transferencia de calor, normalmente, se considera que un material es isotrópico, es decir, que tiene propiedades uniformes en todas direcciones. Ésta es una consideración realista que se establece para la mayoría de los materiales, excepto para los que tienen características estructurales diferentes en distintas direcciones como los compuestos laminados y la madera. Por ejemplo, la conductividad térmica de la madera a través de sus fibras es diferente a la que se tiene en sentido paralelo a esas fibras.

La conductividad térmica de un material es, en realidad, el factor más importante a tener en cuenta para la ingeniería, la búsqueda de nuevos materiales así como sus condiciones para lograr un aumento de conductividad

o, por lo contrario, de aislante es una de las investigaciones más universales que existen.

Un experimento que suele usarse para calcular la conductividad térmica de un material [13], es el colocar dos muestras del mismo material con formas cilíndricas y de mismas dimensiones, separadas por un calentador eléctrico con un fluido circulante por uno de sus extremos, con el fin de mantenerlos a una temperatura constante, y se dispone un aislamiento externo para garantizar una transferencia unidimensional a través de la muestra, de manera en la que se muestra en la figura 19. La razón de colocar dos muestras idénticas para calcular la conductividad térmica es la simetría de los resultados de los cálculos, es decir, se calcula la conductividad de una muestra y su resultado se verifica con el resultado de la otra.

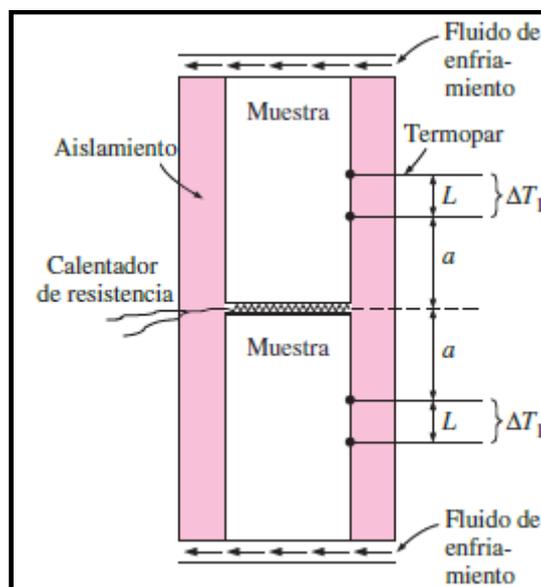


Figura 19. Equipo para el cálculo de la conductividad térmica de un material.

Se colocan unos termopares en cada una de las muestras con una distancia L , y se instala en él un termómetro diferencial que revele entre los dos puntos del diferencial, la caída de temperatura ΔT de cada muestra. Cuando se alcanzan unas condiciones estacionarias de operación, es decir, que las características

de las muestras no varían con el paso del tiempo, la potencia eléctrica dada por el calor se iguala a la velocidad total de transferencia de calor en ambas muestras.

4.2.2. Convección.

Existen dos mecanismos de transferencia de calor que componen el método de convección; además de la transferencia de energía debido al movimiento molecular al que llamamos difusión, la energía también se transfiere al movimiento global de un fluido, este último se origina por el movimiento grupal de moléculas en presencia de una diferencia de temperaturas, y de esta manera se origina una transferencia de calor [13].

En la práctica, de manera más simple se define la transferencia de calor por convección, a la transferencia entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que se encuentra en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluido. Cuanto mayor sea la velocidad del fluido que toca el sólido, mayor será la transferencia de calor por convección. Tal es la importancia de este movimiento del fluido, que sin su presencia la transferencia pasaría a ser por conducción. Además, en la convección, las densidades de los fluidos adquieren un papel esencial, ya que existe un desplazamiento vertical ascendente del fluido caliente debido a que contiene menor densidad que frío.

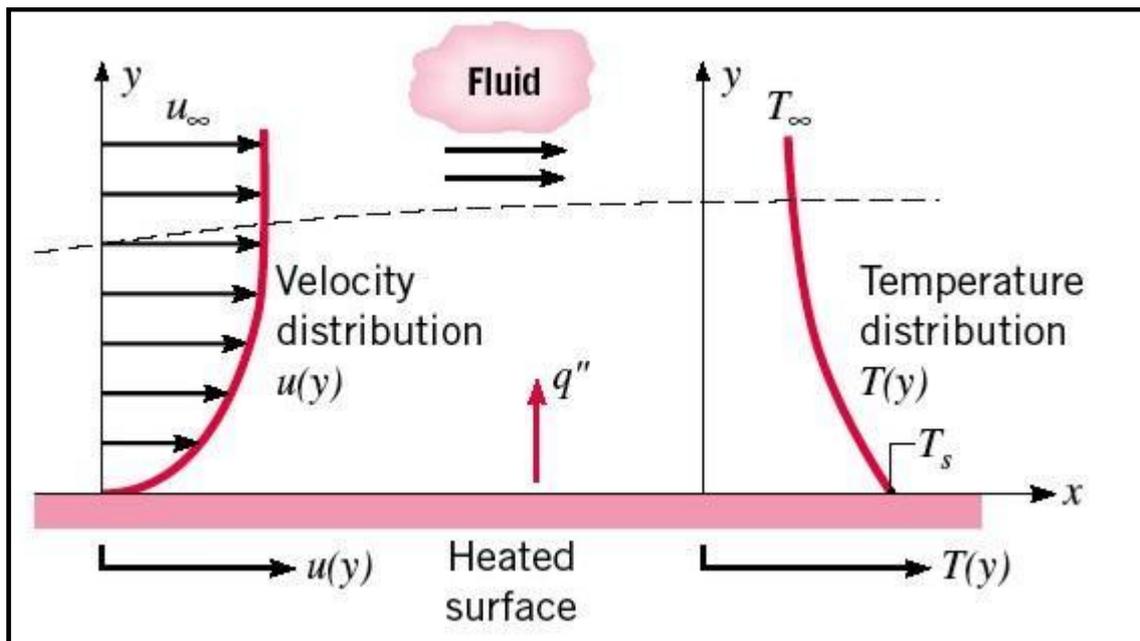


Figura 20. Transferencia de calor de una superficie caliente hacia el aire por convección.

Para comprender el método de transferencia por convección se encuentra la figura 20. Ésta representa el enfriamiento de un bloque caliente colocado horizontalmente por una corriente de aire fría. Una consecuencia de la interacción fluido-superficie, es un descenso de la velocidad de la corriente de aire frío a medida que esta entra en contacto con la superficie del bloque caliente. La velocidad adquiere el valor de 0 cuando toca el bloque, a esta región del fluido se le conoce como capa límite de velocidad. En este momento es en el que ocurre una transferencia de calor molecular (difusión) entre la capa de aire frío sin movimiento y la capa de aire caliente adyacente al bloque. Más aún, si las temperaturas del bloque y la corriente del aire difieren, habrá una región del fluido a través de la cual la temperatura varía de T_s en $y = 0$ a T_∞ en el flujo exterior. Esta región se denomina como capa límite térmica, y su tamaño puede ser más pequeño o grande, varía con la velocidad del fluido. En cualquier caso, si existe una región de variación de temperatura, por lo cual existe una transferencia de calor entre superficie y flujo.

Se ha mencionado el efecto molecular en la transferencia, pero se sabe que hay otro que contribuye en el proceso. El movimiento volumétrico o grupal del fluido se origina del hecho de que la capa límite crece a medida que el flujo avanza en la dirección x , remueve el aire caliente de la superficie y lo desplaza hacia la capa exterior y es reemplazado por aire más frío.

La transferencia de calor por convección se clasifica de acuerdo con la naturaleza del flujo. Se hablará de convección natural o libre [13], cuando la fuerza motriz procede de la variación de densidad en el fluido por consecuencia del contacto con una superficie a diferente temperatura, lo que da lugar a fuerzas ascensionales. El fluido próximo a la superficie adquiere una velocidad únicamente a esta diferencia de densidades, sin ninguna fuerza motriz exterior. Un ejemplo de convección natural que puede verse fácilmente, es el del efecto del radiador del hogar.

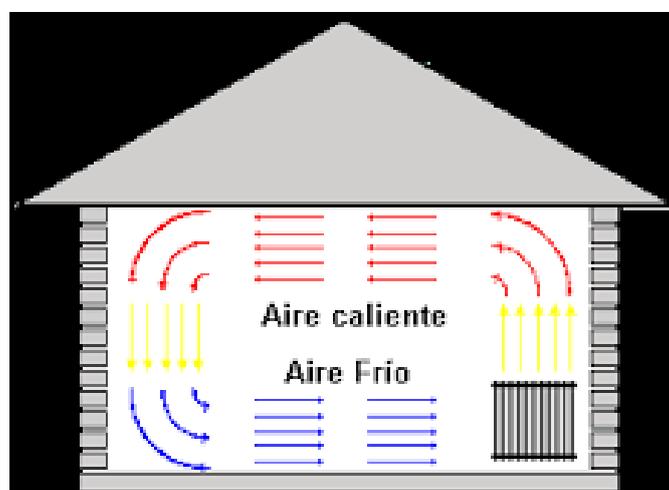


Figura 21. Transferencia térmica por convección natural en un radiador.

El aire frío al ser más pesado se encuentra en la parte inferior del espacio, éste hace contacto con la superficie del radiador y se calienta. Una vez calentado, asciende a la parte superior removiendo el aire, y lo desplaza en la dirección contraria a la que se encuentra el radiador. El aire desplazado se enfría, cayendo de nuevo y volviendo a realizar el ciclo (figura 21).

La convección forzada [13], tiene lugar cuando una fuerza motriz exterior mueve un fluido con una velocidad V sobre una superficie que se encuentra a una temperatura T_s mayor o menor que la del fluido T_f . Como la velocidad del fluido en la convección forzada es mayor que en la convección natural se transfiere por lo tanto, una mayor cantidad de calor para una determinada temperatura (figura 22).

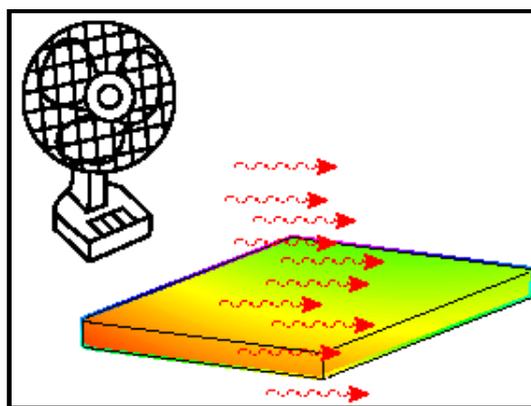


Figura 22. Transferencia de calor por convección forzada.

Los procesos de transferencia de calor que comprenden cambios de fase de un fluido, también se consideran como convección a causa del movimiento de ese fluido inducido durante el proceso, como la elevación de las burbujas de vapor durante la ebullición o la caída de las gotitas de líquido durante la condensación.

A pesar de la complejidad de la convección, se observa que la rapidez de la transferencia de calor es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa, sea la convección natural o no, por la ley de Newton del enfriamiento.

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = hA_s (T_s - T_{\infty})$$

Figura 23. Ecuación de transferencia de calor por convección.

Donde se relacionan la temperatura de la superficie, del fluido y el área, además de la h para conocer el flujo de calor por convección. La h no es una propiedad del fluido, es un parámetro que se determina en forma experimental y cuyo valor depende de todas las variables, como la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades de éste y su velocidad grupal.

4.2.3. Radiación.

En la transmisión del calor por radiación, un cuerpo cede parte de su energía interna a través de la emisión de ondas electromagnéticas (que viajan a la velocidad de la luz y no necesitan de un medio material para su propagación). Al absorberse estas ondas electromagnéticas por otros sólidos, su energía pasa de nuevo a un movimiento térmico de las moléculas y por tanto, a un aumento de temperatura. Así, el proceso de intercambio de energía por radiación es un proceso de absorción y emisión posterior de energía en forma de fotones por parte de los átomos y moléculas de una sustancia. La transferencia por radiación, a diferencia de la conducción y convección, no es necesaria la presencia de un medio sólido. De hecho, la transferencia de energía por medio de radiación, es la más rápida y no sufre atenuación en el vacío [13].

En la transferencia de calor es de un gran interés el estudio de la radiación térmica, que es la forma de radiación que exhala un cuerpo debido a su temperatura. Todos los cuerpos a una temperatura superior del cero absoluto (-273°C) emiten radiación térmica. La radiación es un fenómeno que toda materia, se encuentre en el estado que se encuentre, ya sea sólido, líquido o gas, la emiten, la absorben y la transmiten en diferente grado. Por otra parte, la radiación es considerada un fenómeno superficial para sólidos opacos a la radiación térmica, alguno de ellos son; la madera, las piedras o los metales. Los materiales opacos o reflectantes únicamente son capaces de absorber una pequeña parte de la radiación térmica que se les incide, al igual que solo pueden ceder una pequeña parte de su energía interna. La figura 24, muestra

el fenómeno de radiación superficial, y el cómo afecta las ondas de radiación a los materiales opacos y reflectantes.

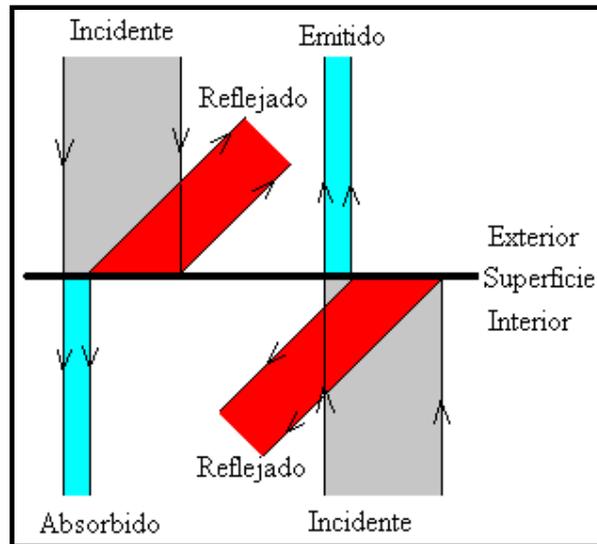


Figura 24. Efecto de la radiación en cuerpos opacos y reflectantes.

La figura 25 muestra el comportamiento de una superficie de un cuerpo que refleja solo una pequeña parte de la energía incidente y absorbe el resto. La anchura de las distintas bandas corresponde a cantidades de energía radiante incidente, reflejada y transmitida a través de la superficie.

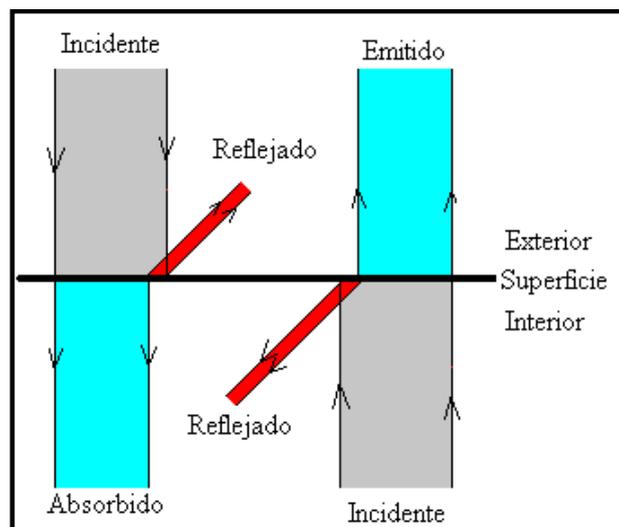


Figura 25. Efecto de la radiación en materiales no opacos ni reflectantes.

Una aplicación práctica de la radiación está en los termos, utilizados para mantener la temperatura de los líquidos como el café, un termo dispone de doble pared de vidrio, y se vacía de aire el espacio entre dichas paredes para evitar la pérdida de calor por conducción y convección, por otro lado para reducir la pérdida de calor por radiación, se cubren las paredes con una lámina de plata, que es altamente reflectante y por tanto, mal emisor y mal absorbedor de radiación [23].

La cantidad de energía que abandona una superficie en forma de calor radiante depende de la temperatura absoluta y de la naturaleza de la superficie. Un radiador perfecto o cuerpo negro emite una cantidad de energía radiante de su superficie por unidad de tiempo q_r dada por la ecuación de Stefan – Boltzmann [13]:

$$\dot{Q}_{\text{emitida, máx}} = \sigma A_s T_s^4$$

Figura 26. Ecuación de Stefan-Boltzmann para un cuerpo negro.

Donde σ es la constante de Stefan – Boltzmann que equivale a $5,67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

La superficie de un cuerpo negro es un caso límite, en el que toda la energía incidente desde el exterior es absorbida, y toda la energía incidente desde el interior es emitida (figura 27).

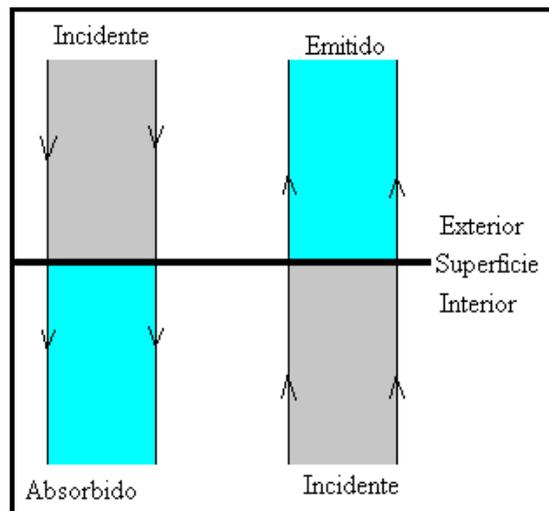


Figura 27. Radiación en un cuerpo negro.

No existe el cuerpo negro en la realidad, como todo, en la termodinámica o energías, siempre existen pérdidas [23]. Como se ha mencionado anteriormente, no todos las superficies tienen la misma capacidad de absorción y de transferencia. La radiación emitida por todas las superficies reales es siempre menor que la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura, y se expresa como:

$$\dot{Q}_{\text{emitida}} = \epsilon \sigma A_s T_s^4$$

Figura 28. Ecuación de transferencia por radiación emitida por un cuerpo.

Donde (ϵ), representa la emisividad de la superficie del material, este valor se encuentra entre el 0 y el 1. Es una medida que indica cual próxima está ese material de ser cuerpo negro, es decir de la absorción y transferencia absoluta (ϵ)=1. La vegetación, por ejemplo, tiene una emisividad de 0,92, y una hoja de aluminio 0,07, podría decirse en la vegetación tiene mayor facilidad para emitir energía.

Tal y como existe una propiedad de los materiales que indica la capacidad de emisión, también existe la propiedad de absorción, que se denomina como

absortividad (α), y es la capacidad de un material para absorber la energía térmica por radiación incidente en la superficie, su valor se encuentra entre 0 y 1, siendo la unidad la correspondiente a un cuerpo negro que absorbe toda la radiación que incide en él.

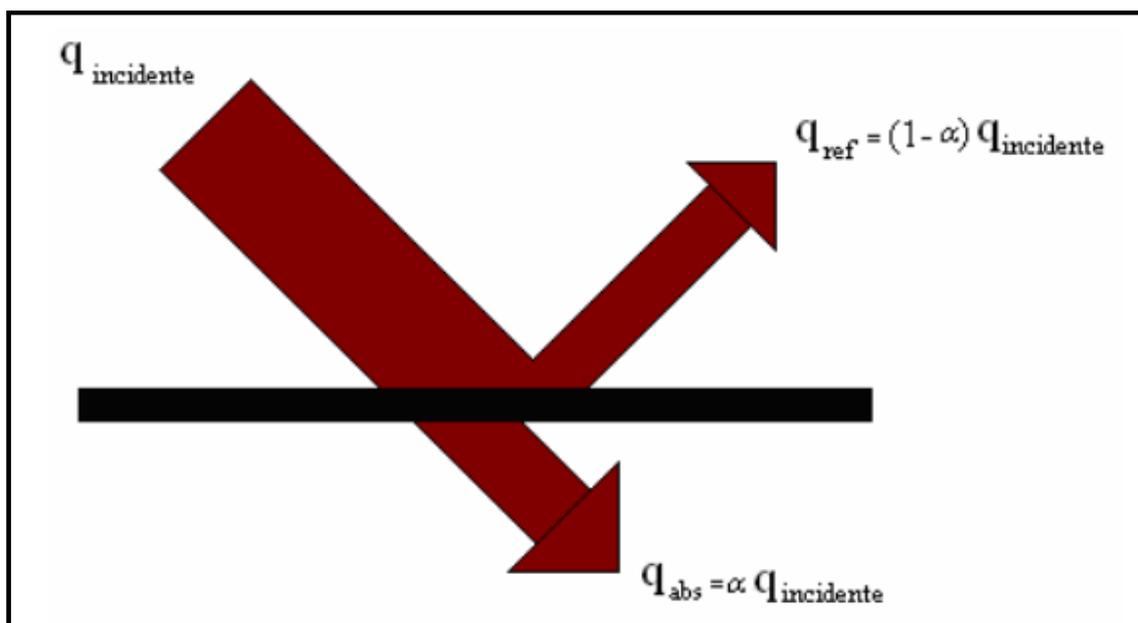


Figura 29. Absorción de la radiación incidente sobre una superficie.

La figura 29 representa la energía de radiación absorbida por una superficie. Como puede comprobarse, se trata de una superficie con opacidad ya que no toda la cantidad de energía térmica que se incide sobre la superficie del cuerpo se absorbe, existe un reflejo que su valor dependerá de la absortividad.

La diferencia entre las velocidades de la radiación emitida por la superficie y la radiación absorbida es la transferencia neta de calor por radiación [13]. Si la velocidad de absorción de la radiación es mayor que la de emisión, se dice que la superficie está ganando energía por radiación. Si se trata de lo contrario, se dice que la superficie está perdiendo energía por radiación. En general la determinación de la velocidad neta de la transferencia de calor por radiación entre dos superficies, depende de las propiedades de las mismas, de la orientación que tengan una de la otra y del medio existente entre ellas.

Cuando se requiere calcular la radiación existente entre un cuerpo con un área, temperatura y emisividad definida, con otra superficie mucho mayor que la rodea y que se encuentra a una temperatura absoluta, separados por un gas como el aire que no interviene en la radiación. En este caso, la emisividad y el área de la superficie circundante no tienen efecto sobre la transferencia neta del calor de radiación.

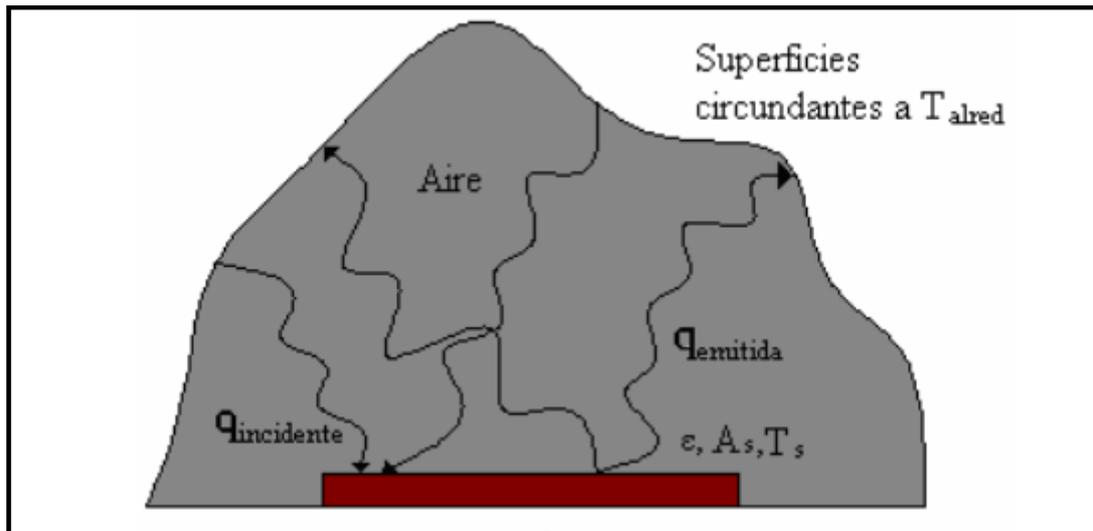


Figura 30. Transferencia de calor por radiación entre una superficie y la superficie que la rodea.

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \epsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{\text{alred}}^4)$$

Figura 31. Ecuación para la transferencia de calor por radiación entre una superficie y la superficie que la rodea.

4.3. INTERCAMBIADORES DE CALOR.

En la industria y en los procesos industriales a menudo deben transferirse grandes cantidades de energía térmica; entre un sistema y el medio ambiente o entre distintas partes de un sistema. Se llaman intercambiadores de calor a los dispositivos cuyo propósito es realizar un intercambio de calor entre dos fluidos que se encuentran a distintas temperaturas y evitan, al mismo tiempo, que se mezclen entre sí. Estos dispositivos, además de encontrarse en la industria, se hallan también en los sistemas domésticos como la calefacción y aire acondicionado, así como, en plantas energéticas, en procesos químicos, y como no, a bordo de buques. Un ejemplo donde puede mostrarse el efecto de un intercambiador común y sencillo es en el radiador de un automóvil. El agua caliente que refrigera el motor circula a través de los tubos del radiador, este agua se enfría gracias a la corriente de aire que se impulsa con un ventilador y que choca con dichos tubos absorbiendo con el contacto, la energía térmica.

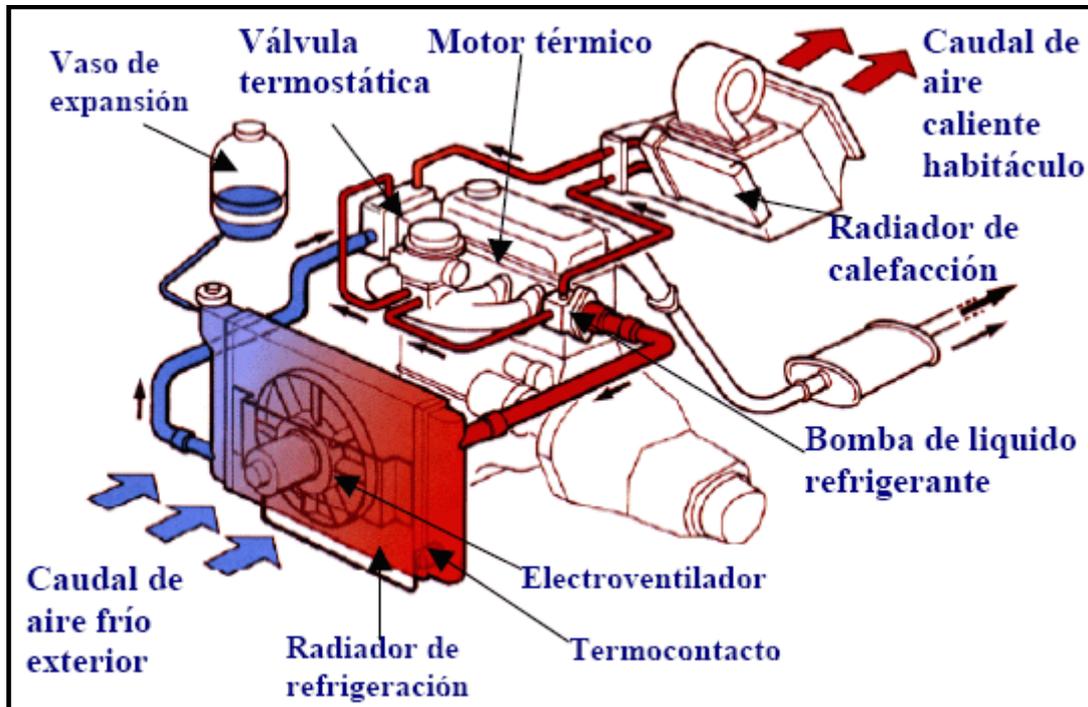


Figura 32. Instalación de un intercambiador para la refrigeración del agua de un motor de un automóvil.

La transferencia de calor que ocurre normalmente en los intercambiadores se compone de un intercambio de calor por convección debido al movimiento de los fluidos, y una transferencia por conducción a través de la pared que separa ambos fluidos. En los análisis de una transferencia de calor por medio de un intercambiador, deben tenerse en cuenta todos estos efectos que alteran a dicha transferencia, para ello es conveniente trabajar con un coeficiente de transferencia de calor total que se expresa como U . Otro de los efectos que afectan a un intercambio térmico en estos dispositivos es la velocidad de transferencia de calor, que como es sabido, lo determina la diferencia de temperatura entre los dos fluidos, diferencia que varía en los diferentes puntos a lo largo del intercambiador. Por ello es conveniente trabajar con una diferencia de temperatura media logarítmica expresada como $LMTD$, que hace referencia a una diferencia media equivalente de temperatura entre los fluidos para todo el intercambiador.

4.3.1. Clasificación genérica.

Dado que existen numerosas aplicaciones en las que se precisan intercambiadores de calor, existen diferentes diseños para satisfacer las necesidades que se requieran. Los intercambiadores pueden clasificarse en diferentes categorías [24]; por geometría, por materiales, por dirección de los fluidos o por aplicaciones. Independientemente del tipo de clasificación que se vaya a analizar, los intercambiadores de calor se catalogan en tres grandes grupos.

4.3.1.1. Regenerativos.

El intercambiador regenerativo realiza la transferencia de calor mediante una corriente alternativa, de un fluido frío y de uno caliente a través del mismo espacio, evitando dentro de lo posible, la mezcla física de ambos [24]. Este dispositivo puede ser estático, cuando existe una masa porosa con gran capacidad de almacenaje de calor alojada en un conducto por el que pasa

alternativamente los dos tipos de fluidos. La masa porosa recoge la energía del fluido caliente cuando entra en contacto con ella, y la cede después al fluido frío durante su paso. Por tanto, la masa sirve como un medio de almacenamiento de calor temporal. El regenerativo dinámico, consta de un tambor giratorio, donde los fluidos circulan a través del él con una corriente continua pero por diferentes partes, de modo que el fluido caliente cede el calor a partes del tambor, las cuales, al girar entran en contacto con el fluido frío cediendo la energía recogida.

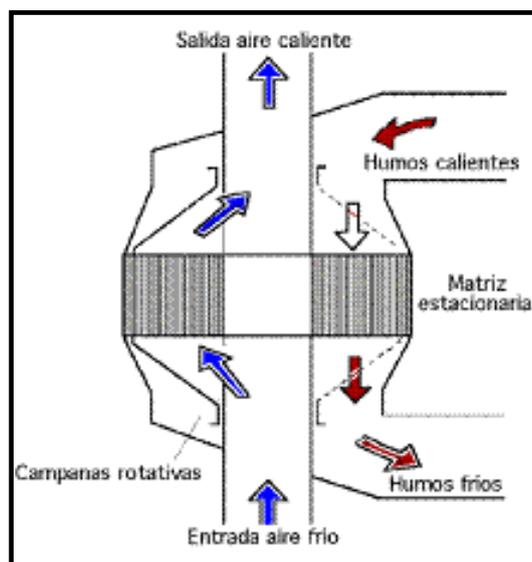


Figura 33. Modelo de intercambiador regenerativo dinámico.

4.3.1.2. Tipo abierto.

Los intercambiadores de tipo abierto, como su propio nombre indica, es un dispositivo donde tanto las corrientes del fluido frío como del caliente fluyen hacia una cámara abierta y ocurre una mezcla física completa de ambas corrientes [24]. La corriente fría y la caliente entran en el dispositivo por separado y salen de él como una sola corriente. El diseño de estos intercambiadores es simple y carece de análisis complejos, únicamente cumple la ley de la conservación de la masa [25] y la primera ley de la termodinámica [26] (conservación de la energía).

realizan o por las direcciones de movimiento de los fluidos, sino que también, por el tipo de diseños de fabricación.

4.3.2. Tipos de intercambiadores cerrados.

4.3.2.1. Intercambiadores de doble tubo

Son los equipos de transferencia de calor más sencillos que existen [13]. Están formados por dos tubos de diámetro distinto, en los cuales, un fluido pasa por el tubo de menor diámetro y el otro lo hace por el espacio anular entre los dos tubos, tal y como se muestra en la figura 35. En una instalación de un intercambiador de calor de doble tubo son posibles dos tipos de disposición de flujo: de flujo paralelo, donde el fluido frío y el caliente recorren el intercambiador de calor en la misma dirección y entran y lo abandonan por el mismo extremo. O por otra parte, de contraflujo, donde los fluidos se introducen al intercambiador por extremos opuestos, y lo recorren en direcciones enfrentadas. Las ventajas de este tipo de dispositivo son su bajo costo de producción, su simpleza de construcción y la escasa necesidad de un exhaustivo mantenimiento. Por otro lado requiere espacios amplios para su instalación y no está capacitado para la utilización de fluidos a grandes presiones.

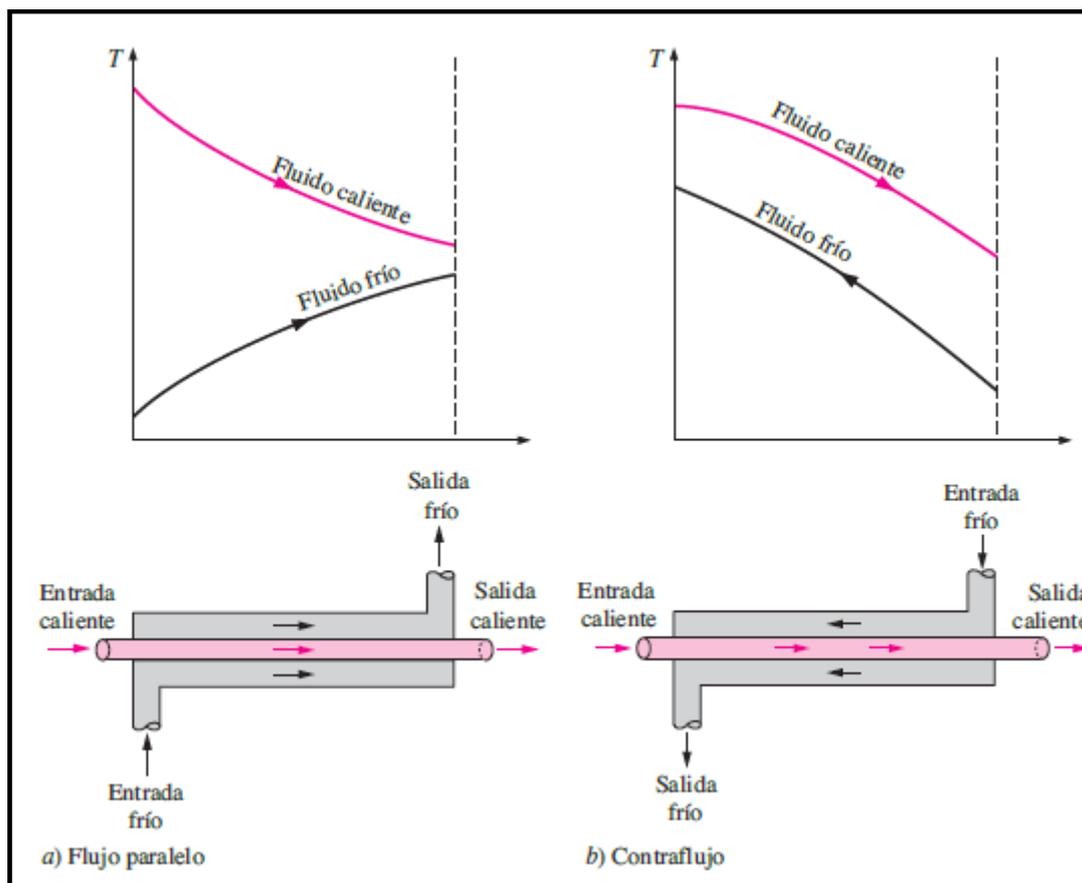


Figura 35. Intercambiador de doble tubo de flujo paralelo y contraflujo.

4.3.2.2. Intercambiadores compactos.

En ocasiones la importancia de las dimensiones de un equipo de intercambio de calor, así como su costo y su peso son relevantes. En el ámbito de la aviación y del automovilismo se requieren equipos ligeros y de dimensiones pequeñas, pero de gran capacidad de intercambio, por lo que un intercambiador compacto resulta una buena elección para estas instalaciones. Este tipo de intercambiador de calor está diseñado para lograr un gran área superficial de transferencia de calor por unidad de volumen, permitiendo lograr grandes velocidades de transferencia entre dos fluidos en un volumen reducido [13]. La relación entre el área superficial de transferencia de calor de un equipo y su volumen se denomina densidad de área (β), todo intercambiador con un valor β mayor de $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ se considera como compacto, por ejemplo, el radiador de un automóvil que consta de un valor de densidad de área de 1.000

m^2/m^3 . El gran área superficial de intercambio que disponen estos equipos se debe al montaje de unas placas delgadas o aletas corrugadas con poco espacio entre sí y las paredes que separan los fluidos.

Los intercambiadores de calor compactos, normalmente, se utilizan cuando se requiere realizar una transferencia de calor entre dos gases o entre un gas y un fluido o viceversa, con el fin de contrarrestar el bajo coeficiente de transferencia de calor asociado con el flujo de gases mediante un mayor área superficial [13].

En este tipo de dispositivos, el movimiento del fluido suele ser de flujo cruzado, es decir, los fluidos circulan perpendicularmente entre sí para realizar la transferencia de calor, siendo de tipo flujo mezclado o no mezclado dependiendo de su configuración. Se denomina flujo cruzado mezclado, cuando uno de los fluidos obtiene libertad para movimientos transversales, es decir, movimientos paralelos a los tubos tal y como se expone en la figura 36a. Un intercambiador compacto de flujo cruzado no mezclado, se compone de de unas aletas de placas que fuerzan al fluido a moverse en un espacio particular entre ellas e impiden el movimiento transversal (figura 36b).

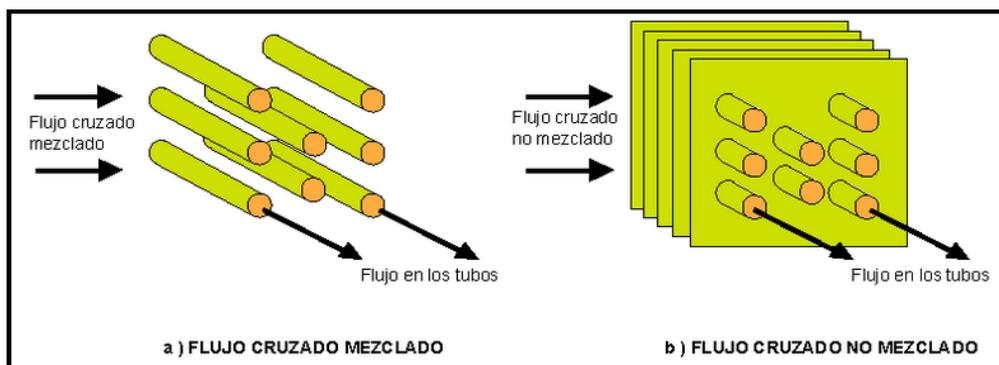


Figura 36. Diferentes configuraciones de flujo en intercambiadores de calor de flujo cruzado.

4.3.2.3. Intercambiadores de casco y tubos / multitubular.

El equipo de transferencia de calor de mayor uso en la industria es el intercambiador de casco y tubos. Éste se forma a partir de un casco denominado coraza, y de un número indefinido (en ocasiones cientos) de tubos alojados paralelamente en su interior [13]. Mientras que uno de los fluidos recorre el interior de los tubos, el otro lo hace por la parte exterior de ellos, recorriendo el casco, y realizando así, la transferencia de calor. El fluido que recorre los tubos antes de entrar en ellos, se acumula en unas zonas grandes de flujo situadas en los extremos del intercambiador llamadas cabezales. En la figura 37, se muestra en un corte transversal la disposición de un intercambiador común de este tipo y el movimiento de los fluidos para el logro de la transferencia.

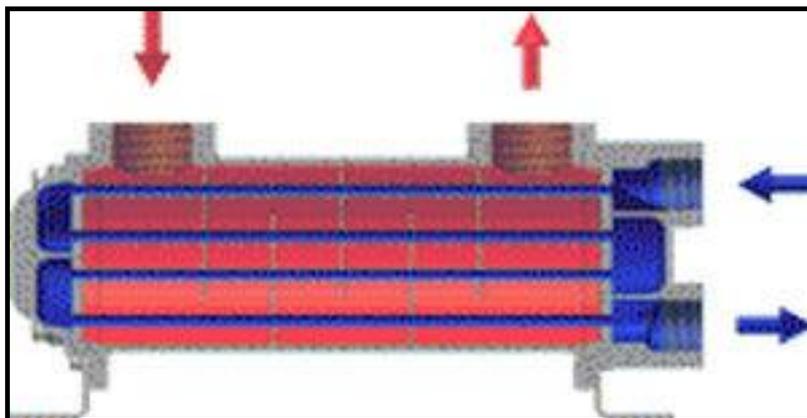


Figura 37. Funcionamiento del intercambiador de casco y tubos.

En el interior de estos intercambiadores suelen instalarse una serie de desviadores en el casco para forzar al fluido a moverse de forma transversal a dicho casco y así, mejorar la transferencia de calor, y también para mantener un espacio uniforme entre los tubos. Este tipo de equipos se clasifican dependiendo del número de pasos que realicen los fluidos por el interior de los tubos o por el casco y por la forma de los tubos [13].

Como presenta la figura 38, este equipo puede disponer de un diseño simple, cuando se compone de un sólo paso por el casco y dos pasos por los tubos, o

de forma más compleja aumentando el número de pasos del casco, así como el de los tubos. El número de pasos de los fluidos dependerá del grado de intercambio que requiera un sistema, teniendo en consideración siempre los efectos que sufren los fluidos y el sistema con la ampliación de los recorridos, así como el volumen del equipo, su costo y su peso.

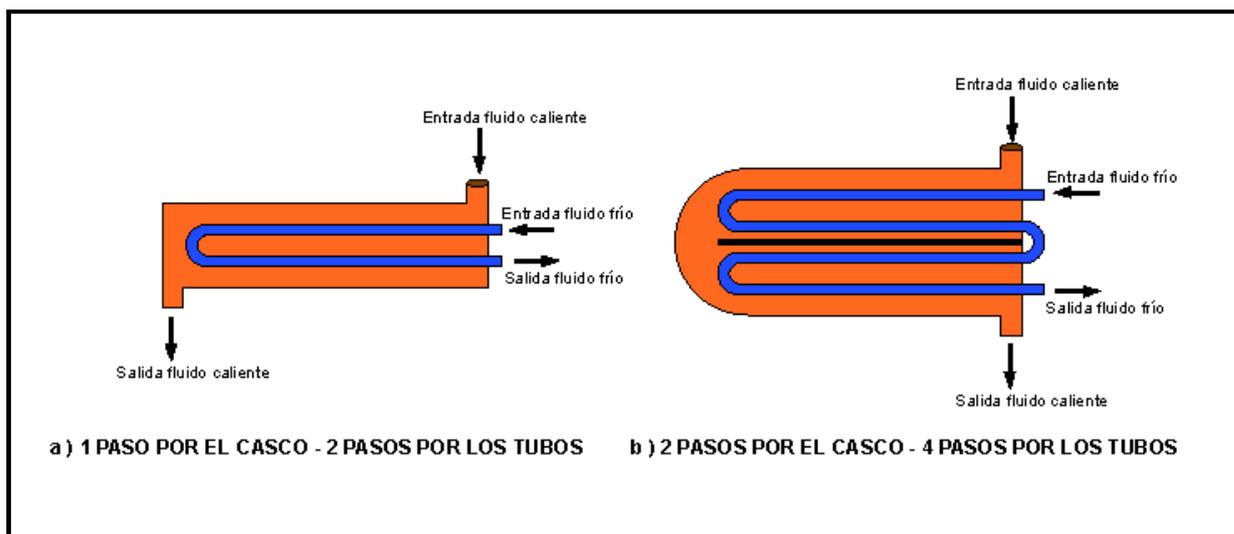


Figura 38. Disposiciones del flujo en pasos múltiples en los intercambiadores de calor de casco y tubos.

Normalmente debido a su tamaño y su peso no resultan de gran interés en sectores o en sistemas que requieran equipos ligeros, ya que se construyen con aleaciones ferrosas, aun así, son los intercambiadores más usados y más estudiados que existen, debido a su gran capacidad de transferencia térmica, su tolerancia a soportar grandes presiones y temperaturas, y a la posibilidad del uso de cualquier tipo de fluido ya sea gas o líquido.

4.3.2.4. Intercambiadores de placas y armazón.

Otro de los intercambiadores con mayor uso tanto en el ámbito de la industria, como en el sector naval, en procesos alimenticios u otros espacios que requieran una transferencia térmica, es el intercambiador de placas y armazón, comúnmente llamado intercambiador de placas. Este equipo resulta ideal en aplicaciones en las que el fluido disponga de una viscosidad relativamente baja y no contenga partículas sólidas. También tienen una eficiencia bastante

notable cuando no existe un salto térmico demasiado grande entre el fluido caliente y el frío.

Construcción.

Aunque son muchos los elementos de construcción de un intercambiador de placas, únicamente son tres los que adquieren mayor importancia para el funcionamiento de este equipo; el bastidor, las placas y las juntas [27].

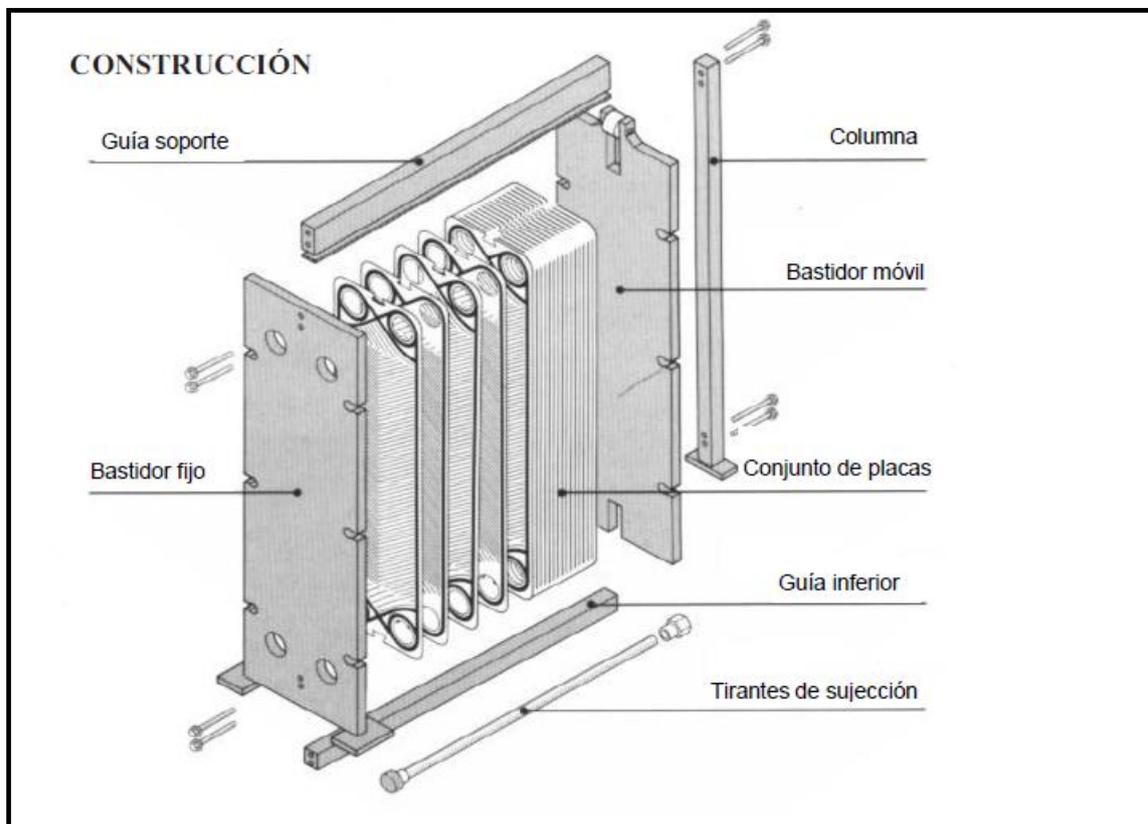


Figura 39. Elementos que componen un intercambiador de placas.

1.-Bastidor.

El intercambiador se compone de un bastidor con placa frontal fija, en el cual se pueden apreciar cuatro agujeros, donde van instaladas unas conexiones normalmente roscadas a las tuberías de entradas y salidas de los dos fluidos. Un bastidor con placa de cierre móvil también forma parte del intercambiador,

éste se desplaza por un carril guía y se fija y aprieta mediante pernos. Dependiendo de la instalación, en algunos casos se debe recurrir a una construcción multipaso, en estos casos, las entradas y salidas de los circuitos ya no se encuentran sólo en la placa fija del intercambiador, sino que también ocupan la placa móvil. Estos bastidores normalmente suelen ser fabricados de titanio, acero inoxidable, monel (níquel-cobre), hastelloy [28], y otras aleaciones normalmente resistentes a la humedad y a la corrosión. Las barras guías superior e inferior son elementos importantes también, ya que es donde van alojadas las placas del intercambiador.

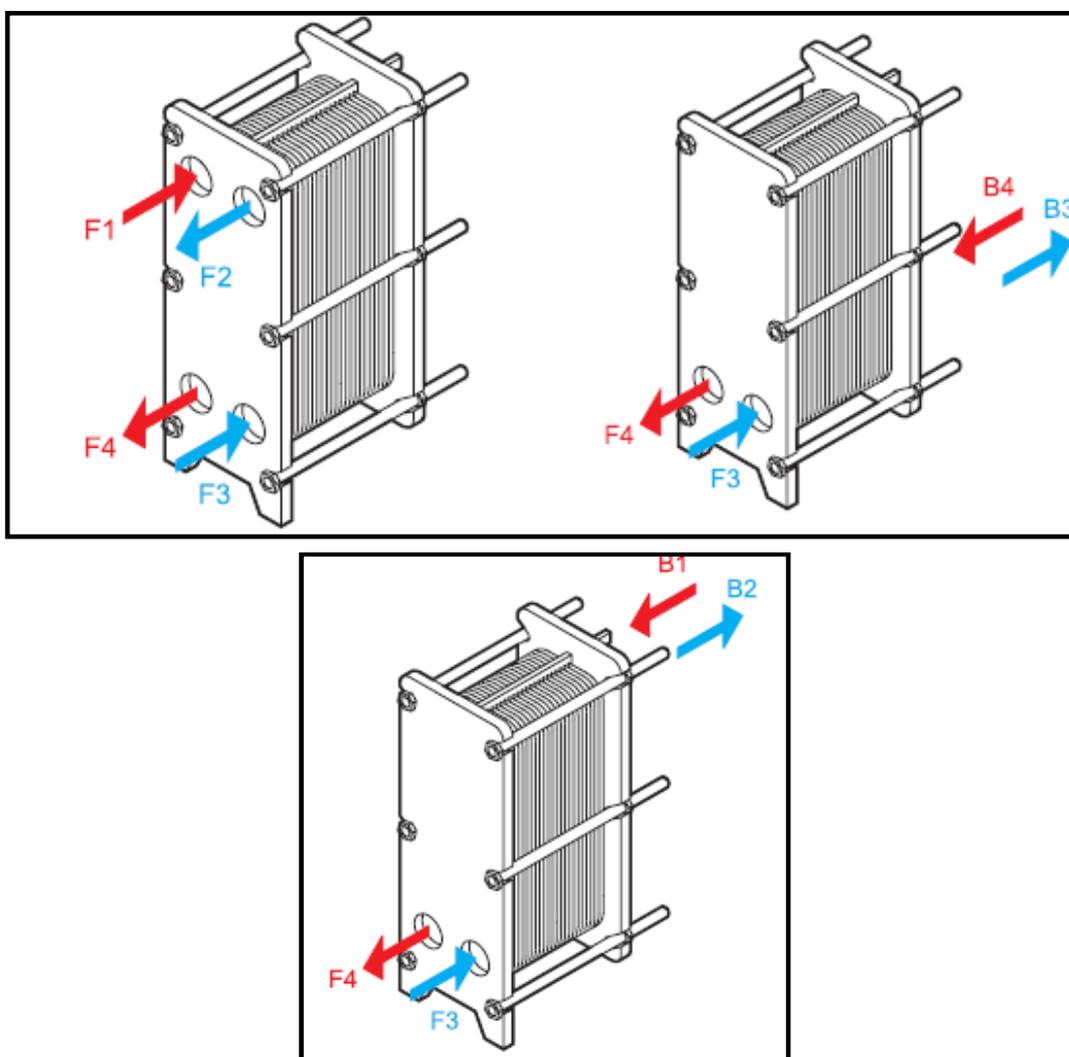


Figura 40. Diferentes disposiciones de las conexiones de entrada y salida de los fluidos en los bastidores.

2.-Placas.

Las placas sin duda es el elemento más importante del equipo, ya que en su superficie es donde se realiza el intercambio de calor entre los dos fluidos. Estas placas se alojan una tras otra en los carriles guía del intercambiador, a continuación se prensan en conjunto con el bastidor móvil y con ayuda de los pernos, para evitar así su movimiento y con ello pérdidas de fluido. Además, disponen de agujeros acordes con los bastidores llamados canales por donde circularán los fluidos. Su fabricación se compone de aceros inoxidables como el titanio, el AISI 304 [29], AISI 316 [29], aceros resistentes a las corrosiones producidas por el agua o fluidos con componentes químicos.

Estas placas de acero inoxidable poseen una superficie corrugada con variación de diseños con el fin de, lograr un movimiento específico del fluido en la placa y obtener un alto coeficiente de transferencia de calor. Tanto la elección del diseño como del material de construcción y las medidas del paso, dependerán del tipo de fluido que recorra el sistema, de su densidad, de la presión y temperatura, de ello dependerá también si se requiere una combinación de los distintos diseños de las placas para el mismo intercambiador. Existen numerosos tipos de placas los cuales pueden clasificarse; por su tamaño, por su corrugación, por su tipo de sellado, por su tipo de soldadura, o bien por su geometría. Algunos de los diseños de mayor uso se describen a continuación [30].

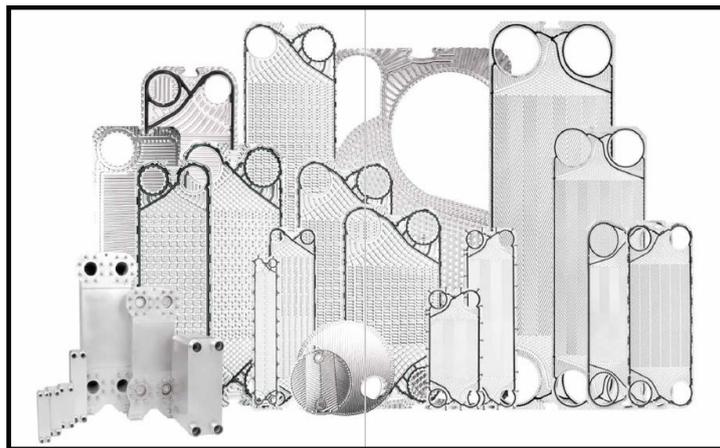


Figura 41. Diferentes formas y tamaños de las placas del intercambiador.

Placas de flujo libre: diseñadas para que no exista ningún punto de contacto metal-metal entre las placas, estas placas permiten el uso de fluidos que contengan partículas y fibras de hasta 2mm de diámetro y 5mm de longitud [30]. Su ámbito de aplicación principalmente es en industrias alimentarias.

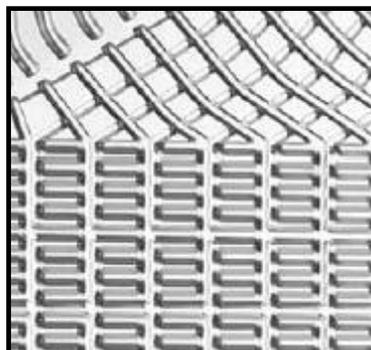


Figura 42. Placas de flujo libre.

Placas de doble pared: el tipo de doble pared proporciona doble seguridad a la hora de evitar la mezcla de los dos fluidos, en caso de pérdidas por perforaciones de las placas. En estos casos el fluido se elimina al exterior a través de la cámara de aire existente entre la doble capa, lo cual permite también la visualización de las pérdidas. El inconveniente de la instalación de este tipo de placas es el costo de fabricación ya que dispone de un diseño más complejo que el convencional. Hay instalaciones en las que se precisan este

tipo de placas, para evitar la mezcla de fluidos y la contaminación entre ellos, siendo estos, por ejemplo, fluidos con componentes químicos o alimenticios.



Figura 43. Placas de doble pared.

Placas semisoldadas: su aplicación engloba los procesos en los que uno de los fluidos precisa altas temperaturas y altas presiones, así como en procesos químicos donde los fluidos son agresivos para un intercambiador de placas convencional. El conjunto de placas está formado por un par de placas soldadas entre sí y unidas mediante juntas, lo cual facilita su desmontaje y limpieza.

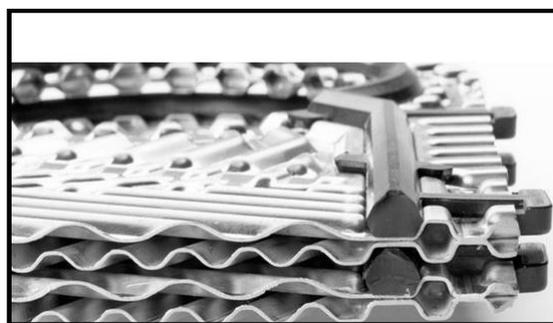


Figura 44. Placas semisoldadas.

Placas soldadas: los intercambiadores de calor que incorporan este tipo de placa trabajan como un intercambiador tubular tradicional, en el cual se ha sustituido el haz tubular por un conjunto de placas de mayor rendimiento. El paquete formado por estas placas soldadas va montado dentro de una carcasa cilíndrica. Este tipo de intercambiador tiene como ventaja la carencia de juntas, pudiendo trabajar a temperaturas de hasta 250 °C y presiones de más de 25

bar, como los que se requieren con el vapor o aceites térmicos [31]. La soldadura de las placas se realiza normalmente con un 99% de cobre.



Figura 45. Placas soldadas.

Placas circulares convencionales y soldadas: este diseño de placas resulta menos común que el resto, y se caracteriza por su geometría circular [30]. El trabajo del intercambiador de placas circulares convencional trabajar como un intercambiador de placas común y su ámbito resulta el mismo con la única diferencia de ser circular, por otro lado, el de placas soldadas su trabajo y aplicación resulta ser como el del caso anterior, lo hace como un intercambiador de tubos, siendo las placas más eficientes.

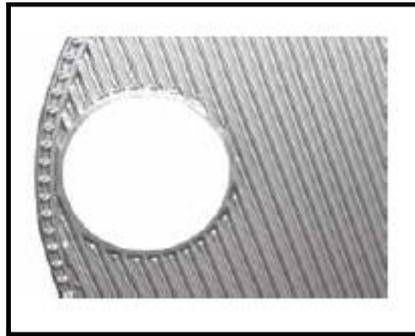


Figura 46. Placa circular.

Placas convencionales: son las placas que normalmente se pueden encontrar en un intercambiador convencional de este tipo [32]. Se establecen en sistemas en los cuales el fluido no adquiere presiones ni temperaturas elevadas, en los que pequeñas mezclas de fluidos que puedan existir en roturas de placa no resulten muy dañina para el proceso, y en los que se desea un sistema económico, dado que estas placas son de menor costo que las anteriores. Dos tipos de modelo de corrugación ponen la base a los distintos diseños de las placas, el tipo H y el L, que están conformados con dos ángulos diferentes de estampado, uno con un ángulo obtuso con un coeficiente alto de transmisión y otro con un ángulo agudo con una pérdida de carga baja. En los procesos de intercambio de calor con placas puede darse el caso de que la instalación se forme con placas base L o H, o con combinaciones entre ambas y otros modelos de superficie.

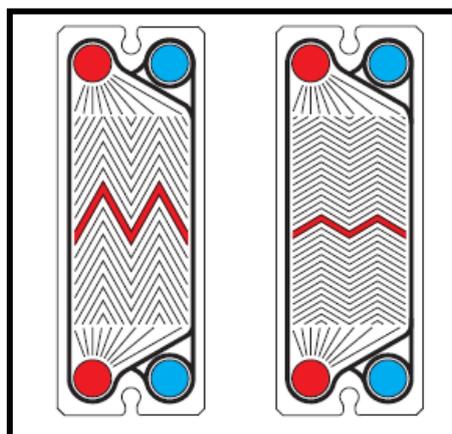


Figura 47. Modelos de placa L (ángulo agudo) y H (ángulo obtuso).

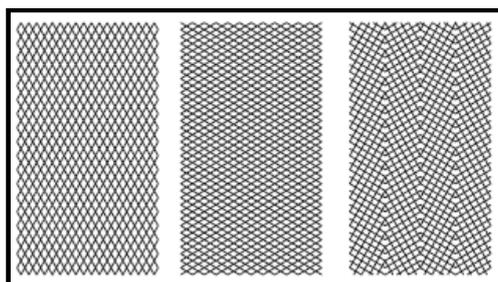


Figura 48. Combinación de los estampados L y H con otras corrugaciones.

3.-Juntas.

En los canales de cada placa se incorporan juntas, cuya misión es la de independizar cada circuito evitando que el fluido circule por donde no le corresponde y evitar también, las fugas de fluido al exterior. El material de las juntas se selecciona dependiendo de la presión, temperatura, características de los fluidos y otras consideraciones como el tipo de placa, su colocación, y su sujeción. No obstante, las juntas de polímeros de caucho, gomas y otros derivados similares son las de mayor uso [32], tal y como se muestra en la tabla 3.

FLUIDO PRIMARIO		FLUIDO SECUNDARIO	CALIDAD DE LAS JUNTAS	CALIDAD DE LA PLACA
AGUA	GLICOLADA 20% AL 50%	AGUA	NITRILO	304 ó 316
	HASTA 120°C y 16 bar HASTA 150°C y 6 bar	AGUA	EPDM	304 ó 316
	HASTA 90°C y 12 bar	AGUA	NITRILO	304 ó 316
	TERMAL HASTA 120°C y 16 bar	AGUA	NITRILO / EPDM	TITANIO
	AGUA DE MAR	AGUA ó AGUA DE MAR	NITRILO / EPDM	TITANIO
	AGUA DE RÍO ó POZO	AGUA	NITRILO	316 ó TITANIO
VAPOR	VAPOR HASTA 4 bar	AGUA	EPDM	316
	VAPOR HASTA 0,5 bar	ACEITES	NITRILO	316
	VAPOR HASTA 4 bar	AGUA DE PROCESOS	EPDM	316
ACEITE	ACEITES SAE	AGUA	NITRILO	304
	ACEITE VEGETAL	AGUA	NITRILO	316

Figura 49. Elección del material de las juntas según las necesidades del sistema.

Juntas de NBR-Nitrito peróxido (goma de nitritobutadieno) [33]: este compuesto tiene mayor resistencia que el nitrito normal y resulta muy resistente a los aceites e hidrocarburos. Gracias a la composición de acrilonitrilo, aumenta su resistencia frente a la temperatura/presión. Tiene muy buena memoria elástica después de su deformación, debido al enfriamiento y calentamiento que sufre en el intercambiador. Su uso es aconsejado para funcionamientos discontinuos o temperaturas muy variables de los intercambiadores.

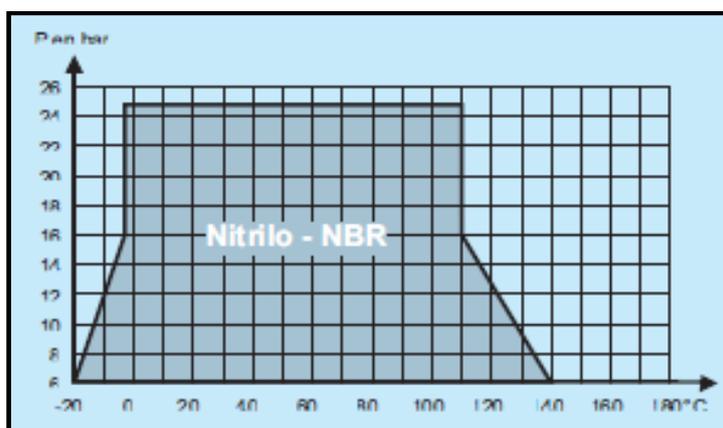


Figura 50. Gráfico del comportamiento del NBR-Nitrito frente a la presión/temperatura.

EPDM peróxido (caucho de etileno propileno-dieno) [34]: este polímero posee muy buenas propiedades mecánicas unidas a una excelente resistencia al envejecimiento. No obstante las juntas fabricadas con este material poseen una memoria elástica peor a la del NBR, y pueden generarse pequeñas fugas durante los procesos de enfriamiento, calentamiento y parada del intercambiador, aunque este fenómeno deja de afectar cuando el intercambiador llega al régimen normal de funcionamiento. Esta calidad de juntas se emplea especialmente en procesos de intercambio térmicos con temperaturas y presiones altas, cuyo régimen de funcionamiento es muy estable.

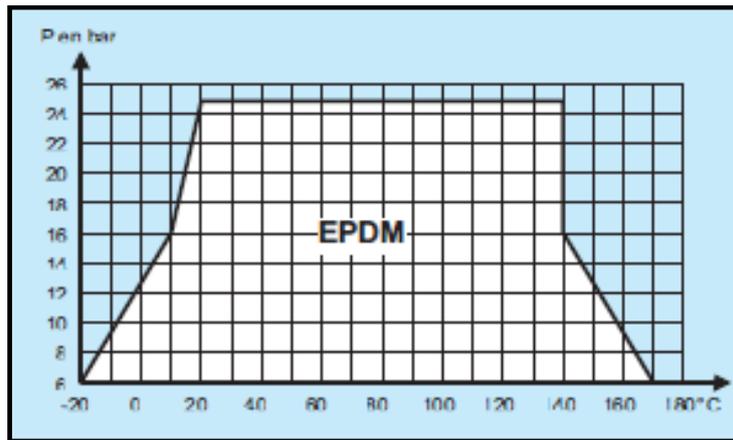


Figura 51. Gráfico del comportamiento del EPDM frente a la presión/temperatura.

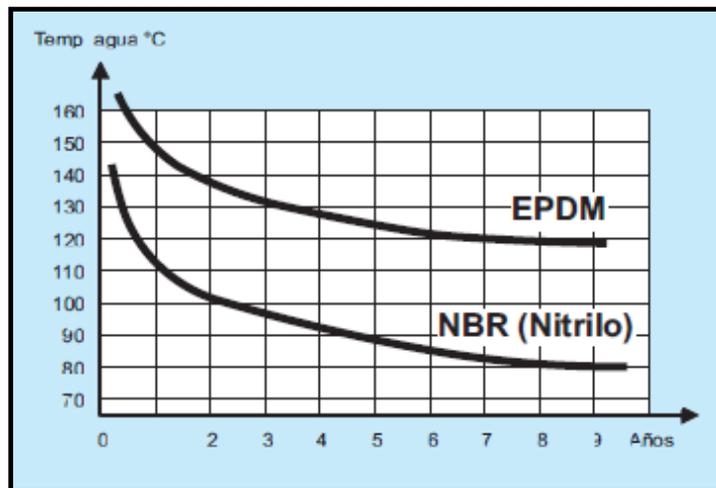


Figura 52. Gráfico comparativo entre EPDM y NBR-Nitrilo temperatura/tiempo.

Flúor G, Vitón B (fluoroelastomeros), Vitón-FPM [35]: son juntas con una excelente resistencia a las agresiones químicas que se utilizan en procesos especiales donde las juntas de NBR o EPDM no resistirían. Son materiales especiales y por ello el costo resulta más elevado que el resto.

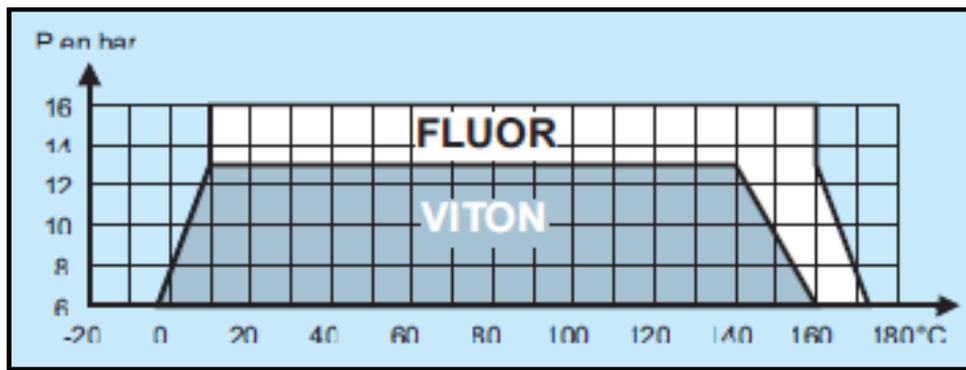


Figura 53. Gráfico del comportamiento del Flúor y Vitón frente a la presión/temperatura.

Funcionamiento del intercambiador de placas.

Cada placa del intercambiador de acero inoxidable y de superficie corrugada queda sellada con juntas de caucho sintético, las cuales sella un canal de flujo permitiendo dirigir al fluido caliente y al frío hacia diferentes canales.



Figura 54. Acople de la junta a la placa del intercambiador.

La primera placa del sistema, es decir, la placa que se sitúa después del bastidor se denomina placa "D" o placa ciega. Esta placa contiene juntas que cubren los dos canales de flujo evitando que los fluidos entren en contacto directo con el bastidor fijo y evitar así, su deterioro. A continuación, se

introducen las placas de transferencia de calor “A” y “B” de patrones idénticos. Estas placas se encuentran alineadas y prensadas unas a otras entre los dos bastidores y sujetas a las barras guías. La diferencia entre estas placas reside, en que la placa “B” se coloca de manera inversa a la placa “A”, y ambas van dispuestas de manera intercalada. Esto es vital para que el fluido caliente y el frío circulen por canales alternos, y ello se consigue gracias a las juntas de caucho sintético.

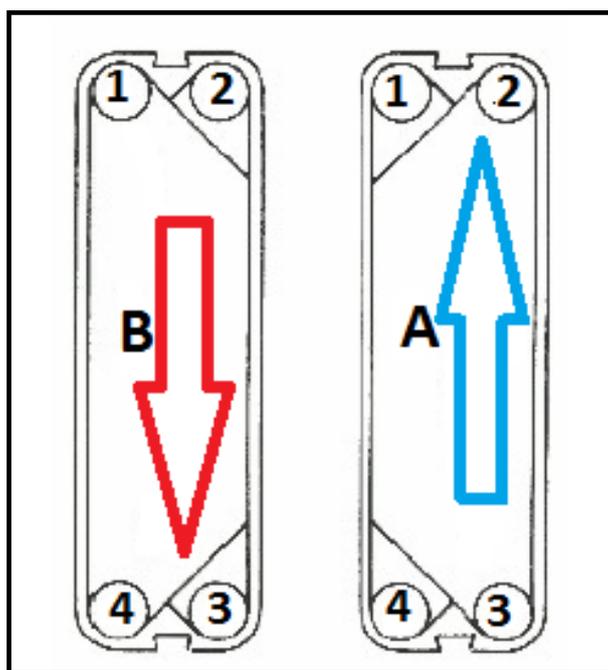


Figura 55. Orientación de las placas “B” y “A”.

Como se expone en la figura 55, al colocar la placa de manera inversa, la disposición de las juntas queda de manera diferente, definiendo así los canales. En el caso de la placa “A” el fluido entrará en la placa por el orificio 3 y recorrerá la placa con un movimiento ascendente con la ayuda de la presión y el corrugado de la placa hasta su salida 2. La placa alterna “B”, realiza la operación de manera similar, el fluido caliente entrara al sistema por el número 1, y saldrá por el 4, sin haber contacto físico alguno con el otro fluido, gracias a que la junta impide el paso al número 2 y 3.

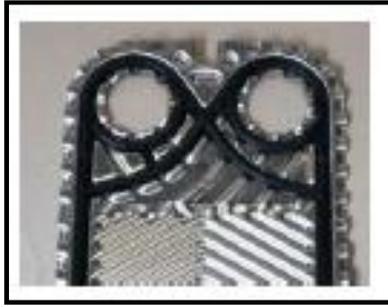


Figura 56. Placa "D".



Figura 57. Placa "B".



Figura 58. Placa "A".



Figura 59. Última placa (bastidor móvil).

En el intercambiador de calor de placas la transferencia térmica se desarrolla como se muestra en la figura 60. El fluido frío hace su ingreso en el equipo por la tubería inferior derecha, el fluido sigue su camino a través de la placa ciega “D” llegando a todas las placas “A” que se encuentran intercaladas. Debido a la disposición de las juntas, el fluido frío se transfiere únicamente por las placas “A”, llegando hasta la parte superior derecha por donde sale.

El fluido caliente hace su entrada por la parte superior izquierda, y circula por las placas “B” intercaladas, la disposición de las juntas permite que el fluido se transfiera por estas placas hacia la zona inferior, realizando su salida por la parte inferior izquierda.

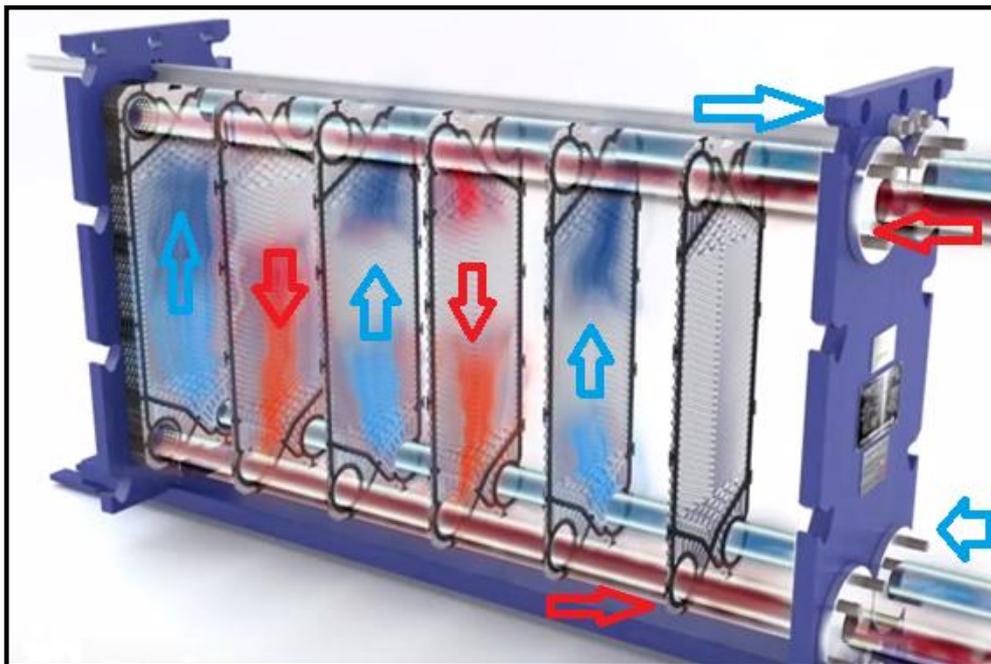


Figura 60. Funcionamiento del intercambiador de placas.

Los dos fluidos se encuentran en contracorriente en los canales alternos creados por las placas. La corrugación de las placas provoca un flujo en torbellino que aumenta la eficiencia de intercambio térmico y protege la placa contra la presión diferencial. Una fracción del fluido caliente se transfiere por convección hacia el foco frío, el cual permite alcanzar la temperatura de trabajo deseada.

Ventajas y desventajas del intercambiador de placas.

Comparando el intercambiador de tipo de placas con algún otro tipo de uso común como el intercambiador multitubular, se encuentran numerosas ventajas lo suficientemente significativas como para instalar en un proceso, un intercambiador de placas en lugar de uno tubular si éste lo permite.

VENTAJAS	INCONVENIENTES
<p>Normalmente el intercambiador de placas ocupa el 20% del espacio que necesita uno multitubular con la misma capacidad y necesita menos espacio para su mantenimiento.</p>	<p>Con estos equipos no se puede trabajar a altas presiones, debido a que la unión de las placas no lo soportaría.</p>
<p>Tiene mayor eficiencia térmica debido a la elevada turbulencia generada en los canales.</p>	<p>Son incapaces de trabajar con temperaturas mayores de 300° f.</p>
<p>Al ser más eficiente es necesaria menos superficie de intercambio, por lo que se trata de un equipo más ligero.</p>	<p>No es posible el uso de cualquier tipo de fluido.</p>
<p>Los intercambiadores de placas desmontables, permiten ampliar o reducir su capacidad, añadiendo o retirando placas si las condiciones varían y ello se requiere. También resulta más sencillo a la hora de limpiarlos y de efectuar el mantenimiento.</p>	
<p>La construcción de los intercambiadores de placas no consta de zonas muertas donde el fluido pueda acumularse y crear suciedad.</p>	
<p>La elevada eficiencia de estos equipos permite un intercambio deseado con menor aporte energético.</p>	

Tabla 3. Ventajas y desventajas del intercambiador de placas frente al multitubular.

Mantenimiento y limpieza.

Afortunadamente este tipo de intercambiador no es propenso a acumulaciones de suciedad o corrosión, pero la limpieza es una parte indispensable del mantenimiento que siempre hay que realizarle a un equipo [37]. Ésta tarea se puede realizar manualmente o mediante el sistema CIP (cleaning in place) [38]. Debido a que la construcción de este intercambiador permite un fácil desmontaje del mismo, únicamente se deberá extraer cada placa y limpiarla con ácidos como; el nítrico y cítrico, aclararlas con un chorro de agua convencional, y secarlas a continuación.

El sistema CIP de limpieza se realiza cuando se emplean en el intercambio térmicos fluidos corrosivos y peligrosos, y se requiera efectuar un lavado profundo sin la necesidad de abrir el intercambiador. En este caso se vaciará el circuito del intercambiador por completo, a continuación, se pondrá en circulación agua dulce para limpiar el fluido que quede aún en el sistema. Una vez más, se vaciará y se retirará el agua dulce para después conectar el intercambiador la unidad CIP. Esta unidad dispone de un almacén con productos químicos de limpieza de placas. Una vez se encuentre conectado al circuito, con la ayuda de una bomba centrífuga, la química de la unidad CIP recorrerá el intercambiador por completo, dejándolo libre de incrustaciones e impurezas. A continuación, se realizará la misma operación en el circuito del otro fluido para después aclarar de nuevo los dos circuitos con agua dulce.



Figura 61. Unidad CIP.

También es posible limpiar el sistema del intercambiador de agua realizando un contraflujo. Esta operación se realiza a menudo en el sector marino, los buques normalmente disponen de este tipo de intercambiador de calor para el enfriamiento del agua destilada de la refrigeración de los motores principales con agua salada del mar.

A pesar de que la tubería de aspiración de agua de mar dispone siempre de un filtro para evitar que el biofouling [39] y otros posibles sólidos entren en el sistema, es habitual que parte de estas sustancias logren entrar. Pequeñas incrustaciones en los intercambiadores de calor hacen elevar la presión del sistema, por ello debe limpiarse asiduamente. Por otro lado, el buque en la mayoría de ocasiones no dispone de tiempo para desmontar y limpiar el intercambiador, ni para conectar la unidad CIP y vaciar los circuitos, por ello se realiza un contraflujo. Con ayuda de las bombas de circulación de agua y abriendo y cerrando las oportunas válvulas de entrada y salida de intercambiador, es posible hacer que el fluido recorra en sentido contrario el circuito limpiando el intercambiador. Este método no resulta tan efectivo como los anteriores, pero debido a la falta de tiempo disponible, es aconsejable realizarlo con frecuencia.

La limpieza no es el único mantenimiento que debe realizarse en un intercambiador, ciertamente es el de mayor importancia, pero muchos otros deben llevarse a cabo para que el intercambiador opere a su máxima plenitud. Algunas de estas ensayos son; verificar el estado de las juntas, limpiarlas, o sustituir las si ello lo requiere y comprobar también su ajuste, así como, su adherencia a la placa. Revisar el apriete de los pernos que mantiene compactas las placas y el bastidor, y efectuar exhaustivas búsquedas de problemas y soluciones para el equipo.

Búsqueda de problemas y soluciones.

Es normal encontrarse con problemas en los intercambiadores de calor de placas, así como, en cualquier otro equipo de una instalación. Por otra parte, la realización de un buen mantenimiento evita en muchos de los casos algunos

de ellos. Sin embargo, en ocasiones los problemas y averías son imprevistos y algunos se presentan frecuentemente [27], [38].

Pérdidas de flujo al exterior: este problema puede originarse por varios motivos; debido a que las juntas no estén bien colocadas en su cavidad, debido al montaje erróneo del paquete de placas, o bien por daños en la superficie de las placas. Como solución a este problema, deberá hallarse el motivo de la pérdida y sustituir la junta o la placa si la situación lo requiere, o desmontar las placas y realizar un montaje nuevo siguiendo las indicaciones de los manuales de montaje, y comprobar después, el apriete de los pernos del bastidor. Estas pérdidas al exterior llegan a tener gran peligro cuando se trabaja con fluidos tóxicos que afectan al trabajador y a la instalación.

Pérdidas de carga y variaciones en la temperatura: normalmente este problema se origina por incrustaciones, suciedad o atasco en las placas o en el circuito en general. Por lo que, su solución radica en una limpieza y una revisión del estado del circuito.

Mezcla de fluidos: a menudo sucede que existe una mezcla del fluido caliente y el fluido a calentar, en este caso el problema se origina normalmente porque las tuberías tienen mala conexión con el intercambiador, o cuando existen perforaciones en las placas o un mal montaje de ellas. Comprobar el estado de apriete, conexiones, y montaje del intercambiador es la solución a este problema.

Ámbito de uso.

Como se ha mencionado anteriormente, el ámbito de uso de este tipo de intercambiadores es muy amplio debido a las ventajas que ofrece en el proceso de intercambio de energía y a su disposición y espacio. Este equipo se puede encontrar en el sector de la industria funcionando como un recuperador de calor, como equipo en procesos químicos y farmacéuticos, trabajando con aceites térmicos y en el sector del automovilismo. En el mundo de la ingeniería el intercambiador de placas también tiene un uso relevante, como por ejemplo; en plantas nucleares, en proceso de cogeneración o de calefacción. En el

sector alimentario también se instala este equipo; en industrias de lácteos, en alcoholeras y en las fábricas de zumos y otras bebidas. El sector marino es otro de los ámbitos donde es frecuente la instalación de estos equipos, se pueden encontrar; en los procesos de refrigeración de los motores y en los enfriadores de aceites, en la recuperación de calor y en generación de vapor.

4.3.2.5. Intercambiadores de espiral.

El intercambiador de espiral es un equipo que no se encuentra tan normalizado como el resto, su presencia es bastante escasa en los diferentes sectores y procesos en los que ya predominan otro tipo de equipos [40]. La falta de uso del intercambiador de espiral no se debe únicamente a la consideración de las ventajas y desventajas que ofrece en un sistema, sino que también, influye el hecho de que este equipo es relativamente innovador y aún no se ha investigado y experimentado a fondo como con el resto de equipos, y ello crea desconfianza en la efectividad del equipo en un proceso, y de su durabilidad en el tiempo.

Los intercambiadores de espiral, en inglés llamados; “Spiral Heat Exchanger” (SHE), se originaron en Suecia hace aproximadamente 40 años en el ámbito de la industria del papel [41]. Los materiales de construcción y las capacidades de este tipo de intercambiador son similares a las de un intercambiador de placas. La capacidad del uso de fluidos con altos niveles de viscosidad y de partículas sólidas da a este equipo, su ventaja respecto al resto de intercambiadores, y su exclusividad en las instalaciones de uso de este tipo de fluidos.

Espacios entre canales:	5–70 mm (0.197– 2.76 in.)
Anchura del canal:	50–2000 mm (2–79 in.)
Superficie por unidad:	0.1–800 m ² (1.1– 8610 ft ²)
Presión de diseño:	Vacuum→45 barg (Vacuum→653 psig)
Temperatura de diseño:	-100→450°C (-148→840°F)
Códigos disponibles	AD-2000, PED, ASME, AS1210, etc.
Materiales	Acero al carbono, acero inoxidable, acero inoxidable dúplex, aleaciones de níquel (p. ej., Hastelloy, Nicrofer, Inconel, Monel), titanio
Certificaciones de calidad	ISO 9001:2000, SQL, GOST, Sello coreano, SVTI

Figura 62. Características de los intercambiadores de espiral.

Construcción.

El intercambiador de espiral o SHE (Spiral Heat Exchanger), es un tipo de intercambiador compacto. Su diseño consiste en dos láminas enrolladas alrededor de un colector central de forma cilíndrica, que forman dos canales de metales relativamente largos e independientes, por donde fluyen dos tipos de fluidos con el fin, de efectuar una transferencia térmica [41]. Las dimensiones de estos canales se ajustan a las necesidades de la instalación, es decir, es posible encontrar dentro del mismo intercambiador las mismas dimensiones para ambos fluidos, o distintas. En este último caso, deberán diseñarse por separado teniendo en consideración las presiones, temperaturas y la viscosidad del fluido que soportara cada canal.

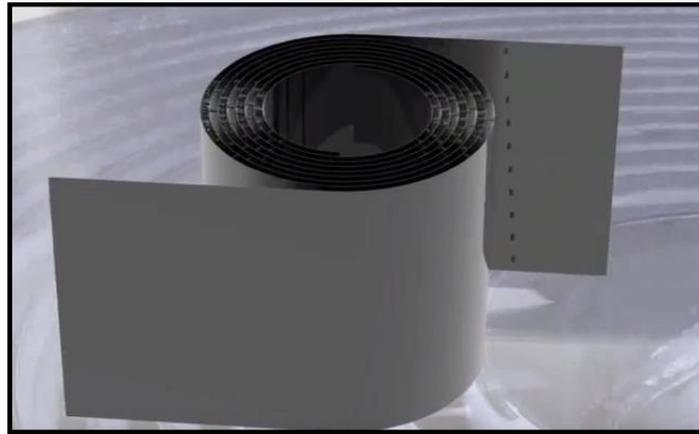
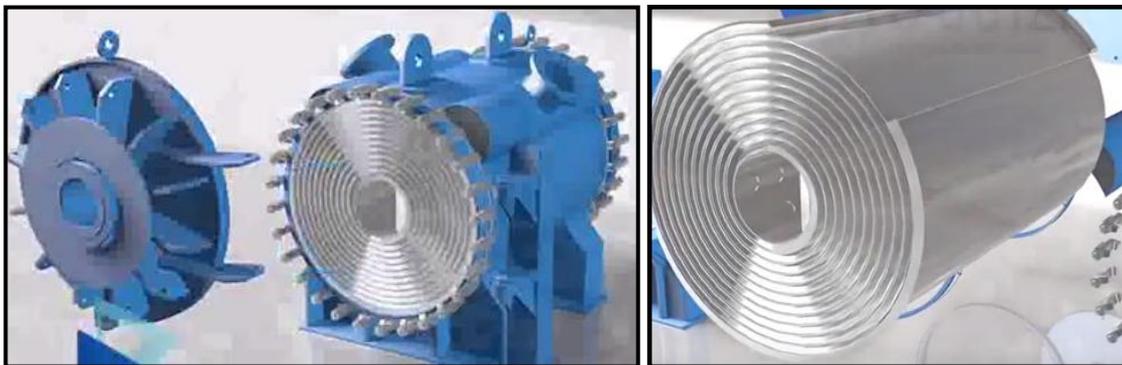


Figura 63. Espiral del intercambiador formado por dos laminas enrolladas entre sí.

El sellado del equipo es fundamental para evitar la mezcla de los dos fluidos, esto se consigue gracias a unas soldaduras a doble cara que cierran los extremos de los dos canales en espiral. El bloque de espiral se encuentra alojado en una carcasa cilíndrica y encerrada mediante uno o dos bastidores fijos o móviles dependiendo del modelo de acceso al interior del intercambiador [42].



a)

b)

Figuras 64. a) Interior del intercambiador de calor en espiral. b) Bloque de espiral.

El bastidor móvil sella a la carcasa mediante pernos alojados en el perímetro circular de él y adaptadores de ganchos forjados. Para evitar pérdidas de fluido al exterior por el bastidor o mezclas entre ambos fluidos, los bastidores móviles disponen de juntas de fácil colocación que cubren toda la superficie. En el caso

de que exista un bastidor fijo, éste irá soldado al bloque de placas y a la carcasa. Los colectores de fluido de entrada y salida al intercambiador que se encuentran en la carcasa, se conectan al bloque de espiral, y los colectores que se encuentran en ambos bastidores del intercambiador, ya sea móvil o fijo, conectan con el núcleo del intercambiador.

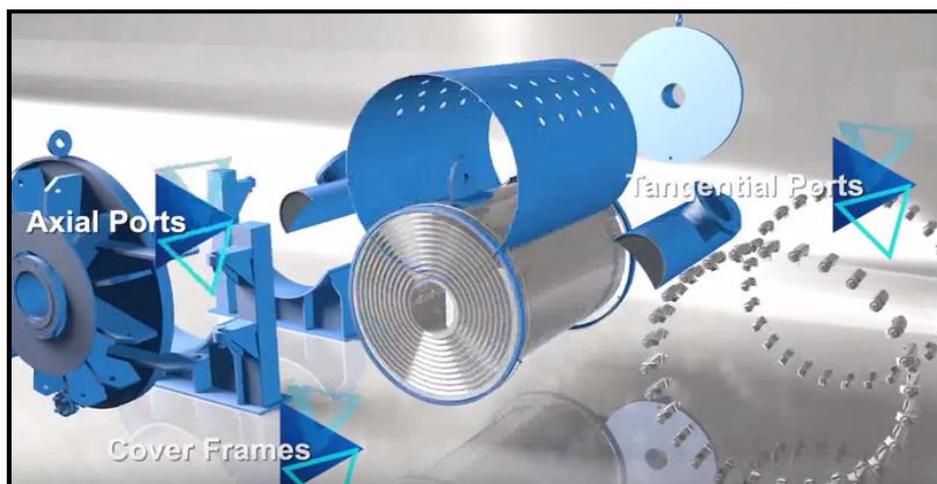


Figura 65. Despiece del intercambiador de espiral.

Las láminas metálicas que forman los canales, poseen unos refuerzos (studs) soldadas o atornilladas a una de sus caras para evitar deformaciones causadas por las temperaturas y presiones del fluido y para asegurar la separación constante de las láminas en todo el recorrido del intercambiador [43]. Estos pilares, se fabrican normalmente del mismo material del bloque de espiral y su tamaño, diseño y el número de ellos dependerá de las dimensiones de los canales, del tipo de fluido con el que se trabaje y sobre todo, del valor de las presiones y temperaturas que se establezcan en el proceso. Normalmente el canal por el que circula el fluido con mayor viscosidad suele diseñarse con mayor paso y por lo tanto con studs más largo, para que el fluido pueda circular con mayor libertad.

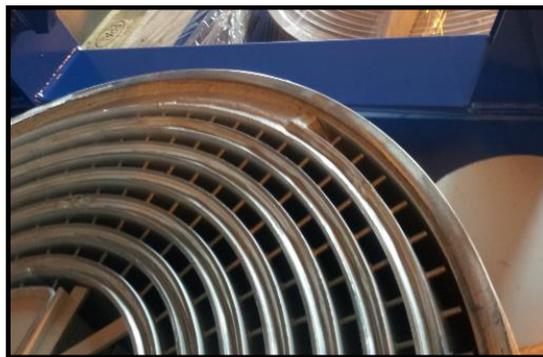


Figura 66. Refuerzos soldados en los canales de espiral.

El núcleo es otro de los elementos importantes del que se compone el intercambiador, se forma a partir de un cilindro y éste se divide en dos partes. Por una parte, el cilindro queda hueco con o sin refuerzos, dependiendo de su diseño para evitar deformaciones por presiones. Este núcleo accede por un lado a la espiral y por el otro a uno de los bastidores, y con ello a una conexión de entrada o salida del fluido. Por la otra parte del cilindro, el flujo queda encerrado dentro del núcleo para evitar mezclarse con el otro fluido, teniendo este también acceso al exterior de intercambiador y a la espiral.



a)

b)

Figuras 67. a) Núcleo del intercambiador con refuerzos. b) Núcleo del intercambiador sin refuerzos.

Dentro del intercambiador de espiral se encuentran diversos diseños, los cuales se clasifican según la disposición de los flujos. Hay instalaciones en las

que una de las sustancias fluye por un canal totalmente libre mientras que el otro queda encerrado en ambos lados de la placa. Por lo que el conjunto de espiral se equipa con cubiertas para crear tres tipos de diseño de flujos [40]:

Ambos fluidos en canales de espiral: este tipo de construcción es la más común de encontrar en las instalaciones, y es el que hace mención al nombre de intercambiador de espiral. Su uso son las instalaciones en los que se desea que el intercambiador realice el proceso con los fluidos a contracorriente. Entre sus aplicaciones se encuentran; procesos de biogás, refrigeración de líquidos etc. (Figura 68. Tipo 1)

Un flujo en el canal de espiral y el otro con movimiento axial a través del espiral: su uso general son los evaporadores, condensadores, calentadores y refrigeración de gases. (Figura 68. Tipo 2)

Uno de los fluidos recorre el espiral y el otro se mueve con una combinación en forma axial y de flujo en espiral: sus aplicaciones son en condensadores con postenfriadores incorporados y vaporizadores. (Figura 68. Tipo 3)

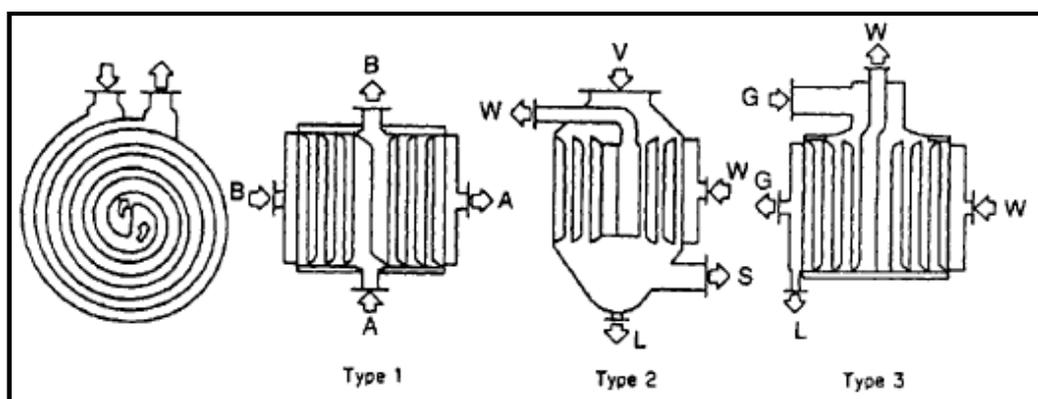
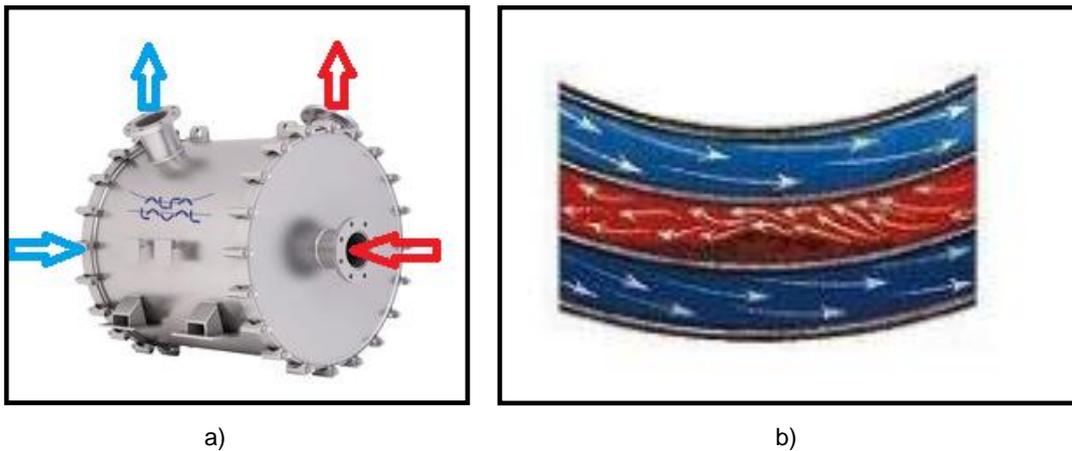


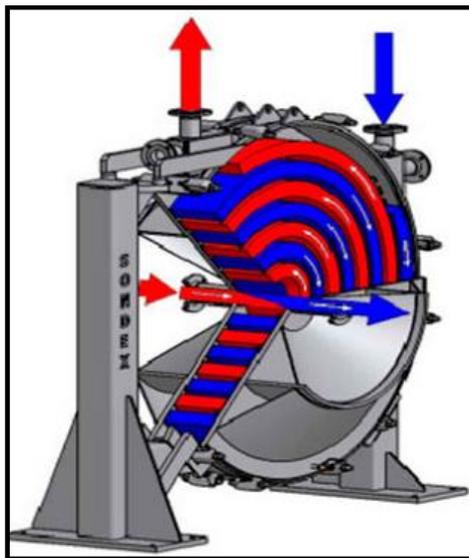
Figura 68. Distintos diseños de construcción del intercambiador de espiral.

Los intercambiadores de espiral se encuentran fabricados de materiales con los que se pueda trabajar en frío y soldar fácilmente, estos materiales además, deben ser resistentes a desgastes y corrosiones producidas por los fluidos. Los materiales más típicos usados en la fabricación son; los aceros al carbono y



Figuras 70. a) Entradas y salidas de los flujos en un intercambiador de espiral. b) Disposición de la dirección de los fluidos en contraflujo.

Los fluidos una vez se encuentren en el interior del intercambiador, recorrerán su canal en espiral de manera en la que se muestra en la figura 71, completándose un intercambio de energía térmica. Los ángulos de curvatura de las placas y la forma de su superficie, obligan a los fluidos a moverse entre curvas y se forman turbulencias en el flujo [41]. Gracias a esa turbulencia, existe una mejora notable en la eficacia de transferencia de calor, y reduce la suciedad, evitando que las partículas se acumulen en cualquier punto del recorrido. Cuando los fluidos realicen todo el circuito, cada uno saldrá por la conexión al exterior que le corresponda, terminado así, con el proceso de intercambio térmico por espiral.



Figuras 71. Funcionamiento del intercambiador de espiral.

Mantenimiento de los intercambiadores en espiral.

El intercambiador de espiral resulta un equipo sencillo de manipular a la hora de realizarle el mantenimiento y la limpieza [45]. Este equipo permite fácil acceso al área donde se produce la transmisión del calor, acceso a ambos lados de las espirales abriendo los bastidores situados a cada lado del intercambiador. Se accederá independientemente al área de transferencia de uno de los fluidos abriendo únicamente uno de los bastidores y a la otra área con la apertura del bastidor situado en el extremo opuesto. Existen intercambiadores en los que uno de los bastidores carece de la capacidad de apertura, o que el intercambiador encierre uno de los fluidos por soldadura. Éste diseño se emplea cuando el fluido encerrado es una sustancia limpia y no corrosiva, como en el caso del agua, sustancia que haga que no sea necesaria la limpieza de su recorrido en espiral.

Una de las ventajas de las que dispone este intercambiador respecto a la limpieza, es su autolimpieza [46]. Gracias a la turbulencia de flujo que se crean en las espirales, se impide la deposición de partículas que crean la corrosión y suciedad. En el caso de que esto sucediera y se obstruyera el paso, el propio flujo al no tener otra vía de escape que la de seguir por el espiral, aumentaría la velocidad y la turbulencia, y automáticamente retiraría las partículas

depositadas. El sistema de limpieza CIP [38] también es posible utilizarlo con este equipo.

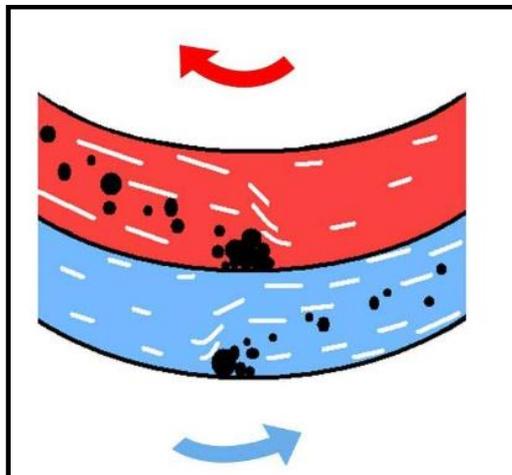


Figura 72. Sistema de autolimpieza del intercambiador.

Como cualquier otro intercambiador, la revisión del estado de las juntas es una tarea obligatoria. La sustitución y la correcta colocación de juntas defectuosas o desgastadas evitan las pérdidas de fluido tanto en el interior del equipo como en exterior de él.

Ventajas e inconvenientes de los intercambiadores de calor.

El intercambiador de calor de espiral, ofrece numerosas ventajas frente al resto de equipos y resulta interesante su instalación en numerosos sistemas o procesos, pero por otro lado no resulta tan eficiente en otros casos.

Ventajas de su instalación:

- 1- Su diseño se acerca al diseño ideal de un intercambiador, debido a su gran eficiencia ya que ofrece un flujo de contracorriente completo.
- 2- Este equipo es capaz de realizar un intercambio térmico eficiente con fluidos con grandes viscosidades y partículas.

- 3- Resulta fácil de limpiar, gracias a su autolimpiado y al sencillo acceso al área de transferencia.
- 4- Al ser un intercambiador compacto, requiere menor espacio, y peso que otro equipo que ofrezca la misma capacidad de intercambio.
- 5- Un alto grado de turbulencia a baja velocidad aumenta la capacidad de transferencia.
- 6- No requiere demasiado espacio a la hora de realizar el mantenimiento o desmontaje.
- 7- No tiene problemas asociados con la expansión térmica como el intercambiador de placas.
- 8- Excluye el riesgo de mezclado de fluidos únicamente soldando los extremos de los expírales e independizando los canales.
- 9- Soporta una presión máxima de 35 bar y temperaturas de hasta 450° C.
- 10- Menos peligro de fugas de fluido, gracias a su gran estanqueidad.

Limitaciones:

- 1- No soporta grandes presiones ni temperaturas, como las que pueden soportar los intercambiadores tubulares.
- 2- En caso de rotura de un tramo del espiral, su reparación es compleja y de gran coste económico.
- 3- Estos equipos no se recomiendan para servicios en los que el ciclo térmico es frecuente, debido a la tensión.
- 4- Las ventajas que ofrece este equipo sobre otros equipos disminuye con la viscosidad de los fluidos.

Ámbito de uso.

Debido a la gran característica de poder realizar intercambios térmicos con fluidos muy viscosos y con partículas en suspensión, estos equipos se utilizan principalmente para procesos en los que formen parte estas sustancias, como en plantas de aguas residuales y en procesos de lodos [45]. Por otro lado, también pueden encontrarse en procesos donde la sustancias sean líquidos o gases, ya sea en recuperadores, condensadores, calefactores y plantas criogénicas, siempre que la instalación no requiera presiones y temperaturas considerablemente altas.

CAPÍTULO 5: METODOLOGÍA.

5.1. INTERCAMBIADORES DE CALOR A BORDO DE UN BUQUE.

Los equipos de intercambiadores de calor se encuentran muy presentes en el ámbito marino. En la disposición de la sala de máquinas de un buque se encuentran diversos tipos y modelos de intercambiadores, cada uno con su función y proceso. Para mostrar la importancia y el uso de estos aparatos en el sector naval, como ejemplo, se muestran a continuación unos equipos de intercambio de calor en las instalaciones de mayor relevancia en el buque “Sorolla” de la compañía Tramediterránea.

Producción de vapor: se precisa un intercambio térmico para la producción de vapor a bordo. Éste se realiza por medio de economizadores o calderas, siendo éstos un ejemplo de intercambiador. El vapor creado en estos equipos se distribuye por toda la sala de máquinas como fluido de otros intercambiadores. La formación de vapor es el resultado del intercambio térmico entre una llama de fuego y agua en el caso de la caldera, o bien, entre los gases de escape y agua en el caso de los economizadores. Los economizadores son equipos de ahorro energético, y se ponen en funcionamiento únicamente cuando el buque se encuentra en marcha. Éstos se encuentran montados en el tronco de los gases de escape. Una estructura envolvente de acero de forma cilíndrica encierra un armazón tubular por donde circula, en el interior de los tubos agua destilada y en el exterior los gases de escape de los motores principales.



Figura 73. Economizadores en el buque Sorolla.

Calentamiento de combustible: los tanques de almacenamiento de combustible se consideran un intercambiador en sí, ya que disponen de un serpentín por donde fluye vapor para el calentamiento del F.O. El combustible debe calentarse para obtener una viscosidad adecuada para su consumo, ya que el F.O. frío resulta demasiado viscoso para los motores. Este calentamiento ocurre dentro de los tanques, el vapor creado en las calderas fluye por tuberías llegando a estos depósitos de almacenamiento, donde recorren su interior en pequeñas tuberías con forma de serpentín, aumentando así, la temperatura del combustible y disminuyendo su viscosidad.

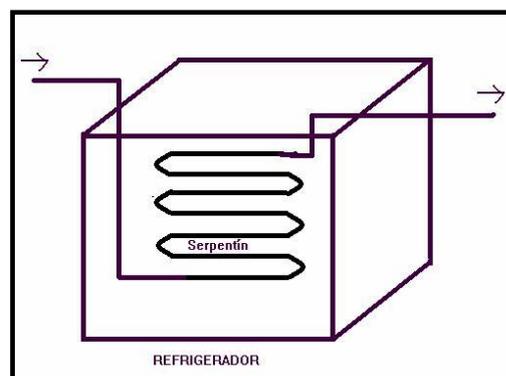


Figura 74. Tanque de almacenamiento del combustible (F.O.).

Producción de agua destilada: los motores del buque son refrigerados con agua destilada para evitar la corrosión en su interior producida por las sales y minerales que contiene el agua sanitaria, y el porcentaje de sales y partículas que contiene el agua de mar. Así mismo, el agua destilada también es utilizada para generar el vapor en las calderas y evitar así, corrosión en el circuito de vapor. El generador de agua destilada se compone por dos etapas; un evaporador y un condensador, ambos considerados intercambiadores de calor. El agua de mar depositada en la parte de inferior del generador, se evapora gracias a que circula a través de ella un flujo de agua caliente (evaporador), que proviene de los motores del buque. El fluido convertido en gas asciende a la segunda etapa del generador, es ahí donde el vapor libre de sales, choca con las paredes del circuito de agua fría (condensador), que lo condensa y lo deposita en una plancha para, a continuación, extraerlo del equipo y almacenarlo en un tanque.



Figura 75. Generador de agua destilada del buque Sorolla.

Refrigeración de los motores: el buque “Sorolla” de la compañía Trasmediterránea dispone de dos circuitos de agua de refrigeración para los motores principales, los cuales se diferencian únicamente por la temperatura. El agua de baja temperatura y el agua de alta temperatura, ambos circulan por canales distintos refrigerando las partes del motor que les corresponda. Debido a que el sistema de refrigeración es un circuito cerrado, el agua que sale de los motores debe ser enfriada, ya que éste sale con un incremento de temperatura considerable, y se perdería el efecto de refrigeración si entra de nuevo al motor sin un enfriamiento que baje su temperatura.



Figura 76. Intercambiador de placas para el agua de refrigeración de los motores en el buque Sorolla.

Enfriadores de aceites: el aceite es otro fluido esencial para los motores del buque, ya que éste evita calentamientos de los mecanismos por efecto de fricción. El aceite como en el caso del agua recorre el motor lubricando sus mecanismos. Debido a que el circuito de lubricación es cerrado y el aceite adquiere temperatura al circular por el interior del motor, se le debe realizar un proceso de enfriamiento antes de entrar de nuevo al motor. El enfriamiento se

efectúa mediante un intercambiador de placas donde el intercambio ocurre entre el aceite de lubricación y el agua de baja temperatura.



Figura 77. Intercambiador de aceite de lubricación de motor del buque Sorolla.

Condensación del vapor sobrante: normalmente no existe tanta demanda de vapor en la sala de máquinas del buque para consumir la cantidad que generan las calderas o economizadores. Por lo que, una vez distribuido el vapor por las diferentes instalaciones del buque, el vapor no consumido, llamado vapor sobrante, se dirige a un intercambiador de calor donde se enfría y se condensa para después, dirigir el fluido en estado líquido al tanque de agua destilada para reusarlo.



Figura 78. Condensador de vapor sobrante en el buque Sorolla.

Módulos de combustible: los módulos de combustible son equipos que dan al combustible las condiciones óptimas para la entrada a los motores tanto principales como auxiliares. Estos equipos están provistos de un viscosímetro y de controladores de temperatura. Su función es calentar el combustible y, con ello, darle una viscosidad concreta para satisfacer los parámetros de entrada de fuel a los motores. Esta tarea la realiza un calentador, el cual es un intercambiador de calor donde el vapor y el fuel son los fluidos que interactúan.



Figura 79. Módulo de combustible del buque Sorolla.

Calentadores para la depuradora: la sala de máquinas de este buque está equipada con dos tipos de depuradoras, unas para el fuel y otras para aceites. La función de éstas, es liberar de partículas sólidas a los fluidos mediante un proceso de depuración. Estos equipos funcionan dentro de un rango de temperatura y presión de fluido, por lo cual, el fluido a depurar debe calentarse antes de acceder a ella. Esto requiere que en la instalación de la depuradora se aloje un calentador del fluido y vapor, antes de la entrada a la depuradora. Considerando que en este proceso en el que se manejan presiones de vapor relativamente altas y que se requiere una alta eficiencia de transmisión, se han instalado intercambiadores de placas soldadas.



a)



b)

Figuras 80. a) Depuradora de combustible del buque Sorolla. b) Intercambiador de placas soldadas para la depuradora de combustible del buque Sorolla.

Calentadores de lodos: las pérdidas de los equipos así como los residuos de las depuradoras y otros procesos, se depositan y se acumulan en tanques de lodos, para luego mediante bombeo extraerlos del buque a empresas de residuos de MARPOL [47]. El fluido de los tanques de lodos se compone de aceites, combustibles, y de aguas residuales. Estos residuos deben calentarse

para que el bombeo de extracción se realice adecuadamente, debido a que los fluidos en frío resultan tener demasiada viscosidad para su bombeo. Por esta razón, es necesario equipar los tanques de lodos de calentadores, tales como los que disponen los tanques de combustible (figura 74).

Pre calentamiento de los motores principales: en los largos estacionamientos del buque, en los cuales existe una parada de los motores principales para realizar las operaciones de carga y descarga o algún tipo de mantenimiento, los motores se enfrían a lo largo de ese tiempo de parada. Una vez realizado las labores pertinentes el motor debe ponerse en marcha, pero éste no se encuentra a la temperatura adecuada en su interior para realizar un buen arranque y un buen funcionamiento del resto de equipos. Por lo cual, debe realizarse un calentamiento del interior del motor cuyo nombre es pre calentamiento. Esta operación se basa en hacer fluir el agua dulce a alta temperatura por el interior del buque, pasando antes por un calentador de vapor para mantener continuamente el fluido a una temperatura constante y así calentar el interior del motor y conseguir las condiciones óptimas de su puesta en marcha. El calentador se trata de un intercambiador de doble tubo sencillo por el cual fluye el agua de Alta Temperatura y vapor.

5.2. SUSTITUCIÓN DE UN INTERCAMBIADOR PARA UN SISTEMA DADO.

Como es sabido, la sala de máquinas de un buque está repleta de equipos de intercambio de calor para diferentes procesos que resultan vitales para el funcionamiento del buque. El estudio de este trabajo comenzará con una breve descripción general del buque Sorolla y con una exposición de mayor profundidad del sistema de refrigeración del aceite de lubricación del motor principal. Una vez conocido el proceso de enfriamiento, se compararán los diseños obtenidos del intercambiador de placas instalado en el buque y del intercambiador de tipo espiral, para realizar un planteamiento de la posibilidad de sustitución de este último en el proceso.

El Sorolla [48] es un buque destinado al transporte de carga rodada y pasajeros, con una eslora total de 172 m, y un peso de 26916 TRB, tiene

capacidad para 1000 pasajeros y 1200 metros de línea para la carga rodada. El buque se propulsa gracias a cuatro motores principales Wartsila 8L42A con una potencia de 9850 CV (7240 KW) cada uno, y dividido en dos líneas de ejes de propulsión, dando al buque una velocidad máxima aproximada de 26 nudos.

Un buque en general, y el Sorolla en particular, dispone en la sala de máquinas de un sistema de refrigeración centralizada, el cual, se utiliza para la refrigeración de los diferentes mecanismos del motor y los aceites de lubricación. En el Sorolla, el sistema de refrigeración se compone por cuatro fluidos; el agua de alta temperatura (A.T.), el agua de baja temperatura (B.T.), el agua de mar y el aceite de lubricación. El sistema consta de cuatro enfriadores de aceite situados a un lado de cada motor, y dos intercambiadores para refrigerar el agua del motor, uno perteneciente a la línea de babor y otro a la de estribor, los cuales se componen de dos motores cada una.

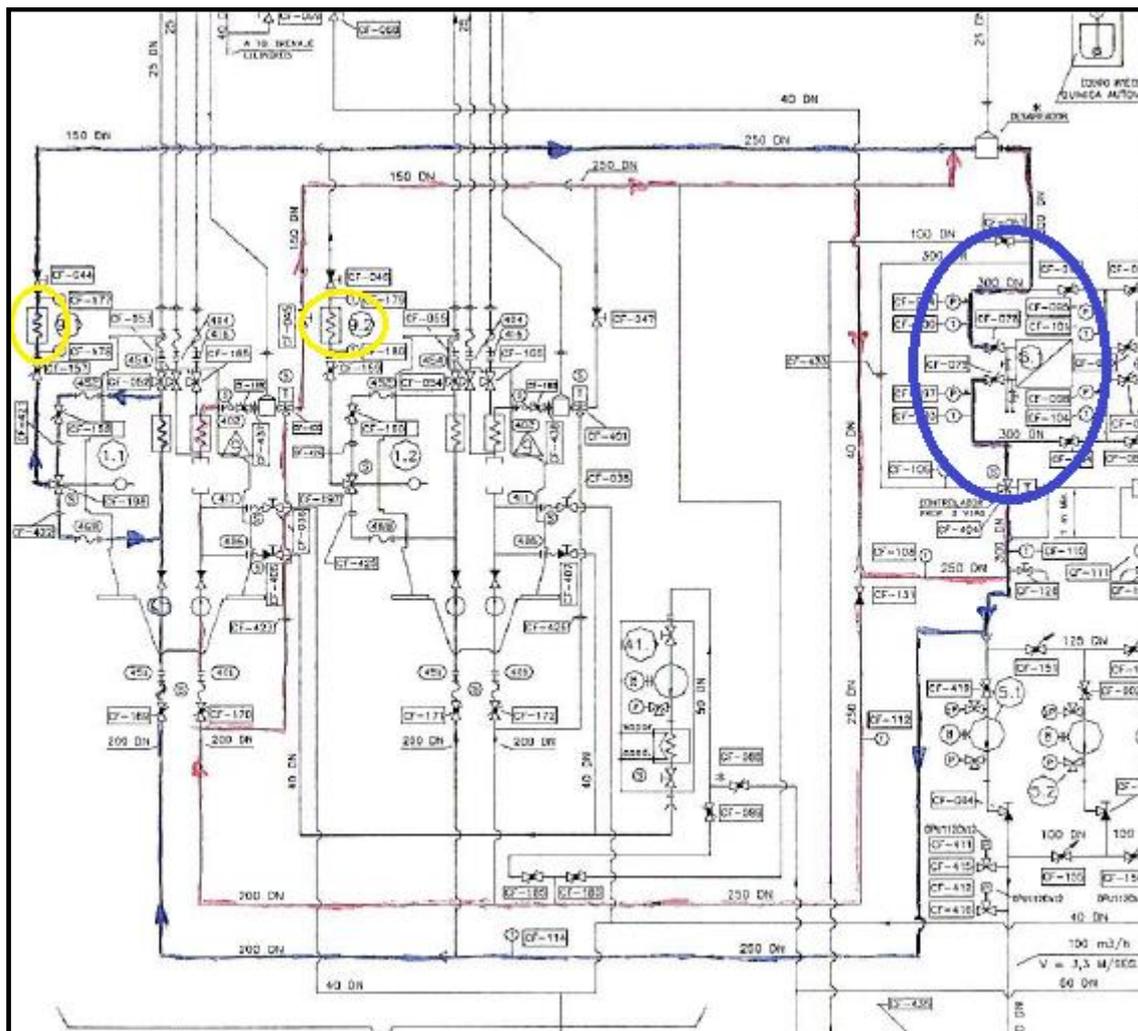


Figura 81. Sección del plano de refrigeración centralizada de la línea de estribor, señalando en amarillo los intercambiadores de aceite y en azul el de agua.

5.2.1. Descripción del sistema de enfriamiento de aceite.

Este buque dispone de cárter seco, lo que significa que el aceite de lubricación se drena del motor, es decir, que cae por gravedad, no se acumula en el cárter, sino que lo hace en un depósito de aceite situado debajo del propio cárter. Este depósito se encuentra continuamente conectado por tuberías, bombas de alimentación y circulación con la depuradora de aceite, que realiza un lavado del fluido si lo precisa (figura 82).

Una bomba otorga el movimiento y la presión al aceite en el circuito. Esta bomba se encuentra acoplada por engranajes al cigüeñal, el cual al girar la

pone en funcionamiento. El circuito de lubricación comienza cuando el aceite es aspirado por la bomba acoplada, y esta lo dirige hacia el enfriador de aceite. El enfriador de aceite es un intercambiador de placas de doble pared, donde el aceite interactúa con el agua de baja temperatura y le cede su energía térmica sobrante adquirida al recorrer el interior del motor y lubricarlo. Una válvula termostática comprueba que el fluido sale del intercambiador con la correcta temperatura para circular por los filtros y llegar al motor. En el caso en el que el fluido no se haya enfriado lo suficiente, la válvula se abre y traslada el fluido de nuevo al intercambiador. Una vez dentro del motor, el aceite asciende por él y se distribuye por medio de la presión, lubricando; camisas, bielas, cojinetes, pistón, y demás partes del motor. Para finalizar, el aceite cae por gravedad por el interior del motor y llega de nuevo al depósito de aceite.

Cuando el motor no se encuentra en marcha, y se procede a realizar la maniobra de salida, el motor debe estar lubricado antes de ponerse en funcionamiento. Esta tarea ya no la podrá ejecutar la bomba acoplada ya que va solidaria al tren alternativo del motor, sino que la hará la bomba de prelubricación. Esta bomba efectuará las mismas funciones y trasladará el fluido de la misma manera que la bomba acoplada, deteniéndose automáticamente cuando la bomba acoplada entra en funcionamiento.

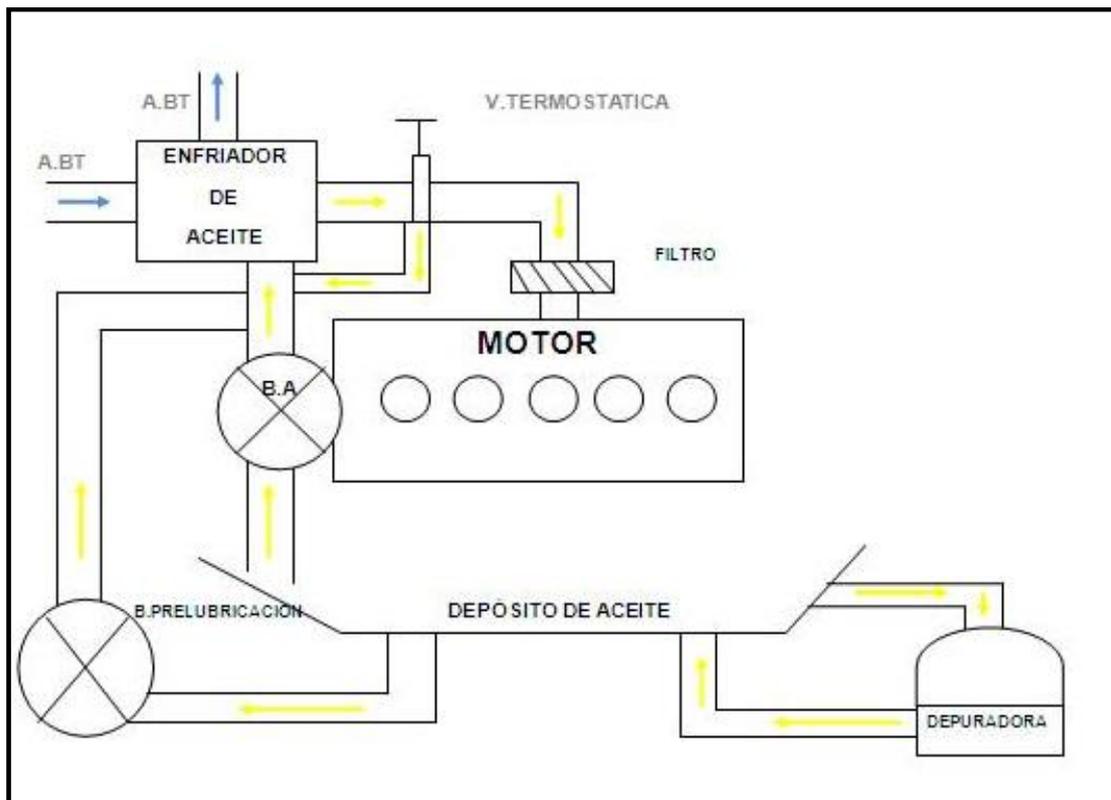


Figura 82. Circuito de enfriamiento del aceite de lubricación de motor del buque Sorolla.

CAPÍTULO 6: DESARROLLO.

El objetivo de este estudio es el considerar la posibilidad de la sustitución del intercambiador de calor de placas instalado en el proceso de enfriamiento de aceite de lubricación del motor principal de la sala de máquinas del buque Sorolla, por uno de tipo espiral. La empresa de abastecimiento de equipos Sedical ofrece su software de cálculo de características y costos de los equipos, para realizar una comparativa entre ambos intercambiadores y finalmente, escoger el equipo con mayor rentabilidad para el proceso. Los datos que se utilizan en el desarrollo de este ejercicio son reales y han sido recogidos a bordo durante el periodo de prácticas de embarque en el año 2014.

6.1. DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE PLACAS.

En el proceso de enfriamiento de aceite, este entra en el intercambiador con una temperatura de 67,77 °C, y sale de él ya enfriado a 50,00 °C con un volumen de flujo de 115,00 m^3/h . El fluido frío, en este caso agua destilada, hace su entrada al equipo a 35,00 °C y después de enfriar el aceite, sale del intercambiador con una temperatura de 39,00 °C, y con un flujo de 210,31 m^3/h . Sabiendo que la potencia de intercambio entre ambos fluidos es de 970 KW , se introducirán todos los datos en el programa de cálculo de intercambiadores para obtener las características del equipo.

Con juntas (selected)
Terminosoldados

Ampliar: 10.0 %

Posición: []

Calculo Anti-Legionela: []

Material de las placas: AISI 316

Grosor mínimo de la placa: 0.5 mm

Material de las juntas: Nitrilo HT

M. conexiones c. primario: Forro goma

M. conexiones c. secundario: Forro goma

Botones: calcular, ver datos, recalcular, materiales, archivar, imprimir, salir

Modelo	Placas Nº	Agrupamiento	Area m2	DP1 KPa	DP2 kPa	Sobredimens. %	Precio unitario Euros
UFP-151 / LM86 - IS - PN10	146	1x72/1x73	65	27	49	10,9	12611.9
UFP-151.2 / LM86 - IS - PN10	146	1x72/1x73	65	27	49	10,9	12979.5
UFP-201 / MH75 - IS - PN10	130	1x64/1x65	58,9	25	48	11,1	13992.3
UFP-153 / L - IS - PN10	130	1x64/1x65	87	30	49	19,1	14083.2

Figura 83. Software para el diseño del intercambiador de calor de placas.

La parte inferior de la figura 83 muestra los distintos modelos de intercambiadores de placas que pueden adquirirse conforme a los datos y especificaciones que hemos introducido. Uno de los datos a destacar, es el material de construcción de las placas, que en este caso se ha optado por el AISI 316 [29], un compuesto de gran uso en estos equipos, así como, los materiales seleccionados para las juntas.

El sobredimensionamiento es otro dato a tener en cuenta a la hora de diseñar el intercambiador. El equipo tiende a ensuciarse con paso del tiempo y el uso, pequeñas partículas se adhieren a las placas ocupando los huecos diseñados para el flujo del fluido, creando así, una obstrucción a su paso y un aumento de presión. Esto afecta considerablemente al rendimiento del equipo, y deberá ser limpiado lo antes posible. Como solución al problema, se sobredimensionará el intercambiador al menos un 10%, para que la obstrucción que causan las partículas no repercuta tanto en el rendimiento, así, aunque exista cierta suciedad, el fluido aún tendrá el espacio suficiente para circular con normalidad

sin que el redimiendo caiga notablemente. Con ello se alargará también, el tiempo entre mantenimientos de limpieza del equipo.

La amplitud es otro de los datos a destacar del programa, este se encuentra en la parte superior de la figura 83, y se refiere a la distancia entre los dos bastidores del intercambiador. Esta distancia normalmente se amplía al menos un 10%, para tener la posibilidad de introducir un número de placas extra y así, aumentar el poder de transferencia del intercambiador térmico, si las condiciones del proceso cambia y se requiere mayor potencia.

La importancia de la elección del fluido afecta directamente al diseño del intercambiador. En este caso, como fluido primario se ha escogido el aceite ISO VG 68 [49], una sustancia de uso común para la lubricación de los distintos elementos que se encuentran en continuo funcionamiento dentro del motor de un barco. Al seleccionar el agua como fluido secundario, la base de datos por defecto, rellena el cuadro de las características del fluido, pero en el caso del ISO VG 68 se han tenido que extraer fuera del programa.

Nombre	Oil ISO VG 68
Densidad	kg/m ³ 849.10
Calor específico	kJ/kg*°K 2.01
Conductividad termica	W/m*°K 0.13
Viscosidad media	mPa*s 26
Viscosidad pared	mPa*s 67.90
Grupo del fluido	No peligroso
Estado del fluido	Liquido

Figura 84. Características del fluido primario.

Una vez tengamos la lista de opciones de distintos diseños de intercambiadores para el mismo sistema (parte inferior de la figura 83), se elige uno de ellos y se exporta del programa. En este ejemplo se ha escogido la

primera opción. En la figura 85 se exponen todos los datos del intercambiador seleccionado; el modelo, sus medidas, su capacidad de intercambio, el número de placas, el costo del producto, los plazos de entrega... También se obtiene un plano del equipo donde se muestran las medidas de construcción (figura 86).

			
Fecha	: 07/12/2016	Empresa	:
Oferta	:	A la atención de	:
Proyecto	:	Dirección	:
Referencia	:	Localidad	:
Posición	:		
SEDICAL - Intercambiador de placas UFP-151 / 146 LM 86 - IS - PN10			
Datos Generales		Caliente	Frio
Fluido		OIL ISO VG 68	Aqua
Potencia de intercambio	kW	970.0	
Caudal	l/h	115167.7	210354.6
Temperatura entrada	°C	67.8	35.0
Temperatura salida	°C	50.0	39.0
Perdida de carga	kPa	26.8	49.3
Propiedades termodinámicas		Caliente	Frio
Densidad	kg/m ³	849.10	993.06
Calor específico	kJ/kg×°K	2.01	4.18
Conductividad térmica	W/m×°K	0.13	0.62
Viscosidad media	mPa×s	26.00	0.70
Viscosidad pared	mPa×s	67.90	0.50
Datos técnicos del intercambiador			
Diferencia de temperatura logarítmica media	°C	21.14	
Numero de placas		146	
Agrupamiento		1 x 72 / 1 x 73	
Tipo / porcentaje		LM 86	
Superficie de intercambio efectiva	m ²	65.01	
Coef. global de transmisión (servicio / Sobredimensionamiento	W/m ² ×°K	705.6 / 782.4	
Factor de ensuciamiento	%	10.88	
Factor de ensuciamiento	m ² ×°K/kW	0.1391	
Presión de trabajo / prueba	bar	10.0 / 14.3	
Temperatura máxima de diseño	°C	100.0	
Acorde a normativa		PED 2014/68/UE Art 4.3	
Materiales, dimensiones y pesos			
Material del bastidor / tornillos		ST 52.3 / calidad 8.8	
Material de las placas / grosor	mm	AISI 316 / 0.5 mm	
Material de las juntas		Nitrilo HT (sin pegamento)	
Material de las conexiones circuito caliente		Forro goma	
Material de las conexiones circuito frio		Forro goma	
Diámetro de las conexiones		DN 150	
Situación de las conexiones (Caliente / frio)		F1 - F4 / F3 - F2	
Tipo de bastidor		IS - PN10 N° 3 (Max =168 placas)	
Especificación pintura del bastidor		Según ISO12944 Categ. C2 RAL5010	
Largo, alto, ancho y peso del bastidor		1400 mm/ 1546 mm/ 608 mm/ 1142 kg	
Precios y plazos			
Precio unitario tarifa 2016	Euros	13195.89	
Cantidad	Unidades	1	
Precio total tarifa 2016	Euros	13195.89	
Plazo de entrega		De 3 a 8 semanas a confirmar	
Transporte		Excluido	
Forma de pago		La habitual con Vds.	
Validez de la oferta		2 semanas	
Fecha máxima para recepción del pedido		31/12/2016	(versión 28/09/2016)

Figura 85. Características del diseño del intercambiador de calor de placas para el proceso.

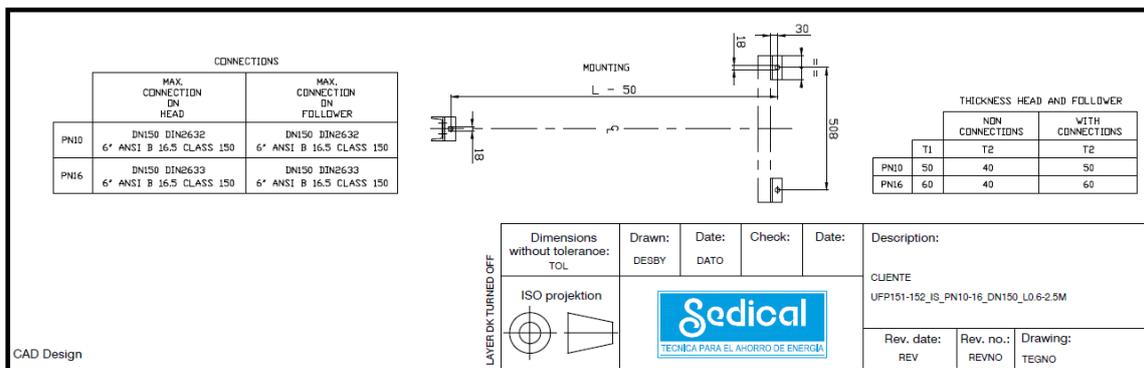
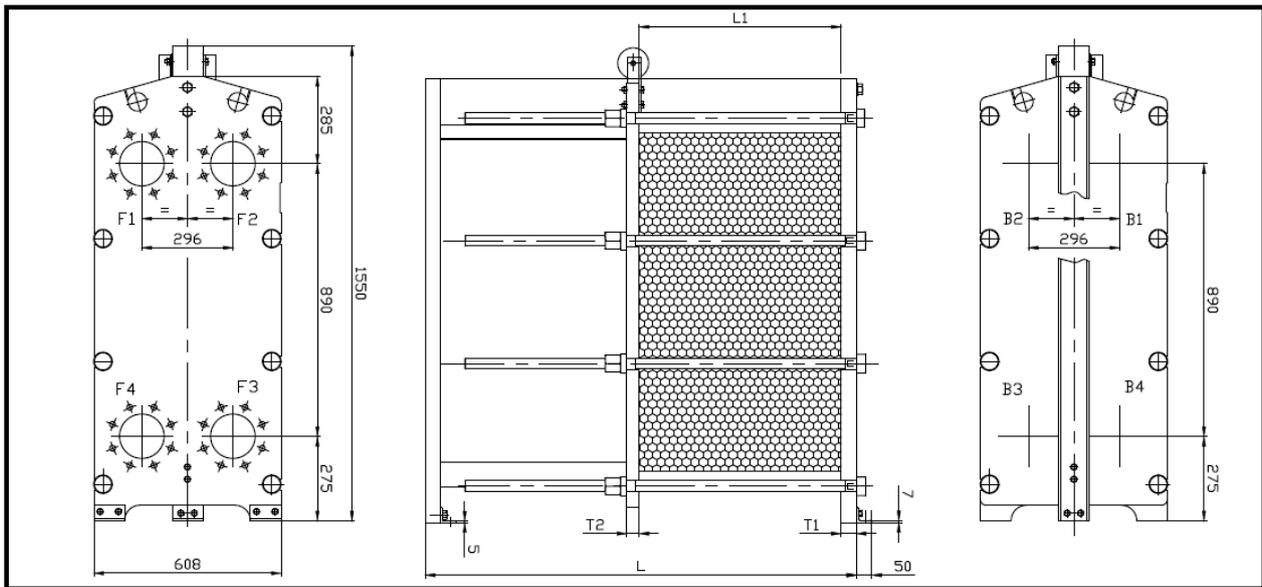


Figura 86. Plano del diseño del intercambiador de calor de placas.

Debe tenerse en cuenta que el distribuidor no posee un intercambiador y unas placas que se ajusten exactamente a las características requeridas de cada instalación, por lo que el programa seleccionará una serie de modelos del equipo que puedan servir para cumplir las necesidades de cada sistema. Por otro lado, cada distribuidor posee su propio programa para calcular las dimensiones y características de los intercambiadores, así como, su propio stock de modelos, por lo que es muy probable que realizando esta misma práctica en otros programas de otras empresas, puedan darse modelos y características diferentes de los equipos.

6.2. DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE ESPIRAL.

La práctica con el intercambiador de espiral se realiza aproximadamente siguiendo los mismos procedimientos que en el caso anterior, se rellenarán los huecos que definen las características de los fluidos que forman parte del intercambio de calor, y los huecos que caracterizaran las necesidades del sistema (figura 87). Debido a que no se dispone del mismo programa de cálculo que se ha utilizado en el caso del intercambiador de placas, se hará uso de una hoja Excel de cálculo. Dado que el intercambiador de espiral se compone de una estructura y funcionamiento distinto al intercambiador de placas, se deberá tener en consideración otros aspectos que definirán el equipo.

A/ REQUERIMIENTOS DEL PROCESO				LADO CALIENTE		LADO FRIO	
Nombre del fluido				OIL ISO VG 68		AGUA	
				ENTRADA(A1)	SALIDA(A2)	ENTRADA(B1)	SALIDA(B2)
Caudal másico total		kg/h	97646,50		208850,44		
Temperatura entrada/salida		°C	67,77	50,00	35,00	39,00	
Presión de trabajo/prueba		bar	10,00	13,00	10,00	13,00	
Diferencia de presión máxima		bar	10,00				
Temperatura de diseño		°C	100		100		
Materiales: Espiral + Carcasa / Cubierta + Bastidor / Varilla				AISI 316L / S235 / AISI 316L			
Pintura (Categoría / Color)				Category C2L	Blue RAL 5010		
Material junta				Nitril			
B/ PROPIEDADES DEL FLUIDO				LADO CALIENTE		LADO FRIO	
Densidad		kg/m ³	849,10		993,06		
Viscosidad		mPa·s	26,00		0,70		
Conductividad térmica		W/m·°K	0,13		0,62		
Calor específico		kJ/kg·°K	2,01		4,18		
C/ RENDIMIENTO TÉRMICO							
Cantidad de calor intercambiado						969	

Figura 87. Hoja de cálculo Excel para el diseño del intercambiador de calor de espiral.

Como el caudal se muestra en este caso con las unidades de kg/h, deberá multiplicarse el caudal que se tiene como dato ($115,00 \text{ m}^3/h$ y $210,31 \text{ m}^3/h$) por la densidad de cada fluido. Otra de las diferencias de la hoja de cálculo Excel, es que una vez rellenado las características de cada fluido y las temperaturas de entrada y salida de ellos, la hoja calculará automáticamente la

potencia de intercambio que se precisa para cumplir el cambio térmico deseado, mostrado en la figura 87 con el valor 969kw.

C/ RENDIMIENTO TÉRMICO			
Cantidad de calor intercambiado	kW	969	
Limpieza / Coeficiente efectivo	W/m ² ·°K	284,3	249,3
Área calculada.	m ²	164,5	
Área efectiva	m ²	187,6	
Superficie adicional	%	14%	
Factor de fouling	m ² ·°C/W	0,00	0,0005
Caída de presión	bar	1,2	2,8

Figura 88. Relación entre superficie adicional y pérdida de carga.

El objetivo de esta hoja de cálculo Excel es el conseguir una superficie adicional de transferencia de los fluidos de un 10% aproximadamente, como en el caso del intercambiador de placas, para hacer frente a las pérdidas térmicas por suciedad provocadas por el paso del tiempo y el uso del equipo.

Para lograr este propósito se actuará sobre el diseño del diámetro de paso de fluido, logrando un equilibrio entre la superficie adicional, paso de fluido y pérdida de carga de fluido. Para ello debe entenderse la relación que guardan estos tres factores; cuando se aumenta el diámetro del paso del fluido dentro de un intercambiador de espiral, este recorre el equipo con menor contacto con la superficie del canal y menor resistencia al rozamiento, por lo que la pérdida de carga en este caso disminuiría. Sin embargo, al aumentar el diámetro de paso, el fluido además de, realizar menor número de recorrido en espiral debido al tamaño, la superficie de trasmisión térmica disminuiría, ya que parte del fluido no hará contacto con la superficie de trasmisión y perdería rendimiento.

Para satisfacer las exigencias del sistema de intercambio térmico, y cumplir con la relación de un 14% de superficie adicional y una pérdida de carga razonable indicada en la figura 88, la hoja de cálculo Excel obliga a elegir el siguiente diseño para el intercambiador;

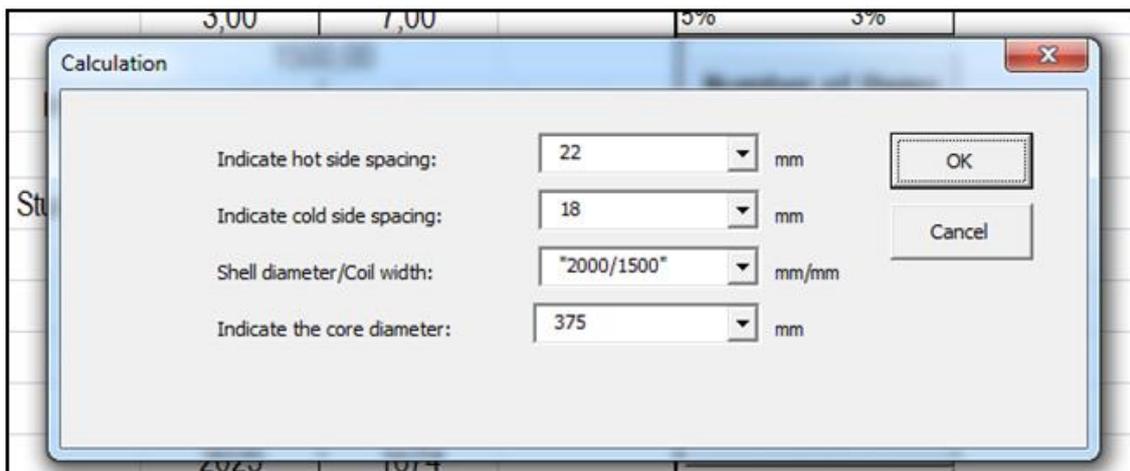


Figura 89. Selección de medidas y modelo del intercambiador de espiral.

Otras especificaciones propias de estos equipos deben ser mencionadas, como la elección de los soportes llamados studs para los canales de los fluidos. Estos soportes como ya se ha mencionado anteriormente, sirven para evitar que los canales se deformen por efectos de la presión y temperatura, y así, conserven su paso uniforme. Para sustancias con una alta viscosidad como son los lodos, es conveniente no construir el canal de este fluido con studs, ya que al tener una alta viscosidad y constar de partículas sólidas, obstaculizaría al movimiento del fluido y existiría un alta pérdida de carga. En este caso, el aceite no consta de una viscosidad elevada, por lo que se colocarán los soportes por seguridad estructural.

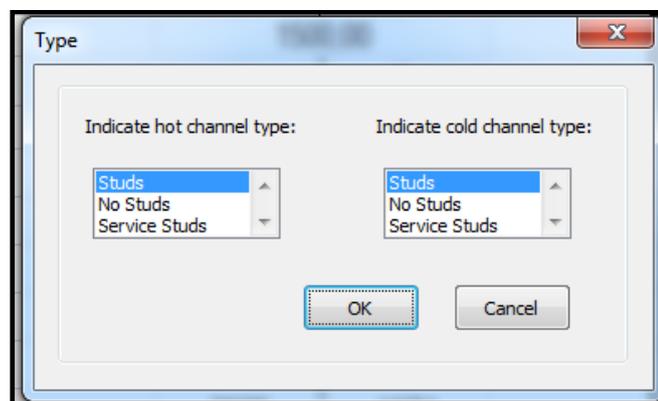


Figura 90. Selección de studs para los canales de los fluidos.

También puede ser modificado el espesor de las chapas de construcción de los canales del fluido, así como, el de la carcasa del intercambiador de espiral. Se optará por los espesores mostrados en la figura 91, teniendo en cuenta que a mayor espesor, mayor rigidez contra las deformaciones, pero menor transferencia térmica.

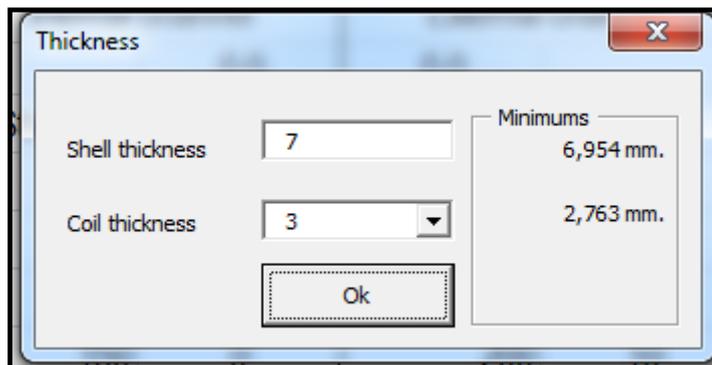


Figura 91. Selección del espesor de las chapas de los canales.

Una vez rellenado todos los datos necesarios y manteniendo con ellos un diseño del intercambiador adecuado para el sistema, la hoja de cálculo Excel mostrará una sección dentro de la hoja con los datos técnicos finales (figura 92), otra con los plazos de entrega y precios (figura 93), y finalmente con el modelo se obtendrá un plano del diseño del intercambiador en espiral (figura 94), los cuales se compararán con los resultados obtenidos en el ejercicio del intercambiador de placas.

		INTERCAMBIADOR DE ESPIRAL		SEDICAL S.A Txorierrri Etorbidea 46, Pab 12F 48150 Sondika (Bizkaia) Tel.: (+34) 94 4710 460 FAX: (+34) 944 7010 009 E-mail: igarrucho@sedical.com	
CLIENTE :		FECHA : 07-dic-16			
PROYECTO :		NÚMERO DE COTIZACIÓN:			
REFERENCIA :		REVISION:			
A/ REQUERIMIENTOS DEL PROCESO		LADO CALIENTE		LADO FRIO	
Nombre del fluido		OIL ISO VG 68		AGUA	
		ENTRADA(A1)	SALIDA(A2)	ENTRADA(B1)	SALIDA(B2)
Caudal másico total	kg/h	97646,50		208850,44	
Temperatura entrada/salida	°C	67,77	50,00	35,00	39,00
Presión de trabajo/prueba	bar	10,00	13,00	10,00	13,00
Diferencia de presión máxima	bar	10,00			
Temperatura de diseño	°C	100		100	
Materiales: Espiral + Carcasa / Cubierta + Bastidor / Varilla		AISI 316L / S235 / AISI 316L			
Pintura (Categoría / Color)		Category C2L		Blue RAL 5010	
Material junta		Nitril			
B/ PROPIEDADES DEL FLUIDO		LADO CALIENTE		LADO FRIO	
Densidad	kg/m ³	849,10		993,06	
Viscosidad	mPa·s	26,00		0,70	
Conductividad térmica	W/m·°K	0,13		0,62	
Calor específico	kJ/kg·°K	2,01		4,18	
C/ RENDIMIENTO TÉRMICO		969			
Cantidad de calor intercambiado	kW				
Limpieza / Coeficiente efectivo	W/m ² ·°K	284,3		249,3	
Área calculada.	m ²	164,5			
Área efectiva	m ²	187,6			
Superficie adicional	%	14%			
Factor de fouling	m ² ·°C/W	0,00		0,0005	
Caída de presión	bar	1,2		2,8	
D/ CARACTERÍSTICAS DEL INTERCAMBIADOR		SONSPV 1500 Ø2000		Counter flow	
Número serie / paralelo	Type	1		1	
Número de venta		1		1	
Diametro de carcasa / núcleo	mm	2000,0		375,0	
Espesor de espiral / carcasa	mm	3,00		7,00	
Anchura de espiral	mm	1500,00			
Posición del fluido del circuito.		Internal channel		External channel	
Tolerancia de corrosión	mm	0,0		0,0	
Altura del canal	mm	Studs	22,00	18,00	Studs
Paso de varilla	mm-mm	80,00	40,00	80,00	40,00
Área de sección transversal	mm ²	32516,000		26676,000	
Conexión de entrada	DN/PN	150	10	200	10
Conexión de salida	DN/PN	150	10	200	10
Volumen	liter	2025		1674	
Peso total / espiral	kg	9216		4501	

Figura 92. Características del diseño del intercambiador de calor de espiral para el proceso N°1.

		INTERCAMBIADOR DE ESPIRAL Cálculo de precio		SEDICAL S.A Txorierrri Etorbidea 46, Pab 12F 48150 Sondika (Bizkaia) Tel.: (+34) 94 4710 460 FAX: (+34) 944 7010 009 E-mail: igarrucho@sedical.com	
CLIENTE :	FECHA:	07-dic-16			
PROYECTO :	INDICE :				
REFERENCIA :	BASE :				
Gracias por su consulta. Nos gustaría ofrecerle lo siguiente:					
			Precio		Precio
Intercambiador de calor espiral	SONSPV 1500 Ø2000		111.239	1 pcs.	111.239
Material / Grosor del espiral	AISI 316L / S235 / AISI 316L		3,00		
Altura del canal caliente / frío	22,00	18,00			
Varilla caliente / frío	Studs	Studs			
Pintura (Categoría / Color)	Category C2L	Blue RAL 5010			
Conexión entrada/ salida lado caliente	150 mm	10 bar			
Conexión entrada/ salida lado frío	200 mm	10 bar			
Carcasa/ Construcción	S235				
Certificado	PED 97/23/EC (Art 3.3)				
Número de equipos de intercambiador					1
Precio total				EUR	111.239
Condiciones de entrega	A confirmar				
Condiciones de pago	A confirmar				
Plazo de entrega	A confirmar				
Validez de la oferta	Tres semanas				
Diseñado por	Dr. Isaac Garrucho				

Figura 93. Características del diseño del intercambiador de calor de espiral para el proceso N°2.

7. CONCLUSIONES.

Entender el comportamiento de la transferencia de calor, así como, de dónde y cómo se origina es fundamental para cualquier sujeto que trabaje con esta materia, ya sea, como diseñador, suministrador, fabricante o manipulador de equipos de transferencia térmica.

El calor y los procesos de transferencia térmica han sido uno de los pilares de mayor importancia en la historia de la evolución tecnológica, su presencia se remonta desde las primeras cocinas, hasta las nuevas tecnologías. En este trabajo se han estudiado los inicios de las investigaciones sobre el calor y la transmisión de energía térmica; los conceptos básicos, los primeros experimentos y teorías, y la importancia que tienen todas ellas como base para las futuras investigaciones. La aparición de nuevos combustibles y nuevas técnicas de obtención de energía que forman parte en el desarrollo de las energías renovables y reducción de la contaminación del medio ambiente son posibles gracias a los principios de la transmisión térmica y a la manipulación de las temperaturas de las diferentes sustancias.

El Intercambiador de calor es el equipo donde se desarrolla la transferencia de calor en un proceso de intercambio térmico. Hoy en día se encuentran numerosos tipos de intercambiadores de calor, cada uno con un diseño y unas características propias. Es de suma importancia conocer profundamente el sistema en el que se requiera la instalación de un intercambiador de calor. Deben conocerse el tipo de fluidos que formarán parte del proceso, el espacio disponible para la instalación del equipo, las temperaturas de los fluidos, las presiones, el peso máximo que pueda tener el equipo, la potencia de intercambio que requiera el proceso y, cómo no, el precio que suponga la compra de ese equipo, para la elección del tipo y diseño del intercambiador más adecuado para el sistema en cuestión.

Dentro del sector marino y poniendo como ejemplo el buque tipo ferry llamado Sorolla de la compañía Trasmediterránea, pueden observarse los diversos cometidos que se realizan por la presencia de intercambiadores de calor, alguno de ellos totalmente esenciales para la propulsión y el buen funcionamiento de la máquina del buque.

Una vez examinados los resultados de los diseños de los dos intercambiadores utilizados como ejemplo para el proceso de enfriamiento del aceite de lubricación del motor principal del Sorolla, se puede afirmar, como queda demostrado, que el intercambiador de placas resulta notablemente más eficaz y más económico que el intercambiador de espiral. Por lo que la posibilidad de instalar este último equipo se debe rechazar.

En primer lugar analizando las figuras 95 y 96, el área de transferencia de intercambio efectiva es apreciablemente mayor en el intercambiador de espiral, por lo que se deduce que para una misma potencia de intercambio, este tendrá un tamaño considerablemente mayor que el intercambiador de placas.

Datos técnicos del intercambiador		
Diferencia de temperatura logarítmica media	°C	21.14
Numero de placas		146
Agrupamiento		1 x 72 / 1 x 73
Tipo / porcentaje		LM 86
Superficie de intercambio efectiva	m ²	65.01
Coef. global de transmisión (servicio /	W/m ² ×°K	705.6 / 782.4
Sobredimensionamiento	%	10.88
Factor de ensuciamiento	m ² ×°K/kW	0.1391
Presión de trabajo / prueba	bar	10.0 / 14.3
Temperatura máxima de diseño	°C	100.0
Acorde a normativa		PED 2014/68/UE Art 4.3

Figura 95. Área de transferencia térmica efectiva en el intercambiador de placas del diseño.

C/ RENDIMIENTO TÉRMICO			
Cantidad de calor intercambiado	kW	969	
Limpieza / Coeficiente efectivo	W/m ² ·°K	284,3	249,3
Área calculada.	m ²	164,5	
Área efectiva	m ²	187,6	
Superficie adicional	%	14%	
Factor de fouling	m ² ·°C/W	0,00	0,0005
Caída de presión	bar	1,2	2,8

Figura 96. Área de transferencia térmica efectiva en el intercambiador de espiral del diseño.

Para un buque es esencial disponer de un equipo que tenga unas medidas y un peso mínimo, además de un gran rendimiento. Porque con ello se pueden aprovechar mejor los espacios libres en la sala de máquinas y reducir el calado del barco. Para nuestra instalación el intercambiador de placas no solo dispone de menor tamaño que el intercambiador de espiral, sino que, su construcción es mucho más ligera.

Materiales, dimensiones y pesos		
Material del bastidor / tornillos		ST 52.3 / calidad 8.8
Material de las placas / grosor	mm	AISI 316 / 0.5 mm
Material de las juntas		Nitrilo HT (sin pegamento)
Material de las conexiones circuito caliente		Forro goma
Material de las conexiones circuito frio		Forro goma
Diámetro de las conexiones		DN 150
Situación de las conexiones (Caliente / frio)		F1 - F4 / F3 - F2
Tipo de bastidor		IS - PN10 N° 3 (Max =168 placas)
Especificación pintura del bastidor		Según ISO12944 Categ. C2 RA15010
Largo, alto, ancho y peso del bastidor		1400 mm/ 1546 mm/ 608 mm/ 1142 kg

Figura 97. Peso del intercambiador de placas del diseño.

D/ CARACTERÍSTICAS DEL INTERCAMBIADOR	Type	SONSPV 1500 Ø2000		Counter flow	
Número serie / paralelo		1		1	
Número de venta		1		1	
Diametro de carcasa / núcleo	mm	2000,0		375,0	
Espesor de espiral / carcasa	mm	3,00		7,00	
Anchura de espiral	mm	1500,00			
Posición del fluido del circuito.		Internal channel		External channel	
Tolerancia de corrosión	mm	0,0		0,0	
Altura del canal	mm	Studs	22,00	18,00	Studs
Paso de varilla	mm-mm	80,00	40,00	80,00	40,00
Área de sección transversal	mm ²	32516,000		26676,000	
Conexión de entrada	DN/PN	150	10	200	10
Conexión de salida	DN/PN	150	10	200	10
Volumen	liter	2025		1674	
Peso total / espiral	kg	9216		4501	

Figura 98. Peso del intercambiador de espiral del diseño.

El precio de un equipo es uno de los factores de mayor importancia, los distintos suministradores y fabricantes compiten entre ellos para darle al cliente un producto de un buen rendimiento al menor costo posible. En ocasiones es posible instalar distintos tipos de intercambiadores en un sistema, ya que todos ellos cumplen unas buenas características de funcionamiento, es ahí, donde adquiere el costo del equipo un papel importante, ya que siempre se tiende a buscar el equipo más barato. Al comparar los dos tipos de equipos que ocupan la práctica de este trabajo, se puede verificar que el intercambiador de placas además de ser el equipo más adecuado para el proceso de enfriamiento del aceite de un motor en un buque, tiene un coste notablemente menor que el de espiral.

Precios y plazos		
Precio unitario tarifa 2016	Euros	12611.89
Cantidad	Unidades	1
Precio total tarifa 2016	Euros	12611.89
Plazo de entrega		De 3 a 8 semanas a confirmar
Transporte		Excluido
Forma de pago		La habitual con Vds.
Validez de la oferta		2 semanas
Fecha máxima para recepción del pedido		31/08/2016 (versión 20/04/2016)

Figura 99. Precio del intercambiador de placas del diseño.

Número de equipos de intercambiador		1
Precio total	EUR	111.239

Figura 100. Precio del intercambiador de espiral del diseño.

Por otra parte, otra de las ventajas que dispone el intercambiador de placas es la posibilidad de aumentar la potencia de intercambio del equipo proporcionándole un mayor número de placas entre los bastidores, ya que a la hora de diseñar este equipo, se le ha dotado de un 10% de amplitud al espacio donde se alojan las placas. Por el contrario, el diseño de potencia del intercambiador de espiral es fijo y no posee la facultad de aumentarse, en todo caso, disminuirá en el tiempo por el uso y suciedad.

Todas las valoraciones que se tienen en cuenta en el caso del proceso de enfriamiento del aceite de lubricación de un motor, se desarrollan también en otros sectores. En una de las visitas a la empresa Sedical, se ha tenido la oportunidad de comprobar con equipos reales estas características que definen un intercambiador de placas y uno en espiral.



Figura 101. Intercambiador de calor para una planta de procesos químicos.



Figura 102. Intercambiador de calor en espiral para una planta de aguas residuales.

Véanse las figuras 101 y 102, donde se muestra un intercambiador de placas diseñado para una planta química y un intercambiador de espiral cuya instalación se realizará en una planta de aguas residuales para obtención de biogás. Si se cotejan ambos intercambiadores con el mismo criterio que se ha tenido anteriormente en este trabajo, se verifica que el intercambiador de placas obtiene un menor tamaño para una mayor potencia de intercambio de 425kw, frente a un mayor tamaño para los 307kw que posee el intercambiador de espiral. Por otro lado, gracias a la información de los equipos facilitada por la empresa, se sabe que el intercambiador de placas adquiere un precio aproximado de 2.000€, un precio mucho más económico que los 15.000€ que le corresponden al equipo de espiral.

La única ventaja de la que goza en este último caso el intercambiador de calor en espiral es el poder de realizar un intercambio térmico entre fluidos que alcancen viscosidades muy elevadas, como son los lodos de una planta de

tratamiento de aguas residuales, gracias a la amplitud del paso de los canales por donde circularán los fluidos. Ventaja que el intercambiador de placas es incapaz de realizar dado que el paso del fluido entre placas consta de muy pocos milímetros, y un fluido de una gran viscosidad atascaría el circuito. Por lo que puede deducirse, que en el proceso de calentamiento de lodos, la instalación de un intercambiador de placas sería una mala elección.

Con la práctica desarrollada en este trabajo, se ha reforzado y demostrado lo que en numerosas ocasiones se ha declarado. El conocimiento de una instalación y de los distintos tipos de intercambiadores de calor resulta esencial para la elección del equipo más adecuado para el proceso en cuestión. Se ha podido mostrar también, de una manera simplificada, cómo se realiza un estudio de un equipo para un sistema y como se valoran los distintos resultados del programa para la elección de un tipo de intercambiador u otro.

Los intercambiadores de calor poseen numerosas aplicaciones, no solo en el sector marino, que es el que ocupa fundamentalmente este trabajo, sino que pueden encontrarse en sectores como; las tecnologías de energías renovables anteriormente mencionada, en el sector automovilístico, en procesos químicos, en la industria alimentaria, en centrales nucleares, en procesos de tratamientos de aguas, en la industria metalúrgica y en muchos otros.

8. ÍNDICE DE FIGURAS.

FIGURA 1. Proceso de transferencia de calor, hasta un estado de equilibrio.

ÇENGEL, YUNUS A. *Transferencia de calor*. 2^o Edición, McGraw-Hill Interamericana. (2004). 11/04/2016

FIGURA 2. Representación de un termo aislado ÇENGEL, YUNUS A.

Transferencia de calor. 2^o Edición, McGraw-Hill Interamericana. (2004). 11/04/2016

FIGURA 3. Antoine Lavoisier. <https://global.britannica.com/biography/Antoine-Laurent-Lavoisier>. 13/04/2016.

FIGURA 4. Experimento de Joule antes de dejar caer el cuerpo. MARTÍN BLAS TERESA, SERRANO FERNANDEZ ANA. *Equivalente mecánico del calor*. Termodinámica. Universidad politécnica de Madrid.

<http://acer.forestales.upm.es/basicas/udfisica/asignaturas/fisica/termo1p/joule.html>. 13/04/2016.

FIGURA 5. Experimento de Joule, después de dejar caer el cuerpo. MARTÍN BLAS TERESA, SERRANO FERNANDEZ ANA. *Equivalente mecánico del calor*. Termodinámica. Universidad politécnica de Madrid.

<http://acer.forestales.upm.es/basicas/udfisica/asignaturas/fisica/termo1p/joule.html>. 13/04/2016.

FIGURA 6. Formula de Joule para calcular la energía térmica. Conceptos básicos de calorimetría. <http://fisica.laguia2000.com/energia/conceptos-basicos-de-calorimetria> 13/04/2016

FIGURA 7. Aumento del movimiento molecular debido a la temperatura.

JIMENEZ JOAQUÍN. *Evolución del concepto calor y su relación con el concepto energía*. Prezi. <https://prezi.com/5qlgvndfvtoj/evolucion-del-concepto-calor-y-su-relacion-con-el-concepto-energia/>. 13/04/2016.

FIGURA 8. Perdida y aumento de la temperatura en el cuerpo humano, por esfuerzo físico y ambiente frío.

<http://www.ciclismoafondo.es/entrenamiento/preparacion-fisica/articulo/la-termorregulacion>. 14/04/2016

FIGURA 9. Aplicación del aislante en la construcción.

http://www.ceramicamarlo.com/es/soluciones-constructivas-familia.asp?id_tipo=2. 14/04/2016.

FIGURA 10. Métodos de transferencia de calor.

<http://termoycalor.blogspot.com.es/2015/12/condiciones-de-frontera-e-iniciales.html>. 15/04/2016

FIGURA 11. Transferencia de calor del interior de un edificio al exterior.

http://laplace.us.es/wiki/index.php/Calor_y_calorimetr%C3%ADa. 15/04/2016.

FIGURA 12. Ecuación de Fourier para una pared plana. ÇENGEL, YUNUS A. *Transferencia de calor*. 2º Edición, McGraw-Hill Interamericana. (2004). 16/04/2016.

FIGURA 13. Representación de una pared plana. ÇENGEL, YUNUS A. *Transferencia de calor*. 2º Edición, McGraw-Hill Interamericana. (2004). 16/04/2016.

FIGURA 14. . Formula de Fourier en condiciones estables. ÇENGEL, YUNUS A. *Transferencia de calor*. 2º Edición, McGraw-Hill Interamericana. (2004). 16/04/2016.

FIGURA 15. Conductividad térmica en diferentes materiales.
http://www.aipex.es/faq_es.php?s=9. 17/04/2016.

FIGURA 16. Gráfica de la conductividad térmica de los materiales en estado gaseoso, según la temperatura. KREITH FRANK, MANGLIK RAJ M., BOHN MARK S. *Principios de transferencia de calor*. 7º Edición, CENGAGE Learning. (2012). 17/04/2016

FIGURA 17. Gráfica de la conductividad térmica de los materiales en estado líquido, según la temperatura. KREITH FRANK, MANGLIK RAJ M., BOHN MARK S. *Principios de transferencia de calor*. 7º Edición, CENGAGE Learning. (2012). 17/04/2016

FIGURA 18. Variación de la conductividad térmica de diversos sólidos, líquidos y gases, con la temperatura. ÇENGEL, YUNUS A. *Transferencia de calor*. 2º Edición, McGraw-Hill Interamericana. (2004). 18/04/2016

FIGURA 19. Equipo para el cálculo de la conductividad térmica de un material. ÇENGEL, YUNUS A. *Transferencia de calor*. 2º Edición, McGraw-Hill Interamericana. (2004). 18/04/2016

FIGURA 20. Transferencia de calor de una superficie caliente hacia el aire por convección. ÇENGEL, YUNUS A. *Transferencia de calor*. 2º Edición, McGraw-Hill Interamericana. (2004). 18/04/2016

FIGURA 21. Transferencia térmica por convección natural en un radiador. http://laplace.us.es/wiki/index.php/Calor_y_calorimetr%C3%ADa. 20/04/2016.

FIGURA 22. Transferencia de calor por convección forzada. http://help.solidworks.com/2016/Spanish/SolidWorks/cworks/c_Convection.htm?format=P&value=. 20/04/2016.

FIGURA 23. Ecuación de transferencia de calor por convección. ÇENGEL, YUNUS A. *Transferencia de calor*. 2º Edición, McGraw-Hill Interamericana. (2004). 20/04/2016.

FIGURA 24. Efecto de la radiación en cuerpos opacos y reflectantes. <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/negro/radiacion/radiacion.htm>. 22/04/2016.

FIGURA 25. Efecto de la radiación en materiales no opacos ni reflectantes. <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/negro/radiacion/radiacion.htm>. 22/04/2016.

FIGURA 26. Ecuación de Stefan-Boltzmann para un cuerpo negro. ÇENGEL, YUNUS A. *Transferencia de calor*. 2º Edición, McGraw-Hill Interamericana. (2004). 22/04/2016.

FIGURA 27. Radiación en un cuerpo negro.

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/negro/radiacion/radiacion.htm>.

22/04/2016.

FIGURA 28. Ecuación de transferencia por radiación emitida por un cuerpo.

ÇENGEL, YUNUS A. *Transferencia de calor*. 2º Edición, McGraw-Hill Interamericana. (2004). 22/04/2016.

FIGURA 29. Absorción de la radiación incidente sobre una superficie.

ÇENGEL, YUNUS A. *Transferencia de calor*. 2º Edición, McGraw-Hill Interamericana. (2004). 22/04/2016.

FIGURA 30. Transferencia de calor por radiación entre una superficie y la

superficie que la rodea. ÇENGEL, YUNUS A. *Transferencia de calor*. 2º Edición, McGraw-Hill Interamericana. (2004). 22/04/2016.

FIGURA 31. Ecuación para la transferencia de calor por radiación entre una

superficie y la superficie que la rodea. ÇENGEL, YUNUS A. *Transferencia de calor*. 2º Edición, McGraw-Hill Interamericana. (2004). 25/04/2016.

FIGURA 32. Instalación de un intercambiador para la refrigeración del agua de

un motor de un automóvil. . <http://nergiza.com/calefaccion-del-coche-consume-combustible-y-otras-preguntas-mas-que-razonables/>. 25/04/2016.

FIGURA 33. Modelo de intercambiador regenerativo dinámico.

<http://www.monografias.com/trabajos93/metodo-limpieza-precalentador-aire-regenerativo-ljungstrom/metodo-limpieza-precalentador-aire-regenerativo-ljungstrom.shtml>. 26/04/2016.

FIGURA 34. Intercambiador abierto. Elaboración propia. 29/04/2016

FIGURA 35. Intercambiador de doble tubo de flujo paralelo y contraflujo.

ÇENGEL, YUNUS A. *Transferencia de calor*. 2º Edición, McGraw-Hill Interamericana. (2004). 30/04/2016

FIGURA 36. Diferentes configuraciones de flujo en intercambiadores de calor de flujo cruzado. ROJAS FLORES AMANCIO R. *Intercambiadores de calor*.

<http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/interc.2010.1.pdf>.

30/04/2016

FIGURA 37. Funcionamiento del intercambiador de casco y tubos.

<http://www.directindustry.es/fabricante-industrial/tubo-intercambiador-calor-73751.html> 30/04/2016

FIGURA 38. Disposiciones del flujo en pasos múltiples en los intercambiadores de calor de casco y tubos. ROJAS FLORES AMANCIO R. *Intercambiadores de calor*.

<http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/interc.2010.1.pdf>.

30/04/2016

FIGURA 39. Elementos que componen un intercambiador de placas. SEDICAL. *Intercambiadores de Placas con juntas. Manual instrucciones de montaje y funcionamiento*. 30/04/2016.

FIGURA 40. Diferentes disposiciones de las conexiones de entrada y salida de los fluidos en los bastidores. SEDICAL. *Intercambiadores de Placas Sedical*. 30/04/2016.

FIGURA 41. Diferentes formas y tamaños de las placas del intercambiador. SEDICAL. *Producto, información sobre sistemas de intercambio térmico*. 30/04/2016

FIGURA 42. Placas de flujo libre. SEDICAL. *Producto, información sobre sistemas de intercambio térmico*. 30/04/2016

FIGURA 43. Placas de doble pared. SEDICAL. *Producto, información sobre sistemas de intercambio térmico*. 30/04/2016

FIGURA 44. Placas semisoldadas. SEDICAL. *Producto, información sobre sistemas de intercambio térmico*. 30/04/2016

FIGURA 45. Placas soldadas. SEDICAL. *Intercambiadores de Placas Sedical*. 30/04/2016.

FIGURA 46. Placa circular. SEDICAL. *Producto, información sobre sistemas de intercambio térmico.* 30/04/2016

FIGURA 47. Modelos de placa L (ángulo agudo) y H (ángulo obtuso). SEDICAL. *Intercambiadores de Placas Sedical.* 30/04/2016.

FIGURA 48. Combinación de los estampados L y H con otras corrugaciones. SEDICAL. *Intercambiadores de Placas Sedical.* 30/04/2016.

FIGURA 49. Elección del material de las juntas según las necesidades del sistema. SEDICAL. *Intercambiadores de Placas Sedical.* 30/04/2016.

FIGURA 50. Gráfico del comportamiento del NBR-Nitrito frente a la presión/temperatura. SEDICAL. *Intercambiadores de Placas Sedical.* 30/04/2016.

FIGURA 51. Gráfico del comportamiento del EPDM frente a la presión/temperatura. SEDICAL. *Intercambiadores de Placas Sedical.* 30/04/2016.

FIGURA 52. Gráfico comparativo entre EPDM y NBR-Nitrito temperatura/tiempo. SEDICAL. *Intercambiadores de Placas Sedical.* 30/04/2016.

FIGURA 53. Gráfico del comportamiento del Flúor y Vitón frente a la presión/temperatura. SEDICAL. *Intercambiadores de Placas Sedical.* 30/04/2016.

FIGURA 54. Acople de la junta a la placa del intercambiador. . SEDICAL. *Intercambiadores de Placas con juntas. Manual instrucciones de montaje y funcionamiento.* 02/05/2016.

FIGURA 55. Orientación de las placas “B” y “A”. . SEDICAL. *Intercambiadores de Placas con juntas. Manual instrucciones de montaje y funcionamiento.* 02/05/2016.

FIGURA 56. Placa “D”. . SEDICAL. *Intercambiadores de Placas con juntas. Manual instrucciones de montaje y funcionamiento.* 02/05/2016.

FIGURA 57. Placa “B”. . SEDICAL. *Intercambiadores de Placas con juntas. Manual instrucciones de montaje y funcionamiento.* 02/05/2016.

FIGURA 58. Placa “A”. . SEDICAL. *Intercambiadores de Placas con juntas. Manual instrucciones de montaje y funcionamiento.* 02/05/2016.

FIGURA 59. Última placa (bastidor móvil). . SEDICAL. *Intercambiadores de Placas con juntas. Manual instrucciones de montaje y funcionamiento.* 02/05/2016.

FIGURA 60. Funcionamiento del intercambiador de placas. *INGC Ingeniería y Capacitación.* <https://www.youtube.com/watch?v=bk-2psGBRG4>. (2014). 03/05/2016.

FIGURA 61. Unidad CIP.

http://es.made-in-china.com/co_zjgkz2010/image_Automatic-Cip-Cleaning-in-Place-System-CIP-heuiusryg_KMzQuBSILjgN.html. 03/05/2016.

FIGURA 62. Características de los intercambiadores de espiral. TRANTER. <http://www.tranter.com/es/products/spiral-heat-exchangers>. 10/05/2016.

FIGURA 63. Espiral del intercambiador formado por dos láminas enrolladas entre sí. TRANTER. *Spiral Heat Exchangers.* <https://www.youtube.com/watch?v=a4fCOBU-k9Q&t=46s>. (09/04/2014). 15/05/2016.

FIGURA 64. a) Interior del intercambiador de calor en espiral. b) Bloque de espiral. TRANTER. *Spiral Heat Exchangers.* <https://www.youtube.com/watch?v=a4fCOBU-k9Q&t=46s>. (09/04/2014). 15/05/2016.

FIGURA 65. Despiece del intercambiador de espiral. TRANTER. *Spiral Heat Exchangers.* <https://www.youtube.com/watch?v=a4fCOBU-k9Q&t=46s>. (09/04/2014). 15/05/2016.

FIGURA 66. Refuerzos soldados en los canales de espiral. Elaboración Propia. (SEDICAL). 16/05/2016.

FIGURA 67. a) Núcleo del intercambiador con refuerzos. b) Núcleo del intercambiador sin refuerzos. Elaboración Propia. (SEDICAL). 16/05/2016.

FIGURA 68. Distintos diseños de construcción del intercambiador de espiral. KUPPAN. T. *Heat Exchanger Design Handbook*. Marcel Dekker, Inc. (2000). 17/05/2016.

FIGURA 69. Plano de construcción del intercambiador de espiral. Elaboración SEDICAL. 03/06/2016.

FIGURA 70. a) Entradas y salidas de los flujos en un intercambiador de espiral. b) Disposición de la dirección de los fluidos en contraflujo. ALFA LAVAL. <http://www.alfalaval.mx/productos/heat-transfer/plate-heat-exchangers/intercambiadores-de-calor-espirales-soldados/> 19/05/2016.

FIGURA 71. Funcionamiento del intercambiador de espiral. *SONDEX. Spiral Heat Exchangers*. Catalogo comercial. 20/05/2016.

FIGURA 72. Sistema de autolimpieza del intercambiador. STANDARD XCHANGE. *Spiralex. The New Standard in Spiral Heat Exchangers*. <http://www.antumec.com/wp-content/uploads/2014/05/SpiralEx.pdf>. (2013). 25/05/2016.

FIGURA 73. Economizadores en el buque Sorolla. Elaboración propia. 07/06/2016.

FIGURA 74. Tanque de almacenamiento del combustible (F.O.). Elaboración propia. 07/06/2016.

FIGURA 75. Generador de agua destilada del buque Sorolla. Elaboración propia. 07/06/2016.

FIGURA 76. Intercambiador de placas para el agua de refrigeración de los motores en el buque Sorolla. Elaboración propia. 08/06/2016.

FIGURA 77. Intercambiador de aceite de lubricación de motor del buque Sorolla. Elaboración propia. 08/06/2016.

FIGURA 78. Condensador de vapor sobrante en el buque Sorolla. Elaboración propia. 09/06/2016.

FIGURA 79. Módulo de combustible del buque Sorolla. Elaboración propia. 09/06/2016.

FIGURA 80. a) Depuradora de combustible del buque Sorolla. b) Intercambiador de placas soldadas para la depuradora de combustible del buque Sorolla. Elaboración propia. 10/06/2016.

FIGURA 81. Sección del plano de refrigeración centralizada de la línea de estribor, señalando en amarillo los intercambiadores de aceite y en azul el de agua. Elaboración propia (plano del buque Sorolla). 15/06/2016

FIGURA 82. Circuito de enfriamiento del aceite de lubricación de motor del buque Sorolla. Elaboración propia. 20/06/2016.

FIGURA 83. Software para el diseño del intercambiador de calor de placas. Elaboración propia (SEDICAL). 25/11/2016.

FIGURA 84. Características del fluido primario. Elaboración propia (SEDICAL). 25/11/2016

FIGURA 85. Características del diseño del intercambiador de calor de placas para el proceso. Elaboración propia (SEDICAL). 25/11/2016

FIGURA 86. Plano del diseño del intercambiador de calor de placas. Elaboración propia (SEDICAL). 25/11/2016

FIGURA 87. Hoja de cálculo Excel para el diseño del intercambiador de calor de espiral. Elaboración propia (SEDICAL). 25/11/2016.

FIGURA 88. Relación entre superficie adicional y pérdida de carga. Elaboración propia (SEDICAL). 25/11/2016.

FIGURA 89. Selección de medidas y modelo del intercambiador de espiral. Elaboración propia (SEDICAL). 25/11/2016.

FIGURA 90.Selección de studs para los canales de los fluidos. Elaboración propia (SEDICAL). 25/11/2016

FIGURA 91.Selección del espesor de las chapas de los canales. Elaboración propia (SEDICAL). 25/11/2016.

FIGURA 92.Características del diseño del intercambiador de calor de espiral para el proceso N^o1. Elaboración propia (SEDICAL). 25/11/2016.

FIGURA 93.Características del diseño del intercambiador de calor de espiral para el proceso N^o2. Elaboración propia (SEDICAL). 25/11/2016.

FIGURA 94.Plano del diseño del intercambiador de calor de espiral. Elaboración propia (SEDICAL). 25/11/2016.

FIGURA 95.Área de transferencia térmica efectiva en el intercambiador de placas del diseño. Elaboración propia (SEDICAL). 25/11/2016.

FIGURA 96.Área de transferencia térmica efectiva en el intercambiador de espiral del diseño. Elaboración propia (SEDICAL). 25/11/2016

FIGURA 97.Peso del intercambiador de placas del diseño. Elaboración propia (SEDICAL). 25/11/2016.

FIGURA 98.Peso del intercambiador de espiral del diseño. Elaboración propia (SEDICAL). 25/11/2016.

FIGURA 99.Precio del intercambiador de placas del diseño. Elaboración propia (SEDICAL). 25/11/2016.

FIGURA 100.Precio del intercambiador de espiral del diseño. Elaboración propia (SEDICAL). 25/11/2016.

FIGURA 101.Intercambiador de calor para una planta de procesos químicos. Elaboración propia (SEDICAL). 25/11/2016.

FIGURA 102.Intercambiador de calor en espiral para una planta de aguas residuales. Elaboración propia (SEDICAL). 25/11/2016.

TABLA 1. Comparación de los conceptos entre las teorías del calor; como energía y como sustancia. Elaboración propia. 12/04/2016.

TABLA 2. Variación de la conductividad térmica del cobre y aluminio con la temperatura. ÇENGEL, YUNUS A. *Transferencia de calor*. 2º Edición, McGraw-Hill Interamericana. (2004). 14/04/2016

TABLA 3. Ventajas y desventajas del intercambiador de placas frente al multitubular. Elaboración propia. 02/05/2016.

9. BIBLIOGRAFÍA.

- [1]. GOOGLE PATENTS. *Intercambiador de calor de placas apiladas, en espacial para aceite de motor.*
<http://www.google.st/patents/WO2003085240A1?cl=es>.
- [2]. OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS. *Un intercambiador de calor en espiral.* N° de publicación 2477887.
<https://patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/abdfae15395eb6d53e0a/2477887.pdf>.
- [3]. PATENTADOS.COM. *Un intercambiador de calor en espiral.*
<http://patentados.com/patente/intercambiador-de-calor-en-espiral/>.
- [4]. OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS. *Intercambiador de calor de haz tubular con revestimiento de fondo de tubo resistente al desgaste.* N° DE PUBLICACION 2363248.
http://www.oepm.es/pdf/ES/0000/000/02/36/32/ES-2363248_T3.pdf.
- [5]. GOOGLE PATENTS. *Intercambiador de calor tanque de fermentación.*
<http://www.google.es/patents/WO2004031340A1?cl=es>.
- [6]. PATENTADOS.COM. *Nuevos materiales compuestos inorgánicos salinos par la fabricación de fluidos caloportadores y concentradores.*
<http://patentados.com/patente/nuevos-materiales-compuestos-inorganicos-salinos-fabricacion-fluidos/>.
- [7]. SANCHEZ BANDA FELIPE. *Generan energía con biogás en Saltillo.* Conacyt agencia informativa.
<http://conacytprensa.mx/index.php/tecnologia/energia/9601-generan-energia-con-biogas-en-saltillo> (2016). F. Consulta: 10/11/2016.
- [8]. AGRO WASTE. *Digestión anaerobia.* <http://www.agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/DIGESTION-ANAEROBIA.pdf>. F. Consulta: 01/12/2016.
- [9]. ERENOVABLE. *Energía geotérmica.* <http://erenovable.com/energia-geotermica/> (2016). F. Consulta: 13/11/2016.
- [10]. AGENCIA IBEROAMERICANA PARA LA DIFUSION DE LA CIENCIA Y LA TECNOLOGIA. *Una investigación pretende crear sondas geotérmicas más eficientes.* <http://www2.dicyt.com/noticias/una-investigacion-pretende-crear-sondas-geotermicas-mas-eficientes> (2010). F. Consulta: 14/11/2016.

- [11]. REJANO FLORES LUIS. *Diferencias entre energía termosolar y fotovoltaica*. <http://www.laenergiadelcambio.com/diferencias-entre-energia-termsolar-y-fotovoltaica-2>. F. Consulta: 23/11/2016.
- [12]. ACCIONA ENERGIA. <http://www.accion-energia.com/es/areas-de-actividad/otras-tecnologias/termsolar/instalaciones-destacadas/termsolar-majadas/>. F. Consulta: 24/11/2016.
- [13]. ÇENGEL, YUNUS A. *Transferencia de calor*. 2º Edición, McGraw-Hill Interamericana. (2004).
- [14]. *Historia del concepto transferencia de calor a través del tiempo*. <http://transdec calor.galeon.com/cvitae2163559.html>. F. Consulta: 08/04/2016.
- [15]. *Antoine-Laurent Lavoisier*. Biografías y vidas. La enciclopedia biográfica en línea. <http://www.biografiasyvidas.com/biografia/l/lavoisier.htm>. F. Consulta: 13/04/2016.
- [16]. *Benjamin Thompson*. Wikipedia. La enciclopedia libre. https://es.wikipedia.org/wiki/Benjamin_Thompson (2010). F. Consulta: 13/04/2016.
- [17]. DOMINGO NAVAS ROSARIO. *Joule James Prescott (1818-1889)*. Mcn biografías. <http://www.mcnbiografias.com/app-bio/do/show?key=joule-james-prescott>. F. Consulta: 13/04/2016.
- [18]. MARTÍN BLAS TERESA, SERRANO FERNANDEZ ANA. *Equivalente mecánico del calor*. Termodinámica. Universidad politécnica de Madrid. <http://acer.forestales.upm.es/basicas/udfisica/asignaturas/fisica/termo1p/joule.html>. F. Consulta: 13/04/2016.
- [19]. JIMENEZ JOAQUÍN. *Evolución del concepto calor y su relación con el concepto energía*. Perezi. <https://prezi.com/5qlgvndfvtoj/evolucion-del-concepto-calor-y-su-relacion-con-el-concepto-energia/> (2013). F. Consulta: 13/04/2016.
- [20]. SILVINA NATALIA. *Aéreas de aplicación de la transferencia de calor*. Blogger. <http://portaldelasmaticas1.blogspot.com.es/2011/12/areas-de-aplicacion-de-la-transferencia.html> (2011). F. Consulta: 14/04/2016.
- [21]. *Jean Baptiste Joseph Fourier*. Biografías y vidas. La enciclopedia biográfica en línea. <http://www.biografiasyvidas.com/biografia/f/fourier.htm>. F. Consulta: 16/04/2016.
- [22]. KREITH FRANK, MANGLIK RAJ M., BOHN MARK S. *Principios de transferencia de calor*. 7º Edición, CENGAGE Learning. (2012).

- [23]. *La radiación del cuerpo negro*. Mecánica cuántica.
<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/negro/radiacion/radiacion.htm>. F.
Consulta: 22/04/2016.
- [24]. WELTI JAMES R. *Transferencia de calor aplicada a la ingeniería*. Limusa S.A. (1996).
- [25]. *La ley de la conservación de la masa*.
<https://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0314-01/leyconma.htm>. F.
Consulta: 15/12/2016.
- [26]. NUÑEZ OTTO. *Primera ley de la termodinámica*. Vix.
<http://www.vix.com/es/btg/curiosidades/4383/la-primera-ley-de-la-termodinamica>. F. Consulta: 15/12/2016.
- [27]. SEDICAL. *Intercambiadores de Placas con juntas. Manual instrucciones de montaje y funcionamiento*. F. Consulta: 30/04/2016.
- [28]. MEGA MEX. *Metales espaciales bajo demanda*.
<http://megamex.com/span/hastelloy.htm>. F. Consulta: 30/04/2016.
- [29]. JN ACEROS BLOG. *El portal del acero inoxidable*.
<http://www.jnaceros.com.pe/blog/acero-inoxidable-304-316-resistencia-corrosion/>. F. Consulta: 30/04/2016.
- [30]. SEDICAL. *Producto, información sobre sistemas de intercambio térmico*. F. Consulta: 30/04/2016.
- [31]. INDEL CASA. *Intercambiadores del calor a placas*.
<http://www.indelcasa.es/cat/descargas/prod/2247..pdf>. F. Consulta: 30/04/2016.
- [32]. SEDICAL. *Intercambiadores de Placas Sedical*. F. Consulta: 30/04/2016.
- [33]. HABASIT. *Goma de nitrilo butadieno (NBR)*.
<http://www.habasit.com/es/goma-nitrilo-butadieno.htm>. F. Consulta: 15/12/2016.
- [34]. ERICA. *EPDM Etileno Propileno*. <http://www.ericas.es/web/epdm-etileno-propileno/>. F. Consulta: 15/12/2016.
- [35]. ELAPLAS. *Viton FPM*. <http://www.elaplas.es/materiales/cauchos-y-elastomeros/viton-fpm/>. F. Consulta: 15/12/2016.
- [36]. INGC. *Intercambiador de placa*. <https://www.youtube.com/watch?v=bk-2psGBRG4&t=3s>. (2014). F. Consulta: 03/05/2016.
- [37]. GRUPO FERROLI. *Manual de uso y mantenimiento intercambiadores de placas*. 2º Edición. (2011).

- [38]. CUCHI LEANDRO. *Equipos de limpieza CIP*.
http://www.cuben.com.ar/catalogos/01_ARTICULO_TECNICO_CIP_CUBEN.pdf
f. F. Consulta: 20/05/2016.
- [39]. GONZÁLEZ ANTONIO. *Productos naturales marinos: nuevas alternativas para el viejo problema del biofouling*. Universidad de la lengua.
https://vmartin.webs.ull.es/Temp/Segundo_Premio_Alberto.pdf. (2010). F.
Consulta: 15/12/2016.
- [40]. KUPPAN. T. *Heat Exchanger Design Handbook*. Marcel Dekker, Inc. (2000).
- [41]. GONZÁLEZ MAHULI A. *Unidad N°4 Intercambiadores de calor*. Universidad nacional experimental Francisco de Miranda.
<https://operacionesunitarias1.files.wordpress.com/2011/07/unidad-iv-intercambiadores-de-calor.pdf>. F. Consulta: 10/05/2016.
- [42]. TRANTER. *Spiral Heat Exchangers*.
<https://www.youtube.com/watch?v=a4fCOBU-k9Q&t=46s>. (2014). F. Consulta: 15/05/2016.
- [43]. JNC. *Intercambiador espiral*. <http://www.jnegre.com/intercambiador-de-calor-en-espiral.html>.
- [44]. *Protección anódica*.
https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm12/pfcm12_5_4.html. F. Consulta: 15/12/2016.
- [45]. SEDICAL. *Intercambiadores espirales. Solución perfecta para gestión y tratamiento de fangos y lodos en EDAR*. F. Consulta: 20/05/2016.
- [46]. STANDARD XCHANGE. *Spiralex. The New Standard in Spiral Heat Exchangers*. <http://www.antumec.com/wp-content/uploads/2014/05/SpiralEx.pdf>. (2013). F. Consulta: 23/05/2016.
- [47]. BLOGGER. *CONVENIOS MARITIMOS INTERNACIONALES. MARPOL 73/78*. <http://conveniosmaritimos.blogspot.com.es/2015/02/marpol-7378.html>. (2015). F. Consulta: 20/12/2016.
- [48]. TRASMEDITERRANEA. *Características del buque Sorolla*. F. Consulta: 2014.
- [49]. SEDICAL. *Características de los aceites lubricantes*. F. Consulta: 20/11/2016.

