

GRADO EN MARINA
**TRABAJO FIN DE
GRADO**

***PREVENCIÓN DEL BIOFOULING Y
MANTENIMIENTO DE INSTALACIONES
MARÍTIMAS***

DOCUMENTO 1- MEMORIA

Alumno/Alumna: UNAI ARANCON YOLDI

Director/Directora: MIGUEL ANGEL GOMEZ SOLAECHE

Curso: 2017/2018

Fecha: MARTES, 13, FEBRERO, 2018

Índice

INTRODUCCIÓN	5
ESTADO DEL ARTE	7
1.1-Biofouling	7
1.2.- Formación y desarrollo de una bioincrustación	8
1.3.- Propiedades biológicas de las bioincrustaciones	12
1.4.- Concepto de biofouling	14
1.5.- Factores que influyen a la acumulación de biofouling.....	15
1.5.1.- <i>Composición del soporte</i>	15
1.5.2.- <i>Temperatura del soporte</i>	16
1.5.3.- <i>Temperatura del agua</i>	17
1.5.4.- <i>Velocidad del agua</i>	17
2.- Intercambiadores de calor – Enfriadores	17
2.1.- <i>Intercambiadores de calor</i>	17
2.2.- <i>Condiciones que afectan a la trasmisión de calor</i>	19
OBJETIVOS.....	21
MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	22
3.1.- Sistemas del buque.....	22
3.1.1.- <i>Sistema de agua salada de refrigeración</i>	24
3.1.2.- <i>Sistema de refrigeración de alta temperatura</i>	27
3.2.- Control del ensuciamiento en el enfriador de alta temperatura	31
3.3.- Interpretación de los datos.....	34
RESULTADOS	36
DISCUSIÓN	39
4.1.- Métodos de limpieza.....	39
4.1.1.- <i>Alta velocidad de agua o contraflujo</i>	39
4.1.2.- <i>Aumentar el área de intercambio de calor</i>	40
4.1.3.- <i>Limpieza de la placas</i>	40
4.1.4.- <i>Dosificación química</i>	40
CONCLUSIÓN	42

Índice de figuras

Figura 1. Flujo de agua.....	8
Figura 2. Adhesión de partículas.....	9
Figura 3. Multiplicación de las moléculas.....	10
Figura 4. Acumulación de partículas.....	10
Figura 5. Enfriador de placas.....	17
Figura 6. Buque Ro-Pax Dimonios.....	22
Figura 7. Enfriadores de alta temperatura.....	25
Figura 8. Toma de mar alta.....	24
Figura 9. Filtro de mar.....	24
Figura 10. Precalentador de agua.....	27
Figura 11. Bomba de refrigeración acoplada a motor principal.....	29

Índice de tablas

Tabla 1. Tipos de algas.....	12
Tabla 2. Tabla de correlaciones.....	33

Índice de gráficas

Gráfica 1. Temperatura de agua de mar.....	31
Gráfica 2. Entrada/salida de agua dulce de enfriadores.....	32
Gráfica 3. Diagrama CUSUM.....	35

INTRODUCCIÓN

Las aguas de los océanos y mares se basan en una compleja solución de componentes inorgánico y orgánicos. En dicha solución podemos encontrar disueltos iones de sodio y iones de cloruro, sumándolos obtendremos más del 85% de las sustancias disueltas. En no tan altas concentraciones, encontramos mezclas de todos los elementos existentes en la tierra, los cuales se ocupan del desarrollo de la vida marina. También encontramos gases disueltos como: nitrógeno, oxígeno y dióxido de carbono; todos ellos generados gracias el continuo contacto con la atmosfera y los procesos de fotosíntesis.

Existe una gran variedad de organismos disueltos en el agua marina que son capaces de adherirse a una superficie para crear una incrustación. Dentro de estos grupos encontramos dos subgrupos: *Procariotes* y *Eucariotes*. En estos últimos hallamos un grupo llamado los *Protistas*, que incluyen los miembros microscópicos ocupados de la vida marina (López, 1998).

Estos organismos incrustantes, varían mucho de unas aguas a otras, ya que dependen de muchos factores físico-químicos: la luz solar, salinidad, pH, acidez, dureza, oxígeno disuelto, carbono dióxido disuelto, cloruros, densidad, viscosidad y temperatura. Una vez adheridos los organismos a la superficie, realizan una serie de reacciones que inician y aceleran la biocorrosion.

Por otro lado, las incrustaciones en superficies metálicas se producen por varias especies fisiológicamente diferentes, cuya composición esta determinada por las condiciones ambientales próximas. Las incrustaciones de las diferentes especies se desarrollan unas juntas a otras, formando la llamada *biopelícula*.

Uno de los elementos que más sufre la adherencia del microorganismos en los sistemas industriales y marítimos son los intercambiadores de calor. Comúnmente son usados para transferir calor entre dos fluidos. En dichos dispositivos, la generación de las biopelículas es sencilla ya que uno de los fluidos usados suele ser agua, tanto dulce como salada.

En este estudio se expondrán los diversos problemas generados por las incrustaciones de organismos sobre los sistemas que se encuentran en contacto con el agua marina, centrándose en los problemas generados en las instalaciones que se hayan a bordo del buque

Ro-Pax “Dimonios”. Se explicará también el funcionamiento del sistema de refrigeración de los motores principales que se encuentran a bordo, exponiendo los problemas que crea el *fouling* en los intercambiadores de calor de este último circuito.

Con todo ello, se mostrarán y propondrán métodos para prevenir la reproducción de *fouling* en la instalación ya nombrada.

ESTADO DEL ARTE

1.1-Biofouling

La fijación de las comunidades de organismos incrustantes tiene que evitarse por los efectos importantes que causa en la instalaciones, por ejemplo, en el casco de una embarcación genera un incremento de la resistencia de avance. Como también los procesos de corrosión que generan en los diferentes equipos industriales o marinos, los cuales se intensifican en función de las siguientes acciones:

1. Cambios en la composición del agua en contacto directo con los organismos.
2. Producción de ácidos y gas hidrogeno.
3. Una alteración en el proceso anódico en las áreas cubiertas por las incrustaciones.

Cabe decir que no solo tiene importancia el asentamiento de animales y plantas cuando aún están con vida, si no que cuando estos organismos mueren unidos a una superficie, sus restos originan un nuevo asentamiento para futuros organismos que prefieren este soporte que el inicial.

Las creación de biopelículas siempre ha sido un problema para los armadores como para operadores de industria, los cuales siempre han estado buscando medios que eviten la incrustación de microorganismos en sus instalaciones. Uno de los medios más antiguo es el de las pinturas, conocidas en el ámbito náutico como “patentes”.

Las pinturas se utilizan ampliamente en la protección de estructuras y equipos industriales, el modo de actuación de estas se basa en la liberación de sustancias bioactivas. La efectividad de este tipo de pinturas depende de que el agente tóxico este presente en la superficie de la pintura justo cuando los organismos acuáticos traten de fijarse (Garcia, 2010).

Antes de aplicar estas pinturas para lograr la mayor durabilidad de estas, se aplica en las superficies metálicas un chorreado a presión con un abrasivo, generalmente granalla de acero o mineral de cobre. Pero actualmente también existen tendencias que afectan menos al medio ambiente, como puede ser el chorreado con agua a muy alta presión. Ambos chorreados eliminaran cualquier impureza que puedan afectar a la buena aplicación de la patente.

Por otra parte, las incrustaciones biológicas adheridas a los tubos o placas de un intercambiador de calor supone un gran problema en la industria tanto terrestre como naval.

Los depósitos biológicos adheridos a las superficies interiores de los intercambiadores de calor, disminuyen la transferencia de calor, causan pérdidas de presión de vacío y aumentan la resistencia al flujo, con todo ello la consiguiente pérdida del rendimiento de la instalación.

No hay duda que en un buque o en una plataforma offshore el medio refrigerante siempre será el agua de mar. En estas instalaciones se encuentran infinidad de intercambiadores de calor, como pueden ser: condensadores, enfriadores, evaporadores, calderas, etc. Los que más sufren el problema de las incrustaciones son los condensadores y los enfriadores, ya que por ellos circula agua de mar.

1.2.- Formación y desarrollo de una bioincrustación

La formación de la bioincrustación sobre una superficie sumergida en agua salada es un consecuencia inevitable de una serie de sucesos que comienzan con la fijación de moléculas orgánicas en la superficie del equipo, seguido por el crecimiento y reproducción de las células.

Asimismo, el desarrollo de una bioincrustación sobre una superficie en contacto con un fluido es el resultado neto de varios procesos físicos, químicos y biológicos, entre los cuales enumeramos los siguientes:

1. Transporte de partículas biológicas desde el fluido a la superficie.
2. Adhesión de células a la superficie.
3. Reacciones químicas y microbianas en la superficie, generando un crecimiento de procesos metabólicos. Siendo reacciones microbianas los conjuntos de procesos por los cuales un microorganismo obtiene energía y los nutrientes necesarios para vivir y reproducirse (Wikipedia, 2017).
4. Separación o desprendimiento de la superficie por esfuerzos cortantes del fluido.

Por otro lado, las bacterias son cuerpos que están cargados con potencial negativo, hidrófobas, y teniendo en cuenta la superficie en la que se adhieren, se pueden considerar partículas disueltas vivientes.

Las bacterias en grupo son capaces de metabolizar los sustratos que encuentran en las superficies, comenzando su crecimiento y reproducción. En sistemas de flujo, donde las bacterias incrustadas reciben un constante suministro de nutrientes, la rápida multiplicación y atracción de nuevas partículas del seno del fluido, da como resultado el desarrollo de la biopelícula.

Las principales causas por las que las bacterias suspendidas en el fluido se adhieren a la superficie de un equipo son:

- *Las fuerzas dinámicas de los fluidos.* Las corrientes en las diferentes capas del agua proporciona el principal mecanismo para el transporte de bacterias.
- *Sedimentación.* La sedimentación bacteriana se genera normalmente en fluidos que se encuentran en reposo.
- *Movimiento Browniano.* Es un grado de desplazamiento que muestran las partículas menores de $1.0\ \mu\text{m}$.

El conjunto de procesos mencionados anteriormente se pueden observar separados en diferentes etapas, en las siguientes figuras:

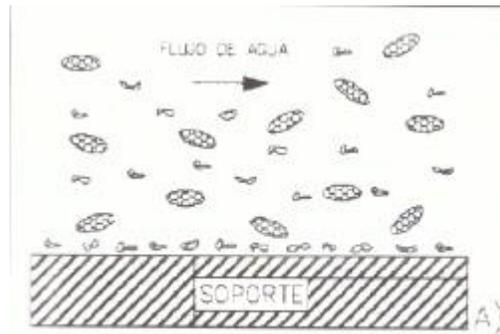


Figure 1. Flujo de agua (Fuente: (López, 1998))

En la figura 1 se presenta un punto inicial del proceso de incrustación, lo que se entiende como la primera fase de la bioincrustación, donde la superficie se encuentra limpia y está expuesta a un flujo de régimen turbulento. Este flujo contiene microorganismos y nutrientes, los cuales harán que en pocos minutos comiencen adherirse organismos a la superficie, formando la

primera capa. Las moléculas orgánicas fijadas harán como sustrato para el crecimiento bacteriano posterior a la primera capa.

Por otra parte, el flujo de partículas hacia una superficie se aumenta con la velocidad del propio fluido, estando también vinculado este flujo con las propiedades de las partículas, como pueden ser el tamaño, forma y densidad.

La adhesión de microorganismos a las superficies puede depender de la carga energética que tenga y su rugosidad. La rugosidad varía considerablemente con los materiales del soporte y el grado de hidrofobicidad que tenga el material de la superficie. Incluso en soportes aparentemente lisos pueden encontrarse ondulaciones de hasta $10\mu\text{m}$, lo suficiente para proporcionar cobijo a pequeñas bacterias (López, 1998).

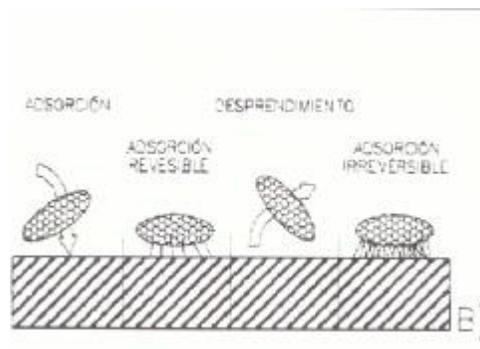


Figure 2. Adhesión de partículas (Fuente: López, 1998)

En la figura 2 se muestra la segunda etapa de la adhesión de microorganismos a la primera capa formada anteriormente.

Algunas moléculas se adhieren al soporte por un tiempo limitado, para desprenderse después. Este fenómeno de incrustación se le conoce como adhesión reversible. Como se aprecia en la figura 2 la molécula se adhiere de cierta manera a la superficie pero no por completo, lo que hace que pueda ser desprendida del soporte por una moderada fuerza de arrastre (López, 1998).

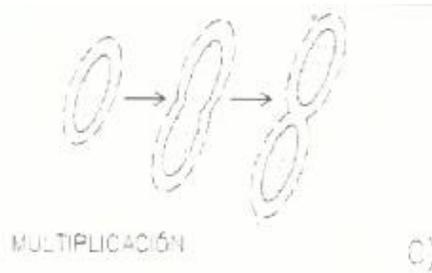


Figure 3. Multiplicación de las moléculas
(Fuente: (López, 1998))

Por otro lado, tenemos el fenómeno de adhesión irreversible en el cual las moléculas se adhieren a la superficie por un tiempo ilimitado. Esto no quiere decir que no se desprendan nunca, si no que no es posible separarlas del soporte por medio de una fuerza moderada cortante.

El crecimiento de la bioincrustación se presenta fundamentalmente en función del pH, temperatura , concentración de nutrientes y concentración de microorganismos adheridos.

Para que el crecimiento ocurra todos los microorganismos presentes en el sistema asimilan los nutrientes, sintetizan nueva biomasa y producen nuevas células. La producción de biomasa es el resultado de la reproducción celular, como se muestra en la figura 3.

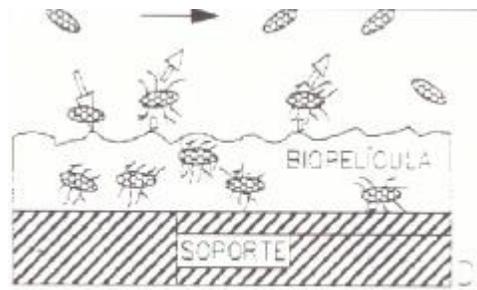


Figure 4. Acumulación de partículas
(Fuente: (López, 1998))

Por último, fracciones de la bioincrustación se desprenden y son reintegradas al fluido, como se aprecia en la figura 4. Este proceso depende de las condiciones hidrodinámicas, es decir, diferentes causas que puedan afectar a la propiedades del fluido. Algunas de esas causas son las siguientes:

- *Cambios de las propiedades superficiales bacterianas.* Algunas bacterias obtienen propiedades que hacen que las fimbrias adhesivas se cierren, desincrustando así la bacteria del soporte.
- *Cambios en las propiedades de la superficie.* Al cambiar ciertas propiedades del material de la superficie puede generarse cierta hidrofobia, liberando así bacterias.
- *Liberación de células hijas.* Ciertas partículas adheridas al soporte liberan células hijas directamente al flujo del fluido.
- *Ruptura de los polímeros de anclaje.* Por esfuerzos cortantes generados por el flujo turbulento ciertas polímeros que ligan las células al soporte se pueden romper.

En esta descripción la generación de la biopelícula se produce por etapas pero en la realidad ocurre simultáneamente como se muestra en la siguiente figura 5.

1.3.- Propiedades biológicas de las bioincrustaciones

Para conocer más las bioincrustaciones, hay que saber que poseen dos componentes principales: los microorganismos y una red de polímeros extracelulares. Los microorganismos en las bioincrustaciones poseen una película biológica madura que puede contener 10^6 células/ m^3 (10^3 células/litro) y que la diversidad de los mismos va desde los virus a los complejos organismos multicelulares con orgánulos especializados.

Dentro de los microorganismos podemos incluir las microalgas, los hongos, los protozoos, las bacterias y los virus. Aunque las bacterias son los microorganismos dominantes en la mayoría de biopelículas. Las microalgas, los hongos y los protozoos son del grupo de microorganismos llamado *Eucariotes*. En la siguiente tabla se presentan los grupos mas extensos de algas, estando las microalgas contenidas en todo los grupos excepto en el de la *Phaeophita* (López, 1998).

División	Nombre común	Morfología	Pared celular
<i>Chlorophita</i>	Alga verde	Unicelular, filamentosa	Celulosa
<i>Euglenophyta</i>	Euglenida	Unicelular	Sin pared
<i>Pyrrophita</i>	Dinoflagelada	Unicelular, pocos filamentos	
<i>Chrysophita</i>	Diatomea	Unicelular, filamentosa	Dos medios solapes, frecuente contenido de sílices
<i>Phaeophita</i>	Alga marrón	Multicelular	Celulosa y algitano
<i>Rhodophita</i>	Alga roja	Unicelular	Celulosa

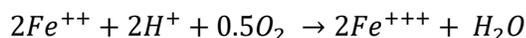
Tabla 1. Tabla de tipos de algas

Las bacterias se encuentran en el grupo de los *Procariotes*. Estos organismos capturan la energía para su metabolismo y crecimiento, las principales fuentes de energía utilizadas por estos microorganismos son la luz y los puestos orgánicos e inorgánicos reducidos.

Los principales grupos de bacterias comprenden (López, 1998):

- *Bacterias fotosintéticas*. Todas estas bacterias usan la luz como fuente de energía.
- *Bacterias quimiolitotrofas*. Obtienen su energía de la oxidación de compuestos inorgánicos y obtienen su carbono de la síntesis de compuestos orgánicos, a partir del CO_2 . Dentro de las bacterias quimiolitotrofas se encuentran algunas características en la corrosión de los equipos.

A continuación se presenta una reacción típica sobre hierro o tubería de acero dulce:



- *Bacterias heterótrofas*. Requieren de un sustrato de carbono orgánico como fuente de energía.

1.4.- Concepto de biofouling

Después de exponer como se genera una bioincrustación, se debe explicar los tipos de biopelículas que se forman y como. No siempre una película biológica formada sobre una superficie puede ser perjudicial para el sistema, es decir, comúnmente podemos utilizarlas de manera positiva, por ejemplo en los tratamientos de aguas residuales. Pero este no es nuestro caso, nosotros trataremos el desarrollo de bioincrustaciones que afectan negativamente al proceso industrial o naval en cuestión.

Habitualmente, a esta formación biológica la hemos denominado biopelícula, bioincrustación, incrustación biológica o *biofouling*. A partir de ahora, nos referiremos a la incrustación biológica con el nombre de *biofouling*, ya que es el usado en estructuras artificiales, como es nuestro caso.

La palabra *biofouling* proviene de *fouling*, el termino mas genérico para una bioincrustación. Como ya sabemos el *fouling* es la acumulación de depósitos biológicos sobre una superficie en contacto con un fluido. Actualmente esta son las formas de *fouling* (Sánchez, 2014):

1. *Fouling biológico*. Este es el termino que se esta empleando habitualmente en la literatura escrita castellana para designar la adherencia y crecimiento de vida animal y vegetal sobre estructuras artificiales sumergidas o en contacto con ambientes marinos. Esta acumulación puede ser de dos tipos: De macro organismos (biofouling macrobiano) o de microorganismos (biofouling microbiano).
2. *Fouling por reacción química*. Serviría como ejemplo la polimerización de los productos de una refinería de petróleo.
3. *Fouling por corrosión*. Este tipo de *fouling* se basa en la formación de organismos de corrosión sobre las superficies en contacto con un fluido, todo ello resultado de la corrosión electroquímica de la superficie.
4. *Fouling helado*. Es la solidificación de un líquido con un punto de fusión mas alto, en una superficie enfriada.
5. *Fouling por partículas*. Al generarse este tipo de *fouling* las partículas generadas crean otro tipo llamado: *fouling por sedimentación*. Estas partículas caen a la superficie por

gravedad, las cuales no se adhieren fuertemente y suelen ser partículas blandas, pudiendo removerlas o eliminarlas con un incremento de velocidad del flujo. La cantidad y velocidad de acumulación depende del tipo de partícula y de las condiciones térmicas en las que se encuentre.

6. *Fouling por precipitación.* También llamado proceso de encostramiento, ya que se forman escamas cuando las sustancias disueltas han invertido las características de temperatura-solubilidad. Esto puede ocurrir cuando el agua entra en contacto con la pared del tubo caliente, provocando la precipitación de las sales, tendiendo este precipitado a depositarse sobre la superficie del tubo. Al depositarse esta sal, el depósito obtenido es duro y adherente. En caso de que esto ocurra la temperatura de la superficie caliente tiene una gran influencia sobre el valor máximo de transferencia de calor, generalmente al aumentar la temperatura se incrementa el valor max. de transferencia de calor.

En la mayoría de entornos de las plantas industriales en funcionamiento, se producen varios tipos de fouling al mismo tiempo. Los procesos de fouling que más comúnmente encontramos en estas plantas son fouling por partículas, precipitación y corrosión. Al ser una composición más compleja se le denomina “depósito” siendo una forma más genérica de denominarlo.

Centrándose en los intercambiadores de calor se han llevado numerosos de estudios encaminados en resolver los problemas que presenta el fouling.

1.5.- Factores que influyen a la acumulación de biofouling

El estudio del proceso de acumulación de biofouling da lugar a investigaciones en laboratorio e in situ, buscando su relación con los procesos físicos, químicos y biológicos que lo originan. Las variables que influyen a la acumulación de biofouling son las siguientes: la composición del agua, la temperatura del soporte y el agua, la velocidad del agua y las variables biológicas.

1.5.1.- Composición del soporte

El objetivo de este análisis es el estudio del fouling biológico en la industria, más concretamente en los intercambiadores de calor que se encuentran en la industria. Estos se evalúan generalmente por su capacidad de transmisión de calor y la resistencia al flujo. Normalmente, el soporte por el que circula el agua es: un haz tubular, placas, espiral, doble tubo, etc.

Las características del soporte afectan de forma directa a la acumulación de *biofouling*. Se han elaborado numerosos estudios que han evaluado los diferentes materiales utilizados para la fabricación de soportes. Dichos estudios se basaban en analizar las acumulaciones de *biofouling* generadas en diferentes aleaciones.

Si se compara la extensión de la deposición del *biofouling* en aleaciones de cupro níquel (bronce de almirantazgo) y titanio en un sistema de agua de mar, en el cual, los experimentos llevados a cabo indican que la resistencia a la transmisión de calor aumenta un poco más en el tubo de acero inoxidable a bajas velocidades de agua (N.Zelver, 1984).

De este modo, en vista de la conductividad del bronce, un equipo en funcionamiento con este material tendrá una tendencia menor a incrustaciones de *biofouling*.

En otras investigaciones se halla que el cobre es un inhibidor de bacterias, ya que la reducida película microbiana en las aleaciones de cobre es parcialmente debida a la toxicidad del cobre. Las aleaciones de cobre se corroen más rápidamente que la de titanio y tienden a desprender sus productos de corrosión. La mayor parte de las partículas de corrosión desprendidas llevan parte del depósito de *biofouling* al seno del fluido, reduciendo así la capa de *fouling* adherido.

Se puede concluir que la composición del soporte ejerce influencia sobre la acumulación de *fouling* biológico. Variando los materiales del soporte podría reducirse la generación de incrustaciones.

1.5.2.- Temperatura del soporte

Una investigación realizada por Characklis en un intercambiador de calor con tubos de acero inoxidable, indica que la temperatura de la pared del tubo influye sobre la acumulación de incrustaciones. En el ensayo realizado se acumularon más depósitos en la sección calentada del tubo, donde la temperatura de este era 35°C. Para una velocidad del agua a 0,3 m/s la acumulación de *biofouling* fue mayor en el tubo no calentado (López, 1998).

Esto indica que la temperatura del soporte es un parámetro decisivo en el proceso de acumulación de *biofouling*, como también lo es la velocidad a la que circula el agua.

1.5.3.- Temperatura del agua

La temperatura del fluido es un factor importante cuando se utilizan aceros inoxidable, puesto que la temperatura de agua de mar puede afectar a los niveles de potencial de corrosión del metal, y en ocasiones generar grietas en este tipo de aleaciones.

Por otra parte, la estación del año influye directamente sobre la generación de incrustaciones, ya que en verano con aguas más cálidas los microorganismos son más abundantes y se reproducen con más facilidad.

1.5.4.- Velocidad del agua

Otra investigación demuestra que la velocidad del fluido ejerce influencia sobre los procesos de *biofouling*, afirmando que:

- 1) La transferencia de masa aumenta con el incremento de la velocidad del fluido.
- 2) El nivel de desprendimiento de la biopelícula aumenta con el incremento de la velocidad.

Los resultados de las investigaciones sugieren que en velocidades bajas, el nivel de acumulación de *biofouling* es mayor (Characklis, 1991). En caso contrario, al aumentar la velocidad del fluido, el desprendimiento controla la acumulación de incrustaciones, haciendo así que el nivel de *biofouling* sea menor. Al combinar la alta y la baja velocidad se debe obtener una velocidad óptima para la prevención en la formación de *biofouling*.

2.- Intercambiadores de calor – Enfriadores

2.1.- Intercambiadores de calor

El intercambiador de calor es un dispositivo creado para transferir calor entre dos o más fluidos, encontrándose estos o separados por un material. Generalmente, son componentes principales de las instalaciones marítimas e industriales (Laval).

Los principales usos de los intercambiadores de calor son los siguientes:

- Elevar la temperatura de un fluido cediéndole la de otro.
- Disminuir la temperatura de un fluido entregándosela a otro.
- Condensar gases utilizando fluidos fríos.

- Llevar a ebullición un fluido por la acción de la temperatura de otro.

Los intercambiadores de calor pueden clasificarse en varios tipos: calderas, evaporadores, condensadores y enfriadores. En este trabajo nos centraremos en los enfriadores, puesto que son los tipos de intercambiadores que se encuentran en las instalaciones de a bordo.

Concretamente, nos centraremos en los enfriadores de placas, es decir, de contacto indirecto y de flujo contrario. Su manera de actuar es la siguiente: El agua salada de “sacrificio” circula entre dos placas que están en contacto con las placas por las que circula el agua dulce de trabajo.

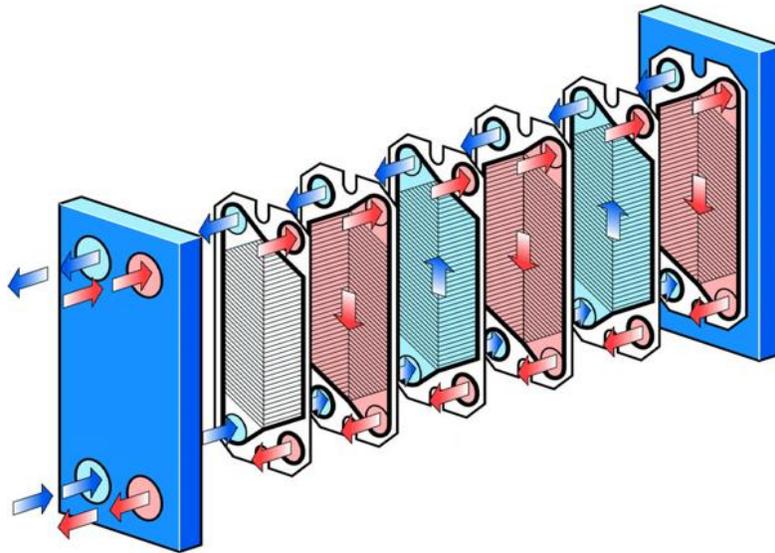


Figure 5. Enfriador de placas (Fuente: areamecanica.com)

Normalmente el fluido de “sacrificio” es el encargado de robar o entregar calor a el fluido de trabajo. Por ejemplo, en lo barcos, el agua dulce de refrigeración de motores circula por los enfriadores de placas entregando parte de su calor a el agua salada de sacrificio. Logrando de esta manera descender la temperatura del agua de refrigeración.

El diseño y número de placas varia según la capacidad de transferencia deseada. Los intercambiadores de placa son resistentes, compactos y permiten una alta capacidad de transferencia de calor. El corrugado de las placas genera un régimen turbulento del fluido, ayudando así a una mejor transferencia de calor, también reducen el ensuciamiento (Solórzano).

2.2.- Condiciones que afectan a la trasmisión de calor

En los enfriadores una condición que afecta a la tasa de transferencia de calor es el ensuciamiento, que puede ocurrir en ambos lados de las placas corrugadas (Solórzano). El agua deposita organismos, minerales y microorganismos que generan una capa de suciedad. Dicha capa afecta a la transferencia de calor:

- Actúa como una capa aislante, impidiendo la correcta transferencia de calor para que ha sido diseñada.
- Aumenta el grosor específico del fluido.
- Reduce la velocidad de fluido cerca de las paredes del tubo.

A medida que esta capa se va haciendo más gruesa la eficiencia del enfriador comienza a descender. Cuando esto ocurre, deben limpiarse todas las placas eliminando todas las incrustaciones y partículas sucias que hayan podido adherirse.

Para darse cuenta de la importancia del problema causado por las incrustaciones en los equipos, a continuación se nombran los efectos perjudiciales más comunes (Luis Gomez Orozco, 2015):

- Pérdidas de energía debidas a la disminución de la resistencia por fricción del fluido, esto ocurre en las tuberías, cascos y hélices de buques, estructuras offshore y medios porosos como filtros.
- Pérdidas por el incremento de la resistencia a la trasmisión de calor en equipos de plantas energéticas y actividades industriales que requieren procesos de refrigeración.
- Crecimiento del coste final. Esto se debe a la necesidad de reemplazar el equipo prematuramente a causa de generación de corrosión bajo la capa de incrustación biológica.
- Paradas imprevistas. Estos tiempos muertos significan una pérdida de productividad debido a un fallo inesperado del equipo, con su resultante parada para limpieza. Estas paradas imprevistas pueden significar una pérdida de 1 millón de dólares al día.
- Problemas medioambientales. En las centrales nucleares la presencia de incrustaciones en un intercambiador de calor puede suponer un grave problema, ya que reduce la capacidad de trasmisión de calor ante una emergencia pudiendo desatar un accidente.

Como ejemplo de que dichos efectos pueden causar problemas graves en equipos, en una planta energética canadiense, la bioincrustación disminuyó la transmisión de calor de un intercambiador de calor un 30% en un periodo de dos meses. Por otro lado, en el año 1982 el costo ocasionado por esta causa en el sector industrial de Estado Unidos se resumía entre 3 y 10 billones de dólares.

Por esto, en los últimos años el interés de la industria relacionada con la generación eléctrica se centra en desarrollar investigaciones enfocadas a la eliminación del problema del *biofouling*. Ya que la mayor parte de la electricidad se genera en centrales térmicas con infinidad de intercambiadores de calor (Urquiola, 1994).

El grave problema del *biofouling* conlleva inconvenientes en el ámbito industrial y naval. Al tener un contacto directo con el agua de mar, el ámbito naval tiene mayor número de complicaciones. Además, a menos que se encuentre una solución, va a haber trascurrido un largo periodo con dificultades en las instalaciones y equipos de a bordo.

OBJETIVOS

Durante los cursos de estudio en la Náutica de Portugalete se ha observado un vacío en las técnicas de mantenimiento y funcionamiento de intercambiadores de calor, después de los problemas que encontramos a causa del *antifouling*. Por lo que se intenta ampliar los conocimientos en esta materia a los estudiantes.

El objetivo principal de este trabajo es dar a conocer las principales características de los enfriadores utilizados con agua de mar, así como la generación de *bioincrustaciones* en las superficies de estos. También se pretende exponer la instalación de refrigeración de motores del buque “*Dimonios*”, incluyendo los problemas causados por el *fouling* en dichos sistemas. A continuación se formulan los objetivos mas específicos:

- Descripción y comprensión del problema que genera el *biofouling*. A parte de explicar las causas que posibilitan la formación y desarrollo de una biopelícula en cualquier sistema tanto en ámbito industrial como naval, se intenta describir el problema que genera sobre las superficies de los intercambiadores de calor, más concretamente de los enfriadores.
- Descripción de los enfriadores. Se intenta explicar el funcionamiento de estos intercambiadores de calor, los tipos que podemos encontrar y los problemas que pueden causar en ellos el *biofouling*. Se centrará más a los enfriadores de ámbito naval.
- Explicar la estructura del sistema de refrigeración por agua. Se pretende exponer el circuito de refrigeración por agua de alta temperatura de los motores principales del buque Ro-Pax “*Dimonios*”, explicando toda su estructura, incluyendo los enfriadores de alta temperatura.
- Medidas antifouling. Se intenta exponer formas de eliminar y controlar el *biofouling* en enfriadores, centrándose en enfriadores de placas, los cuales encontramos en el circuito del buque “*Dimonios*”.

MATERIALES Y METODOLOGÍA

Para la elaboración de este estudio me he basado en diferentes bibliografías y síntesis de materiales buscados en todo el ámbito relacionado con el trabajo; libros especializados en el tema a tratar, artículos web, artículos de revistas, manuales de fabricantes, planos del propio barco, etc.

Además, he contado con la opinión experta de profesionales del sector como pueden ser jefes de maquinas y profesores universitarios, de los cuales he obtenido los conocimientos reales utilizados en ese ámbito.

A partir de la información obtenida, el trabajo se estructura de manera que en un principio se describe lo que es el *biofouling*, como se genera, y los problemas que origina en los intercambiadores de calor. Posteriormente, se explican los métodos de estudio utilizados, como pueden ser: planos de las instalaciones de a bordo, parámetros obtenidos a bordo, etc.

De esta manera se pretende adquirir un conocimiento del funcionamiento de los enfriadores en general ante el problema que causa el *biofouling*, teniendo como modelo las instalaciones del buque “Dimonios”.

Finalizara el trabajo con un apartado de resultados obtenidos, en el cual se verán las conclusiones obtenidas a partir de este estudio.

3.1.- Sistemas del buque

Una de las razones por las que decidí centrarme en el problema del biofouling en los enfriadores de placas fue a causa de mi embarque como alumno de máquinas en el buque “M/V DIMONIOS”.



Figure 6. Buque Ro-Pax Dimonios (Fuente: puentedemando.com)

Dicho buque era recién comprado a la compañía italiana “Tirrenia”, y a pesar de ser construido en el año 2007, presentaba numerosas faltas de mantenimiento. Centrándonos en los circuitos de agua salada y agua de refrigeración: los enfriadores carecían de sistema de contraflujo, las tomas de mar carecían de sistema de dosificación de química, etc. Estos y otras faltas de mantenimiento son las causantes del grave problema que sufren las instalaciones y sus equipos, que es el *biofouling*.

El mantenimiento de enfriadores del sistema de refrigeración por agua de alta temperatura, concretamente, debía hacerse mensualmente. Y los enfriadores del sistema de refrigeración por agua de baja temperatura bimensualmente. Las tomas de mar dependiendo de la estación del año se hacían una o dos veces por mes.

Esto generaba muchas paradas imprevistas y desorganización del sistema de mantenimiento, debido a que en verano se llegaban a limpiar los enfriadores de refrigeración por agua de alta temperatura dos veces por mes, al igual que las tomas de mar alta y baja.

Además, los enfriadores de refrigeración por agua de alta temperatura trabajan con agua salada, que proviene directamente del fondo de mar. El agua dulce de refrigeración al circular a 90°C sufre un choque térmico, ya que el agua salada de trabajo circula entre 28°C en verano y 16°C en invierno.

Estos hechos fueron los que me llevaron a estudiar lo que ocurría en los enfriadores de la instalación de refrigeración de alta temperatura de motores principales, para así poder exponer el problema que generaba el *biofouling* y buscar unas posibles soluciones.

El buque “M/V Dimonios” es de tipo Ro-pax, es decir, tiene capacidad para carga rodada y pasajeros. Con 27.105 tons de Gross Tonage navega entre Barcelona – Islas Baleares. Consta de 188,46 metros de eslora, manga 25,6 metros y puntal de 19 metros. Se compone de 2.255 metros lineales de carga y con capacidad para pasajeros+tripulación de 906 personas.

Posee dos motores de combustión interna, marca MAN de 10.800 KW de potencia cada uno. Para la generación de electricidad comprende tres generadores auxiliares Caterpillar, por otra parte consta de generadores de cola, los cuales usan el movimiento de los ejes principales para la generación de energía eléctrica.

En lo que concierne a la generación de agua de trabajo, posee dos evaporadores marca AQUAMAR, los cuales a partir de agua de mar forman agua destilada. Esta agua destilada es usada en el circuito de refrigeración de motores principales y otros sistemas de a bordo.

3.1.1.- Sistema de agua salada de refrigeración

La instalación de refrigeración de la sala de máquinas se divide en dos secciones: sistema de agua salada y sistema de agua dulce. El sistema de agua salada es el circuito encargado de robar el calor a el agua de trabajo, que en este caso seria el agua del circuito de agua dulce.

Como se distingue en el plano 1, la instalación de agua salada contiene tres tipos de toma de mar: toma de mar alta, toma de mar baja de babor y estribor, y por último toma de mar ártica.

La toma de mar es la aspiración de agua de mar, la cual cuenta con una cesta o filtro, también llamado fondo, de tal manera que impide el paso a todos los residuos que podrían obtenerse del mar. Estos residuos pueden ser basuras orgánicas provenientes del ser humano, animales, como peces o crustáceos, y también algas u otras plantas. Cada fondo tiene diferentes funciones:

- *Fondo alto*. Se encuentra a una altura en la que siempre estará cubierto por agua. Es la toma de mar que se abre antes de las maniobras de entrada y en las estancias en

puerto, ya que en cada maniobra el movimiento de las hélices de proa levantan los desechos del fondo marino, los cuales ensuciarían el fondo de mar bajo.



Figure 7. Toma de mar alta (Fuente: propia)



Figure 8. Filtro de mar (Fuente: propia)

- *Fondo de mar bajo.* Se encuentra en la zona inferior del casco. Al estar cerca de la quilla es más difícil que absorba basuras y otros residuos que se encuentran flotando en el mar, por ello este fondo se usa en navegación.
- *Fondo de mar ártico.* Es la toma de mar más cercana a la quilla. Este filtro tiene la finalidad de succionar agua de mar en lugares de aguas frías, como podría ser el ártico, de tal manera que impida la entrada a trozos de hielo.

El agua procedente de los fondos se almacena en un tanque estructural, el cual se aprecia en el plano con color verde oscuro. Estos tanques o colectores, mantienen un nivel constante de agua, para así abastecer siempre a la succión de las bombas de mar.

Encontramos diversas bombas en el circuito, cada una con su función. Las principales son las bombas de mar (56), las cuales alimentan a los enfriadores de alta y baja temperatura de refrigeración en caso de estar navegando. Para las estancias en puerto se usa la bomba de

menor tamaño (57), ya que consume menos potencia y no es necesario tanto flujo de agua con los motores principales parados.

Independientemente de las bombas que estén en funcionamiento, el aguase dirige desde las bombas a los enfriadores, tanto de alta temperatura (52) como a los de baja temperatura (58). El agua salada se topa con dos enfriadores de alta y otros dos de baja. Por un lado, los dos enfriadores del circuito de alta temperatura siempre están en servicio, ya que en caso de navegación son necesario los dos para obtener la temperatura adecuada de refrigeración en los motores principales. La temperatura del agua salada a la entrada del enfriador es de 20°C, después de refrigerar el agua de trabajo a la salida es de 27-28°C.



Figure 9. Enfriadores de alta temperatura (Fuente: propia)

Por otro lado, solo habrá en servicio un enfriador del circuito de baja temperatura, pues con uno se alcanza la temperatura optima de funcionamiento. A la entrada del enfriador el agua esta a 20°C, después de robar el calor del fluido de trabajo asciende hasta 25°C.

Una vez el agua a pasado los enfriadores y su temperatura a descendido, la línea saliente de los enfriadores de baja temperatura se unen con las líneas de los enfriadores de alta temperatura. Como se distingue en el plano 1.1, el agua retorna al colector de agua salada.

Después de todo, el sistema de agua salada es un circuito “cerrado”, el cual obtiene agua de mar para extraer el calor al agua dulce de dos sistemas de refrigeración de motores principales y otros equipos de la sala de máquinas.

3.1.2.- Sistema de refrigeración de alta temperatura

El circuito de agua de refrigeración de alta temperatura tiene uso únicamente en la refrigeración de camisas y el enfriador de aire de admisión de motores principales.

Este circuito es de vital importancia para el mantenimiento de la temperatura de los motores principales en estancias en puerto. Al estar hablando de un buque Ro-Pax, que al día cumple una media de siete horas en puerto, es importante el régimen de temperaturas a las que se mantienen los motores estando parados. Las diferencias de calor deben de ser mínimas, ya que al ser motores grandes pueden sufrir choque térmicos que generen fisuras en las camisas o simplemente fallos de arranque.

Para el buen mantenimiento de estos motores, la casa indica que es conveniente mantenerlos a unas temperaturas entre 80-90°C. Con ese fin, el sistema de refrigeración por agua de alta temperatura tiene tres fase, son las siguientes:

Fase de puerto:

La primera fase es fundamentalmente la conservación de la temperatura en las estancia en puerto. Como se advierte en el plano 1.2 la diferencia principal con el resto de fases son los precalentadores que se encuentran antes de la entrada a motores principales.

El agua refrigerada proveniente de los enfriadores de alta temperatura se dirige hacia el precalentador de agua, ya que al encontrarse ambos motores parados el agua de refrigeración se mantiene frio sin ningún foco caliente que la caliente. Por ello, para aumentar su temperatura el agua es circulada por un precalentador a la entrada previa al motor.

Los precalentadores son simples intercambiadores de calor. La bomba del propio equipo hace mover el agua a través de un serpentín. En contacto con este serpentín está el vapor, que cede calor al agua calentándola entre 87°C y 90°C de temperatura.



Figure 10. Precalentador de agua (Fuente: propio)

Antes de la entrada a los enfriadores, la línea se divide mandando un línea hacia una válvula de tres vías termostática, la cual mezcla el agua refrigerada procedente de la salida de los enfriadores con el agua caliente procedente directamente de los motores principales. La válvula genera un aumento en la temperatura, ya que el enfriador enfría demasiado el agua dulce de trabajo. Después de la válvula termostática el agua temperada llega al precalentador, en ese momento el vapor entrega calor al agua de trabajo subiéndola hasta una temperatura de 92°C en el manifold.

Una vez pasado el precalentador la línea de la 1º fase se une a la principal, llegando a la entrada del motor principal. Antes de introducirse a la refrigeración de camisas el agua entra en el enfriador de aire de admisión de principales. Esta parte del circuito función solamente con los motores en marcha.

El enfriador de aire de admisión de principales trabaja en dos etapas: etapa de alta temperatura y etapa de baja temperatura. Al estar el motor en marcha, la turbo comprime el aire de admisión por lo que su temperatura se eleva a valores muy altos. Para ello se circula primero el aire por el enfriador de alta temperatura, la primera etapa de enfriamiento, y después recorre el enfriador de baja temperatura, la segunda etapa. De esta manera se logra un temperatura de aire adecuada y da opción a mas volumen de aire en la admisión.

El agua procedente del enfriador de aire, mediante un manifold principal se dirige a la refrigeración de camisas. El agua tiene una temperatura alrededor de 90-92°C, con lo cual logra mantener esa temperatura sobre los cilindros de principales en las estancias en puerto.

El agua obtenida del calentamiento de los motores se dirige de nuevo a los enfriadores de alta temperatura. Durante dicha línea se encuentra un by-pass encaminado a la alimentación de evaporadores.

Fase de arranque:

Estos motores MAN precisan de un sistema de arranque propio. Esta fase ocurrirá en el minuto de preparación para el arranque.

Al dar la orden de arranque, las bombas de prelubricación de los motores y las bombas de prelubricación de las reductoras se ponen en marcha. La finalidad de este sistema de encendido es la siguiente:

Son motores de potencias muy grandes, los cuales sufren muchas horas de parada en puerto. Dichas paradas suponen volverlos a poner en marcha al cabo muy pocas horas, de esta manera los motores sufren grandes choques térmicos en el arranque. Teniendo en cuenta que en el momento de arranque todos los elementos del motor se someten a grandes esfuerzos físicos. Además, en los tiempos de paradas, las bielas, los cojinetes, el cigüeñal y las camisas se quedan sin lubricación gracias a la gravedad que escurre todo el aceite al cárter.

Esto hace que sea necesario mínimo un minuto de prelubricación, para así adecuar el motor al momento de arranque.

Fase de navegación, con motor en marcha:

Una vez arrancado el motor, la bomba de agua acoplada al motor principal mueve el agua de refrigeración de alta temperatura. El agua proveniente de la termostática de después de los enfriadores de alta temperatura alcanza presión en la bomba acoplada.

En un principio, el agua ingresa en el enfriador de la aire de a turbo. Refrigerera primero el aire de admisión para después pasar a refrigeración de camisas. En navegación el agua procedente de los cilindros alcanza una temperatura alrededor de 98°C.



Figure 11. Bomba de refrigeración acoplada a motores principales (Fuente: propia)

Una vez refrigerados las camisas de los cilindros, el agua se recircula de nuevo hacia la válvula termostática que regula la temperatura de refrigeración de motores principales. Aunque como ya se ha explicado antes, cierta cantidad de agua, antes de alcanzar la válvula termostática,

circula por un ramal o “by-pass”, donde se encuentran los enfriadores de alta temperatura que bajan la temperatura del agua.

Posteriormente, la válvula termostática mezcla el agua proveniente de camisas con la procedente de enfriadores, adquiriendo así la temperatura de agua correcta para refrigerar los motores principales. Generalmente el agua que arriba a la termostática desde los enfriadores alcanza unos 75°C, después de mezclarse en la válvula termostática alcanza 90°C.

Como vemos el agua dulce es constantemente recirculada, y en caso de descender el nivel de agua de refrigeración, los tanques de compensación cubrirían dicha falta. Por otro lado esta el circuito de agua salada, que pasaría a refrigerar el agua dulce en los enfriadores de alta para volver de nuevo al mar.

3.2.- Control del ensuciamiento en el enfriador de alta temperatura

Como ya se ha indicado, el enfriador de placas de alta temperatura trabaja refrigerando el agua de motores principales mediante agua salada, por ello tienden a sufrir un mayor ensuciamiento que los enfriadores de baja temperatura, los cuales trabajan refrigerando el agua dulce de baja con agua dulce.

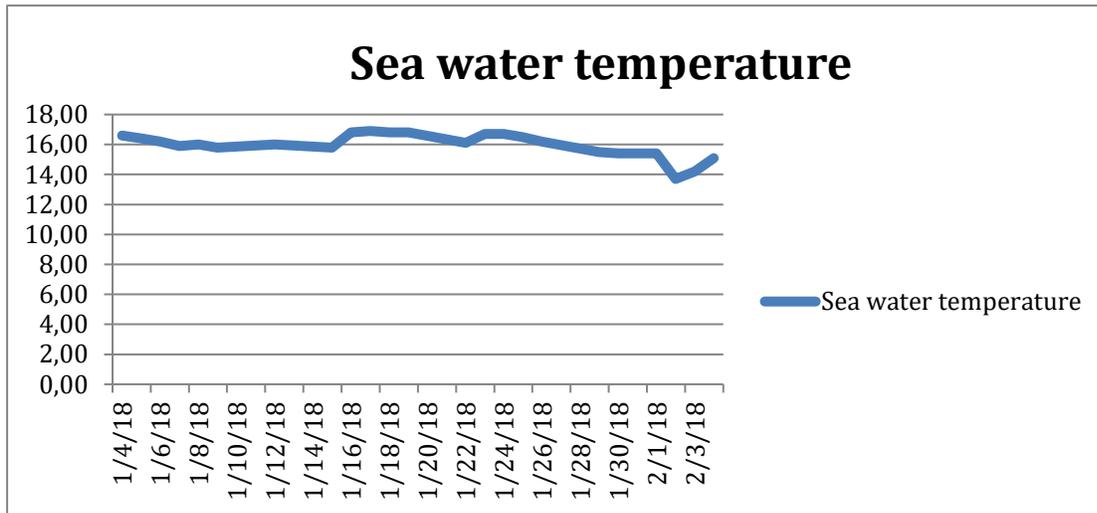
Los enfriadores de alta temperatura desarrollan mayor suciedad debido al agua salada, por ello, se han tomado parámetros durante varias semanas del circuito de alta, para así lograr evaluar y controlar el desarrollo del *biofouling* en el intercambiador de calor.

Para ello se han debido de tener en cuenta diferentes parámetros: a) temperatura del agua de mar, b) temperatura de entrada al enfriador de aire de admisión, c) temperatura de entrada al motor principal, d) temperatura de salida del motor principal, e) temperatura de salida del enfriador.

Cabe decir, que solo se procederá a estudiar uno de los motores principales, más concretamente el de babor, ya que se considera necesario el estudio de ambos motores, siendo el sistema de ambos el mismo y paralelo.

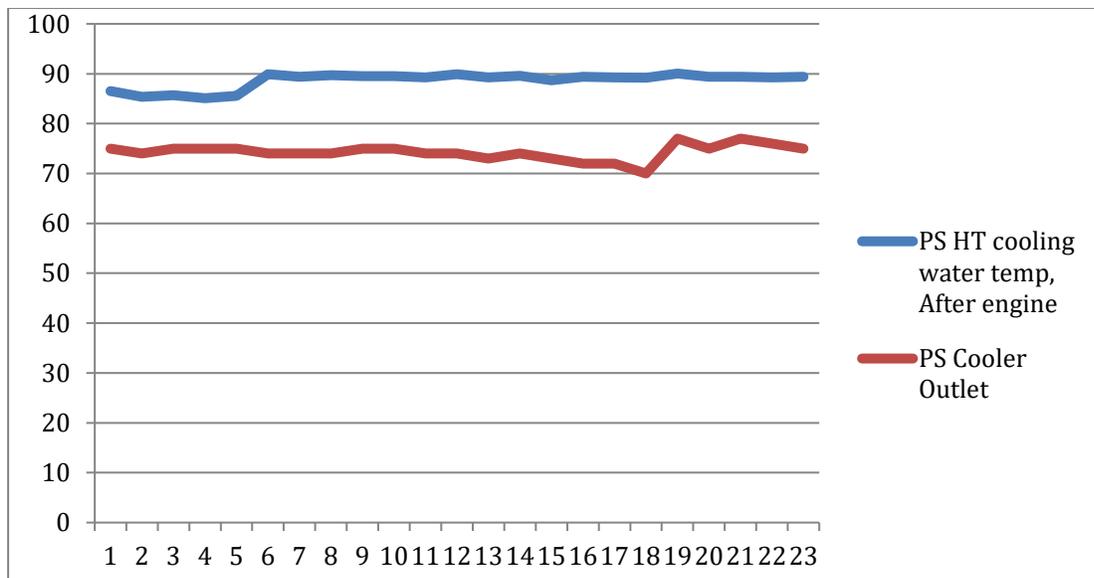
La temperatura de mar, como podemos observar en la gráfica 13, no varió demasiado. Los primeros quince días se mantuvo alrededor de los 16°C pegando una ligera subida el 18 de

enero hasta los 17°C. Después, se puede ver que hay una bajada de temperaturas a comienzos del mes de febrero. Estos cambios de la temperatura del agua de mar son despreciables, ya que la válvula termostática del circuito optimiza la temperatura del circuito mezclando aguas refrigeradas, provenientes del enfriador y aguas calientes provenientes de los motores.



Gráfica 1. Temperatura de agua de mar

Examinando el resto de parámetros nos damos cuenta de que la temperatura de salida del enfriador se mantiene dentro de unos valores hasta aproximadamente la muestra nº 18, donde las temperaturas a la salida del intercambiador empiezan a tomar valores superiores a la media.



Gráfica 2. Entrada/salida de agua dulce del enfriador

En la gráfica, la curva azul se trata de la temperatura del agua a la salida del motor principal, la cual tomamos como la temperatura de entrada al enfriador de placas ya que el enfriador se encuentra a continuación del motor. La curva roja es la temperatura del agua a la salida del enfriador.

Como se puede apreciar, en la muestra nº18 se advierte un ligero ascenso de las temperaturas, alcanzando temperaturas de casi 80°C. Esto indica que el intercambiador no está enfriando correctamente el agua de refrigeración de camisas, esto ocurre debido a la suciedad generada en las placas de agua salada, en las que la capa de *biofouling* se ha convertido en un aislante térmico, impidiendo la correcta transferencia de calor.

Para asegurarnos más acerca de la cuestión del ensuciamiento del enfriador, hemos buscado correlaciones entre los diferentes parámetros adquiridos a bordo. Para ello, hemos utilizado el programa SPSS (National Instruments), el cual es un programa estadístico informático muy usado en las ciencias sociales. Con este programa hemos logrado buscar correlaciones entre todos los parámetros de temperaturas y presiones. De estos parámetros la que más llama la atención para su estudio acerca del problema generado por el ensuciamiento en el generador, es la siguiente:

		PS inlet	PS HT cooling water temp, After engine
PS inlet	Correlación de Pearson	1	-,112
	Sig. (bilateral)		,610
	N	23	23
PS HT cooling water temp, After engine	Correlación de Pearson	-,112	1
	Sig. (bilateral)	,610	
	N	23	23

Tabla 2. Tabla de correlaciones

Como se aprecia en la figura 15, entre la temperatura de entrada a la termostática, equivalente a la salida del enfriador de placas, y la salida del motor principal de babor, temperatura equivalente a la entrada de agua al enfriador de placas, se aprecia una correlación de 0,610. Cuanto más cercano sea el valor a 1,00 mayor será la correlación entre los parámetros. Por ello, una correlación de 0,610 se toma como un valor significativo y merecedor de estudio.

A continuación, teniendo en cuenta la relación entre las muestras de entrada y salida del enfriador, decidimos centrarnos en el estudio de estos para así demostrar las consecuencias de la fijación de *biofouling* en los intercambiadores de placas, como es el caso.

3.3.- Interpretación de los datos

Para interpretar las muestras obtenidas a bordo y observar como el ensuciamiento va afectando a la correcta transmisión de temperaturas se han motorizado los parámetros de entrada y salida del enfriador mediante una gráfica de control.

La gráfica de control que hemos usado son los gráficos CUSUM, la cual muestra las sumas acumuladas de las desviaciones de cada valor muestral con respecto al valor objetivo, en este caso el gráfico esta basado en medias muestrales (Gráficas de control por variables, 2014).

Al estar trabajando con procesos bajo control, el diagrama CUSUM nos ayuda a detectar cualquier cambio respecto al objetivo, que en este caso seria el ascenso de las temperaturas de salida del enfriador de placas. Con este tipo de graficas podemos observar cuando las temperaturas están fuera de control, es decir, aumentan o disminuyen sobre un valor objetivo.

Para la representación del diagrama CUSUM se ha utilizado el programa de diseño de sistemas LabVIEW (National Instruments).

RESULTADOS

El término CUSUM procede del inglés *cumulative-sum*, que significa suma acumulada. Los diagramas CUSUM se basan en la representación de la acumulación de las desviaciones de cada observación respecto un valor de referencia.

La principal cualidad de este tipo de diagramas es que son capaces de detectar pequeños cambios o desviaciones del estado de control más rápidamente que otro tipo de gráficas. Para ello es primordial la colocación de límites de control. De este modo, se tiene un gráfico capaz de detectar desajustes de observaciones fuera de control.

Por otra parte, los gráficos CUSUM se construyen generalmente para observaciones individuales, aunque también pueden construirse para representar la evolución de alguna observación estadística, media o variante. Para ello se usan las gráficas logarítmicas CUSUM, con ellas calculas las desviaciones de cada valor respecto del valor objetivo nominal μ_0 . Se distinguirá entre desviaciones positivas y negativas, puesto que en muchas situaciones ambas desviaciones no tienen la misma repercusión.

Es necesario definir un valor K a partir del cual se considera que la desviación acumulada es significativa. Este valor determinará la sensibilidad del gráfico de control. Si el diagrama es insensible a desviaciones no significativas, será más fácil visualizar desviaciones que sean importantes, es decir, la gráfica será más limpia. El valor K se suele elegir en función de la desviación que se quiera detectar.

Desarrollando la idea de que las gráficas tendrán desviaciones positivas y negativas, se tendrán dos tipos de sumas significativas:

- C_i^+ = acumulación de desviaciones positivas. De este modo si el proceso esta bajo control, la variable X tomará valores cercanos al nominal y el término C_i^+ tenderá a tomar valores nulos.

$$C_i^+ = \max[0, \{ C_{i-1}^+ + (x_i - \mu_0) \} - K]$$

- C_i^- = acumulación de desviaciones negativas.

$$C_i^- = \max[0, \{C_{i-1}^- - (x_i - \mu_0)\} - K]$$

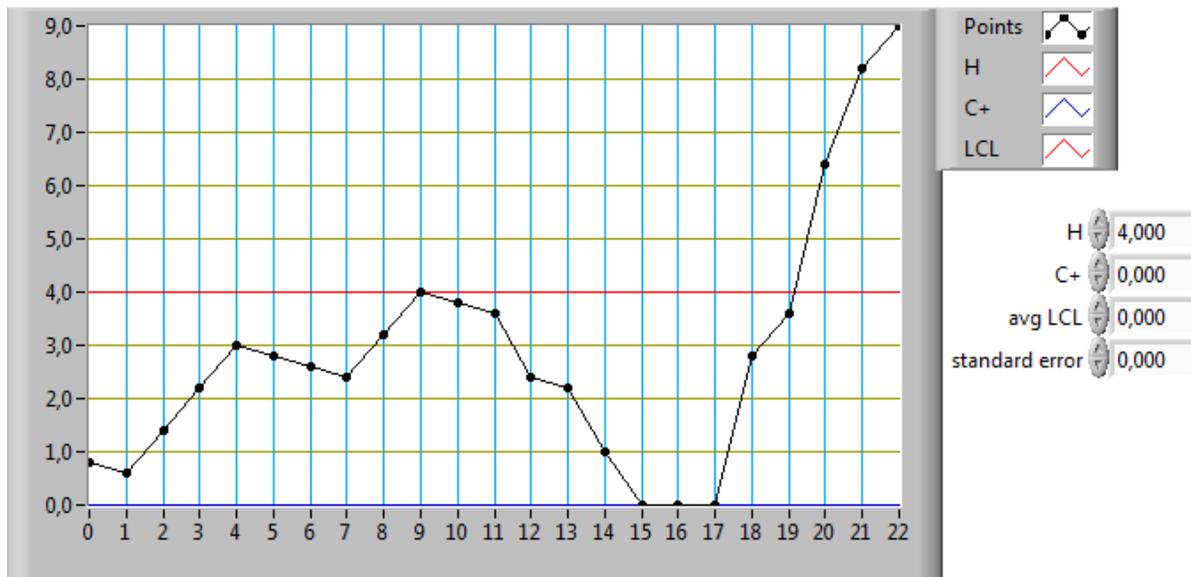
Por último, los valores de las sumas acumuladas C_i^- y C_i^+ se han de comparar con el valor máximo admisible. Este valor, denominado valor de decisión H suele ser:

$$H = h\sigma$$

Los valores $\pm H$ son los límites de control de las gráficas, es decir, alguna observación del proceso al superar H se considerará fuera de control.

En nuestro caso, con la ayuda del LabVIEW se ha obtenido el diagrama CUSUM siguiente:

CUSUM CHART C+



Gráfica 3. Diagrama CUSUM

Hasta el parámetro nº17, podemos observar que todas las muestras se encuentran dentro de los límites de control, no obstante a partir de la muestra 18, la gráfica comienza ascender pero no es hasta el parámetro 19 que no sobrepasa los límites de control, lo que sugiere desviaciones con respecto al objetivo.

Estas desviaciones nos indican que el enfriador a sufrido algún cambio en su funcionamiento, advirtiéndolo que ha comenzado a ensuciarse. He aquí la prueba de que con el tiempo el *biofouling* ha ido adhiriéndose a la superficie de las placas del enfriador, generando en estas una capa de bioincrustaciones. Esta capa logra hacer de aislante alcanzado el parámetro 17 del diagrama CUSUM, haciendo que la temperatura del agua a la salida del enfriador ascienda y generando un cambio respecto al objetivo en el diagrama. Dicho cambio se muestra mediante el ascenso de la grafica en los puntos 18, 19, 20, 21 y 22.

DISCUSIÓN

La reducción, prevención y eliminación de la acumulación de *biofouling* es un objetivo primordial en cualquier ámbito en que se genere este problema. En muchos casos, los métodos o materiales de detección del *biofouling* no son suficientes para detectar si los equipos estas contaminados.

Por esto a sido necesario este estudio, en los sistemas que se encontraban a bordo no había medios de detectar la contaminación de los enfriadores, lo que ocasionaba paradas imprevistas por problemas en el sistema. Con el diagrama CUSUM se ha logrado demostrar la generación del *biofouling* en un tiempo determinado.

Una vez detectado el biofouling en el equipo hay que proceder a su eliminación. Las técnicas empleadas para la eliminación se pueden agrupar dentro de dos grupos:

- Métodos físicos
- Métodos químicos

La utilización de estos métodos depende de muchos factores, pero el mejor método para evitar la contaminación en los equipos será siempre la prevención, es decir, el uso de pinturas o dosificación química, las cuales evitarán la formación del *biofouling*.

4.1.- Métodos de limpieza

Son numerosos los métodos físicos y químicos empleados para la eliminación del *fouling*, pero a continuación solo se mencionaran los mas efectivos.

4.1.1.- Alta velocidad de agua o contraflujo

Es de los métodos mas preventivos. Consiste en realizar inyecciones de agua a altas velocidades en intervalos de 5 y 10 minutos, cada una semana. Estas inyecciones se realizan en sentido contrario al del movimiento normal del fluido. De esta manera lograremos extraer la capa incrustada en las placas del enfriador.

4.1.2.- Aumentar el área de intercambio de calor

Trata de aumentar el la superficie de contacto entre los dos fluidos, lo que sería aumentar tanto la superficie de las placas del enfriador como el numero de ellas. De esta manera, aun ensuciándose las placas habría mayor superficie de contacto entre los dos fluidos, lo que equivaldría a una correcta transferencia.

Generalmente este no suele ser el mejor método, ya que el enfriador sigue contaminándose, además la mayoría de buques carecen de espacio para una ampliación de tamaño de los enfriadores.

4.1.3.- Limpieza de la placas

Es el método más rudimentario. Se basa en abrir el enfriador, en nuestro caso de placas, y proceder a su limpieza. La limpieza se realizaría con agua dulce a presión y rascando con un cepillo.

Es de los métodos más tediosos, pues en el caso del buque “M/V Dimonios” debe hacerse una vez por mes, incluso dos. Lo que equivale a largar horas de trabajo y parones imprevistos. Además, diferentes instrumentos del enfriador, como por ejemplo las juntas de goma, sufren mucho desgaste al abrir y cerrar los enfriadores.

4.1.4.- Dosificación química

Es el método más preventivo. Se trata de dosificar químicas en los fondos o tomas de mar, logrando así eliminar el *biofouling* disperso en el agua obtenida del mar. De esta manera se introduciría el agua a los equipos libre de microorganismos, logrando así la eliminación de la biopelícula. Este método conlleva dos inconvenientes:

- Contaminación del agua. Al dosificar productos químicos en el agua de mar, al enviarla de vuelta al océano se estaría vertiendo productos químicos, lo que equivale a una contaminación del medio marino.
- Coste de los productos químicos. Generalmente los productos químicos no son de larga duración, lo que supondría un coste superior a las empresas que querrían utilizar este método.

Ante todos estos métodos, los más eficaces serían una limpieza mediante contraflujo semanal, y cada dos meses una limpieza completa del enfriador. De esta manera no se contaminaría el medio marino y se prevendría la generación de *biofouling*, eliminando cada dos meses los restos que no logra la limpieza mediante inyección de agua.

CONCLUSIÓN

Concluimos este trabajo, sabiendo la importancia que tiene el *biofouling* en las instalaciones de la industria y el ámbito marino. Es un problema que no se le ha dado importancia pero al trabajar con agua de mar es inevitable su formación, por lo que deben encontrarse soluciones cuanto antes.

Además obtenemos varios puntos a destacar, que son:

- La correcta prevención y mantenimiento de los equipos ante la generación de biopelículas puede ahorrarnos muchos problemas y horas de trabajo.
- Al eliminar correctamente el *biofouling* de cualquier equipo, funcionará con un rendimiento alto, tanto como para el que ha sido diseñado. Esto hará que la instalación funcione correctamente, sin paradas imprevistas.
- Al funcionar correctamente todos los equipos, no habrá pérdidas provenientes del *biofouling*, es decir, supone un ahorro energético para la instalación entera.
- El uso de diagramas CUSUM nos ha servido de gran ayuda además de adquirir una serie de conocimientos acerca del propio sistema. Ya que gracias al sistema CUSUM hemos logrado detectar la menor aparición de ensuciamiento en el enfriador de placas, solo con la ayuda de los parámetros tomados en el buque. Además de los conocimientos adquiridos.

Bibliografía

- [1] Wikipedia. (2017, November 24). *Intercambiadores de calor*. Retrieved December 27, 2017, from Wikipedia: http://es.wikipedie.org/wiki/intercambiador_de_calor
- [2] Urquiola, F. M. (1994). *Equipos de intercambio de calor*. Bilbao: CADEM (EVE).
- [3] Characklis, W. G. (1991). *Biofouling: Effects and Control*. Helsinki: Springer-Verlag.
- [4] *Gráficas de control por variables*. (2014). Retrieved January 23, 2017, from https://www.uoc.edu/in3/emath/docs/SPC_5.pdf
- [5] Luis Gomez Orozco, A. I. (2015). *Modelos de ensuciamiento en intercambiadores de calor tubulares en sistemas indirectos en procesos UHT en la industria lactea*. Bogotá, Colombia.
- [6] Laval, A. (n.d.). Retrieved 1 17, 2018, from www.tsolucion.com/noticias/intercambiadores-que-son-sirven/
- [7] López, E. E. (1998). *El problema del Biofouling en intercambiadores de calor-condensadores refrigerados por agua de mar*. Santander: Univerdad de Cantabria.
- [8] N.Zelver. (1984). *Tube material, fluid velocity, surface temperature and fouling: a field study*. Houston: Cooling tower institute.
- [9] Nautica. (2010, May 17). *Pinturas y productos antifouling*. Retrieved January 3, 2018, from [Pinturas y productos antifouling: http://www.pinturasonline.wordpress.com](http://www.pinturasonline.wordpress.com)
- [10] Sánchez, M. R.-S. (2014). *Desarrollo de un simulador para el análisis y control del ensuciamiento en intercambiadores de carcasa y tubos*. Sevilla: Dept. de ingeniería energetica.
- [11] Solórzano, R. (n.d.). *Hydraulics & Pneumatic*. Retrieved 1 17, 2018, from www.hydraulicspneumatic.com/blog/hablemos-de-certificaci-n-en-t-cnica-de-fluidos/

ANEXO 1. PLANOS

Plano nº1. Circuito agua de mar.

Plano nº2. Circuito agua dulce de alta temperatura.

