



ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
Sección de Náutica, Máquinas y Radioelectrónica Naval
Departamento de Ingeniería Agraria, Náutica, Civil y Marítima

Trabajo de fin de grado en
Tecnologías Marinas

**Estudio del tratamiento del agua de calderas de un
buque de pasaje**

Presentado por
Alejandro Roldán Rodríguez

Santa Cruz de Tenerife, 12 de junio de 2020

Autorización

Pedro Rivero Rodríguez, Profesor Titular de Universidad perteneciente al área de conocimiento de Construcciones Navales del Departamento de *Ingeniería Agraria, Náutica, Civil y Marítima* de la Universidad de La Laguna hace constar que:

Alejandro Roldán Rodríguez, ha realizado bajo mi dirección el trabajo de fin de grado titulado: Estudio del tratamiento del agua de calderas de un buque de pasaje

Revisado dicho trabajo, estimo que reúne los requisitos para ser juzgado por el tribunal que le sea designado.

Para que conste a los efectos oportunos, firmo el presente documento en Santa Cruz de Tenerife, a 12 de junio de 2020.

Fdo.: Pedro Rivero Rodríguez
-Tutor del trabajo-

Resumen

En este trabajo de fin de grado se lleva a cabo un estudio de los métodos de tratamiento utilizados para el control de la calidad del agua de una caldera pirotubular en un buque. Se hace una pequeña exposición de los componentes que forman parte del sistema de generación de vapor, el funcionamiento de la caldera pirotubular y el tipo de problemas que puede acarrear el mal acondicionamiento del agua de la caldera, puesto que se trata del equipo más delicado de los destinados a la generación de vapor.

El agua de alimentación de la caldera ha de contar en su composición con una serie de componentes cuya concentración ha de mantenerse entre unos márgenes estipulados. Estos márgenes están impuestos por el tipo y modelo de caldera y por su presión y temperatura de trabajo.

Periódicamente, al agua que se encuentra dentro del sistema de generación de vapor se le realiza una serie de análisis. El autor utiliza la información obtenida a través de la recopilación de datos de cada análisis del agua de la caldera, cisterna, economizadores y evaporador para realizar unas tablas y gráficos con los que se muestra la evolución de la calidad del agua durante su periodo de embarque. A través de la interpretación de estos recursos se toman las decisiones oportunas en cada caso: dosificación de productos químicos o la realización de extracciones del agua de caldera.

Abstract

In this final degree project, a study is carried out of the treatment methods used to control the water quality of a fire tube boiler on a ship. A brief exposition is made of the components that are part of the steam generation system, the operation of the fire tube boiler and the type of problems that can be caused by poor conditioning of the boiler water, since it is the most delicate equipment of those intended for steam generation.

The boiler feed water must have a series of components in its composition, the concentration of which must be kept within limits. These margins are imposed by the type and model of boiler and by its pressure and working temperature.

Periodically, the water found in the steam generation system undergoes a series of analyzes. The author uses the information obtained through the collection of data from each analysis of the boiler water, cistern, economizers and evaporator to make tables and graphs that show the evolution of water quality during its shipping period. Through the interpretation of these resources, the appropriate decisions are made in each case: dosing of chemical products or carrying out boiler water extractions.

Índice general

Lista de figuras	XII
Lista de tablas	XIII
1. Revisión y antecedentes	1
1.1. Introducción	1
1.2. Constituyentes del agua de alimentación	1
1.2.1. Sólidos totales	2
1.2.2. Gases disueltos	6
1.3. Parámetros característicos del agua de alimentación	8
1.3.1. Alcalinidad	8
1.3.2. pH	8
1.3.3. Salinidad	9
1.3.4. Conductividad	9
1.3.5. Turbidez	9
1.3.6. Color	10
1.4. Efectos producidos por el agua en la instalación	10
1.4.1. Incrustaciones	11
1.4.2. Corrosión	13
1.4.3. Formación de espumas	19
1.4.4. Fragilización cáustica	20
1.5. Métodos de control del agua de caldera	21
1.5.1. Extracción o purga	21
1.5.2. Tratamiento con productos químicos	22
1.6. Mantenimiento de la caldera	25
1.6.1. Periodos de mantenimiento	25
1.6.2. Almacenamiento de la caldera	27
1.6.3. Limpieza de la caldera	28
2. Objetivos	31
3. Metodología	33

4. Descripción de la instalación	37
4.1. Descripción del buque	37
4.2. Descripción de la instalación de vapor	39
4.2.1. Generadores de agua dulce	39
4.2.2. Tanque de observación de purgas, cisterna	41
4.2.3. Condensador de vapor sobrante	42
4.2.4. Caldera pirotubular	43
4.2.5. Economizadores	48
4.3. Productos para tratamiento químico de calderas utilizados en el buque	50
4.3.1. Oxygen Control	50
4.3.2. Liquitreat	51
4.3.3. Autotreat	52
4.3.4. Condensate Control	53
5. Resultados	55
5.1. Cálculo de las extracciones	55
5.1.1. Caudal de salida de extracciones	55
5.1.2. Régimen de purgas	57
5.2. Control del tratamiento químico	58
5.2.1. Oxygen control	58
5.2.2. Liquitreat	58
5.2.3. Autotreat	60
5.2.4. Extracciones	62
6. Conclusiones	65
Anexos	69
A. Dimensiones de la caldera	69
B. Características de la caldera	73
C. Tablas y gráficas análisis	75
Bibliografía	87

Índice de figuras

1.1. Solubilidad CaSO_4	3
1.2. Solubilidad CaCO_3	3
1.3. Esquema equilibrio carbónico	6
1.4. Solubilidad de CO_2 en el agua	7
1.5. Solubilidad del O_2 en el agua	8
1.6. Esquema sistema de vapor y condensado	10
1.7. Efecto de las incrustaciones	12
1.8. Efecto corrosión por hidrógeno	14
1.9. Efecto corrosión por oxígeno	15
1.10. Funcionamiento de un contactor de membrana	17
1.11. Solubilidad O_2 en agua	18
1.12. Tubos de humos	19
1.13. Válvulas de extracción	21
1.14. Mantenimiento en la zona del quemador	26
3.1. Spectrapak™ 311	33
3.2. Enfriador de muestras	33
4.1. Distintivo naviera	37
4.2. Buque <i>Volcán de Tamadaba</i> desatracando de Las Palmas Gran Canaria	37
4.3. Generadores Aquamar	39
4.4. Esquema generador de agua dulce	40
4.5. Gráfica temperatura-producción	40
4.6. Salinómetro	41
4.7. Representación tanque de observación de purgas	42
4.8. Representación condensador vapor sobrante	43
4.9. Caldera <i>Volcán de Tamadaba</i>	44
4.10. Quedamor	44
4.11. Partes caldera pirotubular	45
4.12. Caldera pirotubular 2 pasos	46
4.13. Caldera pirotubular 3 pasos	46
4.14. Cuadro de control caldera	47

4.15. Esquema cabina de control	47
4.16. Esquema local de los Módulos	48
4.17. Representación del economizador	48
4.18. Cuadro de control economizadores	49
4.19. Oxygen Control	50
4.20. Liquitreat	51
4.21. Autotreat	52
4.22. Condensate Control	53
5.1. Nivel óptico	55
5.2. Extracción de fondo en caldera	56
5.3. Extracción de superficie caldera	56
5.4. Diagrama de entradas y salidas de agua de la caldera	57
5.5. Dosificación Oxygen Control	58
5.6. Dosificación Liquitreat	59
5.7. Evolución p-alcalinidad en economizador de popa	59
5.8. Evolución p-alcalinidad en economizador de proa	60
5.9. Evolución p-alcalinidad en caldera	60
5.10. Dosificación Autotreat	61
5.11. Evolución parámetros en economizador de popa	61
5.12. Evolución cloruros en caldera	62
5.13. Evolución cloruros en economizador de proa	62
5.14. Evolución cloruros en economizador de popa	63
A.1. Dimensiones de la caldera	70
C.1. Tabla parámetros del agua de caldera	77
C.2. Gráfica parámetros del agua de caldera	78
C.3. Tabla parámetros del agua de cisterna	79
C.4. Gráfica parámetros del agua de cisterna	80
C.5. Tabla parámetros del agua del economizador de proa	81
C.6. Gráfica parámetros del agua del economizador de proa	82
C.7. Tabla parámetros del agua del economizador de popa	83
C.8. Gráfica parámetros del agua del economizador de popa	84
C.9. Tabla parámetros del agua destilada	85
C.10. Gráfica parámetros del agua destilada	86

Índice de tablas

1.1. Equivalencia entre las medidas de dureza	3
1.2. Valores de los parámetros recomendados por el fabricante.	23
1.3. Periodos mantenimiento	26
4.1. Características del <i>Volcán de Tamadaba</i>	38
4.2. Especificaciones de los motores del <i>Volcán de Tamadaba</i>	38
4.3. Selección salto de alarma	41
4.4. Características del Aalborg Mission XS-2V	49
4.5. Dosificación de Liquitreat en función de la p-alcalinidad.	51
4.6. Dosificación de Autotreat en función de la temperatura.	52
B.1. Características de la caldera pirotubular	74

Simbología

TFG: Trabajo de fin de grado

n°pill: Número de pastillas

ppm: Partes por millón

m: Metros

s: Segundos

kg: Kilogramo

h: Hora

l: Litro

°C: Grado Celsius

atm: Atmósfera

t: Toneladas

kW: Kilovatio

Q: Caudal, m³/s

A: Superficie, m²

cte : Constante

v: Velocidad, m/s

g: Constante de la aceleración, 9,80665 m/s²

p: Presión, N/m²

ρ: Densidad, kg/m³

z: Altura, m

TDS: Sólidos disueltos totales

T.P.: Tasa de purgas

F : Sólidos disueltos totales en el agua de alimentación, ppm

s: Producción actual de vapor, kg/h

b: Valor máximo de TDS en el agua de la caldera, ppm

IMO: Organización Marítima Internacional

AT: Alta temperatura

BT: Baja temperatura

A/D: Agua dulce

A/S: Agua salada

Tk: Tanque

NPSH: Net Positive Suction Head, altura neta positiva de aspiración

U.D: Uso diario

D.O: Diésel oil

F.O: Fuel oil

H⁺: Ión de hidrógeno

OH⁻: Ión de hidróxido

S: Siemens

p_x: Presión parcial de un gas, atm

p_{TOTAL}: Presión total (suma de las presiones parciales), atm

k_H : Constante de Henry, atm/(mol soluto/mol solución)

c: Concentración de un gas en una solución, mol soluto/mol solución

°Be: Grado Beaumé

NWL: Normal Water Level

1 Revisión y antecedentes

1.1 Introducción

En este TFG se muestran los métodos de control y análisis de la calidad del agua de la caldera en el buque de pasaje *Volcán de Tamadaba*. El motivo de la elección de este tema es la afinidad y curiosidad que despierta en el autor el sistema de generación de vapor y las tareas que se le encomiendan al 2º Oficial de Máquinas para mantener un correcto estado del agua del sistema.

Las calderas en la actualidad son el único sistema que permite generar vapor eficientemente en un buque. Existen dos grandes grupos: las calderas acuotubulares y las calderas pirotubulares. La diferencia fundamental entre ambas radica en que en las primeras por el interior de los tubos pasa agua y por el exterior los humos de la combustión, mientras que en las pirotubulares es al revés. A parte de la calidad de la combustión dentro de la caldera, el otro aspecto más importante a la hora de valorar el funcionamiento de la caldera es la calidad del agua que se encuentra dentro de esta.

Este TFG se centra en el método de trabajo que se lleva a cabo en un buque para conseguir que el agua de la caldera tenga las propiedades adecuadas pero también se hace mención a los periodos de mantenimientos generales de la caldera, su limpieza y correcto almacenamiento. Los inconvenientes que puede acarrear una mala calidad del agua de la caldera son las incrustaciones, la corrosión, la formación de lodos y espumas y la fragilización cáustica.

La elaboración de este estudio se comienza con la toma de muestras de agua de los equipos de interés para el trabajo y la confección de los análisis: se mide el pH y la concentración de cloruros y la p-alcalinidad. Estas pruebas se realizan con el objetivo de conocer el carácter del agua con el que está trabajando la caldera y poder valorar si es necesario tomar medidas para el acondicionamiento correcto del agua: dosificar productos químicos en el agua de alimentación y/o realizar extracciones del agua que se encuentra en el interior de la caldera. Se elaboran unas tablas y gráficas en las que se refleja la evolución de los diferentes parámetros a lo largo del periodo de estudio. Con este material se representa la evolución de los parámetros característicos del agua que se encuentra dentro de cada equipo del sistema. Gracias a esta serie temporal de datos se puede analizar las causas y efectos de problemas y en algunos casos, las relaciones que surgen entre los diversos parámetros del agua de un equipo o entre diversos equipos.

1.2 Constituyentes del agua de alimentación

El agua en su forma molecular pura no existe en la naturaleza, por cuanto contiene sustancias (a las que se podrían llamar impurezas) que pueden estar en suspensión o solución según el tamaño de disgregación del material que acarrea.

Las concentraciones de varias sustancias en el agua en forma disuelta, coloidal o suspendida son típicamente bajas pero varían considerablemente. Cuando un componente en particular puede afectar la buena salud de la caldera, se considera un contaminante. Estos contaminantes, por supuesto, son lo que el operador elimina o intenta evitar que ingresen al suministro de agua de alimentación. En esta sección se muestran los constituyentes más frecuentes en la composición del agua.

1.2.1 Sólidos totales

Aparte de los gases, todos los contaminantes del agua contribuyen a aumentar el contenido de sólidos dentro de esta. El agua natural transporta muchos sólidos disueltos y no disueltos. Los sólidos no disueltos son sustancias no polares que forman partículas relativamente grandes de materiales como el lodo y que no se acaban disolviendo. Clasificados por su tamaño y estado, por sus características químicas y por su distribución de tamaño, los sólidos se pueden dispersar en el agua en forma tanto suspendida como disuelta.

Los tamaños de los sólidos en el agua se pueden clasificar como suspendidos, sedimentables, coloidales o disueltos. Los sólidos totales son los sólidos suspendidos y disueltos que quedan cuando el agua se elimina por evaporación. Los sólidos también se caracterizan por ser volátiles o no volátiles. La distribución de sólidos se determina calculando el porcentaje de sólidos filtrables por rango de tamaño. Los sólidos típicamente incluyen: sólidos inorgánicos como lodo y arcilla y materia orgánica como fibras vegetales y microorganismos de fuentes naturales o artificiales.

Aunque no es técnicamente exacto desde el punto de vista químico porque un material finamente suspendido puede pasar a través del filtro, los sólidos suspendidos se definen como aquellos que se pueden filtrar en la prueba de laboratorio de sólidos suspendidos. El material que pasa a través del filtro se define como sólidos disueltos.

Los sólidos coloidales son sólidos suspendidos extremadamente finos (partículas) de menos de 1 micrón de diámetro; son tan pequeños (aunque todavía pueden nublar el agua) que no se depositarán, incluso si se les permite un reposo durante días o semanas.

1.2.1.1 Sólidos en suspensión

Los sólidos en suspensión son materiales dispersos en el agua que se pueden extraer del agua con filtros. Estos materiales están formados en la mayoría de los casos por pequeñas partículas de barro, humus, aguas residuales y residuos industriales. Es habitual relacionar la turbidez con los sólidos en suspensión. Según las revistas especializadas, el agua potable debe tener una turbidez inferior a 10 ppm con el fin de que visualmente tenga un aspecto transparente.

1.2.1.2 Sólidos disueltos

Son las sales, minerales, metales y cualquier otro compuesto orgánico o inorgánico menor a 1,5 micras que se disuelve en el agua. Son una de las sustancias que más difícil es de eliminar.

Las principales sales disueltas en el agua son [9]:

Dureza

El contenido de número de átomos de sales de calcio y magnesio expresados como ppm de carbonato de calcio es lo que se conoce como dureza. En general, el calcio es más abundante que el magnesio. Se distingue dentro de las durezas los siguientes tipos:

- Dureza total: Corresponde a las sales de magnesio y calcio.
- Dureza permanente: En este grupo están los sulfatos, nitratos y cloruros. Puesto que en la ebullición se atrapa el CO_2 disuelto y se transforma el $\text{Ca}(\text{CO}_3\text{H})_2$ soluble en carbonato prácticamente insoluble (solubilidad de 20 a 30 ppm), este tipo de análisis de la dureza ha de realizarse tras la ebullición.
- Dureza temporal: Constituida por los carbonatos y bicarbonatos de calcio y magnesio. La diferencia entre la dureza total y la dureza permanente es prácticamente igual a la dureza temporal debida al $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$.

Las aguas también se pueden dividir en calcáreas, magnesianas o selenitosas según que la dureza sea debida al bicarbonato y sulfato de calcio o a las sales de magnesio.

La dureza causa serios problemas en los intercambiadores de calor, por cuanto se adhiere a las paredes de los equipos, formando incrustaciones muy difíciles de eliminar.

La equivalencia entre las distintas unidades de medida de la dureza se muestra en la siguiente tabla:

	Miliequivalente, me	Grado francés, °fH	Grado inglés, °eH	Grado americano, °aH	Grado alemán, °dH	ppm CaCo3
Miliequivalente, me	1	5	3,5	2,9	2,8	50
Grado francés, °fH	0,2	1	0,7	0,58	0,56	10
Grado inglés, °eH	0,286	1,43	1	0,83	0,8	14,3
Grado americano, °aH	0,31	1,27	1,2	1	0,96	17,2
Grado alemán, °dH	0,358	1,79	1,25	1,04	1	17,9
ppm CaCo3	0,02	0,1	0,07	0,058	0,056	1

Tabla 1.1: Equivalencia entre las medidas de dureza

Fuente: Autoría propia

La solubilidad del bicarbonato y sulfato cálcico disminuye en función de la temperatura, lo que da origen a su precipitación en forma de incrustación sobre superficies calientes. Esto se puede observar en las gráficas 1.1 y 1.2 que muestran como evoluciona la solubilidad del CaSO_4 y el CaCO_3 en función de la temperatura.

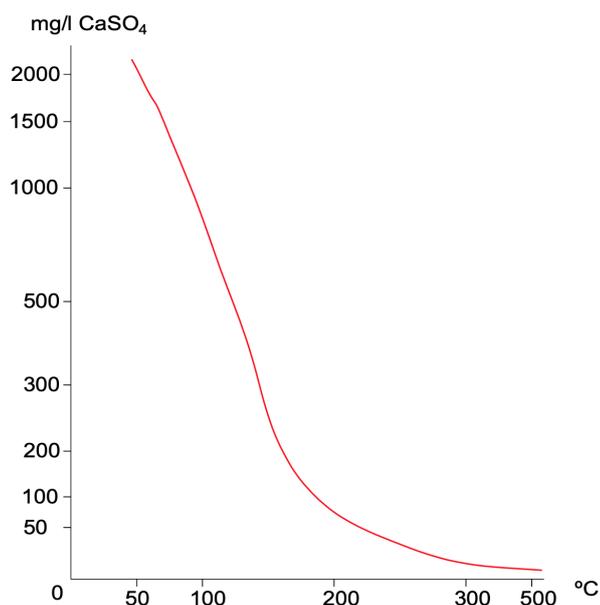


Figura 1.1: Solubilidad CaSO_4

Fuente: Autoría propia

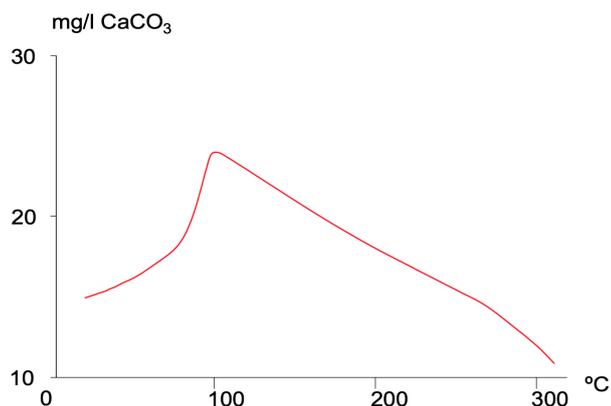


Figura 1.2: Solubilidad CaCO_3

Fuente: Autoría propia

El sulfato cálcico no precipitará en cantidad apreciable hasta alcanzar temperaturas superiores a 100 °C, pero llegado a esta temperatura generalmente precipitan en forma muy dura y compacta. A su vez, el bicarbonato se descompone antes y precipita en forma de carbonato.

Ácidos y bases

El agua en su composición contiene habitualmente álcalis o ácidos, los cuales le aportan las propiedades de alcalinidad y acidez. Los ácidos más comunes utilizados en las operaciones que impliquen el abastecimiento de agua son el ácido clorhídrico (HCl), ácido sulfúrico (H₂SO₄), ácido nítrico (HNO₃) y ácido carbónico (H₂CO₃). Es muy importante tener en cuenta que en cada uno de los ácidos anteriormente citados, el hidrógeno es un elemento común en todos ellos.

Un ácido es una sustancia que produce iones de hidrógeno, H⁺, cuando se disuelve en agua. Los iones de hidrógeno son átomos de hidrógeno a los que se le despojan sus electrones. Un solo ión de hidrógeno es únicamente un núcleo de un átomo de hidrógeno. Los ácidos y las bases se disuelven y se unen libremente a las moléculas de agua.

Los iones de hidróxido, OH⁻, se producen cuando una base se disuelve en agua. Las bases más utilizadas en las operaciones industriales de tratamiento de agua son el hidróxido de calcio, Ca(OH)₂; hidróxido de sodio, NaOH; e hidróxido de potasio, KOH. Además, se ha de tener en cuenta que las bases contienen sustancias metálicas, como calcio, magnesio, sodio y potasio, que incluyen los elementos que se encargan de producir la alcalinidad dentro del agua.

Sílice

Refleja el contenido de ppm de SiO₂ en el agua. El rango en el que se puede encontrar en el agua es de 1-100 ppm, obteniéndose de la disolución de rocas silíceas y por la degradación de feldespato, debido a la acción del CO₂.

La sílice se presenta mayormente en estado iónico, y circunstancialmente en estado coloidal, produciéndose silicatos al combinarse con muchos elementos. Los silicatos forman depósitos muy consistentes en las tuberías de la caldera. A menudo estas incrustaciones son muy difíciles de eliminar, siendo preciso la acción de ácidos fluorídicos.

A presiones elevadas en la caldera, el vapor contiene una cierta proporción de sílice y de distintos componentes minerales. Algunos datos a tener en cuenta con respecto a la presencia de sílice en el agua de caldera son:

- El ácido silícico tiene a partir de los 200^oC una presión de vapor suficiente como para que el vapor de agua contenga en estado gaseoso una cantidad apreciable de este ácido.
- El contenido en sílice del vapor de agua aumenta con el contenido en sílice del agua de la caldera y sobre todo con el aumento de la presión.
- En razón del enfriamiento que acompaña la expansión, el punto de saturación de la sílice en el vapor de agua puede ser superado dando lugar a la formación de depósitos silícicos.

Para la eliminación de los silicatos en las calderas de alta presión es necesario realizarla mediante intercambio iónico, lo que evita que estos silicatos precipiten dentro de la caldera, siendo prácticamente imposible de evitar una vez que se encuentren dentro.

Cuanto más elevada es la presión, temperatura y concentración en el agua, los arrastres de sílice son más fuertes. Las calderas en las que el vapor es destinado a la producción de electricidad y las de baja y media presión, es necesario comprobar periódicamente si la concentración de sílice se encuentra por debajo de SiO₂ < 50 ppm.

Por este motivo, para evitar su precipitación en las superficies más calientes, zonas adyacentes a los tubos de humos, su ajuste y control se hará alcalinizando el agua o disminuyendo su concentración mediante extracciones.

Sales de sodio y potasio

Cuando ácidos y bases reaccionan químicamente entre sí se neutralizan, formando un compuesto, a parte del agua, denominado sal. Este producto obtenido es el grupo más grande que se puede encontrar de compuestos inorgánicos. El CuSO₄ es la sal más utilizada para la eliminación de algas en operaciones de suministro de agua. En cambio, otras sales que aparecen en juego en estas operaciones son las de sodio y potasio, que no tienden a formar incrustaciones por su alta solubilidad pero que provocan grandes corrosiones en las calderas.

Ácido sulfhídrico

El H_2S es producto de la descomposición de la materia orgánica. El agua tiene un olor como a huevos cocidos. Este ácido es corrosivo para la gran mayoría de los metales.

1.2.1.3 Metales

En todo tipo de compuestos químicos los metales están presentes en forma de cationes en solución. Aquellos metales cuya densidad es superior a 5 kg/dm^3 se les denomina metales pesados. La mayor parte de los metales se incorporan en el agua como parte de compuestos que se ionizan para liberarse el metal en forma de ión positivo.

Las formas en que se pueden presentar los metales pueden ser como compuestos orgánicos simples o partículas, coloides o complejos orgánicos. No obstante, la forma en la que pueden aparecer viene definida por la estructura química del agua, la matriz, y en específico, el pH.

Hierro

Las aguas corrosivas contienen sales ferrosas disueltas que en contacto con el aire se oxidan rápidamente, dando origen a sales férricas cuya hidrólisis da lugar a hidrato insoluble. Este hierro se encuentra a veces en forma de ácidos húmicos, lo que hace más difícil su eliminación.

Los inconvenientes de las aguas ferruginosas son numerosos: colmatan las canalizaciones o los aparatos, con riesgo de corrosión por aireación diferencial; forman manchas amarillo-rojizas e hidróxido férrico, que produce problemas en los intercambiadores de calor.

Para los niveles de concentración de hasta 2 ppm de Fe en agua se pueden utilizar métodos de acondicionamiento con fosfatos, pero para niveles superiores hay que realizar la eliminación a través de extracciones.

Manganeso

Produce problemas parecidos al hierro, precipitando en forma de hidróxido, a lo que se conoce como aguas negras. Se le encuentra con menos frecuencia que el hierro, pero los expertos han estudiado que en concentraciones de 0,2 ppm ya produce depósitos.

El manganeso se forma por la descomposición de materia orgánica en depósitos de aguas. Los métodos de control y eliminación son los mismos que los utilizados en el caso del hierro.

1.2.1.4 Sustancias orgánicas

Compuestos que contienen el carbono producto de la descomposición de la materia que estuvo viva (plantas, animales, etc). Incluye madera, combustibles, grasas, proteínas e incluso plásticos. Se trata de moléculas grandes y no polares, que no tienen gran solubilidad en el agua.

En calderas provoca la formación de espuma dentro de ellas. El arrastre, los depósitos y la formación de espuma son problemas muy relacionados entre sí, y que pueden provocar la obstrucción de tuberías y su corrosión.

Estas sustancias se descomponen, dando origen a ácidos orgánicos que favorecen un pH bajo en el agua de alimentación, perjudicial por su alta tendencia al ataque de la superficie de los tubos. Las burbujas de vapor ven dificultada su liberación por culpa de las partículas que se encuentran en la capa superficial del agua. La espuma tiene origen también en los carbonatos en solución que crean un precipitado que se aglutina en la capa superficial.

1.2.1.5 Sustancias inorgánicas

Esta materia es de origen mineral y no contiene carbono en su composición. Dentro de las sustancias inorgánicas se encuentran los óxidos, ácidos, bases y sales. Dos de los integrantes más importantes en el agua son el fósforo y el nitrógeno.

1.2.1.6 Organismos vivos

La proliferación de organismos vivos es frecuente en las redes de distribución. Se habla de bacterias y de algas para designar los cúmulos que se forman en las canalizaciones y en los aparatos. El desarrollo de estos organismos está condicionado por distintos factores:

- La composición del medio, la presencia de materia orgánica y de nutrientes (fósforo y nitrógeno) juegan un papel muy importante.
 - La luz, que favorece la asimilación clorofílica. Por culpa de este factor, los circuitos de recirculación son los más expuestos a este género de inconvenientes.
- Los organismos vivos responsables más destacados son:

Bacterias

Algunas de las cuales se desarrollan en presencia de oxígeno (aeróbicas) y otras en ausencia de este gas (anaeróbicas). Las bacterias heterótrofas utilizan una fuente de carbono orgánico y metabolizan numerosas sustancias orgánicas disueltas. Las bacterias autótrofas pueden crecer a expensas de elementos minerales únicamente y, debido a esto, jugar un papel importante en los fenómenos de corrosión. Las bacterias más importantes son las vinculadas al nitrógeno, del ciclo del azufre, capaces de dar ácidos muy reactivos, y las bacterias del ciclo del hierro que provocan el llamado fenómeno del agua roja.

Hongos, organismos heterótrofos

Reincorporan mediante sus residuos ácidos orgánicos corrosivos.

Algas, organismos autótrofos

Se desarrollan particularmente en presencia de la luz. Además de su propia actividad, los organismos vivos crean zonas de anaerobiosis (vida en un ambiente desprovisto de oxígeno), extraordinariamente nefastas para los metales por: formación de pilas de aireación diferencial y el riesgo de implantación de bacterias de tipo desulfobrio (bacterias reductoras de sulfato, que comprenden varios grupos de bacterias que utilizan el sulfato como agente oxidante, reduciéndolo a sulfuro).

1.2.2 Gases disueltos

Dióxido de carbono

Se encuentra en rangos muy variables dentro del agua. Dado que en la composición de la atmósfera se encuentra un 0,04 % de CO_2 y como este gas es muy soluble en el agua, una gran cantidad de CO_2 se introduce en el agua de mar con la lluvia. Además, los residuos industriales y la materia orgánica que se descompone continuamente en la mar incrementa esta concentración.

El dióxido de carbono es importante debido al papel que desempeña en el pH y la alcalinidad. Para la comprensión del posible comportamiento incrustante y agresivo del agua es importante saber la distribución del CO_2 total disuelto [4]. Para comprender el significado del equilibrio carbónico en el agua se tiene la siguiente imagen:



Figura 1.3: Esquema equilibrio carbónico

Fuente: Autoría propia

El agua al ponerse en contacto con carbonatos y estar presente el anhídrido carbónico libre, se realiza la transformación del carbonato en bicarbonato, obteniéndose el equilibrio:



La reacción 1.1 actúa regulando el equilibrio carbonato-bicarbonato e influye en el pH del medio. El equilibrio se dará en el momento en el que la solución no ceda CO_2 . Este anhídrido que se lo-

caliza en el agua es el encargado de atacar y disolver los carbonatos. No obstante, si se consigue el suficiente CO_2 para lograr que en la reacción de equilibrio 1.1 no ocurra un movimiento hacia los reactivos transformándose en bicarbonatos los carbonatos, este CO_2 se le denomina anhídrido carbónico equilibrante, el cual forma ácido carbónico en unión con el agua.

En este punto, no se dará ni ataque a los carbonatos ni creación de estos a partir de los bicarbonatos. A este punto de equilibrio le corresponde un pH de equilibrio, también conocido como pH de saturación, por alcanzarse en este punto la saturación del agua en carbonato. En este punto de equilibrio se consigue, por tanto, que el agua no sea agresiva ni incrustante.

Para hablar del equilibrio carbónico se pone como ejemplo las sales pertenecientes de Ca, creando los carbonatos cálcicos y bicarbonatos.

Si se da que el CO_2 libre es más abundante que el CO_2 equilibrante, esto es, al indispensable para conservar el bicarbonato cálcico en solución, este sobrante se le denomina como CO_2 agresivo a la caliza, el cual atacará al carbonato hasta conseguir un equilibrio.

Si por el contrario, el CO_2 libre es menor al equilibrante, se libera CO_2 por la descomposición del $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ hasta que se llega al equilibrio carbónico, produciéndose al mismo tiempo CaCO_3 . Este carbonato cálcico es el que provoca las incrustaciones en las calderas.

Cuando la parte de CO_2 libre es superior al CO_2 equilibrante se considera al agua agresiva, mientras que si se da el caso contrario es incrustante. Sin embargo, aunque el agua no sea agresiva ni incrustante estando en su estado de equilibrio carbónico, puede actuar como corrosiva si se encuentra poco mineralizada. Así, puede atacar al Fe y al CO_2 equilibrante.

Por último, apuntar que cuando se aumenta la temperatura del agua se puede provocar un desprendimiento de CO_2 (como se observa en la figura 1.4), causa posible de que formen precipitados incrustantes.

Oxígeno

Se puede encontrar en aguas que tienen sus superficies aireadas. El O_2 provoca la corrosión y el picado en la caldera, especialmente en sus tubos.

Tiene un comportamiento parecido al de otros solutos citados, siendo la temperatura un factor que influye sobre la cantidad de O_2 que se puede disolver.

La solubilidad del oxígeno y el anhídrido carbónico varían con la presión y la temperatura. A presión atmosférica, la solubilidad disminuye cuando la temperatura aumenta, hasta tal punto que se hace nula alrededor de los 100°C . Además, el anhídrido carbónico es fácilmente arrastrado por una corriente de aire. En las figuras 1.4 y 1.5 se muestran las solubilidades de estos gases:

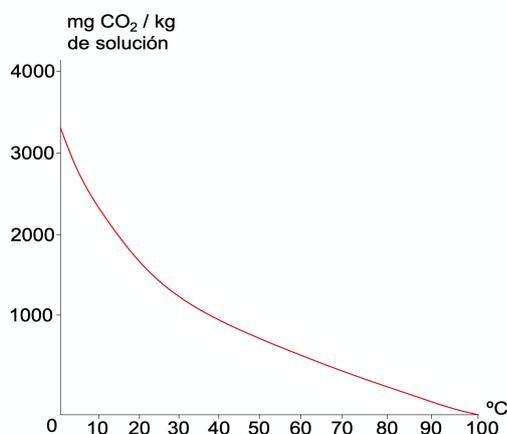


Figura 1.4: Solubilidad de CO_2 en el agua

Fuente: Autoría propia

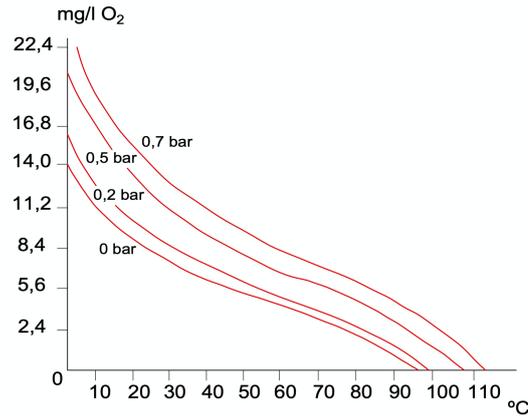


Figura 1.5: Solubilidad del O₂ en el agua

Fuente: Autoría propia

1.3 Parámetros característicos del agua de alimentación

1.3.1 Alcalinidad

La alcalinidad del agua de alimentación representa la cantidad de carbonatos, bicarbonatos, hidróxidos, silicatos o fosfatos. Todos estos son una fuente potencial de depósitos [8].

El contenido de hidróxidos muestra la predisposición del agua de caldera para controlar los arrastres, la fragilidad, la corrosión y el control de las incrustaciones. El hidróxido ha de mantenerse en un rango lo suficientemente bajo para evitar el arrastre y las espumas, así como para evitar que en el acero aparezcan puntos de concentración de tensiones y su fragilidad en zonas con poca circulación. El contenido de fosfatos se vigila para controlar las incrustaciones solubles que se pueden crear para posteriormente eliminarlas mediante las extracciones. Los fosfatos deben de mantener una relación con la alcalinidad y el pH de la caldera para evitar de esta forma que no se formen hidróxidos libres que puedan aumentar la fragilidad de la caldera.

La alcalinidad puede estar expresada como alcalinidad a la fenolftaleína (alcalinidad cáustica) o como alcalinidad total. La primera es la que se conoce como p-alcalinidad y representa la cantidad de hidróxidos y carbonatos que se encuentran en la muestra; mientras que la segunda se le conoce como m-alcalinidad y además de incluir los anteriores compuestos incorpora a los bicarbonatos. La “m-” y la “p-” hacen referencia al metilo y a la fenolftaleína (en inglés phenolphthalein) respectivamente, siendo dos indicadores de pH utilizados a la hora de calcular la alcalinidad. En el caso de los análisis elaborados en este buque, la alcalinidad que se estudia es a la fenolftaleína [7].

1.3.2 pH

El pH refleja la concentración de iones hidrógeno, H⁺. Así, pueden haber soluciones ácidas, donde se da una alta concentración de H⁺; hasta básicas, con alta concentración de iones OH⁻. La escala del pH tiene como rango del 0 al 14, siendo el valor neutral el 7. El pH del agua es importante para las reacciones químicas que tienen lugar dentro de ella debido a que los valores de pH extremos pueden inhibir el crecimiento de microorganismos.

El agua de mar que se trata en los evaporadores es un poco más básica que el agua dulce normal. Tras la destilación, el agua destilada tiene un pH prácticamente de 7.

Los análisis periódicos del pH permiten controlar si el tratamiento de coagulación que está recibiendo el agua de la caldera responde adecuadamente. Con este tratamiento se trata de neutralizar las cargas de las partículas y así conseguir que se unan y poder eliminar la materia de tamaño coloidal que se encuentra en la superficie. Se ha de tener en cuenta que al añadir un ácido al agua de alimentación el pH disminuye y si se hecha cal (álcali) el valor del pH aumenta.

La medición del pH se puede realizar químicamente utilizando diferentes tipos de pruebas indicadoras. El valor del pH también se puede medir con un medidor eléctrico, siendo este un valor más

exacto.

El valor del agua de caldera debe de estar en el margen de 9 a 11,5. Por su parte, el valor del pH del condensado será como mínimo de 7,5. Si el valor del condensado es inferior a 7 es síntoma de que se está produciendo un fallo.

El pH del agua de alimentación debe de ser aproximadamente de 8,5. Si está por debajo de 8,5 se debe de prestar especial atención al pH del agua de la caldera, e incluso, si este está por debajo del margen dado, se debe de aumentar los parámetros de la alcalinidad con el aporte de agua de alimentación. Basándose únicamente en el pH del agua de alimentación, no es necesario tomar otra medida.

1.3.3 Salinidad

Se trata de la cantidad de sales que se encuentran en el agua. Se expresa en ppm. La salinidad que se puede encontrar en el agua de mar es de 30 000 ppm. Los inconvenientes que conlleva la presencia de Cl y NaCl en el agua de un intercambiador son:

- Arrastre: Se produce si hay una concentración de salinidad considerable, provocando el arrastre de partículas sólidas y líquidas junto el vapor tras la formación de espumas o ebulliciones descontroladas. Los arrastres provocan incrustaciones en los precalentadores de vapor y en el resto de sistemas que trabajan con vapor.
- Agresividad: Se puede resumir como la velocidad de corrosión. Así, la agresividad que presenta un líquido respecto a un metal es el desgaste o pérdida de partículas del metal debido a la acción de este líquido.

La agresividad que puede sufrir un metal varía en función del fluido en acción. La agresividad también influye sobre la acidez y alcalinidad, por lo que en función del catión y anión que forma la sal, su hidrólisis dará un pH ácido o básico.

La salinidad del agua de caldera es un parámetro que no debe subir de 200 ppm.

1.3.4 Conductividad

Se trata de la propiedad que tienen las soluciones que permite el paso de corriente eléctrica y está influenciada por la concentración de iones presentes y la temperatura. Representa la concentración de sales y, gracias a mostrar las variaciones de los sólidos disueltos, se utiliza para conocer el grado de corrosión al que está expuesta la caldera.

Por su parte, la conductividad en una solución es correlativa a su resistencia y se representa como S/m (Siemens/metro).

El agua dulce tiene una conductividad de 0.005 – 0.05 S/m mientras que la del agua destilada es de $5.5 \cdot 10^{-6}$ S/m, que se ve aumentada con el tiempo de almacenamiento debido a la absorción de CO₂.

1.3.5 Turbidez

La turbiedad o turbidez no es más que la capacidad de un líquido de diseminar un haz luminoso, siendo su inversa la transparencia. La turbiedad puede deberse a partículas de arcilla provenientes de la erosión del suelo, a algas o a los crecimientos bacterianos.

La turbiedad causa los siguientes problemas:

- Interfiere en la potabilización.
- Forma depósitos en tanques de almacenamiento.
- Antiestética para el agua potable.
- Genera incrustaciones en sistemas de enfriamiento.

Un método sencillo para su medida es la determinación del límite de visibilidad de un objeto sumergido. Otro método es comparar la transparencia de una muestra con la de la muestra de agua destilada a la que se le añade una solución alcohólica de masilla gota a gota [9]. De esta manera, la turbiedad se evalúa a través del número de gotas de la solución de masilla necesarias para obtener el mismo grado de transparencia que la muestra a comparar.

1.3.6 Color

El color está provocado por la acumulación de sustancias químicas, la mayoría de las veces provenientes de la degradación de la materia orgánica, tales como hojas y plantas acuáticas con las cuales entra en contacto. El conocimiento de la naturaleza y características de estos contaminantes es básico para poder entender los procesos de remoción que se deberán realizar a posteriori.

Las razones por las cuáles se suele hacer la remoción del color en el agua son de orden estético y por razones químico-sanitarias e industriales.

La calidad del agua es juzgada por los tipos y niveles de concentración de los muchos componentes que pueden estar presentes en el agua; algunos de estos componentes se producen en la naturaleza y otros son generados por la tecnología humana.

1.4 Efectos producidos por el agua en la instalación

Una caldera es un dispositivo para generar vapor, que consta de dos partes principales: el horno, que proporciona calor quemando combustible; y la caldera propiamente dicha, un dispositivo en el que el calor transforma el agua en vapor. El vapor o fluido caliente se hace circular fuera de la caldera para su uso en diversas aplicaciones que precisen vapor.

El circuito de vapor y condensado, figura 1.6, que se encuentra en el *Volcán de Tamadaba* se puede simplificar en:

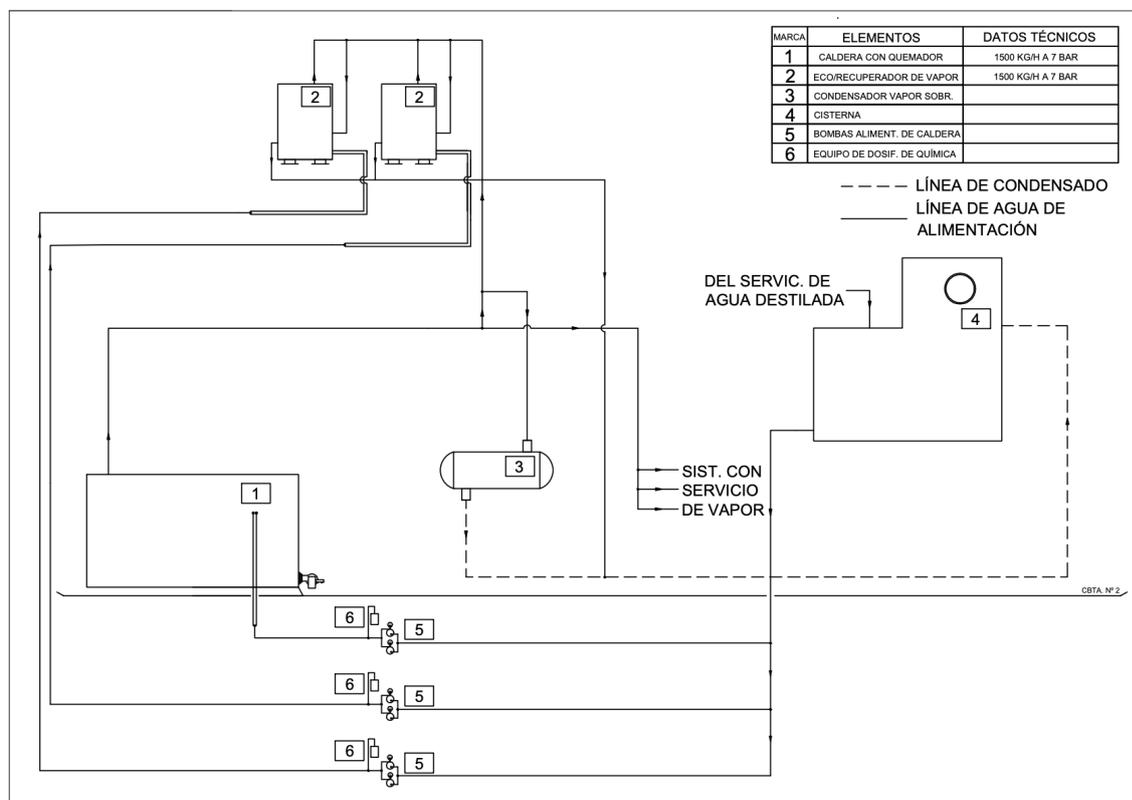


Figura 1.6: Esquema sistema de vapor y condensado
Fuente: Autoría propia

En este esquema aparece reflejado un equipo de dosificación de la química. Este equipo en el periodo del estudio no se encontraba funcionando por lo que la dosificación de la química a través de las bombas de alimentación de la caldera se realiza de forma manual.

La caldera recibe el agua de alimentación, formada por una proporción variable de agua condensada recuperada (agua de retorno) y agua destilada, que ha sido purificada a través de los generadores de agua dulce del buque. Por lo tanto, la composición del agua de alimentación depende de la calidad del agua de reposición y la cantidad de condensado devuelto a la caldera.

El vapor, que sale de la caldera, con frecuencia contiene gotas líquidas y gases. El agua que queda en forma líquida en el fondo de la caldera recoge toda la materia extraña, impurezas, del agua líquida que se convirtió en vapor. Las impurezas deben ser extraídas por la descarga de parte del agua de la caldera a las sentinas. El porcentaje permitido de purgado en una planta está estrictamente limitado por los costos de funcionamiento. La tendencia es reducir este porcentaje a una cifra muy pequeña.

Las impurezas se clasifican por el efecto que producen en el agua de la caldera. Existen cuatro defectos que producen desperfectos y el acortamiento en la vida útil de las calderas de vapor: las incrustaciones, la corrosión, espumas y la fragilización caustica.

1.4.1 Incrustaciones

Las incrustaciones son un depósito que se adhiere y que se forma cuando las sustancias minerales disueltas en el agua abandonan la solución y se aglutinan en la superficie metálica de intercambio térmico de la caldera [9]. Los ejemplos de sustancias con efecto más adverso sobre las superficies de la caldera son las grasas/aceites y la materia en suspensión de diversa procedencia. Este último grupo no puede causar incrustación por sí mismo, pero puede actuar en simbiosis con otras formaciones de incrustación como pueden ser el carbonato y bicarbonato, hidróxido, sulfato, sílice, calcio y magnesio (minerales de dureza).

Cuando los tubos de la caldera entran en contacto con el agua que contenga estas formaciones en solución, se da origen a los depósitos de incrustaciones. Para evitar esta formación de incrustaciones se trata el agua con compuestos químicos para convertir el calcio y el magnesio en sólidos en suspensión. El NaOH es el producto químico que se utiliza para combatir la formación de incrustaciones.

1.4.1.1 Efectos de las incrustaciones

Para que las impurezas citadas antes puedan crear una incrustación, deben abandonar la solución y precipitarse de la siguiente manera:

- Al disminuir la solubilidad debido al aumento de la temperatura del agua. Se da en las impurezas que poseen una solubilidad negativa.
- Al rebasar el punto de saturación del que dispone el agua, por lo que no es capaz de disolver más impurezas y han de precipitar saliendo de la solución.
- Por cambios químicos, como ocurre con los bicarbonatos de calcio y magnesio.

Debido a lo expuesto en los apartados previos, puede ocurrir que el agua natural se convierta en un incrustante por la ruptura del equilibrio carbónico (reacción 1.1). El anhídrido carbónico necesario para mantener este equilibrio es el que se ha denominado CO_2 de equilibrio. Todo fenómeno físico o químico, aireación o calentamiento que trata de eliminar todo o parte del CO_2 de equilibrio, desplaza la reacción hacia la izquierda y provoca la incrustación por acumulación de carbonato cálcico.

Los efectos negativos más habituales que provocan las incrustaciones en el funcionamiento de la caldera son:

- La temperatura de los humos a la salida de las calderas o de los economizadores aumenta en detrimento del rendimiento calorífico. El consumo de combustible y el precio del vapor aumenta paralelamente.
- La capacidad de vaporización disminuye.
- El hierro es sobrecalentado, su resistencia mecánica disminuye, se producen deformaciones y quebraduras que dan como resultado la rotura de los tubos.
- A consecuencia de la porosidad de las incrustaciones, cuando el agua entra en contacto con el hierro sobrecalentado, puede aumentar su concentración en sosa cáustica hasta el punto de provocar corrosiones. Puede también disociarse y el oxígeno nascente atacar al hierro.

- Si un trozo de incrustación de una cierta superficie se separa, la violenta vaporización del agua que contacta con el metal muy caliente puede provocar que los tubos estallen.
 - La incrustación es un aislante muy eficiente del calor, variando el grado de aislamiento con su densidad. Su presencia en grosores apreciables significa menor absorción de calor por el agua de la caldera, con la consiguiente pérdida de eficiencia o rendimiento de caldera.
- En la figura 1.7 se muestra las consecuencias que produce las incrustaciones sobre la eficiencia o rendimiento térmico de una caldera [9]:

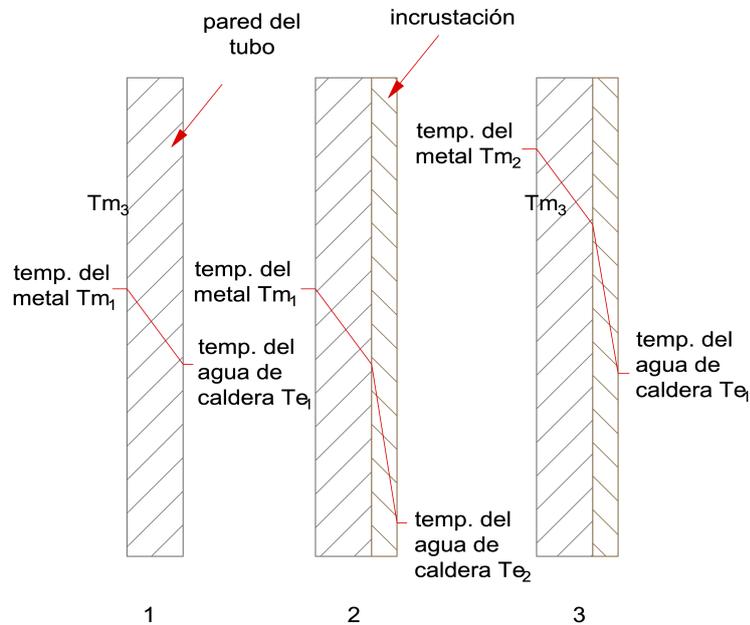


Figura 1.7: Efecto de las incrustaciones

Fuente: Autoría propia

En ausencia de la incrustación, la temperatura (esquema 1) del agua de la caldera T_{e1} se obtiene a partir de la temperatura externa del metal, T_{m1} . En presencia de incrustación (esquema 2) esta misma temperatura del metal, T_{m1} , da lugar a una temperatura del agua T_{e2} , inferior a T_{e1} . Para alcanzar T_{e1} (esquema 3) debe aplicarse a la pared externa una temperatura T_{m2} superior a T_{m1} , por lo cual el incremento de temperatura del metal tiene un valor $T_{m2}-T_{m1}$.

1.4.1.2 Prevención de la formación de incrustaciones

Las estrategias a seguir para prevenir la formación de incrustaciones se basan en:

Impedir la utilización de agua con alta dureza

Se evitará la presencia de sales de calcio y magnesio. Las unidades de dureza en los análisis son las ppm equivalentes de CaCO_3 .

Registro de la concentración de impurezas

Controlando la concentración de impurezas bajo unos límites permite reducir las incrustaciones. Los métodos utilizados son las extracciones periódicas y el tratamiento químico. Las extracciones de fondo deben de realizarse en manera conjunta con la dosificación de los productos químicos que producen lodos, pues han de eliminarse del agua de caldera en el menor tiempo posible.

Tratamiento externo

El tratamiento externo puede fundamentarse en la filtración de sólidos en suspensión para su reducción, el ablandamiento de durezas mediante cal, ablandamiento por zeolita [10], desmineralizadores y desaireadores para la eliminación de oxígeno y gases. Otros tratamientos más innovadores son la tecnología de membranas u ósmosis.

Tratamiento interno

El control de las impurezas minerales que se cuelean esquivando el programa de pretratamiento es a lo que va dirigida la selección de productos químicos que se dosifican.

1.4.1.3 Control de las incrustaciones

Los especialistas en el control de calidad de agua sugieren controlar los siguientes parámetros:

Dureza total

Se trata de la combinación de Ca y Mg disueltos en el agua. Su unidad son las ppm de CaCO_3 , y su límite ronda las 10 ppm.

El motivo para el control de la dureza es porque el sistema de generación de vapor requiere que haya muy poca dureza en el agua de alimentación, ya que el Ca y Mg formarán incrustaciones una vez dentro de la caldera. La incrustación se forma por que la temperatura del agua se ha elevado hasta tal punto que la dureza ya no es soluble y se precipita, se convierte en sólidos en suspensión y se deposita sobre las superficies de los tubos.

Sílice

Su método de análisis es mediante la espectrofotometría, a través de la cuál se valora la cantidad de ppm de SiO_2 presentes en el agua. El límite para este tipo de caldera piro-tubular es de 100 ppm. La presencia de sílice resulta indeseable en el agua de alimentación a calderas, ya que si no se mantienen los límites de control recomendados, la sílice puede formar una incrustación muy densa y dura que provoca serias pérdidas de eficiencia por una deficiente transferencia de calor.

1.4.2 Corrosión

Los metales obtenidos del óxido metálico correspondiente tienden a volver a su estado original debido a la corrosión. Algunos de estos óxidos metálicos crean un revestimiento estable que se adhiere firmemente a la superficie del metal original protegiéndolo de nuevos ataques. Sin embargo, otros óxidos forman recubrimientos que son porosos y, por lo tanto, no proporcionan protección, o son inestables y se descomponen fácilmente. Por ejemplo, una forma especial de óxido de hierro conocida como magnetita puede formarse en las calderas. Esta proporciona una película protectora sobre el metal, pero en presencia de oxígeno se descompone para formar óxido férrico que es poroso y no proporciona protección [3].

La corrosión puede producir ataques generales en amplias superficies metálicas o puede tratarse de un punto de penetración precisa del metal.

Mientras la corrosión básica en calderas puede darse primariamente debido a la reacción del metal con oxígeno, otros factores tales como el estrés, condiciones ácidas y corrosión química específica pueden tener una influencia importante y producir diferentes formas de ataque. Es necesario considerar la cantidad de sustancias perjudiciales que pueden ser permitidas en el agua de caldera sin riesgo de daño a la misma. La presencia de un pH bajo, las corrientes de corrosión producidas por la heterogeneidad en las superficies metálicas o el dióxido de carbono y oxígeno disuelto puede provocar la corrosión en el agua de alimentación.

Tras las incrustaciones, la corrosión es la siguiente causa más común de problemas en el agua de la caldera. Mientras que hay muchos motivos para la formación de incrustaciones por el agua de caldera, incluyendo reacciones químicas provenientes de la mala dosificación de los productos químicos, las razones por las que se produce la corrosión se clasifican en función al tipo de ataque que ocurre en la superficie metálica de caldera.

1.4.2.1 Corrosión y fundamentos de la misma

La corrosión en la caldera ocurre cuando la superficie metálica es expuesta a agua que tiene oxígeno disuelto durante las operaciones o cuando se encuentra en periodos de inactividad. Una alcalinidad baja en el agua de la caldera, altas temperaturas y el estrés tienden a acelerar los mecanismos de corrosión. En el sistema de condensado, la corrosión generalmente es debida la contaminación con CO_2 y O_2 . Además, las aleaciones de cobre que están presentes en el sistema de la caldera pueden

verse dañadas por la contaminación con amoníaco o gases sulfurados.

La corrosión se basa en dos procesos:

- Ataque químico directo: Se produce cuando el metal a alta temperatura entra en contacto con el aire u otros gases, ocurriendo la oxidación o sulfuración del metal.

- Acción electro-química: Este término engloba la mayor parte de las formas de ataque corrosivo, las cuales habitualmente tienen lugar en presencia de humedad. Una forma muy común es la acción galvánica, la cual se produce cuando dos metales diferentes se colocan en un electrolito. El más noble de los metales actúa como cátodo y el otro como ánodo, sufriendo el desgaste.

A continuación se exponen las principales causas de corrosión, tales como:

Corrosión ácida

El pH bajo del agua de alimentación puede causar perfectamente el ataque de ácido en las superficies metálicas que se encuentran en el sistema previo a la entrada de la caldera y en la propia caldera. El agua de alimentación también puede volverse ácida por la contaminación del sistema (contaminación a través del condensado o contaminación del agua de enfriamiento de los condensadores).

La corrosión ácida también puede ser causada por operaciones de limpieza química: sobrecalentamiento de la solución de limpieza, exposición excesiva del metal al agente de limpieza o alta concentración de agente de limpieza [11].

En la caldera y el sistema de agua de alimentación, el ataque ácido puede reflejarse en un adelgazamiento general, o puede localizarse en áreas que sufren gran estrés.

Para la detección de la corrosión ácida, además de la inspección visual, se dispone de varias pruebas que se encuentran preparadas para cuando las condiciones ácidas se presenten, de forma que el operador pueda emprender acciones antes de que se produzcan daños serios. Las pruebas más usadas son el análisis del pH y la alcalinidad del agua.

Corrosión por hidrógeno

El agua destilada contiene un número igual de iones hidrógeno e iones hidroxilo, siendo este un estado eléctricamente neutro. Sin embargo, las impurezas en el agua modifican esta proporción de ionización, conduciendo a un exceso de concentración de iones hidrógeno o hidroxilo. Si ocurre un exceso de iones hidroxilo el agua se convierte en ácida y ataca a la superficie metálica que se encuentra en contacto con el agua. Incluso con la ausencia de oxígeno disuelto, esta forma de corrosión puede tener lugar cuando el pH del agua tiene un valor inferior a 6,5 [3]. Este tipo de pérdida de metal en la superficie se representa mediante la figura 1.8:

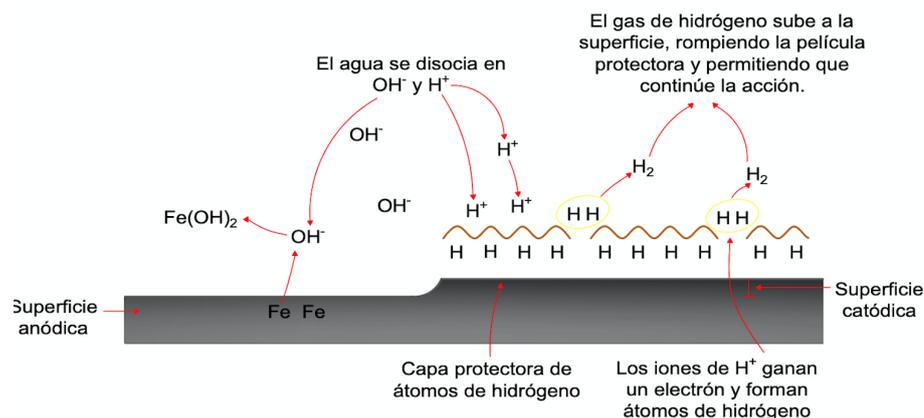


Figura 1.8: Efecto corrosión por hidrógeno

Fuente: Autoría propia

La superficie anódica que se muestra en la figura 1.8 cambia constantemente de posición, por lo tanto, el ataque ocurre en un área amplia que conduce al desperdicio general del metal. Si el oxígeno disuelto está presente en el agua, se combina con los átomos de hidrógeno que se forman en la superficie del metal para formar agua, acelerando así el proceso al eliminar la capa protectora de hidrógeno que cubre el metal.

Corrosión por O₂

Si no se realiza una desaireación mecánica y química apropiada, el O₂ del agua de alimentación entra a la caldera. Mucho se pierde con el vapor, pero el resto puede atacar la caldera metálica. El agua también puede contener amoníaco, que particularmente junto con la presencia de oxígeno ataca al cobre y a sus aleaciones. La corrosión resultante conduce a depósitos en la superficie de transferencia de calor de la caldera y reduce la eficiencia y confiabilidad.

El oxígeno, incluso en pequeñas concentraciones, puede causar duros problemas: se pueden generar depósitos de hierro por el óxido de hierro provocado por la corrosión y dar origen a “pitting” bajo estos depósitos. Producto de la aireación diferencial, como se observa en la figura 1.9, el metal debajo de estos depósitos se convierte en un anódico con respecto al metal expuesto que, al obtener una cantidad de O₂ más cuantioso, se vuelve catódico. Este tipo de ataque es menos común en las calderas de tubos verticales que en las de horizontales, y a menudo se relaciona con tubos de condensadores.

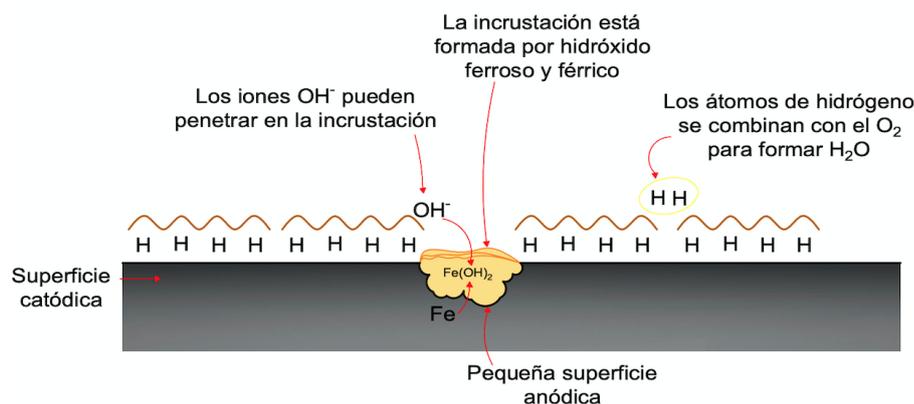


Figura 1.9: Efecto corrosión por oxígeno
Fuente: Autoría propia

El ataque corrosivo producto del oxígeno es un proceso electroquímico que se describe con la siguiente reacción:

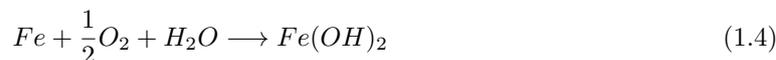
Ánodo:



Cátodo:



En general:

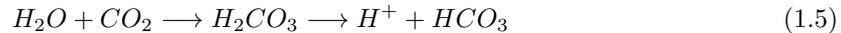


El nivel de oxígeno disuelto aceptable para cualquier sistema depende de muchos factores, tales como la temperatura de agua de alimentación, pH, tasa de flujo, contenido de sólidos disueltos, y las condiciones metalúrgicas y físicas del sistema. En general, el valor límite de oxígeno en el agua de “make-up” puede ser fijada entorno a 0.10 mg/kg [12].

Una vez iniciada, esta forma de ataque no se puede detener hasta que la capa de óxido sobre la picadura se haya retirado mecánicamente con un cepillo de alambre o mediante una limpieza con ácido. La presencia de cloruros, aunque se traten de una sal neutra, a menudo aumentan esta forma de ataque.

Corrosión por CO₂

El dióxido de carbono existe en soluciones acuosas como dióxido de carbono libre y en las formas combinadas de iones de carbonato y bicarbonato. El gas se disolverá en agua, produciendo ácido carbónico corrosivo:



El pH bajo resultante de esta reacción también mejora el efecto corrosivo del oxígeno.

En sistemas de caldera, la corrosión resultante del dióxido de carbono es muy habitual encontrarla en el sistema de condensado. Debido a que la desaireación del agua de alimentación normalmente extrae todo el dióxido de carbono, la presencia de gas en el condensado es típicamente debido a la descomposición de carbonato y bicarbonato bajo las condiciones de caldera. Para una aproximación, se estima que el agua de alimentación con una alcalinidad total de 100 mg/l en forma de carbonato de calcio, puede generar un nivel de dióxido de carbono de 79 mg/l en el vapor (alcalinidad multiplicada por un factor de 0.79) [13].

Corrosión cáustica

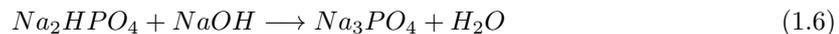
La concentración cáustica es la concentración de sales en la superficie metálica de la caldera producto de una cobertura con vapor o por la “ebullición localizada debajo de depósitos porosos en la superficie del tubo”. Esta corrosión característica ocurre cuando la “cáustica se concentra y disuelve la capa magnetita protectora (Fe₃O₄), causando una pérdida de metal base y una eventual falla” [14]. Para que se produzca este tipo de corrosión se tiene que cumplir que:

- Se produzca alguna falla como una pequeña fuga, permitiendo que el agua de caldera se concentre sobre un metal que pueda tensionarse.

- Aparezca una cantidad apreciable de cáustica y sílice en el agua de caldera.

Cuando se origina un recubrimiento de vapor entre la superficie de la pared del tubo y el agua de caldera se crea una cobertura de vapor que provoca que poca agua líquida alcance a tocar el tubo y absorba el calor que este transfiere. Así pues, esta pequeña cantidad de agua que consigue tocar la superficie del tubo es vaporizada instantáneamente, provocando un depósito de solución cáustica altamente corrosiva.

Con el control combinado de fosfatos y pH, se puede proteger del ataque cáustico a las calderas que usen un “make up” o relleno con agua desmineralizada o procedente de condensados. El fosfato permite combatir los estragos que ocasiona los grandes cambios de pH producto de las altas concentraciones cáusticas. Así, la cáustica se elimina por su combinación con el fosfato a través de la reacción 1.6:



1.4.2.2 Prevención de la corrosión

La prevención se fundamenta en mantener la concentración de hidrógeno dentro de unos límites. Estos límites se cumplen cuando los valores del pH se mantienen debajo de 9,6. Para cumplir estos valores de pH, al agua destilada (con un valor del pH próximo a 7) se ha de añadir dosificaciones de una solución alcalina para elevar su pH.

La desaireación, la dosificación de productos químicos y el uso de un contactor de membrana son los métodos más efectivos para evitar la corrosión mediante la eliminación de gases disueltos.

En el *Volcán de Tamadaba*, la cisterna es el equipo que funciona como desaireador, permitiendo eliminar los gases disueltos utilizando los principios de solubilidad de los gases.

Otro método que se utiliza en este buque es la dosificación de productos químicos que actúan combinándose con el oxígeno y dando como productos de la reacción agua y gas nitrógeno. Sobre este método se profundizará más adelante en el punto referente a tratamientos con productos químicos. Los contactores de membranas están fabricados con “membranas hidrológicas microporosas”. Estas son empleadas para colocar en contacto directo a un gas con un líquido sin que lleguen a combinarse. Los contactores trabajan disminuyendo la presión del gas para conseguir eliminar los gases disueltos en el agua creando una “fuerza de conducción” [15].

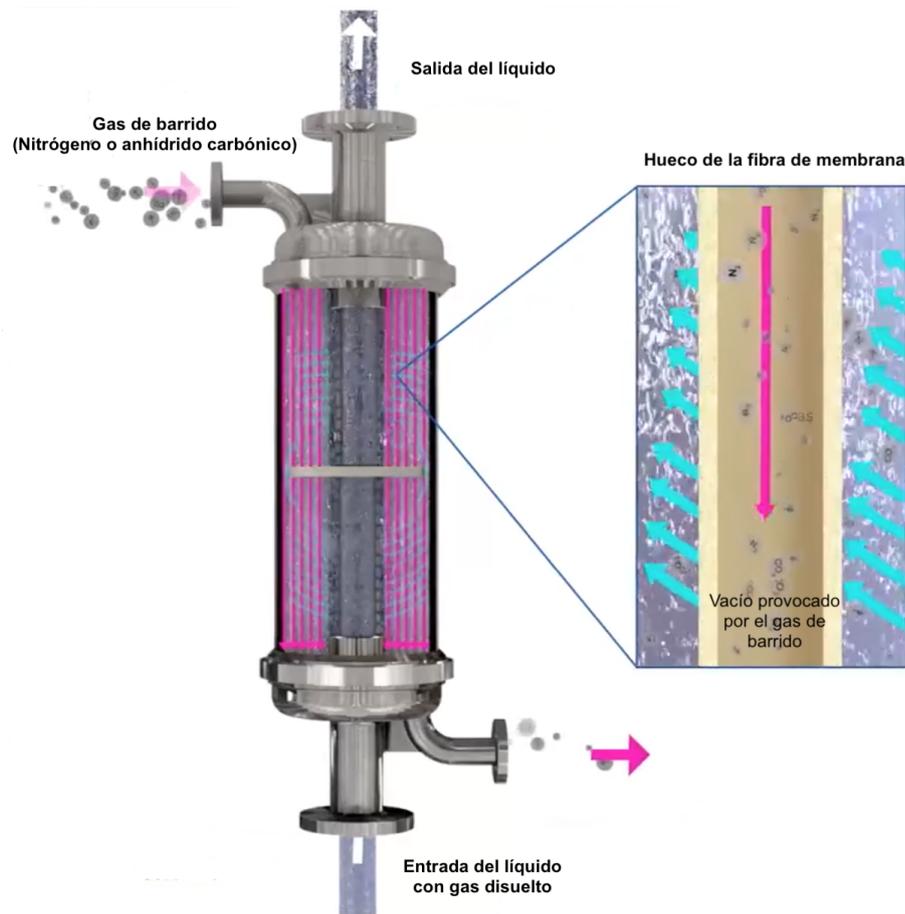


Figura 1.10: Funcionamiento de un contactor de membrana

Fuente: [15]

El líquido, saturado del gas fluye radialmente sobre el exterior (lado de la cubierta) de las fibras huecas de la membrana.

La aplicación de vacío y gas de barrido en el interior de la membrana de fibra hueca, en un sentido a contracorriente del flujo, compensa el equilibrio entre la fase líquida y la fase gaseosa.

En comparación con los desaireadores, los contactores de membrana son sistemas cerrados, lo que permite evitar la amenaza de que penetren contaminantes del ambiente.

1.4.2.3 Corrosión y tratamiento del condensado

La utilización del retorno de condensado es un método de ahorro energético, sin embargo tiene sus inconvenientes. El sistema de retorno de condensado puede arrastrar partículas corrosivas de las tuberías de la parte de vapor y del condensado, provocando la aparición de sedimentos aislantes en las superficies de los tubos de la caldera. De nuevo los compuestos más perjudiciales son el O_2 y el CO_2 , pudiendo aparecer elementos más específicos como el Fe y el Cu.

El sistema de retorno de condensado ha de tener instalado un punto para el muestreo y análisis de la calidad del agua para comprobar si el tratamiento está siendo efectivo.

En los sistemas de retorno de condensado se ha de tener especial cuidado con la presencia de CO_2 pues puede reaccionar dando ácido carbónico, que ataca al acero de la caldera. Este CO_2 en la mayoría de los casos proviene de los carbonatos y bicarbonatos que se encuentran en el agua de alimentación.

1.4.2.4 Control de la corrosión

Los especialistas en el control de calidad de agua sugieren controlar los siguientes parámetros:

pH

Refleja la acidez relativa del agua. El método de medida es con un phmetro. Su escala es de 0 a 14, considerándose un pH 7 como neutro.

Una solución con un pH inferior a 7 tendrá una tendencia a formar corrosión. Con un pH de 4,2 se llega a tal concentración de iones hidrógeno que se provoca un estado de “acidez mineral libre”, permitiendo solubilizar fácilmente todo el hierro del equipo.

Óxido disuelto

El análisis de este parámetro se realiza con un test DEHA del kit de análisis, siendo la unidad de medida las ppm de O₂.

A temperatura ambiente, el oxígeno no contribuye significativamente a la corrosividad del agua. Sin embargo, a altas temperaturas, como en un sistema de generación de vapor, el oxígeno sí es altamente corrosivo.

En el agua de alimentación de una caldera, para contener en unos márgenes la presencia de gases no condensables se ha de emplear métodos de desgasificación. Este procedimiento puede fundamentarse en métodos térmicos, químicos o una combinación de ambos. Este apartado se centra exclusivamente en los métodos térmicos.

Los principios fundamentales en los que se sustenta la desgasificación mediante aportación térmica son: la Ley de Henry, la Ley de Dalton y el concepto de solubilidad.

- Ley de Henry: En un líquido que tiene una temperatura constante, la concentración de gas disuelto es proporcional a la presión parcial del gas en la atmósfera, en proporción con la concentración.

$$p_x = k_H c \quad (1.7)$$

Donde:

- p_x es la presión parcial del gas [atm].
- k_H es la constante de Henry, que depende de la naturaleza del gas, la temperatura y el líquido [atm/(mol soluto/mol solución)].
- c es la concentración del gas [mol soluto/mol solución].

- Ley de Dalton: En una mezcla de gases, la presión total es la suma de las presiones parciales de los gases que componen la mezcla.

$$P_{Total} = p_1 + p_2 + \dots + p_n \quad (1.8)$$

- Solubilidad: La temperatura desempeña un influjo importante en la solubilidad de la mayoría de los gases, disminuyendo al aumentar la temperatura:

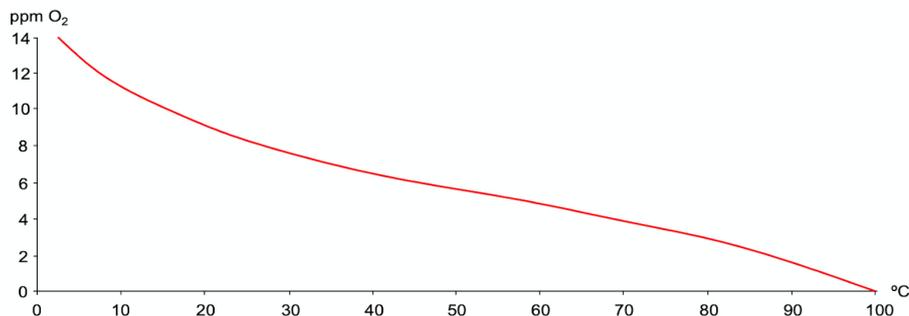


Figura 1.11: Solubilidad O₂ en agua

Fuente: Autoría propia

La figura 1.11 muestra la evolución del O₂ disuelto en el agua en función del aumento de la temperatura. Se observa que el oxígeno disuelto en el agua disminuye con el incremento de temperatura.

Otros gases que tienen un comportamiento muy parecido son el N_2 y el CO_2 . La solubilidad de un gas en un líquido puede ser nula cuando se alcanza la temperatura de saturación del gas. Sin embargo, para una correcta desgasificación completa, se debe de aportar una agitación.

Asimismo, para no someter los tubos de la caldera a un colapso térmico, el agua de alimentación ha de impulsarse al interior de la caldera entre unos 40 y 60 °C. Esto evitará que el gradiente térmico que se producirá entre la temperatura del agua y la superficie en contacto con el agua de aportación sea el menor posible y se eviten fallos mecánicos.



Figura 1.12: Tubos de humos

Fuente: Autoría propia

Conductividad y STD

La conductividad se trata de una medida de capacidad para transportar una corriente eléctrica. El método de análisis de la conductividad es mediante un conductímetro, cuyo límite para estas calderas es de 2500 umhos/cm.

Cuanto mayor es el contenido de minerales del agua, mayor será su conductividad, por lo tanto, más libremente prodrá fluir la corriente eléctrica a través del agua y más rápida es la velocidad de corrosión si las demás condiciones la favorecen.

La conductividad se utiliza como un método de control de purga ya que da una idea aproximada de la totalidad de los sólidos disueltos.

1.4.3 Formación de espumas

Se trata de las burbujas o la espuma que se acumulan en la superficie del agua de la caldera y sale con el vapor. Esto es llamado espumación, y es causado por altas concentraciones de cualquier sólido en el agua de la caldera. No obstante, se cree que sustancias químicas como álcalis, aceites, grasas, ciertos tipos de materia orgánica y sólidos suspendidos favorecen particularmente la formación de espuma. En teoría, los sólidos suspendidos se acumulan en la capa superficial rodeando la burbuja de vapor y haciéndola más resistente. Por lo tanto, la burbuja de vapor resiste al rompimiento y crea la espuma. Se considera que cuanto más finas sean las partículas suspendidas, mayor será su colección en la burbuja.

El cebado o “priming” es el arrastre de cantidades variables de gotas de agua en el vapor (espuma y niebla), lo que reduce la eficiencia energética del vapor y conduce al depósito de cristales de sal en los super calentadores y en las turbinas.

El cebado puede ser causado por una construcción incorrecta de la caldera, clasificaciones excesivas o fluctuaciones repentinas en la demanda de vapor. Algunas veces el cebado es agravado por impurezas presentes en el agua de caldera. Siempre ocurre algún arrastre mecánico de gotas diminutas del agua de la caldera en el vapor.

El cebado es una causa común de altos niveles de arrastre de agua de caldera. El cebado está muy relacionado con la viscosidad del agua y su tendencia a la formación de la espuma. Estas propiedades son gobernadas por la alcalinidad, la presencia de ciertas sustancias orgánicas y por la salinidad

total o TDS. El grado de cebado también depende del diseño de la caldera y su tasa de vaporización. La medida más común para prevenir la espumación y el cebado es mantener la concentración de sólidos en el agua de caldera a niveles razonablemente bajos. Evitar niveles altos de agua, cargas excesivas en la caldera y cambios de carga repentinos también ayuda. Muy a menudo el condensado contaminado regresa al sistema de la caldera causando problemas de arrastre. En estos casos, el uso del condensado debería anularse temporalmente hasta que la fuente del contaminante sea encontrada y eliminada.

El uso de agentes químicos antiespuma y anticebado, mezclas de agentes superficiales activos que modifican la tensión superficial de un líquido, remueven la espuma y previenen el arrastre de partículas finas de agua en el vapor son muy efectivos en la lucha contra el arrastre producto de las altas concentraciones de impurezas en el agua de caldera [16].

1.4.4 Fragilización cáustica

La fragilización o agrietamiento se desarrolla en el acero de las calderas debido a la combinación de la corrosión con esfuerzos mecánicos, y más concretamente al resultado de esfuerzos mecánicos en los que la sosa está presente en concentraciones altas. Es muy probable que se dé fragilización cuando se encuentra sosa cáustica en huecos estrechos cercanos a las zonas más tensionadas.

La fragilización cáustica se caracteriza por ser un agrietamiento intercrystalino que sucede en el área seca de las uniones que se encuentran bajo el nivel del agua. Aparece también por causa de las fugas del agua de la caldera que se dan en las costuras o grietas, y que aumentan la concentración de sosa cáustica en la periferia. Las condiciones conjuntas que se han de prestar para que se inicie un problema como este son:

- Deben estar presente hidróxidos para que se produzca este agrietamiento intercrystalino. Un síntoma de que esté ocurriendo este problema es la aparición de óxido de hierro negro o sulfuro en las zonas perjudicadas.
- El acero tiene que sufrir un esfuerzo mecánico en la zona donde se están concentrando los hidróxidos.

1.4.4.1 Efectos de la fragilización cáustica

Las zonas más afectadas son las juntas remachadas, las soldaduras realizadas en los tubos, orificios diversos y cualquier hendidura por la que se pueda fugar el agua de la caldera.

Cuando se inicia la fragilización no hay forma de detenerla, por lo que se suele optar por cambiar las tuberías u otros repuestos. Si ya está muy avanzado el proceso, se ha de estudiar si es más conveniente a nivel económico sustituir toda la unidad. La mejora en los métodos de construcción de los orificios de los tubos y el perfeccionamiento de la elaboración de los propios tubos han permitido esquivar cada vez más esta falla.

1.4.4.2 Prevención de la fragilización cáustica

Algunos de los métodos para el control de la fragilización utilizados en un gran abanico de tipos de calderas son:

- Conservar una correlación en las concentraciones de ciertas sustancias dentro del agua de la caldera.
- Uso de un método de tratamiento químico en el agua de caldera que no provoque la creación de hidróxido libre en esta.
- Mantener una presencia de Na_2SO_4 , fosfatos y acetatos en el agua de la caldera, ayuda a relantizar el poder fragilizante del NaOH. Esto permite disminuir el agrietamiento de las calderas que tengan juntas remachadas.

1.4.4.3 Control de la fragilización cáustica

Los especialistas en el control de calidad de agua sugieren controlar los siguientes parámetros:

- Alcalinidad: El método de análisis es mediante el kit Spectrapak 311. Muestra la concentración de carbonatos, bicarbonatos y/o hidróxidos, expresados como carbonato de calcio.
- Arrastre de sólidos: El arrastre (priming) hace referencia al empuje de grandes cantidades de líquido

a través del domo de la caldera. Se puede dar por una repentina necesidad de aumento de demanda o por las continuas oscilaciones en el nivel del agua. Menos común, pero si cabe más peligroso, puede ser debido a una ebullición excesivamente rápida.

Tras la entrada de este líquido, la temperatura del vapor que lo acompaña desciende súbitamente, pudiendo provocar un golpe de ariete en las tuberías a la salida de la caldera.

1.5 Métodos de control del agua de caldera

Los métodos utilizados para obtener una calidad óptima del agua de caldera son: las extracciones y el tratamiento con productos químicos.

1.5.1 Extracción o purga

La extracción o purga consiste en extraer una fracción del agua de la caldera de los colectores -de vapor de agua- y reemplazarla por agua de alimentación pretratada, que tiene menor contenido en sólidos disueltos, sales, etc. Su objetivo es disminuir la concentración de sustancias no deseables, manteniendo un nivel tolerable de sólidos disueltos y productos insolubles. Esto permite producir un vapor puro y proteger la instalación.

Si se produce una contaminación del agua de alimentación, es necesario corregir sus causas e incrementar el caudal de agua de purga, para evitar la acumulación de altas concentraciones de sólidos en suspensión y la formación de incrustaciones de lodos, así como para mantener los residuos químicos adecuados en la caldera.

La extracción es una de las operaciones inherentes a la utilización de cualquier caldera de vapor, de baja o alta presión. No obstante, siendo una de las más importantes, a menudo se hace con poco cuidado o irracionalmente. Esto se debe a que, en ocasiones, los responsables de la operación de calderas tienen una idea equivocada del objetivo de la purga y de las consecuencias que derivan de su incorrecta ejecución: pérdidas térmicas, pérdida de productos del tratamiento químico, aumento de incrustaciones, producción de espumas y arrastres.

También se realizan purgas de determinados elementos auxiliares -columnas de nivel, regulador de nivel, etc-. En este caso la finalidad que se persigue es asegurar un correcto funcionamiento del elemento evitando la formación de depósitos.

Sobre el contenido máximo admisible de sales en las calderas existen reglamentaciones, tanto para instalaciones terrestres, como marinas. En el agua de la caldera se concentran impurezas del agua de alimentación, de los productos químicos del tratamiento, de los productos de reacción y de compuestos de hierro y cobre producidos por reacciones de oxidación.

Existen dentro de las extracciones dos tipos dependiendo de la disposición y función de las válvulas de purga:

- Extracción de fondo: El objetivo de esta es la expulsión de los sedimentos y fangos depositados en su interior. Van ubicadas en las partes más bajas de la caldera. También se usan para vaciar las calderas. Estas válvulas se deben abrir totalmente y dejar libre toda la sección de la cañería de descarga. Mediante muchas extracciones cortas se elimina con mejor eficacia los sedimentos que con una sola de mucha duración.



Figura 1.13: Válvulas de extracción
Fuente: Autoría propia

- Extracción de superficie: Se realiza para clarificar el agua, controlar la alcalinidad de esta y disminuir los excesos de cloruros en el agua.

Por otro lado, las extracciones pueden realizarse de forma manual o automática. La diferencia fundamental entre estos dos tipos es la frecuencia en la que el operario tiene que realizar análisis del agua de la caldera para comprobar sus características: de forma manual lo recomendado es diariamente, mientras que de forma automática el operario deberá realizarlo cuando quiera comprobar que el sistema trabaja correctamente. En función de los resultados de los análisis y los problemas que se quieren combatir, la extracción puede realizarla tanto de fondo como de superficie.

La purga manual de superficie se realiza para controlar la concentración de sólidos disueltos que aún no se han decantado, dando lugar a lodos. También se debe de realizar si el operario observa que aumenta perjudicialmente el nivel de espuma en la caldera. La purga manual de fondo se realiza para la eliminación de los lodos formados en el fondo y en los casos en que la cantidad de sólidos disueltos es tan grande que se precisa un gran caudal de purga. También es recomendable para evitar la acumulación de incrustaciones en el fondo, producto de las contracciones y dilataciones que sufre la caldera o por el efecto de los antiincrustantes y dispersantes, que hacen que estas escamas se acumulen en el fondo.

La extracción manual de fondo debe de realizarse con la válvula totalmente abierta durante 3 segundos como máximo. La de superficie debe de ser con la válvula apenas abierta, pero en periodos de tiempo más prolongados.

La extracción automática se fundamenta en un sistema de control mediante sondas. Estas se encargan de medir la conductividad, enviando la señal a un autómata que se ocupa de comparar la conductividad en ese preciso momento con un valor de consigna prefijado, enviando posteriormente una señal a las válvulas de extracción.

El control automático de las extracciones permite optimizar las tasas de extracción tanto de fondo como de superficie, aportando una mejor eficiencia energética. Los ahorros se obtienen de minimizar los volúmenes de agua de extracción, la dosificación de productos químicos, el consumo de combustible y el precalentamiento del agua de alimentación.

Las extracciones de fondo y de superficie en el buque *Volcán de Tamadaba* se llevan a cabo de la siguiente manera:

- Se abre y despega cierto ángulo la válvula de purga, permitiendo que se caliente la tubería. Esto no durará más de cinco segundos, después de los cuales se cierra la válvula.
- Se abre en banda la válvula de superficie durante 2 minutos y se cierra por completo. La de fondo se abrirá únicamente 1 minuto.

1.5.2 Tratamiento con productos químicos

El tratamiento interno del agua de caldera es una medida que precisa de un control permanente de cada indicador mediante los análisis químicos. Los análisis se realizan para verificar la calidad del agua de alimentación, pero esta calidad de agua está influenciada por las condiciones en las que entra el retorno de condensado y la eficiencia del pretratamiento que se le realiza al agua destilada de reposición. Los objetivos principales de este tratamiento del agua es impedir la formación de corrosiones e incrustaciones.

Algunos de los procedimientos para tener una mayor eficiencia con el tratamiento químico son: la realización de un estudio acerca de los productos químicos más adecuados para dosificar dependiendo de los parámetros que están teniendo un comportamiento atípico en el agua de la caldera o la combinación entre la dosificación de productos químicos y las extracciones de fondo y de superficie [18].

Con la comparación de los análisis del agua previos a realizar el tratamiento y los análisis posteriores se puede ir comprobando si las acciones que se están realizando están siendo efectivas o no se está cumpliendo el propósito de ellas. El tratamiento del agua de alimentación a bordo del buque se puede dividir en las siguientes fases:

Desgasificación térmica

Para eliminar oxígeno y anhídrido carbónico disuelto en agua. El objetivo de esto es reducir la corrosión en las calderas, las tuberías de vapor y condensado y los dispositivos relacionados. El equipo que se encarga de la desgasificación térmica en este buque es el tanque de observación de purgas.

Tratamiento químico del agua

Este se puede dividir en:

- Alimentación con fosfato principalmente para disminuir la dureza residual.
 - Alimentación con álcali para elevar el valor de pH para reducir la corrosión.
 - Alimentación con hidracina o sulfito de sodio para eliminar el oxígeno residual y reducir la corrosión.
- Los valores de los análisis del agua de alimentación y del interior de la caldera recomendados por el fabricante son:

Agua alimentación	
pH	8,5-9
Oxígeno, ppm	<0,05
Dureza, °dH	<0,1
Aceite, ppm	<2
Hierro y cobre, ppm	<0,1
Salinidad, ppm	<100
Agua caldera	
pH	9-11,5
p-alcalinidad, ppm	<200
Salinidad, ppm	<1000
TDS, °Be	<0,35
Fosfato, ppm	20-40
Hidracina, ppm	0,1-0,3
Conductividad, $\mu\text{S}/\text{cm}$	<5000

Tabla 1.2: Valores de los parámetros recomendados por el fabricante.

Fuente: [2]

En cuanto a la medida de sólidos disueltos del agua en grados Beaumé, 1°Be corresponde a un contenido de sólidos disueltos de NaCl de 10.000 ppm.

1.5.2.1 Dosificación de fosfatos

Los fosfatos que normalmente se utilizan en agua de calderas son: el monosódico, disódico y el trisódico [2]. Se utilizan fosfatos solubles para poder precipitar el calcio, por medio de una reacción química, como ocurre con el fosfato tricálcico. Este compuesto formado es poco soluble y evita que se generen incrustaciones de sulfatos, carbonatos y/o silicatos de calcio.

Manteniendo un control riguroso de la alcalinidad, se va a formar un precipitado de fosfato básico de calcio. Este precipitado tiene una menor tendencia a solidificar y una baja adherencia a los materiales, que se manifiesta al formar un lodo que fluye con mayor facilidad que en el caso del fosfato de calcio. Al mismo tiempo se presenta una reacción química del magnesio que forma un precipitado como hidróxido de magnesio y como silicato de magnesio.

Este programa químico facilita las condiciones químicas ideales para la precipitación del calcio como hidróxiapatito de calcio y el magnesio como serpentina.

Para que los lodos formados aumenten su fluidez es necesario utilizar compuestos orgánicos que faciliten su extracción por medio de purgas.

Un tipo de reacción química que se debe evitar es la formación del fosfato de magnesio, porque es soluble en el agua. Además, a causa de esta solubilidad, tiene una mayor tendencia a formar depósitos adherentes fuertes. La formación del fosfato de magnesio se debe a los elevados valores residuales de fosfatos, baja concentración de sílice en el agua de la caldera y bajo contenido de alcalinidad de hidróxido.

La cantidad de dosificación depende del volumen de purgado realizado con anterioridad y es directamente proporcional al mismo. El objetivo es mantener el contenido de P_2O_5 en el agua de la caldera entre 20 y 40 mg/l.

Si el volumen del purgado de salida es de aproximadamente un 5 %, la cantidad de fosfato que se agrega al agua de alimentación es de 5 a 10 g/m³. El fosfato trisódico contiene aproximadamente un 19 % de P_2O_5 .

Las tres ventajas más importantes que se pueden destacar en este tratamiento químico del agua con fosfato para calderas son:

- Bajo precio, el costo de inversión en el tratamiento con fosfatos es bajo.
- La aplicación de fosfatos en el agua de alimentación es fácil, se pueden utilizar bombas dosificadoras que faciliten la dosificación continua.
- El análisis del tratamiento es sencillo, debido a que se realiza mediante análisis por titulación. Es recomendable apoyarse en un especialista en tratamiento de aguas para mantener el control de los parámetros.

Conforme la experiencia ha marcado, se detallan algunas desventajas que se presentan en el tratamiento de agua de calderas utilizando fosfatos:

- La generación de lodos en el sistema interno de la caldera es grande, a este tratamiento químico se le conoce como un tratamiento «sucio».
- Altas purgas y control exigente. Del punto anterior se puede concluir que otra desventaja es la tasa alta de purgas y el control riguroso de estas.
- Si no existe un control adecuado de la alcalinidad producto del hidróxido, se genera espuma y con esto el problema por arrastre.
- Debido a que la tasa de purgas es alta, el consumo de combustible va ser elevado. Esto hace que se necesite una mayor cantidad de energía constante para estabilizar la temperatura interna.
- Al existir una sobredosificación se puede iniciar la formación de un depósito aislante y adherente de fosfato de magnesio.
- Si la dosificación es menor, aumenta la formación de sólidos, así como el contenido de sílice en el agua y líneas de vapor.

1.5.2.2 Dosificación de álcali (NaOH)

La dosificación de álcali pretende elevar el valor del pH del agua y evitar la corrosión. Si el volumen de extracción es del 5 % de la cantidad de agua de la caldera, se puede comenzar la dosificación de álcali con una cantidad de 20 g/m³. Si el volumen de expulsión es menor, la dosificación también es correspondientemente menor. La tabla con los valores recomendados de análisis muestra el pH que debe lograrse, también el valor de la p-alcalinidad: menor de 15 ppm.

Un resultado de un pH demasiado alto y un gran consumo de permanganato de potasio (KMnO₄ = medición de humus de agua) puede ser demasiado efervescente y el agua estalla con vapor. Esto se puede observar a través de la salinidad del condensado.

El exceso de alcalinidad de hidróxido puede aumentar la tendencia a formar espuma y esto provoca el arrastre de líquido en el vapor, produciendo vapor de baja calidad, formación de sólidos en la interfase líquido-vapor y formación de depósitos insolubles.

1.5.2.3 Dosificación de hidracina, N₂H₄

La hidracina es el tipo de amina que más se usa en el tratamiento de calderas. El objetivo de esta dosificación es que haya un ligero exceso de hidracina en el agua de la caldera, manteniéndose una concentración entre 0,1 y 0,3 mg/l.

La hidracina es un potente reductor que se transforma junto con el oxígeno libre disuelto en nitrógeno y agua. Teóricamente, 1 g de hidracina se une a 1 g de oxígeno, pero en la práctica, se recomienda al menos un valor triplicado. La hidracina se disuelve como amoníaco y nitrógeno, si no hay oxígeno en el agua. El amoníaco se pierde con el vapor y aumenta el valor de pH del condensado, valor que permite la protección ante la corrosión de las tuberías de condensado.

La necesidad de hidracina es directamente proporcional al contenido de oxígeno del agua. La estimación es que la hidracina contiene un 24 % de N₂H₄ y la dosis es de un 300 % de la necesidad teórica. Cuando se utiliza hidracina con un contenido de N₂H₄ activo superior al 24 %, la dosificación se reducirá en consecuencia.

Cuando la temperatura del agua de alimentación es de 80°C, la dosis es de 30 g de hidracina por cada tonelada de agua de alimentación y con diferentes temperaturas.

1.5.2.4 Dosificación de polímeros

El tratamiento químico que se basa en el uso de polímeros tiene la función de conservar en solubilidad, la dureza de Ca y Mg y diseminar el resto de sales, en concreto las de Fe, para evitar que se depositen en la caldera. De esta manera se forman compuestos solubles con las sales de calcio y magnesio y el resto de sólidos suspendidos, que acaban por decantar y eliminarse mediante las extracciones de fondo. Además, este tratamiento tiene propiedades antiespumantes que impiden la formación de arrastre de partículas junto al vapor.

Mediante este tratamiento se refuerza la película de magnetita dado que los polímeros evitan la adherencia de los óxidos de hierro a esta película de protección.

Si se realiza una comparación entre el uso de los polímeros y el de fosfatos, las mayores ventajas que se encuentran con el uso del primero son [21]:

- La cantidad de extracciones es baja.
- El rendimiento energético de la caldera es mayor y su servicio sin sufrir interrupciones es mayor.
- Las paradas por mantenimientos resultan menos perjudiciales puesto que se reduce la necesidad de limpiezas químicas.
- Con la formación de la película de protección a través del uso de los polímeros, se observa una disminución del efecto de la corrosión.
- Aunque se produzca una sobredosificación de polímeros no hay una respuesta negativa como la corrosión.

El único inconveniente del uso de polímeros en comparación con los fosfatos es que a nivel económico son más caros.

1.6 Mantenimiento de la caldera

Con vistas al presente proyecto se incluyen dentro del mantenimiento de la caldera las acciones necesarias para conservar y permitir el correcto funcionamiento de los sistemas y equipos que conforman el servicio de producción de vapor.

En este apartado se presenta todo lo relacionado con el control del agua de la caldera, los tipos de mantenimiento periódicos que se realizarán, la limpieza y almacenamiento de la caldera.

1.6.1 Periodos de mantenimiento

El mantenimiento de la caldera en el *Volcán de Tamadaba* se ve estructurado según el manual proporcionado por la empresa Aalborg [2], fabricante del modelo de la caldera. Así, los periodos marcados por el fabricantes son:

Semanalmente	<p>Testar automatismos y luces sinópticas</p> <p>Verificar juntas de las bombas</p> <p>Limpiar los electrodos del salinómetro</p>
Mantenimiento periódico dependiendo del tiempo funcionamiento	<p>Revisar cableado y comprobar si todas las conexiones están en bueno estado</p> <p>Revisar todas las juntas y fugas</p> <p>Inspeccionar cableado y componentes del cuadro eléctrico</p> <p>Abrir y cerrar válvulas que casi siempre están en la misma posición</p> <p>Limpiar filtros, electrodos, fotocélula y quemador</p>
Cada 6 meses	<p>Testar válvulas de seguridad</p> <p>Testar alarmas de nivel</p> <p>Testar automatismo del agua de alimentación</p> <p>Verificar parada y arranque de presión de vapor</p> <p>Testar seguridades del quemador (fotocélula, filtros diesel, etc)</p> <p>Limpiar y testar funcionamiento de detector de aceite en agua</p>
Cada año	<p>Limpieza de cámaras de agua y gases</p> <p>Inspección de cámara de agua</p> <p>Verificar cristales del nivel de agua, motores, bombas y respectivas seguridades</p> <p>Verificar y apretar conexiones mecánicas y eléctricas del local y panel de control</p> <p>Renovación del electrodo al año o dos años</p>

Tabla 1.3: Periodos mantenimiento

Observando la tabla 1.3 se pueden diferenciar unos mantenimientos ordinarios que implican las tareas habituales de inspección y revisión y, por otro lado, los mantenimientos extraordinarios que se producen por una parada programada anualmente para una limpieza estructural.



Figura 1.14: Mantenimiento en la zona del quemador

Fuente: Autoría propia

1.6.2 Almacenamiento de la caldera

Toda caldera cuyo servicio no se precise durante un período de tiempo lo suficientemente largo para que la exponga al peligro de sufrir corrosiones internas y externas, deberá acondicionarse debidamente para que durante esta fase de inactividad quede preservada de la oxidación. Cuando la caldera tenga que estar fuera de servicio durante varios meses y no esté expuesta a que se recurra a ella al menor aviso, el “Procedimiento seco” de conservación es el más adecuado. En cambio, en aquellos casos en que la caldera vaya a permanecer inactiva únicamente durante unas semanas y sujeta a entrar en servicio en cualquiera momento, el “Procedimiento húmedo” es el que se aconseja practicar, puesto que la caldera puede quedar dispuesta en seguida para su encendido con sólo dejar correr parte del agua que necesita para elevar el nivel de los indicadores.

Cualquiera que sea el procedimiento que se adopte, la consecución de los resultados pretendidos depende en gran parte de la eliminación absoluta de los sedimentos internos y materiales depositados, capaces de iniciar la corrosión [2].

Procedimiento seco

Cuando se adopte esta opción se tendrá especial cuidado en extraer el agua que se haya quedado depositada en bolsas dentro del interior de la caldera. De que las tuviese, al limpiar la caldera por dentro, se aconseja el empleo de un chorro de aire a presión. Posteriormente, la caldera puede secarse por completo con braseros de cok o por medio de una corriente de aire caliente procedente de un soplador portátil, o bien por ambos métodos dirigidos a los cabezales de los tubos.

Una vez secos los elementos internos, se colocarán bandejas de cal viva, en la proporción de 1 kg por cada 10 m³ de superficie de calefacción, en los cabezales y tambor para que quede absorbida la humedad contenida en el aire encerrado en la caldera. Después de haber dejado colocadas de nuevo las puertas de registro de hombre y las de los registros de mano, deberán cerrarse todas las válvulas y los grifos, teniendo precaución de evitar por todos los medios que entre agua, vapor o aire en la caldera.

Una vez terminada la limpieza exterior, se introducirán asimismo bandejas de cal viva en el hogar y conducto de gases, de notarse la presencia de humedad. Los accesos de fábrica y conductos deberán cerrarse por completo, así como los corta tiros, que lo serán herméticamente. En intervalos de tres meses se harán visitas de inspección, rellenando los recipientes de cal a medida que sea necesario. Se tendrá muy presente la retirada todos los recipientes de cal colocados dentro o fuera de la caldera antes de llenarla de agua y el posterior encendido.

Procedimiento húmedo

Si se da el caso de que la caldera esté fuera de servicio sólo durante unos días, debe de mantenerse caliente a la presión de trabajo. Se ha de evitar que la caldera se enfríe o que sufra un vacío parcial de agua.

Si la caldera va a estar fuera de servicio más de unos pocos días, es mejor optar por llevar a cabo el procedimiento húmedo en su totalidad. Al optar por el procedimiento húmedo, deberá limpiarse la caldera tanto por dentro como por fuera, llenándola después con agua de alimentación a través de la cisterna hasta alcanzar el nivel de trabajo. Los reactivos químicos necesarios para dar al agua la alcalinidad exigida, deberán introducirse con el agua de alimentación sin interrupción alguna con el fin de evitar oscilaciones en la concentración, que de otra forma podrían producirse.

El agua introducida en la caldera deberá tener una alcalinidad cáustica (p-alcalinidad) de hasta 850 ppm cuando se trate de calderas de baja presión. Deberá añadirse sulfito de sodio (Oxygen Control) en todos los casos para conseguir una concentración de 30 ppm, que absorba el oxígeno que pueda contener el agua una vez hechos todos los preparativos.

Deberá mantenerse una producción de vapor a poca presión durante varias horas, con el fin de estabilizar las condiciones del agua y eliminar el oxígeno, apagándola cuando se alcance el nivel alto de agua. Inmediatamente antes de que baje la presión, deberá añadirse agua de alimentación desgasificada hasta llenar por completo el tambor y que salga el agua por todos los grifos de aire. Se cerrarán estos a continuación haciendo subir la presión, que se mantendrá por la presión estática de un depósito elevado o por medio de una bomba.

Terminadas todas estas operaciones, se colocarán bandejas de cal viva en el hogar y pasos de gases antes de cerrar la caldera para protegerla contra la humedad. Se hará una última comprobación de la caldera, cerrando todas las puertas y cortatiros.

El periodo de inactividad puede prolongarse al disponer de medios para hacer circular el agua por la caldera, así como para recoger muestras que reflejan su estado con objeto de comprobar su alcalinidad y su contenido de sulfitos. Esto significa el empleo de una bomba de circulación pequeña,

dispuesta de forma que pueda tomar agua de todas las válvulas de desagüe y purga para descargarla de nuevo en el economizador por su entrada. De otra forma, el periodo de parada deberá limitarse a un mes sobre poco más o menos, al cabo del cual se procederá a encender de nuevo la caldera haciéndola funcionar a baja presión para que circule el agua y puedan tomarse muestras por si fuera necesario rectificar las operaciones químicas.

1.6.3 Limpieza de la caldera

1.6.3.1 Limpieza por ebullición del agua de caldera

Las ocasiones en las que se realizará la limpieza por ebullición de la caldera serán [2] :

- Antes de la puesta en funcionamiento inicial.
- En caso de fuerte corrosión.
- En caso de presencia de aceite o incrustación en el lado del agua.

La limpieza por ebullición se basa en utilizar una ligera sobrepresión en la caldera, sin el objeto de la extracción de vapor.

En la limpieza por ebullición, la cantidad de agente de composición aumenta muchas veces. La dosis normativa es de 4-5 kg de fosfato trisódico (Na_3PO_4) y 0,5 kg de sosa cáustica (NaOH) por cada 1000 kg de agua. La ebullición se realiza con una sobrepresión (entre 3,5 bar y presión de trabajo) durante un mínimo de 24 horas. Generalmente la presión y temperatura elevada del agua aumenta el efecto de ebullición. Durante la ebullición, la caldera se extracciona por lo menos cada 8 horas para eliminar el lodo del fondo de la caldera.

Después de esto, la presión de la caldera se reduce a aproximadamente 1 bar, el fondo se vacía y se enjuaga. Si todavía existe la incrustación, se ha de repetir el procedimiento.

1.6.3.2 Limpieza de caldera por tratamiento químico

El objetivo de este método es eliminar los depósitos y prevenir la adherencia de los sólidos que se puedan formar, evitando que se creen capas aislantes de la transferencia de calor.

Este tipo de método de limpieza de caldera se considera como un mantenimiento correctivo. Es de enorme importancia evitar llegar a este punto, por eso es necesario llevar a cabo correctamente los métodos de prevención anteriormente mencionados.

Para comenzar a realizar esta limpieza se empieza con la construcción de una línea de circulación separada para el tratamiento provisto con un tanque para la solución de tratamiento. Los productos químicos citados a continuación son los que recomienda el fabricante de la caldera para la limpieza y pertenecen todos a la empresa Wilhelmsen S.S. [23].

Se han de instalar bridas con conexiones de manguera y válvulas en los puntos más altos y más bajos. Las válvulas de cierre de pasos de agua, manómetros, presostatos, etc, se cerrarán. Es de vital importancia que exista una buena ventilación en la Sala de Máquinas [2].

Una vez preparada la línea de circulación, los pasos a seguir son:

- Se llena la caldera hasta la mitad de su capacidad con agua dulce.
- Se agrega el producto químico correspondiente. En este caso se usa Descaling Liquid. La dosificación de este producto es entre un 10% y un 30% de la cantidad de agua agregada inicialmente. Si se desea un abrillantado de los tubos, se dosifica un 5% de Metal Brite HD.

La concentración es la correcta si el pH es inferior a 4 en todo momento. Si aparece un pH más alto, se ha de agregar más producto hasta una concentración máxima del 30%.

- Se llena la caldera con agua fresca por encima del nivel normal del agua y se calienta hasta un máximo de 45 °C (no más para evitar la destrucción de los inhibidores de corrosión) y se mantiene esta temperatura durante 8-12 horas, aplicándose inyecciones de aire regulares para crear una buena circulación.

- Se drena la caldera hasta debajo de la apertura principal, se abre la caldera y se lava la parte superior con agua fresca para su inspección. Si la caldera no está limpia, se debe agregar una dosis adicional de Descaling Liquid al 5% y el nivel del agua debe aumentarse nuevamente. La circulación y el calentamiento deben reiniciarse durante varias horas hasta que se alcance un buen resultado.

- Después de drenar la solución de limpieza, se debe realizar una circulación con una solución de Alkalinity Control al 0,5% durante 2 horas, para neutralizar los ácidos (el pH debe ser mayor de 8,5).

- Se drena el circuito y se enjuaga con un chorro de alta presión.
- Finalmente la caldera se pone en utilización con normalidad. Después de esto, la caldera se usa 1-3 h con carga completa. El vapor no debe pasar a dispositivos delicados y no se permite el uso directo del vapor. Durante el calentamiento, la caldera se purga para que la salinidad y la p-alcalinidad se establezcan en los ratios adecuados según el fabricante de la caldera. Tras esto, la caldera está en perfectas condiciones y se puede iniciar el uso normal de vapor sin vaciar la caldera. De ahora en adelante, el agua de la caldera se mantendrá en valores de diseño mediante la dosificación de agentes compuestos y las extracciones o purgados. Una capa magnética que protege el acero de la caldera comienza a formarse inmediatamente y alcanzará su resistencia máxima en aproximadamente 3 meses.

2 Objetivos

Se ha dividido los objetivos de este trabajo en dos grupos:

- Objetivos generales
- Objetivos específicos

Los objetivos generales de este proyecto son:

- Estudiar los componentes que se encuentran disueltos en el agua de alimentación.
- Presentar los equipos que forman parte del sistema de generación de vapor del buque.
- Mostrar el método de trabajo que se lleva a cabo en un buque de pasaje para el estudio de las propiedades del agua de caldera.
- Exponer las medidas que se llevan a cabo para solucionar los fallos y problemas que aparecen en el sistema de generación de vapor durante el periodo de embarque del autor del trabajo.

Los objetivos específicos son:

- Mostrar los productos químicos que se utilizan en el *Volcán de Tamadaba* y los test que se emplean para la práctica de los análisis del agua.
- Exponer la evolución de los parámetros característicos del agua de la caldera, cisterna, economizadores y el agua destilada obtenida de los generadores de agua dulce.
- Evaluar qué tratamiento químico se ha de dosificar en el agua de alimentación en función de los valores de las magnitudes del agua de caldera.

3 Metodología

Este trabajo se elaboró cumpliendo las siguientes etapas:

Toma de datos

Esta primera etapa se desarrolla durante el periodo de embarque como alumno de máquinas en un buque de pasaje.

En este periodo se recopilan los datos de los parámetros sobre la calidad del agua de la caldera mediante la realización de los test de análisis a las muestras de agua de los sistemas implicados en la generación de vapor.

En el *Volcán de Tamadaba* los análisis de agua se realizan con los dos paks de la marca NALFLEET: el Spectrapak™ 311 y el Spectrapak™ 309 [22]. El Spectrapak™ 309 es un set de análisis exclusivo del agua de refrigeración de los motores principales y auxiliares mientras que el Spectrapak™ 311 es un kit de análisis diseñado para agua de caldera de media y alta presión. También con este kit se analiza el agua de la cisterna, los economizadores y el agua destilada producida en los generadores de agua dulce.

Está especialmente pensado para mantener el control de la calidad del agua del sistema de caldera consiguiendo la protección contra la corrosión y la formación de incrustaciones.

Se deben de tomar las muestras siempre en el mismo sitio, dejando drenar unos minutos para asegurar que la muestra es realmente representativa y no ha sido contaminada por residuos presentes en la línea. Se tiene que enfriar la muestra, por debajo de los 21 °C, y realizarse el análisis lo antes posible para evitar la contaminación por culpa del oxígeno atmosférico presente. Para eso se dispone de un enfriador de la muestra como el de la figura 3.2. Únicamente las muestras del agua de la cisterna se tienen que coger directamente del interior en el caso de este buque.



Figura 3.1: Spectrapak™ 311

Fuente: [22]

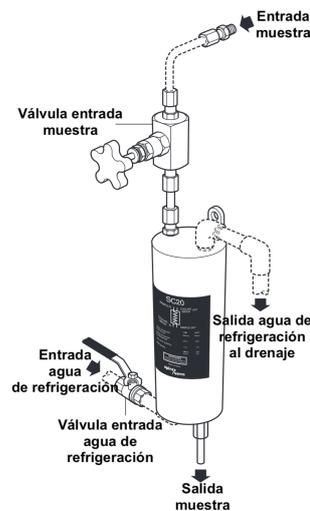


Figura 3.2: Enfriador de muestras

Fuente: [20]

El orden de actuación con cada tipo de análisis del kit Spectrapak™ 311 es el siguiente:

Análisis de p-alcalinidad: El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Se toman 200 ml de muestra en el vaso graduado.
- Se añaden las pastillas de “p-alcalinity” una a una, agitando el envase y observando el cambio de color.
- Cuando el color amarillo se convierta en anaranjado se cuentan las pastillas usadas y se aplica la siguiente fórmula:

$$(n^{\circ}pill_{p\text{-alcalinidad}} \cdot 20) - 10 = ppm CaCO_3 \quad (3.1)$$

Los valores obtenidos del análisis de la p-alcalinidad se utilizan en el cálculo de la cantidad de alcali que va a ser añadida al agua cruda ácida para volverla menos agresiva o al agua de alimentación.

Análisis de cloruros: El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Se vierten 50 ml de muestra en un vaso graduado.
- Se añaden las pastillas de “chloride” una a una, agitando el envase y observando el cambio de color. Puede que se obtenga primero un color amarillo, por lo que se tiene que continuar hasta que se obtenga un color naranja pardo.
- Se cuenta el número de pastillas usadas y se aplica la siguiente fórmula:

$$(n^{\circ}pill_{cloruros} \cdot 20) - 20 = ppm Cl \quad (3.2)$$

Análisis del pH: El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Se toman 50 ml de muestra en el vaso graduado.
- Se añade una tira de papel calorimétrico durante un minuto sumergida en el agua de la muestra.
- Se compara el color de la muestra con la referencia patrón del envase de tiras.

Cálculos

Con los datos obtenidos, las tablas elaboradas y manuales, se obtiene una idea del rango de valores en el que tiene que trabajar la caldera. Además, con los valores que proporcionan los análisis del agua, se realiza el cálculo de los productos químicos que se han de dosificar o las extracciones que se deben de realizar para una correcta calidad del agua del sistema de generación.

Como complemento, se realiza el cálculo del caudal de extracción que ofrece la válvula de purga de fondo y de superficie y la Tasa de Purga necesaria si la caldera tuviera un sistema automático de control de purgas:

- Ecuación de continuidad:

$$Q = v \cdot A \quad (3.3)$$

Q : caudal, m^3
 A : superficie, m^2

- Ecuación de Bernoulli:

$$cte = \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z \quad (3.4)$$

cte : constante
 v : velocidad, $\frac{m}{s}$
 g : constante de la aceleración, $9,80665 \frac{m}{s^2}$
 p : presión, $\frac{N}{m^2}$
 ρ : densidad, $\frac{kg}{m^3}$
 z : altura, m

- Tasa de purga:

$$T.P. = \frac{F \cdot a}{B - F} \quad (3.5)$$

F : Sólidos Disueltos Totales del agua de alimentación, ppm
 a : producción actual de vapor, $\frac{kg}{h}$
 b : valor máximo de SDT en la caldera, ppm

Elaboración del trabajo

Con la información recopilada a través de la bibliografía consultada; las tablas, cálculos y gráficos elaborados; se van obteniendo resultados y conclusiones. Se realiza además una explicación de los métodos de control de la calidad del agua de la caldera y las incidencias ocurridas a lo largo del periodo del estudio.

Los programas informáticos utilizados durante la elaboración del TFG son:

- Open Office: Este software se utiliza para la realización de todos los cálculos, tablas y gráficas a partir de los datos recopilados en los análisis del agua de la caldera.
- texstudio: Programa de edición multiplataforma que se basa en el sistema de elaboración de textos LaTeX.
- Engauge Digitizer: Herramienta que permite obtener los puntos y datos característicos de una gráfica, adjuntada en el programa en forma de PNG, JPEG o TIFF.
- Autocad: Software de diseño para dibujar en 2D o moldear 3D. En la actualidad lo desarrolla y comercializa la Autodesk, Inc.

4 Descripción de la instalación

En este apartado se hace una descripción del buque como de la instalación para tener claro el sistema de generación de vapor.

4.1 Descripción del buque

El *Volcán de Tamadaba* es un buque que pertenece a la Naviera Armas. La Naviera se creó en 1941 y se ha transformado en la empresa naviera con más peso de Canarias.

A lo largo de su historia ha contado con más de medio centenar de buques, comenzando su andadura con buques veleros de madera. Es la empresa encargada de unir todas las islas del archipiélago canario y en la actualidad, también ha logrado adquirir un gran número de líneas que conectan las Islas Baleares, las Islas Canarias y el norte de África con la península. En el 2017 la empresa dio su mayor paso comprando la mayor parte de las acciones de la naviera Transmediterránea, convirtiéndose en la primera naviera española en transporte de pasajeros y de carga rodada, y una de las más grandes de Europa. Actualmente tiene una flota de dieciséis buques, once de ellos Ro-Pax, uno Con-Ro y cuatro Fast Ferrys. El *Volcán de Tamadaba* es un buque tipo Ro-Ro/Buque de pasaje, construido en el astillero Hijos de J.Barreras de Vigo en el año 2007. Su número IMO es 9360506 y tiene a Las Palmas de Gran Canaria como puerto de registro.



Figura 4.1: Distintivo naviera
Fuente: [24]



Figura 4.2: Buque *Volcán de Tamadaba* desatracando de Las Palmas Gran Canaria
Fuente: [19]

Las características constructivas y de propulsión del buque *Volcán de Tamadaba* son:

Eslora	154,35 m
Manga	24,20 m
Puntal a cubierta superior	13,55 m
Puntal a cubierta principal	8,35 m
Calado medio a trazado	5,50 m
Arqueo	19976 t
Peso muerto	3400 t
Desplazamiento en rosca	9250 t
Número de tripulantes	34
Número de pasajeros	966
Capacidad de carga	200-400 vehículos/150-200 camiones
Propulsión	2 motores Wärtsilä 12V46B
Potencia	2 x 11700 KW

Tabla 4.1: Características del *Volcán de Tamadaba*

Fuente: [6]

Las especificaciones mecánicas de los dos motores Wärtsilä son:

Modelo motor	12 cilindros en V, 45°
Potencia	2 x 11700 KW
Ciclos	4T
Revoluciones	500 rpm
Combustible	HFO/DO
Diámetro del cilindro	460 mm
Carrera	580 mm
Cilindrada por cilindro	96,4 l
Tipo de cárter	Seco
Presión de inyección	550-600 bar
Orden de encendido (s.horario)	A1-B1-A5-B5-A3-B3-A6-B6-A2-B2-A4-B4
Orden de encendido(s.antihorario)	A1-B4-A4-B2-A2-B6-A6-B3-A3-B5-A5-B1
Volumen de aceite lubricante	370 l
Volumen de agua refrigerante	AT: 1700 l / BT: 200 l

Tabla 4.2: Especificaciones de los motores del *Volcán de Tamadaba*

Fuente: [25]

4.2 Descripción de la instalación de vapor

En el sistema de generación de vapor los elementos más importantes son los generadores de agua dulce, el tanque de observación de purgas o cisterna, la caldera y los economizadores.

4.2.1 Generadores de agua dulce

Este buque dispone de dos generadores de vapor situados en el costado de babor. Estos generadores de la marca Aquamar han sido diseñados para obtener agua destilada a partir de agua procedente del mar [5].

El agua producida por cada generador tiene una pureza muy alta, dado que su contenido de cloruros disueltos es inferior a <4 ppm.



Figura 4.3: Generadores Aquamar

Fuente: Autoría propia

Estos generadores trabajan siguiendo el principio de vaporización por vacío y tubo sumergido. El agua salada se vaporiza a baja temperatura debido al vacío existente dentro de la unidad y al aporte de energía térmica procedente del calentador.

Cualquier tipo de energía calorífica que disponga de una temperatura comprendida entre 60°C y 98°C se puede utilizar para suministrar calor a los generadores. El medio de calefacción utilizado en este buque es la energía térmica residual procedente del circuito de refrigeración de culatas en los motores principales.

El esquema de la instalación de uno de estos generadores de vapor se resume de la siguiente manera:

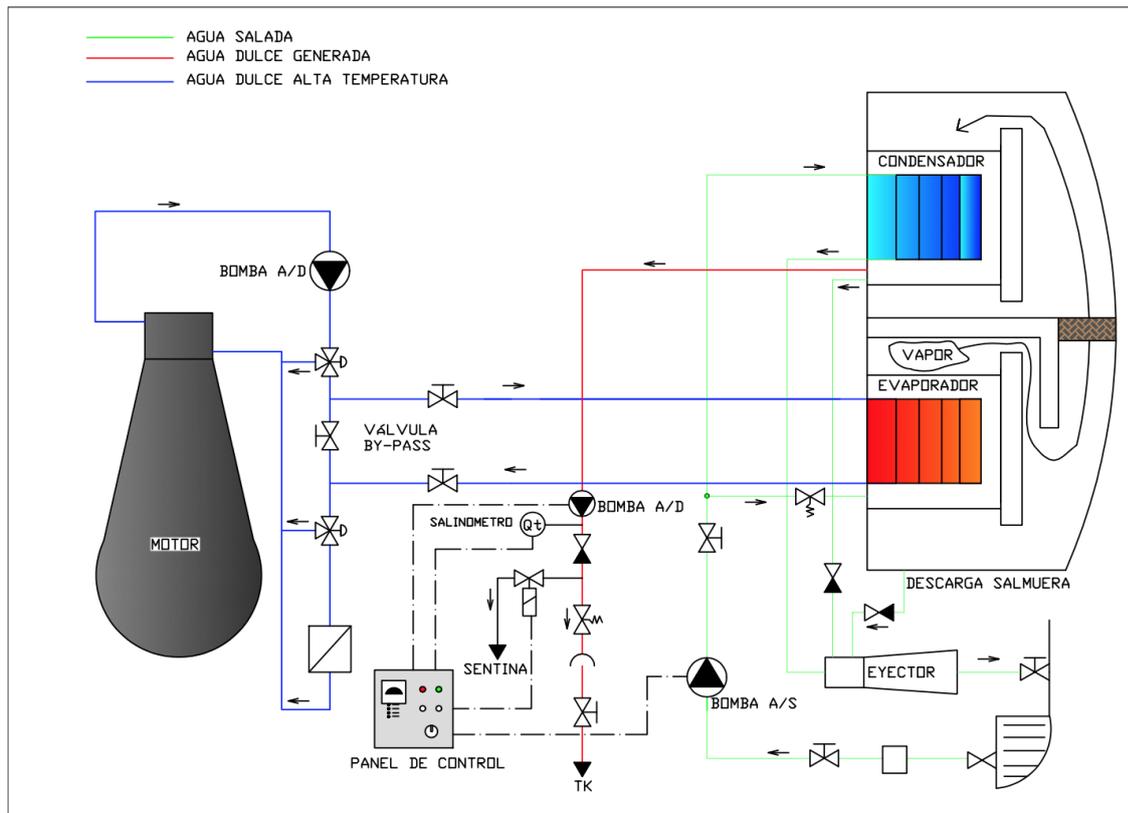


Figura 4.4: Esquema generador de agua dulce
Fuente: Autoría propia

La producción de destilado de este modelo, el AQ-16/20, está influenciada por la temperatura que se le aporte a la calefacción:

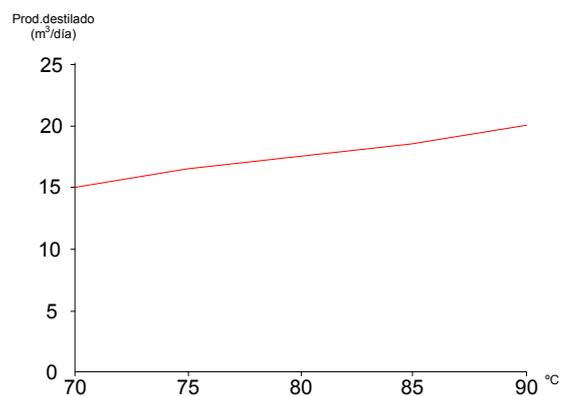


Figura 4.5: Gráfica temperatura-producción
Fuente: Autoría propia

El generador dispone de una unidad salinométrica que analiza la calidad del agua producida constantemente, empleando como valor de referencia la conductividad eléctrica y proporcionando las

señales de control necesarias. Está integrada por la célula salinométrica, un indicador visual de salinidad y un salinómetro.

La célula salinométrica está inmersa en el flujo de destilado (roscada al sistema de distribución de destilado) y la conductividad del agua es continuamente monitorizada en el indicador visual de salinidad. El ajuste del punto de alarma se selecciona moviendo el potenciómetro en conformidad con la tabla 4.3:

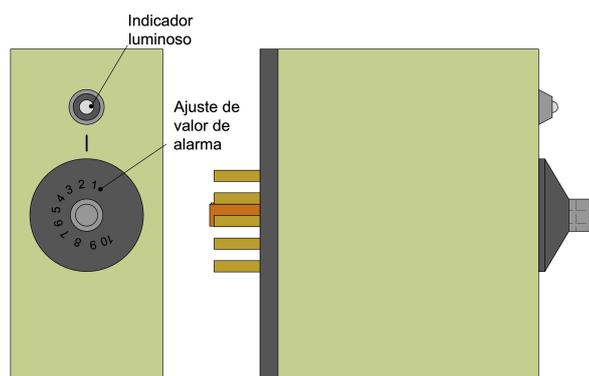


Figura 4.6: Salinómetro

Fuente: Autoría propia

Posición del selector	Valor de alarma salinidad (ppm)
1	0 (ALARMA)
2	0 (ALARMA)
3	0,5
4	3
5	5

Tabla 4.3: Selección salto de alarma

Fuente: Autoría propia

Cuando la concentración de cloruros en el agua excede dicho valor prefijado, el salinómetro activa la señal de alarma y se excita la solenoide, cerrando la descarga al tanque y abriendo la recirculación a la unidad.

Inicialmente el agua producida podría no ser de buena calidad, por lo que la válvula solenoide de descarga a la sentina se mantiene abierta y el indicador luminoso de alarma encendido, hasta que la salinidad se reduce a un valor inferior al de ajuste de alarma. En este caso, los oficiales responsables del generador de agua dulce establecen que la posición del selector ha de ser la número 5, cuyo valor de alarma es de 5 ppm, para conseguir un margen suficiente que permita evitar los saltos continuos de alarma por picos momentáneos del valor de la salinidad o, si por contra, se ocasiona un aumento de la salinidad de manera prolongada, que no se trate de un valor excesivo [5].

4.2.2 Tanque de observación de purgas, cisterna

Este equipo es el encargado de almacenar el agua procedente del servicio de agua destilada y el condensado de vapor procedente del condensador de vapor sobrante, aunque su objetivo principal es suministrar el agua de alimentación a la caldera. Cuenta con un equipo desgasificador que elimina el oxígeno y otros gases contenidos en el agua de alimentación, de modo que se evita la corrosión de elementos y tramos que componen el circuito agua-vapor de la planta.

En medio acuoso, el hierro se oxida originando hidróxido ferroso por la acción del ión hidroxilo. Este, por acción del oxígeno en disolución, pasa a hidróxido férrico (de color rojizo) implicando corrosión.

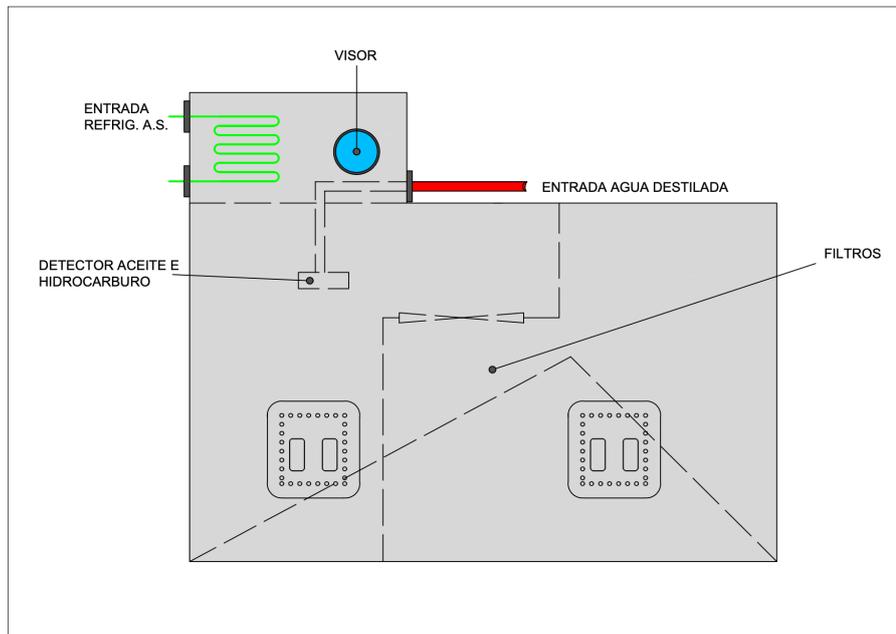


Figura 4.7: Representación tanque de observación de purgas

Fuente: Autoría propia

En una planta de producción de vapor la cisterna tiene las siguientes funciones:

- **Eliminación de gases:** Se encarga de eliminar, a través del aumento de temperatura del agua, los gases disueltos que contenga. Emplea el principio de la solubilidad inversa de los gases, mediante la cual los gases en agua a alta temperatura son menos solubles.
- **Equilibramiento térmico del agua:** Se realiza un precalentamiento o enfriamiento del agua que llega a la cisterna con extracciones de vapor de la línea de producción o con un serpentín por donde circula agua salada o del circuito de BT.
- **Acumulador de agua:** Almacena agua a alta temperatura para alimentar las bombas de alta presión. Con estas bombas se hace circular el agua condensada a través del circuito de generación de vapor.
- **Evita la cavitación:** Para evitar este fenómeno en las bombas de alimentación se trata de proporcionar la presión hidrostática necesaria, NPSH.

Por causar fenómenos de corrosión como por ejemplo el “pitting”, es de vital importancia eliminar la presencia del oxígeno disuelto en el agua. Además de la corrosión por acción del oxígeno disuelto en el agua, esta puede darse también cuando la caldera se encuentra fuera de servicio durante periodos de tiempo prolongados e ingresa en ella el oxígeno.

4.2.3 Condensador de vapor sobrante

Un condensador es un intercambiador térmico donde se pretende que el fluido que lo recorre cambie a fase líquida desde su fase gaseosa mediante el intercambio de calor (cesión de calor al exterior, que se pierde sin posibilidad de aprovechamiento) con otro medio.

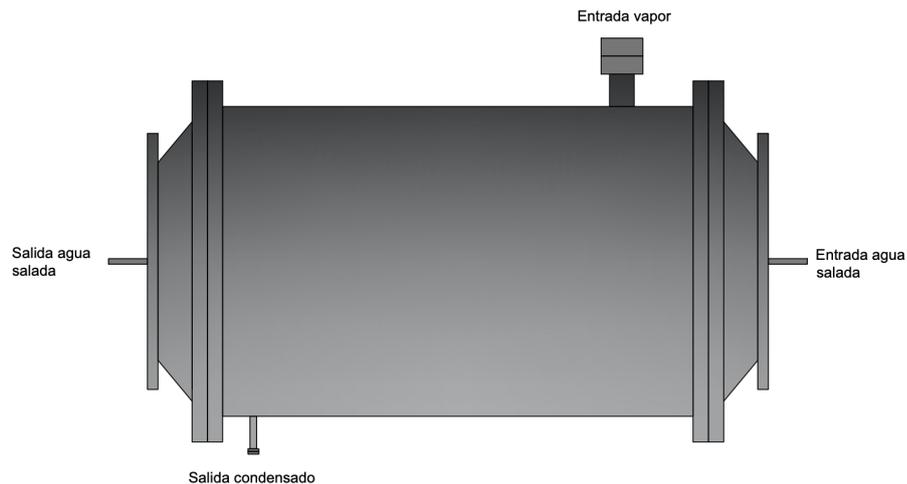


Figura 4.8: Representación condensador vapor sobranante

Fuente: Autoría propia

Este condensador de vapor sobranante, figura 4.8, utiliza agua salada como fluido refrigerante con una chimenea que actúa como sumidero del calor latente de la operación.

El condensador es una fuente potencial de contaminación del agua de alimentación por culpa de la utilización de agua salada como elemento refrigerante. Un punto de muestra y un monitor de salinidad chequean la calidad del condensado en su línea de descarga. El sello de las bombas de condensado es de agua, previniendo la entrada de aire.

4.2.4 Caldera pirotubular

Las calderas pirotubulares surgen en la industria a comienzos del siglo XX, siendo a la par su evolución y su desarrollo técnico. Al principio, se trataban de simples recipientes cilíndricos hermetizados a los cuales se le inyectaba agua a través de tuberías y se extraccionaba el vapor. La combustión era externa, realizándose bajo la parte inferior del cilindro, con la quema de carbón o leña.

La evolución industrial solicitaba mayores temperaturas y presiones de combustión, por lo que los desarrollos técnicos desde aquella época se encaminan a utilizar materiales de construcción más resistentes y aumentar el área de transferencia de calor. Este aumento de las superficies de transferencia se consigue introduciendo tubos de pequeño diámetro inmersos en el volumen de agua, a través de los cuales circulan los gases de la combustión, transfiriendo a su paso el calor y aumentando la eficiencia del equipo.

En definitiva, una caldera es un recipiente metálico, hermético, cuya función es producir vapor o calentar agua a través de la acción del calor, desarrollando una temperatura superior a la del ambiente y presión mayor que la atmosférica. Al conjunto de la caldera con el sobrecalentador se le denomina generador de vapor. En la imagen de la figura 4.9 se muestra la caldera del *Volcán de Tamadaba*.



Figura 4.9: Caldera *Volcán de Tamadaba*

Fuente: Autoría propia

La caldera del *Volcán de Tamadaba* es el modelo UNEX BH 1500 kg/h de Aalborg. Las dimensiones y características se exponen en el Anexo *A.1* y ?? [2]. En el caso de las calderas piro-tubulares, la combustión del combustible se produce en el hogar de la caldera, formándose los gases calientes que comienzan a circular a través de los tubos de pequeño diámetro, también denominados *fluses*. De esta forma, desde el hogar y en su paso a través de los tubos, los gases van realizando la transferencia de calor al agua que rodea los tubos.

La estructura genérica de las calderas piro-tubulares dependerá del tipo y de cada fabricante, pero se pueden presentar una serie de partes comunes a todas ellas [17]:

- Quemador: La parte encargada de realizar la quema del combustible. Este puede ser gasóleo o fuel en el caso de esta caldera. El modelo de quemador que utiliza esta caldera es el KBO-R.H. burner que aparece en la figura 4.10.



Figura 4.10: Quemador

Fuente: [2]

- Hogar: El quemador se encuentra en él, siendo en su interior donde se generan los humos y gases

calientes.

- Tubos de intercambio de calor: El intercambio térmico se realiza a través de la superficie de estos. A través de los tubos es por donde circulan los gases de la combustión luego de abandonar el hogar. Un dato muy importante a tener en cuenta en el mantenimiento de la caldera es que la generación de las burbujas se realiza en la superficie de estos tubos.
- Cámara de agua: Parte del volumen de la caldera que contiene agua en su interior.
- Cámara de vapor: Parte del volumen de la caldera que contiene el vapor producido.
- Placas: Limitan en ambos extremos el volumen de la cámara de la caldera.
- Chimenea: Zona de escape de los humos y gases procedentes de la combustión, después de realizarse la transferencia de calor al fluido.
- Carcasa: Constituye la envoltura exterior o cuerpo de acero que contiene el hogar y el sistema de tubos de intercambio de calor.

Además de las partes anteriormente citadas, las calderas pirotubulares cuentan con las partes que se muestran en la figura 4.11:

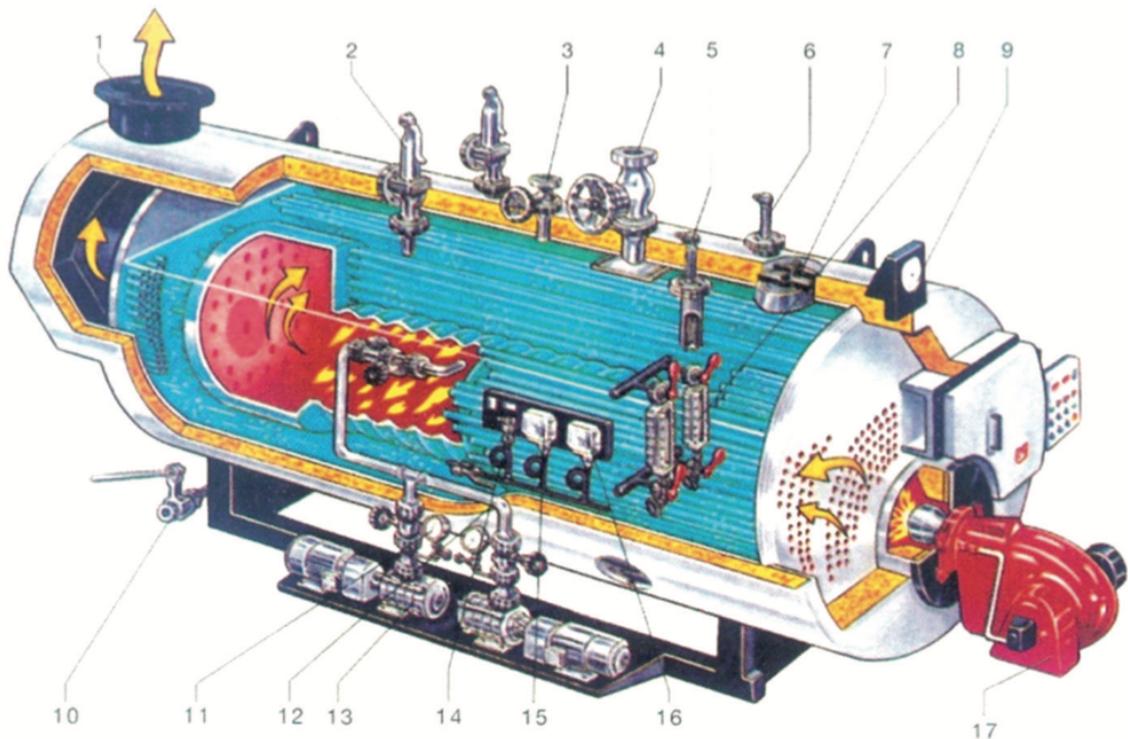


Figura 4.11: Partes caldera pirotubular

Fuente: [17]

1	Evacuación de humos	7	Entrada de hombre	13	Bombas de alimentación de agua
2	Salida auxiliar de vapor	8	Indicadores de nivel	14	Transmisor de presión
3	Salida auxiliar de vapor	9	Manómetro	15	Presostato de seguridad
4	Salida principal de vapor	10	Purga de fondo	16	Presostato de regulación
5	Seguridad de nivel	11	Manómetro	17	Equipo de combustión
6	Regulador de nivel de seguridad	12	Alimentación de agua		

La diferencia más común dentro de los generadores de vapor pirotubulares es el número de pasos de los gases en el sentido longitudinal de la caldera. Así pues, las calderas más comunes son:

- 2 pasos: La caldera cuenta con el hogar y un paso por los tubos de humos, 4.12.

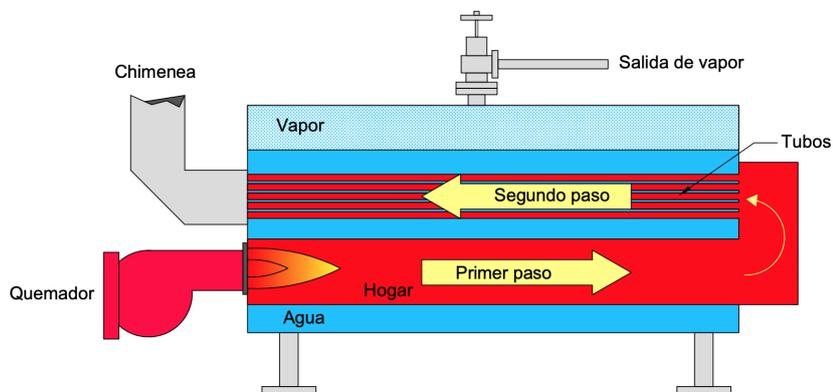


Figura 4.12: Caldera pirotubular 2 pasos

Fuente: Autoría propia

- 3 pasos: La caldera cuenta con el hogar y dos pasos por los tubos de humos, 4.13.

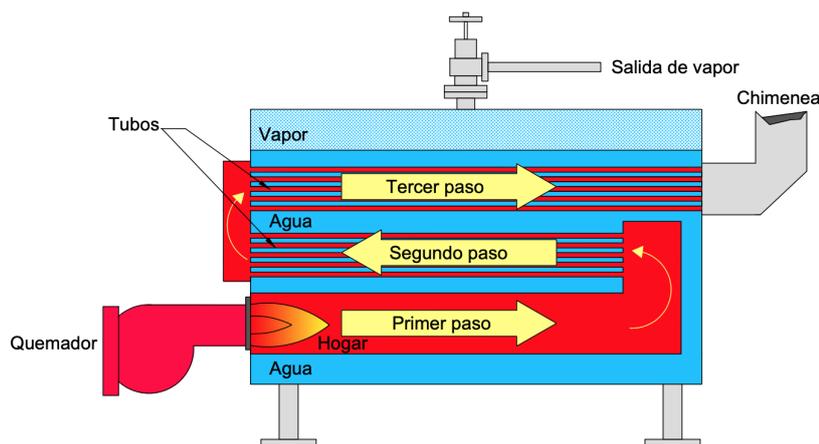


Figura 4.13: Caldera pirotubular 3 pasos

Fuente: Autoría propia

A medida que aumenta el número de tubos o pasos, aumenta el intercambio de calor, lo que produce una disminución de la temperatura de los gases a la salida de la chimenea, por consiguiente, se incrementa el rendimiento.

De manera simplificada, el procedimiento de puesta en marcha de la caldera que se lleva a cabo en esta caldera es:

- Comprobar el estado y revisar las válvulas de seguridad, manómetros e indicadores, controles y demás equipos auxiliares de la caldera. Las válvulas pertenecientes al circuito de combustible y al de agua de alimentación tienen que estar abiertas.
- Si se da el caso que se parta desde una presión cero, abrir la aireación.
- Tras conectar el interruptor del cuadro de control y de las bombas de alimentación, si el nivel de agua es demasiado bajo, la bomba de alimentación se encenderá automáticamente.
- Se coloca el interruptor general en la posición SERVICIO y se acciona el pulsador de rearme, figura 4.14.



Figura 4.14: Cuadro de control caldera
Fuente: Autoría propia

- Cuando se aprecie a la salida de vapor de la caldera que empieza a vislumbrarse una pequeña cantidad de vapor, cerrar la válvula de aireación.
- Cuando se llega a la presión de trabajo, sobre los 7 bar, se abre cuidadosamente la válvula de salida de vapor que se dirige a los sistemas consumidores.

El volumen de vapor que se puede encontrar dentro de una caldera pirotubular corriente oscila entre el 12 y el 14% del volumen total de la caldera, criterio aceptado por la mayoría de las empresas constructoras y sociedades de clasificación.

La caldera está situada en la cubierta número 2 al lado de la Cabina de Control de la Sala de Máquinas, figura 4.15, mientras que las bombas de alimentación de gasoil y fuel oil están en el local de los Módulos de preparación de combustible, figura 4.16.

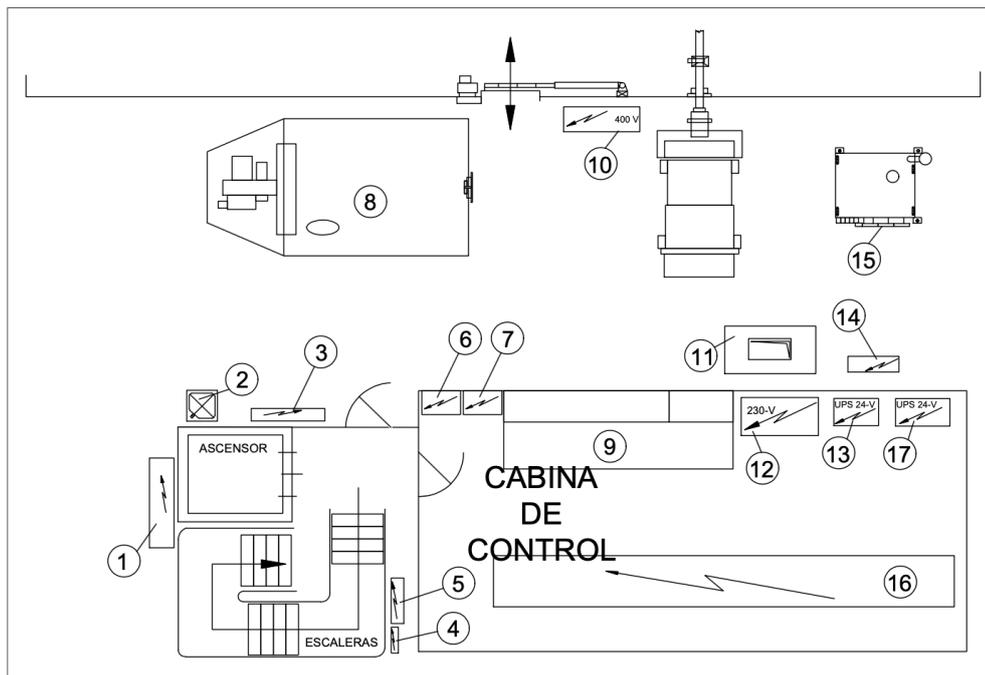


Figura 4.15: Esquema cabina de control
Fuente: Autoría propia

1	Cuadro de ventilación de máquinas	7	Cuadro de estabilizadores	13	Cuadro UPS-24V Eq. de máquinas
2	Fuente de agua fría	8	Caldera	14	Cuadro aire condicionado cabina
3	Cuadro eléctrico caldera	9	Consola cabina de control	15	Tanque filtro de observación y purga
4	Cuadro de alumbrado de emergencia SS.MM.	10	Cuadro de servicios de máquinas 400 V	16	Cuadro principal cabina de control 400 V
5	Cuadro alumbrado SS.MM.	11	Unidad aire acondicionado habilitación	17	Cuadro UPS-24V equipos de máquinas
6	Cuadro detección de incendio	12	Cuadro principal 220V		

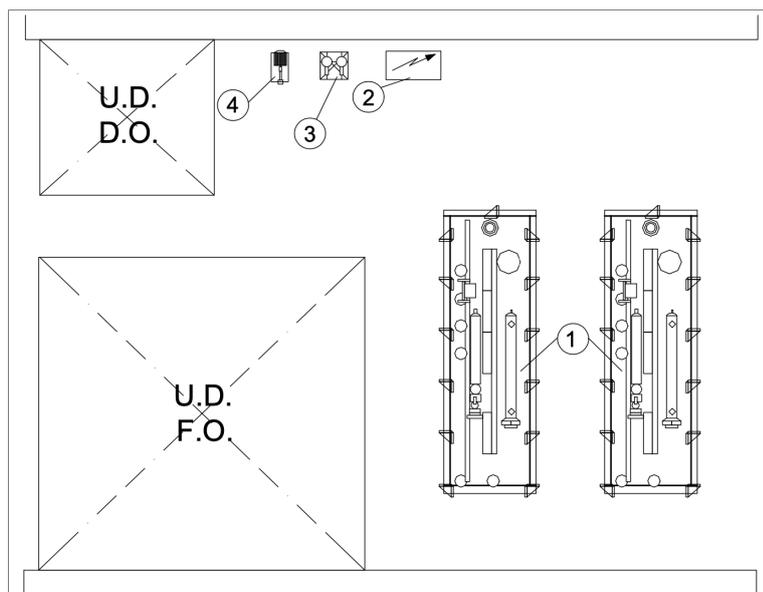


Figura 4.16: Esquema local de los Módulos

Fuente: Autoría propia

- | | | | |
|---|------------------------------------------|---|----------------------------------|
| 1 | Módulo preparación de combustible | 3 | Bombas alimentación F.O. caldera |
| 2 | Cuadro distribución aceite y combustible | 4 | Bombas alimentación D.O. caldera |

4.2.5 Economizadores

Los economizadores están diseñados para la producción de vapor utilizando como fuente de energía el calor recuperado de los gases de escape de los motores principales durante el trayecto de navegación. El *Volcán de Tamadaba* dispone de dos calderas de exhaustación pirotubulares de la empresa Aalborg, el modelo Mission XS-2V [1]. Sus características son, tabla 4.4:

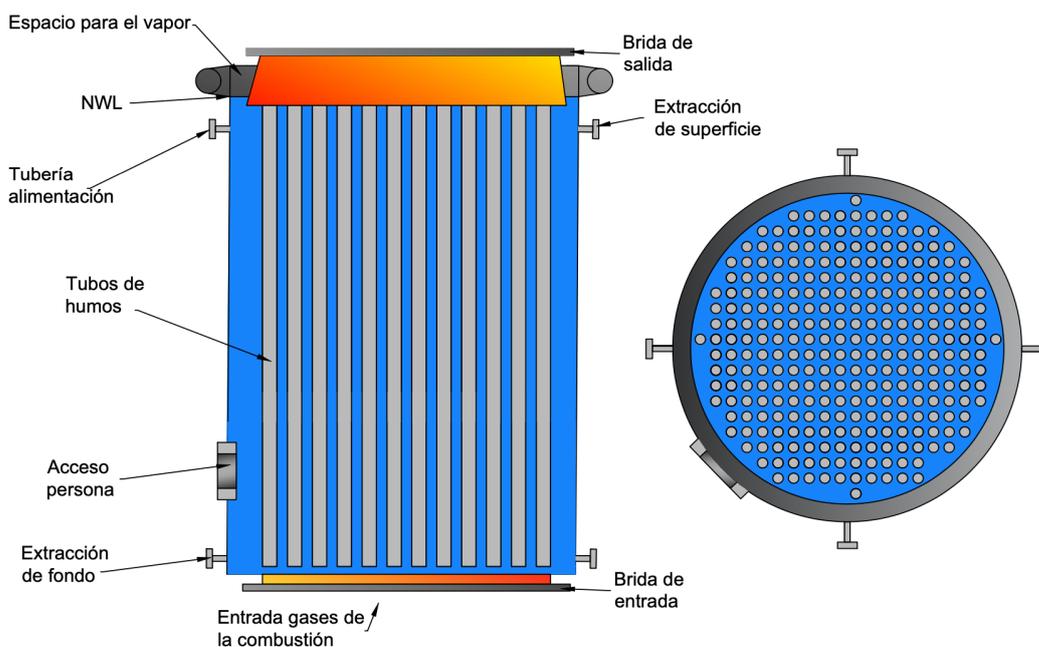


Figura 4.17: Representación del economizador

Fuente: Autoría propia

Producción de vapor	1000 kg/h
Presión de trabajo	7 bar
Presión máxima de servicio	9 bar
Presión prueba hidroestática	13,5 bar

Tabla 4.4: Características del Aalborg Mission XS-2V
Fuente: Autoría propia

En su interior, están diseñados para que tengan una alta velocidad de gas para minimizar el ensuciamiento. El tipo Aalborg XS-2V viene con su propio espacio de vapor y puede funcionar independientemente de la caldera de combustible. Además, está diseñado para que, en casos de emergencia, pueda soportar el funcionamiento en seco.

Los economizadores Aalborg XS-2V son de tipo pirotubular verticales, y funcionan aspirando a través de circulación forzada con la ayuda de dos bombas el agua destilada que se encuentra en el tanque de observación de purgas. De estas dos bombas para cada economizador, una se deja modo automático en el panel de control y la otra en modo reserva, figura 4.18, activándose cuando la sonda de bajo nivel se ve excitada y se para cuando se restaura el nivel correcto de agua.



Figura 4.18: Cuadro de control economizadores
Fuente: Autoría propia

Los tamaños de los economizadores dependen de la capacidad de vapor requerida, la cantidad de gases de escape, la temperatura y la presión de trabajo.

4.3 Productos para tratamiento químico de calderas utilizados en el buque

Los productos químicos que se utilizan en el *Volcán de Tamadaba* son de la marca NALFLEET™, cuya distribuidora es el grupo Wilh Wilhelmsen Holding ASA [23].

4.3.1 Oxygen Control

Oxygen Control es un eliminador de oxígeno cuya composición se basa en hidracina líquida catalizada para la protección contra la corrosión de la caldera y la línea de vapor.

Como beneficio adicional, ayudará a neutralizar el dióxido de carbono disuelto. Proporciona las condiciones requeridas para el establecimiento de una capa pasivante (magnetita) en la caldera y el sistema de condensado.

El control de oxígeno se puede utilizar en todos los sistemas de calderas, desde presiones bajas a



Figura 4.19: Oxygen Control
Fuente: [23]

altas y en combinación con sistemas de desaireación mecánica. El producto se combina con oxígeno disuelto para formar agua y gas nitrógeno inerte, por lo tanto elimina efectivamente el O_2 del agua. No se producen materiales sólidos, por lo que no hay contribución al aumento en los sólidos disueltos totales, un factor crítico en las calderas de alta presión. La eliminación del oxígeno disuelto es vital para prevenir picaduras de oxígeno y corrosión en calderas. El Oxygen Control reacciona con óxidos ferrosos y no ferrosos para evitar la corrosión general. El óxido férrico (óxido rojo, Fe_2O_3) se convierte en magnetita (óxido de hierro negro, Fe_3O_4), que es un óxido resistente a la corrosión que sella la superficie del metal. El término para esto es “pasivación” de las superficies, de modo que estén protegidas de la corrosión adicional.

El objetivo es mantener un residuo de hidracina entre 0.05 y 0.2 ppm dependiendo de la presión de funcionamiento y diseño de caldera.

Una dosis normal es de aproximadamente 1 l por día, dependiendo del diseño del sistema.

Método de dosificación

Para una protección óptima, el Oxygen Control debe de dosificarse continuamente en la línea de alimentación de la caldera, después de la válvula de recirculación de la bomba de alimentación, utilizando los sistemas de dosificación BWT que recomienda Unitor.

Muestreo y Pruebas

Se debe extraer una muestra representativa de agua de caldera para su análisis diario. La muestra

siempre debe tomarse desde el mismo punto después de la purga, enfriarse y probarse de inmediato. Es importante que se realicen pruebas periódicas para garantizar que los niveles de tratamiento sean correctos.

4.3.2 Liquitreat

Los principales atributos se dividen en las siguientes categorías:

- Control de alcalinidad: El nivel correcto de alcalinidad asegura que existan las condiciones óptimas para:
 - Precipitación de sales de dureza junto con fosfato.
 - Neutralización de condiciones ácidas.
 - Evitar la corrosión cáustica.
 - Control de sales de Mg y Ca.
- Control de dureza: Liquitreat proporciona una reserva de fosfato para reaccionar y precipitar las sales de dureza introducidas en el agua de alimentación.
- Acondicionamiento del lodo: El lodo sólo puede eliminarse mediante la purga si fluye libremente. Liquitreat asegura esto, evitando que el lodo se adhiera a las superficies metálicas.
- Control del oxígeno: La eliminación de oxígeno se vuelve más importante con el aumento de la presión en la caldera.



Figura 4.20: Liquitreat

Fuente: [23]

Muestreo

La muestra siempre debe de tomarse en el mismo punto después de la purga, enfriarse y analizarse inmediatamente. **Dosis**

La dosis inicial para un sistema no tratado es de 2,4 l/1000 l. Esto elevará el tratamiento a unas 200 ppm de p-alcalinidad.

p-alcalinidad (ppm CaCO ₃)	0	50	100	150	200	225	300	350	400
Dosis de Autotreat (l/1000)	2,4	1,8	1,2	0,6	0	0	0	Extracción	Extracción

Tabla 4.5: Dosificación de Liquitreat en función de la p-alcalinidad.

Propiedades del producto

- Apariencia: Líquido incoloro.
- Densidad: 1,1 g/ml a 15°C.
- Compatibilidad: Se debe de evitar el Zn, Al y acero galvanizado.

Características, beneficios y aplicaciones

- Adecuado para usar con calderas auxiliares y unidades de calor residual.
- Adecuado para usar con calderas de humo o tubos de agua, hasta 30 bar de presión.
- NALFLEET™ recomienda encarecidamente el uso combinado de Condensate Control con Liqui-treat.

4.3.3 Autotreat

Es un compuesto químico formado por hidróxido de potasio y 2-Dietilaminoetanol, para el tratamiento del agua de calderas. Se tratan de compuestos alcalinos, inhibidores de incrustaciones y corrosión, aminas volátiles para la protección del sistema de condensado y acondicionador de lodos. El producto combina el tratamiento con fosfatos y la tecnología con polímeros. Esto asegura que los precipitados se mantengan suaves y no adherentes para una fácil extracción por purga.



Figura 4.21: Autotreat
Fuente: [23]

Dosis

La dosis inicial para un sistema no tratado es de 2,4 l/t. Esto llevará el tratamiento a un nivel adecuado de 200 ppm de p-alcalinidad. El cuadro proporcionado muestra los parámetros adecuado para el cálculo de la cantidad requerida para llevar el nivel al punto medio, unas 200 ppm de p-alcalinidad.

p-alcalinidad (ppm CaCO ₃)	0	50	100	150	200	225	300	350	400
Dosis de Autotreat (1/1000)	2,4	1,8	1,2	0,6	0	0	0	Extracción	Extracción

Tabla 4.6: Dosificación de Autotreat en función de la temperatura.

Otros parámetros de sustancias que se han de vigilar son:

- p-alcalinidad: 100-300 ppm CaCO₃.
- Cloruros: El valor máximo de la concentración es de 200 ppm.
- pH del condensado: 8,3-9.

Muestreo

La muestra siempre debe de tomarse en el mismo punto después de la purga, enfriarse y analizarse inmediatamente.

Características, beneficios y aplicaciones

- Apto para todas las calderas, hasta 30 bar de presión.
- La acción dispersante suspende las partículas de lodo y sedimento para la eliminación eficiente por extracción en la caldera.
- Mantiene las superficies de los tubos de humos limpias, promoviendo las mejores condiciones de transferencia de calor.

Propiedades del producto

- Apariencia: Líquido amarillo ligero.
- Densidad: 1,1 g/cm³ a 15°C.
- pH: 13-14
- Compatibilidad: Evitar el aluminio, zinc y acero galvanizado.

4.3.4 Condensate Control

Es un producto compuesto por etanolamina que actúa como agente neutralizante líquido desarrollado para el control de la corrosión del condensado líquido en sistemas de condensado y agua de alimentación de calderas.

Es una mezcla de aminas líquidas volátiles con diferentes proporciones de distribución líquido-vapor que neutralizan los contaminantes ácidos en el condensado y agua de alimentación, proporcionando protección contra la corrosión ácida.

La causa más común de esta corrosión ácida en los sistemas de agua de condensación y alimentación es el CO₂ disuelto. El control del condensado neutraliza este ácido y mantiene el condensado y el agua de alimentación en condiciones alcalinas.



Figura 4.22: Condensate Control

Fuente: [23]

Dosis y control

Los puntos de dosificación adecuados son:

- Línea de alimentación de la caldera después de la válvula de recirculación.
- Descarga de la bomba de condensado.

Se prueba el pH del condensado para determinar el nivel de dosificación. Los límites del pH son de 8,3 a 9. Para un sistema típico de, por ejemplo, 10 m³, la dosis es de aproximadamente 0,7 l/día.

Muestreo y pruebas

Se debe de extraer una muestra representativa del condensado para su análisis. La muestra siempre debe de tomarse desde el mismo punto, enfriarse y realizarse de inmediato.

Características, beneficios y aplicaciones

- Tratamiento líquido fácil de usar.
- Neutraliza los ácidos presentes en el sistema de condensado.
- Requiere de menos mantenimiento.
- Volatiliza y se arrastra con el vapor y así es reciclado.
- Utilizado en sistemas de calderas de cualquier rango de presiones.

Propiedades del producto

- Apariencia: Líquido incoloro.
- Densidad: 1 g/cm³ a 15°C.
- pH: 10.
- Compatibilidad: Evitar el cobre, latón y aluminio. En cuanto al caucho o a la goma no se ha detectado incompatibilidad.

5 Resultados

5.1 Cálculo de las extracciones

A medida que el agua se hierve dentro de la caldera y se produce vapor, se van acumulando los sólidos en el agua y se concentran. Así, con el tiempo, aumenta el nivel de sólidos disueltos totales, TDS. Adicionalmente, la evaporación hace que estos sólidos disueltos salgan de la solución y produzcan sólidos en suspensión, y lodos. A medida que aumentan los sólidos disueltos, existe el riesgo de arrastre del agua de la caldera de vapor. Por lo tanto, es extremadamente importante controlar el nivel de los TDS.

Puesto que la vigente normativa impuesta por la sociedad de clasificación limita la salinidad y alcalinidad del agua, se deben ajustar mediante unos regímenes adecuados de purgas.

Al realizar un aporte de agua a la caldera se le está aportando un número de sales que se irán concentrando. La manera más efectiva de disminuir el efecto de esta concentración es la realización de purgas y el posterior reemplazo de este volumen de agua por un nuevo volumen de agua con una salinidad mucho menor.

Los siguientes cálculos que se realizan a continuación únicamente son útiles si la caldera dispone de un sistema automático de control de purgas. Manualmente, el operador intenta conseguir una Tasa de Purga semejante a la que puede realizar un sistema automático pero nunca podrá obtener tal precisión.

5.1.1 Caudal de salida de extracciones

5.1.1.1 Extracción de fondo

Puesto que no aparece reflejado en el manual la medida exacta del NWL en condiciones de trabajo normales, a través de los planos de diseño se consigue una medida bastante aproximada.

El modelo de nivel óptico que tiene esta caldera es de dos partes con seis tornillos. La distancia entre las llaves de las válvulas en cada extremo es de 700 mm y el NWL cuadra justo en la mitad del nivel.

También se observa que la caldera tiene un recubrimiento de 100 mm de espesor en toda su superficie. La válvula de extracción de fondo está a 70 mm de altura del fondo del tanque.

La temperatura de trabajo es 170 °C y la presión 7 bar. La densidad del agua a esta temperatura es de 859,6 kg/m³.

Por último, el diámetro de salida de la válvula de fondo es de 25 mm.

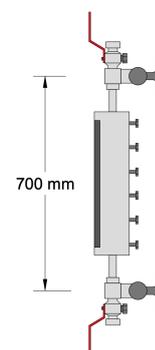


Figura 5.1: Nivel óptico

Fuente: Autoría propia

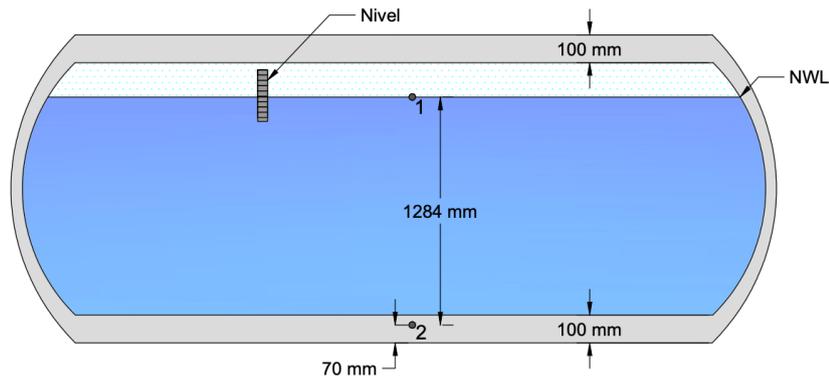


Figura 5.2: Extracción de fondo en caldera

Fuente: Autoría propia

$$\frac{(v_1)^2 \rho}{2} + p_1 + \rho g z_1 = \frac{(v_2)^2 \rho}{2} + p_2 + \rho g z_2 \rightarrow p_1 + \rho g z_1 = \frac{(v_2)^2 \rho}{2}$$

$$700000 \text{ Pa} + 859,6 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1,284 \text{ m} = \frac{(v_2)^2 \cdot 859,6 \text{ kg/m}^3}{2}$$

$$v_2 = 40,6673 \text{ m/s}$$

La velocidad v_2 es la que se encuentra a la salida de la válvula de extracción de fondo. Con esta velocidad se calcula el caudal de extracción al abrir completamente la válvula:

$$Q = v \cdot A = 40,667 \text{ m/s} \cdot \pi \cdot \frac{(0,025 \text{ m})^2}{2} = \frac{(v_2)^2 \cdot 859,6 \text{ kg/m}^3}{2}$$

$$Q = 0,0199625 \text{ m}^3/\text{s}$$

5.1.1.2 Extracción de superficie

En este caso la válvula de extracción de superficie está situada unos centímetros por debajo del NWL. De nuevo se calcula primero la velocidad de salida del agua para saber el caudal de extracción.

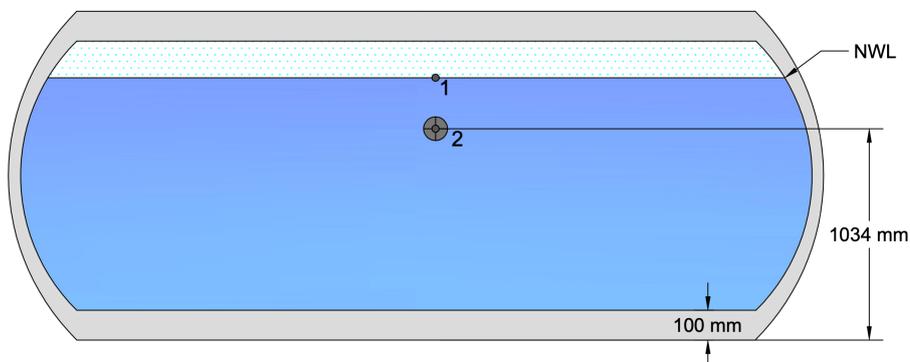


Figura 5.3: Extracción de superficie caldera

Fuente: Autoría propia

$$\frac{(v_1)^2 \rho}{2} + p_1 + \rho g z_1 = \frac{(v_2)^2 \rho}{2} + p_2 + \rho g z_2 \rightarrow p_1 + \rho g z_1 = \frac{(v_2)^2 \rho}{2} + \rho g z_2$$

$$700000 \text{ Pa} + 859,6 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1,284 \text{ m} = \frac{(v_2)^2 \cdot 859,6 \text{ kg/m}^3}{2} + 859,6 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 0,934 \text{ m}$$

$$v_2 = 40,4414 \text{ m/s}$$

La velocidad v_2 es la que se encuentra a la salida de la válvula de extracción de superficie. Con esta velocidad se calcula el caudal de extracción al abrir completamente la válvula:

$$Q = v \cdot A = 40,4414 \text{ m/s} \cdot \pi \cdot \frac{(0,025 \text{ m})^2}{2} = \frac{(v_2)^2 \cdot 859,6 \text{ kg/m}^3}{2}$$

$$Q = 0,019851626 \text{ m}^3/\text{s}$$

5.1.2 Régimen de purgas

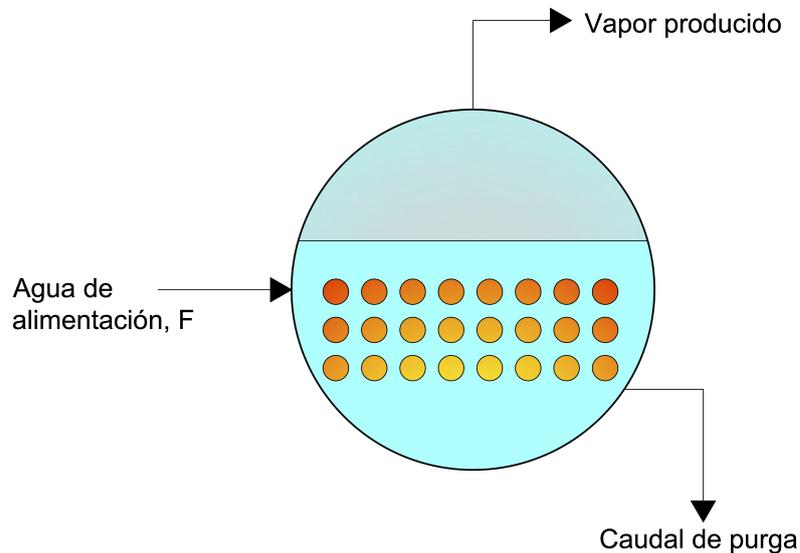


Figura 5.4: Diagrama de entradas y salidas de agua de la caldera

Fuente: Autoría propia

A medida que el agua se hierve dentro de la caldera y se produce vapor, se van acumulando los sólidos en el agua y se concentra. Así, con el tiempo aumenta el nivel de los sólidos disueltos totales, TDS. Una parte de estos sólidos disueltos suben con la evaporación produciendo sólidos en suspensión, mientras que el resto provoca que se aumente el riesgo de arrastre del agua de la caldera.

Con los valores de referencia proporcionados por el fabricante, se obtuvo los valores de los TDS del agua de alimentación y los TDS máximos permitidos en la caldera, así como la Tasa de Producción de la caldera.

Trabajando la caldera a 7 bar de presión y 170 °C de temperatura, la tasa de producción de vapor es de 1500 kg/h.

La expresión que permite conocer la tasa de purga recomendada cuando se trata de una extracción continua automática es:

$$\text{Tasa de purga} = \frac{F \cdot a}{B - F} \quad (5.1)$$

F : TDS máximos del agua de alimentación, ppm

a : Producción de vapor actual de la caldera, $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$

B : TDS máximos permitidos en la caldera, ppm

$$Tasa\ de\ purga = \frac{5\ ppm \cdot 1500\ kg/h}{3500\ ppm - 5\ ppm} \longrightarrow Tasa\ de\ purga = 2,1459\ kg/h$$

En el caso del *Volcán de Tamadaba* la extracción tanto de fondo como de superficie es manual. El operario abre previamente ciertos grados la válvula durante un segundo para que la línea se caliente previamente para después abrir completamente la válvula durante 2-3 segundos. Este procedimiento lo realiza diariamente, comprobando semanalmente cómo evolucionan los análisis. Si los datos son negativos, se llega a realizar una extracción más prolongada.

5.2 Control del tratamiento químico

Tras recopilar la serie de datos de los parámetros de la caldera y de los demás sistemas relacionados con la producción de vapor durante el período de embarque en el *Volcán de Tamadaba*, se puede hacer un estudio del comportamiento durante este espacio de tiempo.

Este estudio se va a clasificar en función de los productos químicos que se van a dosificar en los diferentes sistemas y de las extracciones realizadas, de tal manera que se observe la relación que mantiene el comportamiento de uno o varios parámetros en un mismo equipo o en diferentes equipos a la vez.

5.2.1 Oxygen control

Se dosifica en la cisterna 0,5 l/día durante las semanas que corresponden a los análisis elaborados el 6 y 19 de octubre.

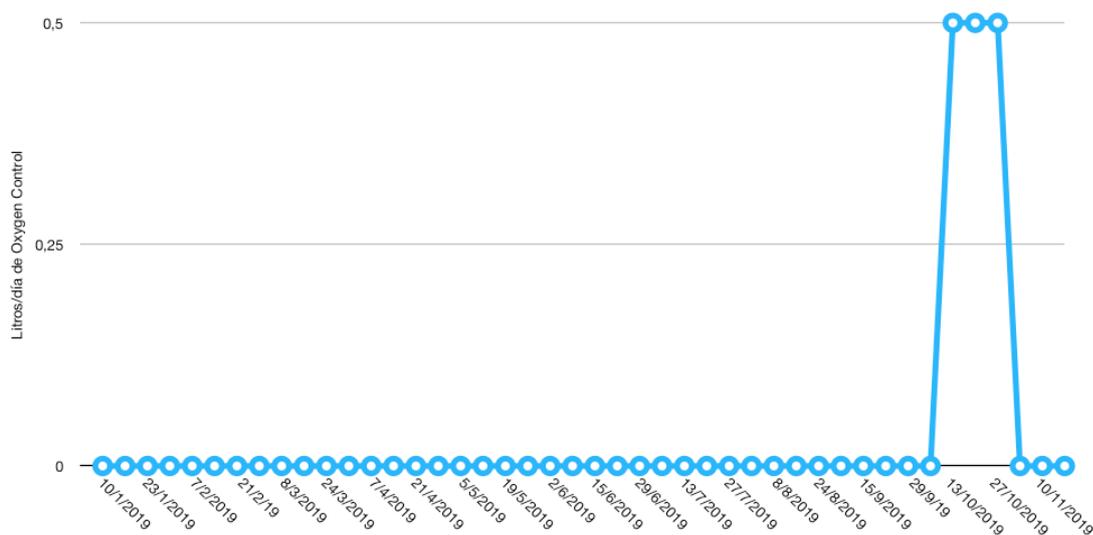


Figura 5.5: Dosificación Oxygen Control
Fuente: Autoría propia

5.2.2 Liquitreat

Se dosifica en la cisterna en la penúltima y última semana de abril. En la caldera también se dosifica durante la segunda semana del mes de abril.

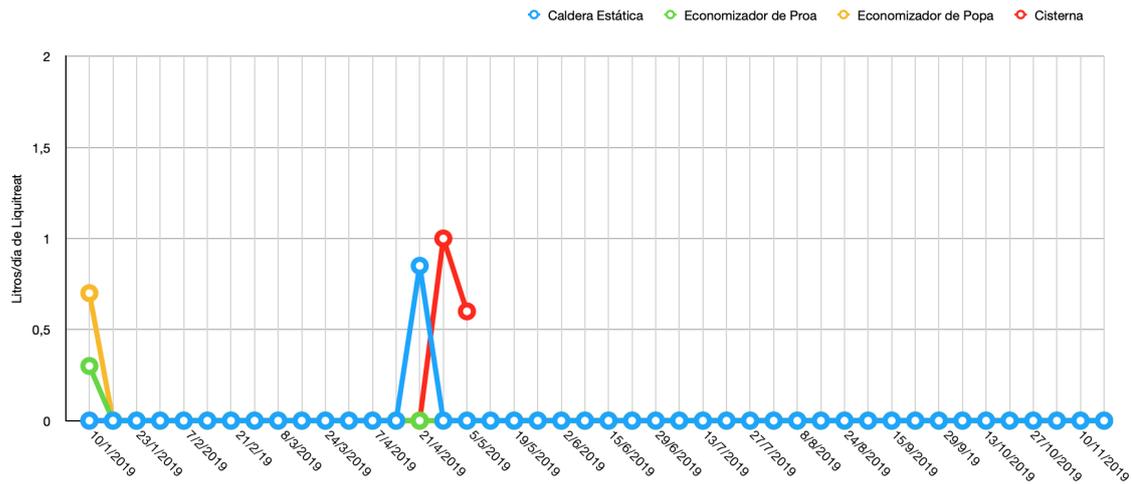


Figura 5.6: Dosificación Lixitreat
Fuente: Autoría propia

En la primera semana de enero se dosifica una pequeña cantidad en los economizadores de proa y popa. Se observa que la p-alcalinidad en el economizador de popa aumenta en 40 ppm pasadas dos semanas después de la dosificación (gráfica 5.7), estabilizándose en 190 ppm y manteniendo un pH de 10 a lo largo de varias semanas.

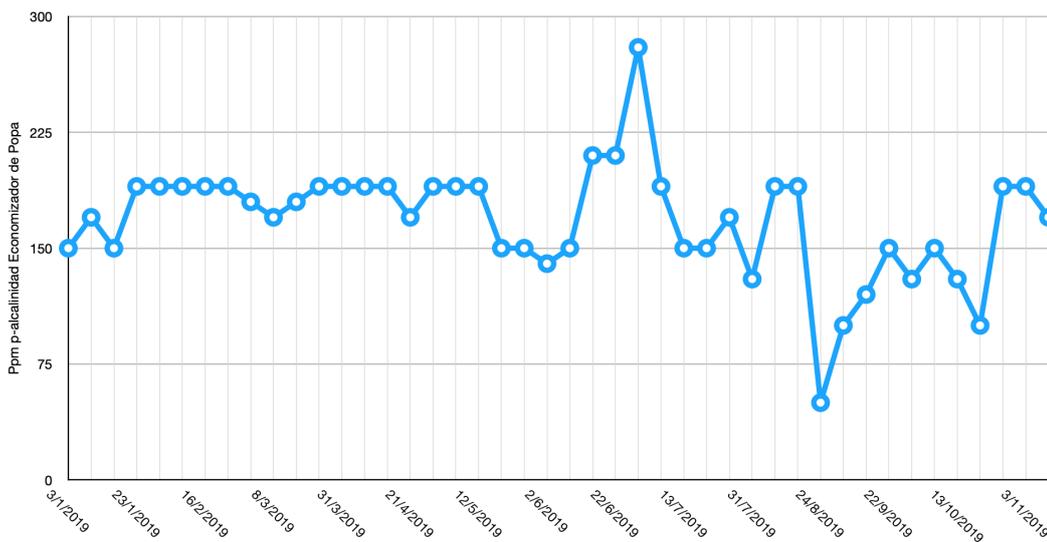


Figura 5.7: Evolución p-alcalinidad en economizador de popa
Fuente: Autoría propia

La p-alcalinidad en el economizador de proa aumenta también 40 ppm, pero en este caso una semana después de la dosificación realizada en la primera semana de enero (gráfica 5.8). En el economizador de proa también se mantendrá el pH entre los valores 10-11.

La p-alcalinidad en la caldera mantenía una tendencia al alza desde el mes de enero y con la dosificación de Lixitreat se observa una disminución durante los meses posteriores (gráfica 5.9). Los análisis muestran que los valores oscilan desde las 20 ppm como valor más bajo hasta las 190 ppm de p-alcalinidad como valor más alto. No se aprecian alteraciones muy bruscas en los valores del pH, pero sí una disminución progresiva en su valor.

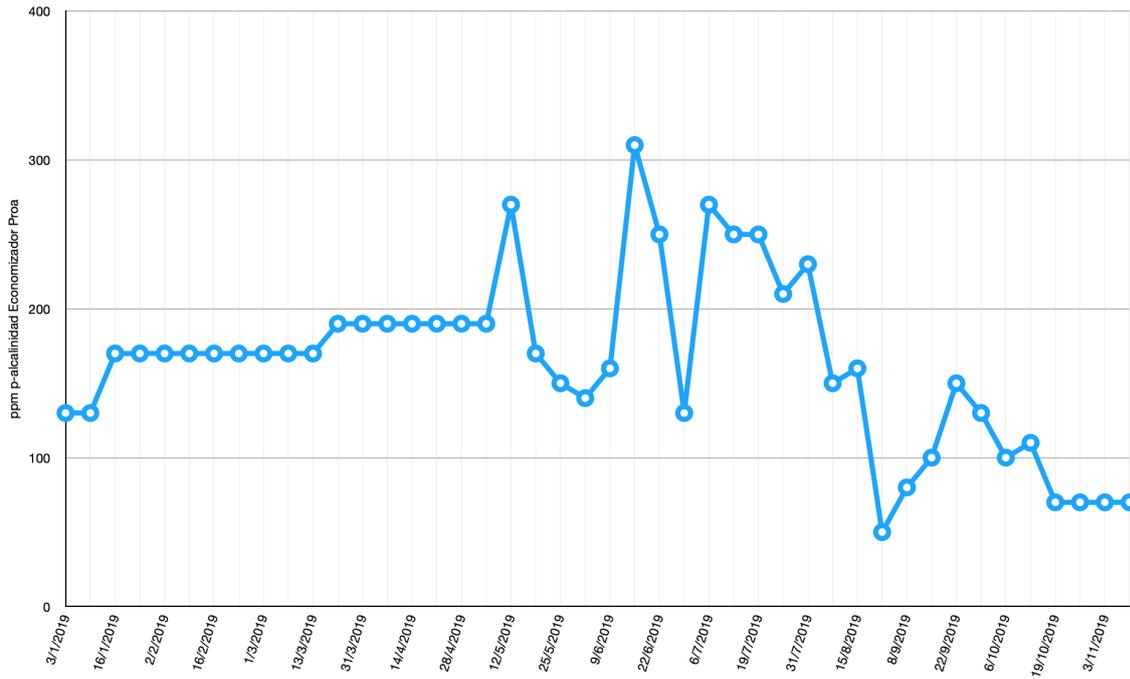


Figura 5.8: Evolución p-alkalinidad en economizador de proa

Fuente: Autoría propia

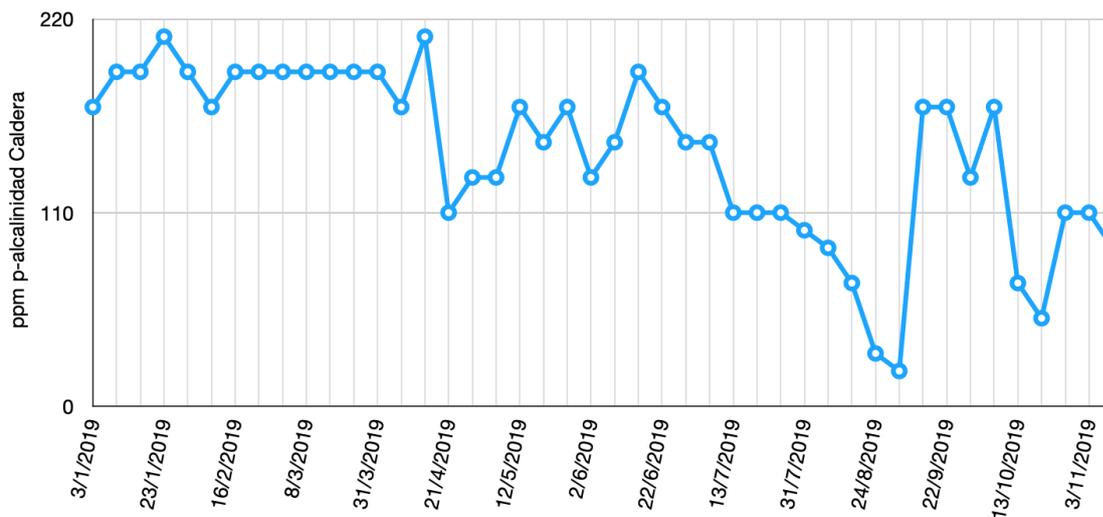


Figura 5.9: Evolución p-alkalinidad en caldera

Fuente: Autoría propia

5.2.3 Autotreat

Se dosifica en la caldera durante la primera semana de junio y durante todo el mes de julio (gráfica 5.10). Se observa que la p-alkalinidad en la caldera aumenta considerablemente a partir de la primera semana de junio (gráfica 5.9).

Con la contaminación de cloruros que sufre la caldera a mediados de junio los valores aumentan siendo necesario realizar extracciones y aportar agua de alimentación. Por causa de este problema, los valores de la p-alkalinidad vuelven a descender de manera continua hasta que de golpe, a comienzos del mes de septiembre, aumenta la p-alkalinidad 150 ppm. Este aumento repentino se vincula con otra nueva contaminación con cloruros en la primera semana de septiembre. Si en la primera contaminación, en el mes de junio, los valores de la p-alkalinidad habían disminuído debido a la renovación del agua, en esta ocasión se realizaron más extracciones y relleno hasta que la

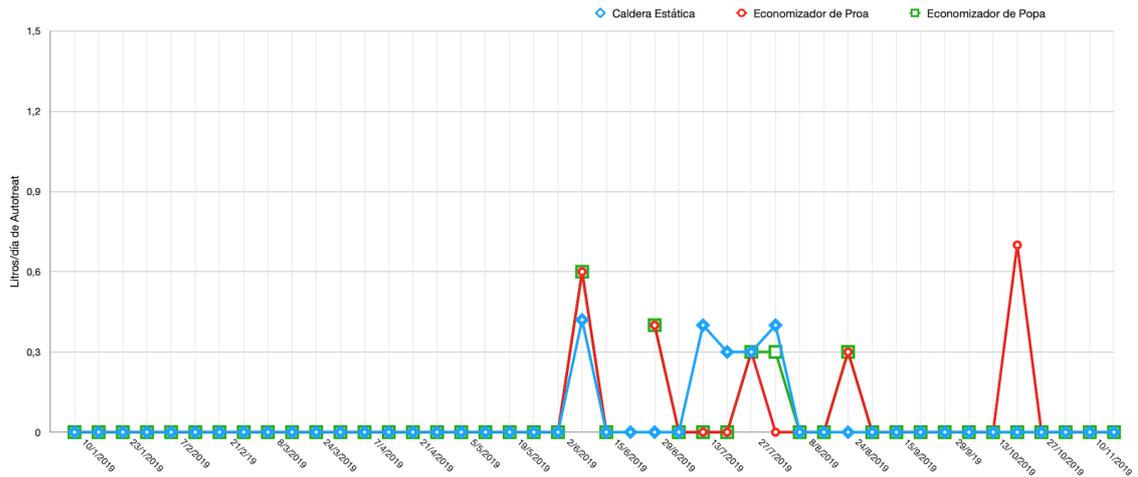


Figura 5.10: Dosificación Autotreat
Fuente: Autoría propia

p-alcalinidad llega a unos valores similares a los que se manejaban previo a las contaminaciones del agua de caldera.

Durante el mes de octubre y noviembre sufrirá alteraciones en los valores de p-alcalinidad causadas por las constantes extracciones e introducciones de agua de alimentación producto de los altos valores de los cloruros anteriormente mencionados.

Se observa una reciprocidad en el comportamiento de los valores de la p-alcalinidad y el pH, visible en el descenso de ambos valores durante algunas semanas de septiembre, octubre y noviembre.

Se dosifica Autotreat en el economizador de proa en la primera y penúltima semana de junio y a mediados del mes de julio y agosto. Con las dosificaciones de junio se produce un aumento muy significativo en las ppm de p-alcalinidad (gráfica 5.8). Esta mejora en los valores se ve truncada por la contaminación del agua de alimentación a causa de la filtración de agua con un índice de cloruros más alto de lo debido. Coincide también el aumento de pH en el economizador de proa con la dosificación de Autotreat.

Se dosifica Autotreat 0,6 l/día en el economizador de popa durante la primera semana de junio y 0,4 l/día durante la tercera semana. Resultado de estas dosificaciones aumenta la p-alcalinidad hasta los 280 ppm. También aumenta el pH hasta 11. En las dos últimas semanas de julio se dosifican 0,3 l/día, aumentando y manteniendo los valores de p-alcalinidad. De nuevo en este sistema se observa como se comporta antagónicamente los valores de la p-alcalinidad y los cloruros fruto de la contaminación.

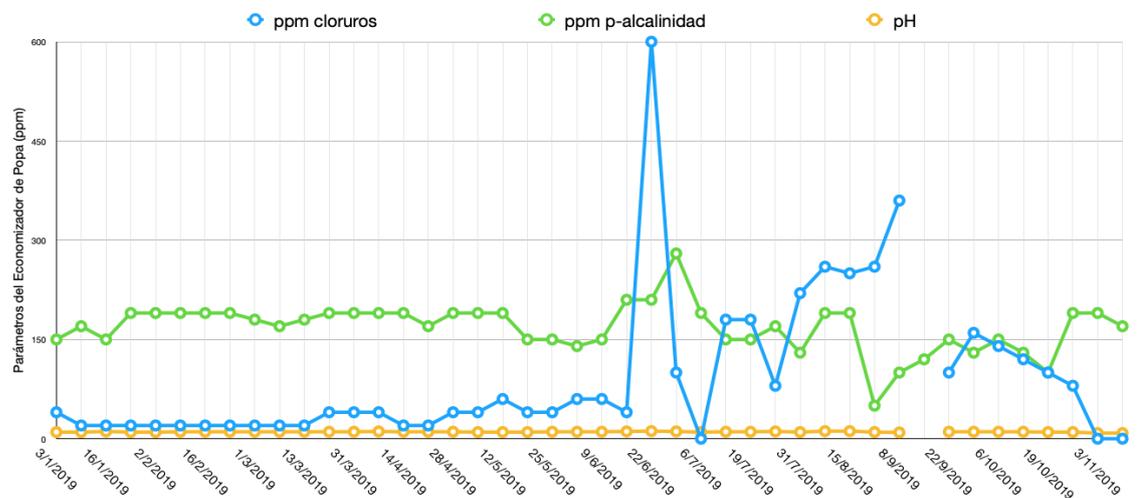


Figura 5.11: Evolución parámetros en economizador de popa
Fuente: Autoría propia

5.2.4 Extracciones

Desde el mes de mayo han subido inexplicablemente el valor de los cloruros, tanto en el agua de los economizadores como en el agua de la caldera. En el mes de junio en la cisterna aparece por primera vez cloruros en el análisis, 50 ppm.

Durante la primera y segunda semana de septiembre se realizan dos extracciones más prolongadas de lo habitual, provocando que el nivel de la caldera disminuya hasta alcanzar la altura en la que suena la alarma de bajo nivel (figura 5.12). De esta manera los cloruros disminuyen a 80 ppm.

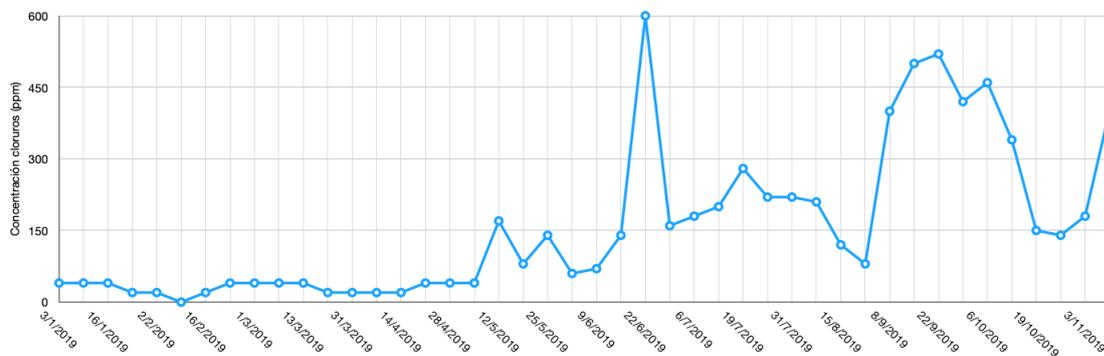


Figura 5.12: Evolución cloruros en caldera

Fuente: Autoría propia

Como resultado de esta sustitución de parte del agua de la caldera se produce el descenso de la p-alcalinidad, siendo necesario dosificar Autotreat para contrarrestar el problema.

En las semanas siguientes se extraccionan los economizadores por los altos niveles de los cloruros (figuras 5.13 y 5.14).

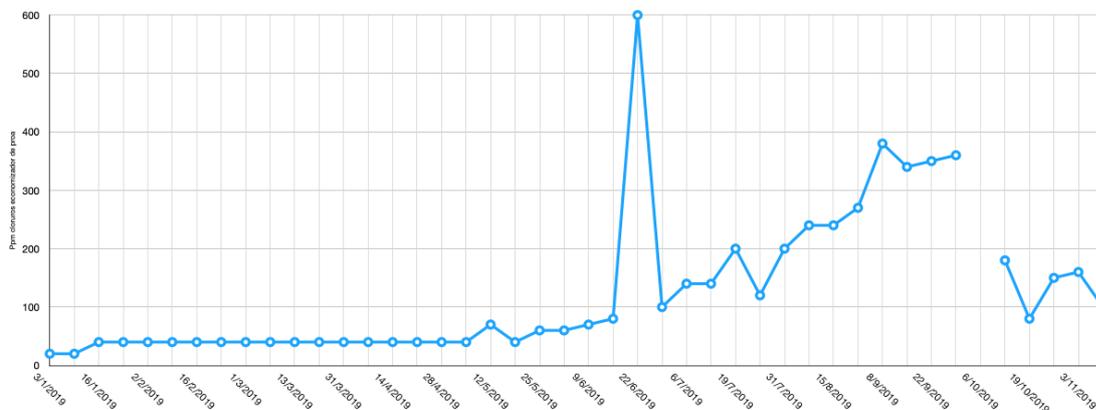


Figura 5.13: Evolución cloruros en economizador de proa

Fuente: Autoría propia

En el análisis correspondiente a la primera semana de septiembre (figura 5.12), los resultados muestran que la caldera está contaminada. Se observa que la tubería que se dirige hacia el costado no se calienta a la temperatura debida cuando se extraccionan los economizadores, concluyendo que la válvula de extracción de superficie de la caldera pierde y el agua de los economizadores se cuele en la caldera.

Se extraccionan los economizadores para mejorar la calidad del agua hasta que esté lo suficientemente bien como para que no contamine el agua de la caldera. El agua se aclara, pero los cloruros no bajan. Pasados 3 días vuelve a analizarse la caldera, el agua es de color marrón intenso y los cloruros superan las 300 ppm, suponiéndose a que es debido a la extracción anterior realizada en los economizadores. El análisis de cisterna esta vez refleja 0 ppm de cloro. Se planea cambiar la válvula de extracción de superficie de la caldera o en su defecto, instalar una chapaleta para dejarla

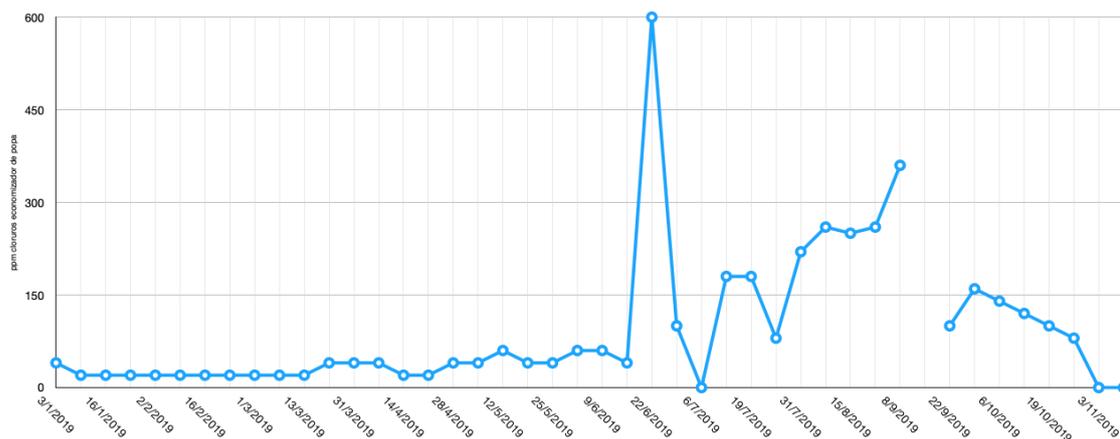


Figura 5.14: Evolución cloruros en economizador de popa

Fuente: Autoría propia

ciega. Igualmente, se seguirá extraccionando la caldera y añadiendo tratamiento químico aunque se pierda, para procurar que la caldera trabaje con el agua más adecuada posible.

Por otra parte, en paradas del buque que lo permitan, se vaciará completamente primero un eco, para llenarlo con agua destilada más química, y en la siguiente parada se realizará en el otro economizador. Posteriormente, se extraccionará la caldera poco a poco y progresivamente todo el circuito vaya recuperando los parámetros adecuado de trabajo.

A mediados del mes de septiembre se vacía el economizador de popa. Se intentó llenarlo en sucesivas ocasiones con agua destilada pero no se conseguía su completo llenado. Se opta por interrumpir los llenados y solicitar la ayuda de un taller externo. Se descubre que un tubo se encuentra picado. Se suelda correctamente y se rellena con agua destilada más el tratamiento químico adecuado. Los primeros resultados de los análisis tras la reparación muestran un contenido de cloruros en el economizador de popa entre 100 ppm y 160 ppm (figura 5.14). En las sucesivas semanas se realizan extracciones, llegando a quedar la concentración de cloruros en 0 ppm. Este valor es un dato curioso puesto que los economizadores siempre tienen un pequeño contenido de cloruros puesto que no se utiliza agua proveniente directamente del servicio de agua destilada.

6 Conclusiones

1. Es muy importante la buena conservación de la caldera y la vigilancia concienzuda del estado de sus válvulas, niveles y conexiones en general para mantener la calidad del agua de calderas. En este caso se ve reflejado por una contaminación de cloruros en la caldera debido a una válvula en mal estado. Esto podría evitarse con una buena planificación de mantenimiento necesario en la caldera para que no se produzcan perturbaciones ni retrasos en los horarios y rutas del buque.
2. Se debería analizar toda la gama de parámetros que permite el kit SPECTRAPAK 311: los análisis de fosfatos -con influencia en el pH o la alcalinidad a la hora de evitar la fragilidad- y de concentración de hidracina -esencial para controlar la corrosión por oxígeno disuelto- no se realizan durante el periodo estudiado.
3. La instalación de un controlador de purgas permitiría evitar el desperdicio de agua y de productos químicos dosificados. También facilitaría una Tasa de Purga adecuada para cada momento, liberando a un operario de esta tarea repetitiva.
4. La normativa de aplicación sobre las calderas pirotubulares a bordo varía en función de la sociedad de clasificación a la que pertenece cada barco. Parece conveniente disponer de unas normas homogéneas a nivel europeo en el sector marítimo, lo que quizás eliminase la arbitrariedad a la hora del seguimiento de la condición del agua de calderas

Anexos

A Dimensiones de la caldera

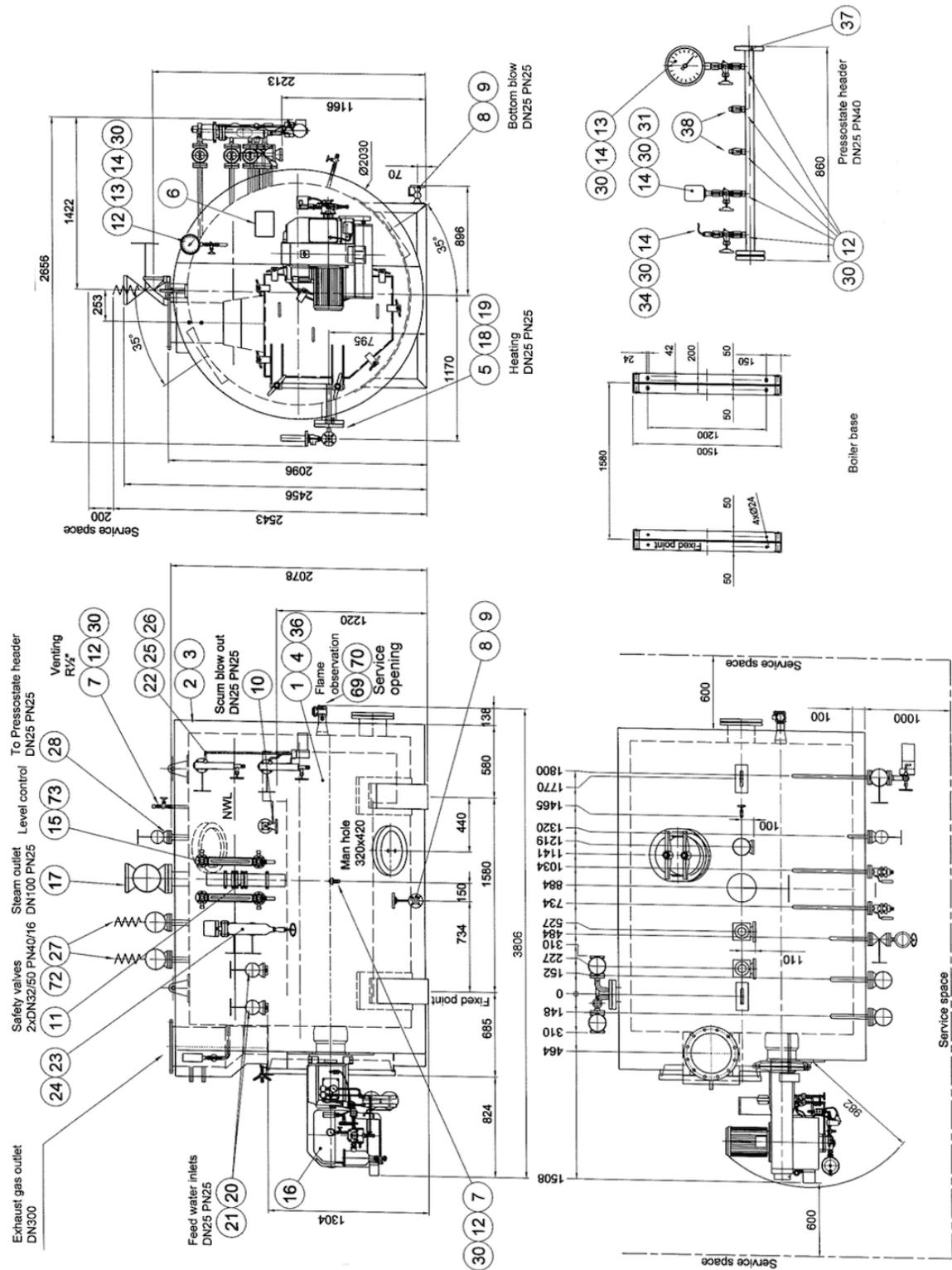


Figura A.1: Dimensiones de la caldera

Fuente: AALBORG INDUSTRIES

Position	Name	Position	Name
1	Pressure parts	20	Globe valve, angle
2	Mineral wool KOVM-100	21	Check valve, wafer type
3	Steel plate	22	Water level DP unit
4	Turbulato	23	Check valve, wafer type
5	Heating coil	24	Globe valve, straight
6	Shield for pressure vessel	25	Globe valve, straight
7	Cock	26	Globe valve, straight
8	Globe valve, straight, non return	27	Water level limiter
9	Ball valve	28	Globe valve, angle
10	Globe valve, angle, non-return	30	Sealing ring
11	Assembly of water level marks	31	Pressure switches
12	Clamping socket	34	Pressure transmitter
13	Pressure gauge, glyserine filled	36	Pipe connections
14	Cock for pressure gauge	37	Pressostate leader
15	Level indicator	38	Plug
16	Oil burner	69	Flame observation cooling
17	Globe valve, straight, non return	70	Flame control valve
18	Globe valve, non return	72	Remote pull for safety valve
19	Safety valve	73	Remote pull for water level gauge

B Características de la caldera

Boiler type	Oil fired boiler	Max. allowable working pressure	9 bar
Boiler model	UNEX BH	Feed water temperature, layout	60 °C
Test pressure	13,5 bar	Min. calorific value of diesel oil	42 200 kJ/kg
Protection of boiler body	Silver (RAL9006)	Min. viscosity of diesel oil	3 cSt at 40 °C
Insulation thickness	100 mm	Max. viscosity of diesel oil	12 cSt at 15 °C
Height to smoke outlet	2,096 m	Density of diesel oil	900 kg/m ³ at 15 °C
Width incl. insulation	2,656 m	Fuel oil temperature before preheater	60 °C
Weight of boiler unit excl. water	5 429 kg	Fuel oil viscosity at burner inlet	12-14 cSt
Steam output per included boiler	1500 kg/h	Fuel oil temperature at burner inlet	145 °C
Working pressure	7 bar	Air consumption at 100 % load	1 850 m ³ /h
Working temperature	170 °C	Flue gas flow	3950 m ³ /h

Tabla B.1: Características de la caldera pirotubular
Fuente: [2]

C Tablas y gráficas análisis

Cloruros		Alcalinidad		pH	
Volcán de Tamadaba	Análisis de Agua SSMM Cl	Volcán de Tamadaba	Análisis de Agua SSMM Al	Volcán de Tamadaba	Análisis de Agua SSMM pH
	Caldera Estática		Caldera Estática		Caldera Estática
3/1/2019	40	3/1/2019	170	3/1/2019	10
10/1/2019	40	10/1/2019	190	10/1/2019	10,5
16/1/2019	40	16/1/2019	190	16/1/2019	10
23/1/2019	20	23/1/2019	210	23/1/2019	9,5
2/2/2019	20	2/2/2019	190	2/2/2019	10
7/2/2019	0	7/2/2019	170	7/2/2019	10
16/2/2019	20	16/2/2019	190	16/2/2019	9,5
21/2/19	40	21/2/19	190	21/2/19	10
1/3/2019	40	1/3/2019	190	1/3/2019	10,5
8/3/2019	40	8/3/2019	190	8/3/2019	10
13/3/2019	40	13/3/2019	190	13/3/2019	10
24/3/2019	20	24/3/2019	190	24/3/2019	11,5
31/3/2019	20	31/3/2019	190	31/3/2019	11
7/4/2019	20	7/4/2019	170	7/4/2019	11
14/4/2019	20	14/4/2019	210	14/4/2019	11
21/4/2019	40	21/4/2019	110	21/4/2019	11
28/4/2019	40	28/4/2019	130	28/4/2019	11
5/5/2019	40	5/5/2019	130	5/5/2019	11
12/5/2019	170	12/5/2019	170	12/5/2019	10
19/5/2019	80	19/5/2019	150	19/5/2019	10
25/5/2019	140	25/5/2019	170	25/5/2019	10
2/6/2019	60	2/6/2019	130	2/6/2019	10
9/6/2019	70	9/6/2019	150	9/6/2019	11
15/6/2019	140	15/6/2019	190	15/6/2019	10,5
22/6/2019	600	22/6/2019	170	22/6/2019	10
29/6/2019	160	29/6/2019	150	29/6/2019	10
6/7/2019	180	6/7/2019	150	6/7/2019	10
13/7/2019	200	13/7/2019	110	13/7/2019	9,5
19/7/2019	280	19/7/2019	110	19/7/2019	10
27/7/2019	220	27/7/2019	110	27/7/2019	10
31/7/2019	220	31/7/2019	100	31/7/2019	10
8/8/2019	210	8/8/2019	90	8/8/2019	10
15/8/2019	120	15/8/2019	70	15/8/2019	10
24/8/2019	80	24/8/2019	30	24/8/2019	10
8/9/2019	400	8/9/2019	20	8/9/2019	7,9
15/9/2019	500	15/9/2019	170	15/9/2019	10
22/9/2019	520	22/9/2019	170	22/9/2019	10
29/9/19	420	29/9/19	130	29/9/19	9
6/10/2019	460	6/10/2019	170	6/10/2019	11
13/10/2019	340	13/10/2019	70	13/10/2019	11
19/10/2019	150	19/10/2019	50	19/10/2019	8,5
27/10/2019	140	27/10/2019	110	27/10/2019	10
3/11/2019	180	3/11/2019	110	3/11/2019	10
10/11/2019	400	10/11/2019	90	10/11/2019	9,5

Figura C.1: Tabla parámetros del agua de caldera
Fuente: Autoría propia

Cloros		Alcalinidad		pH	
Volcán de Tamadaba	Análisis de Agua SSMM CI	Volcán de Tamadaba	Análisis de Agua SSMM AI	Volcán de Tamadaba	Análisis de Agua SSMM pH
	Cisterna		Cisterna		Cisterna
3/1/2019	0	3/1/2019	0	3/1/2019	7,9
10/1/2019	0	10/1/2019	0	10/1/2019	7,4
16/1/2019	0	16/1/2019	0	16/1/2019	7,4
23/1/2019	0	23/1/2019	0	23/1/2019	8,3
2/2/2019	0	2/2/2019	0	2/2/2019	7,1
7/2/2019	0	7/2/2019	30	7/2/2019	7,9
16/2/2019	0	16/2/2019	0	16/2/2019	7,5
21/2/19	0	21/2/19	30	21/2/19	7,4
1/3/2019	0	1/3/2019	0	1/3/2019	7,5
8/3/2019	0	8/3/2019	0	8/3/2019	7,5
13/3/2019	0	13/3/2019	0	13/3/2019	7,9
24/3/2019	0	24/3/2019	0	24/3/2019	6,5
31/3/2019	0	31/3/2019	0	31/3/2019	7,4
7/4/2019	0	7/4/2019	0	7/4/2019	7,4
14/4/2019	0	14/4/2019	0	14/4/2019	7,4
21/4/2019	0	21/4/2019	0	21/4/2019	8,1
28/4/2019	0	28/4/2019	0	28/4/2019	8,1
5/5/2019	0	5/5/2019	0	5/5/2019	8,1
12/5/2019	0	12/5/2019	0	12/5/2019	6,5
19/5/2019	0	19/5/2019	0	19/5/2019	7,5
25/5/2019	0	25/5/2019	50	25/5/2019	7,5
2/6/2019	0	2/6/2019	0	2/6/2019	8
9/6/2019	0	9/6/2019	0	9/6/2019	6,5
15/6/2019	0	15/6/2019	0	15/6/2019	7,1
22/6/2019	50	22/6/2019	0	22/6/2019	6,5
29/6/2019	0	29/6/2019	0	29/6/2019	7,5
6/7/2019	0	6/7/2019	0	6/7/2019	6,5
13/7/2019	0	13/7/2019	0	13/7/2019	6,5
19/7/2019	0	19/7/2019	0	19/7/2019	6,5
27/7/2019	0	27/7/2019	0	27/7/2019	7
31/7/2019	0	31/7/2019	0	31/7/2019	7,1
8/8/2019	0	8/8/2019	0	8/8/2019	7,9
15/8/2019	0	15/8/2019	0	15/8/2019	6,5
24/8/2019	0	24/8/2019	0	24/8/2019	7,7
8/9/2019	0	8/9/2019	0	8/9/2019	8,1
15/9/2019	0	15/9/2019	0	15/9/2019	9
22/9/2019	0	22/9/2019	0	22/9/2019	9
29/9/19	0	29/9/19	0	29/9/19	8,1
6/10/2019	0	6/10/2019	0	6/10/2019	7,9
13/10/2019	40	13/10/2019	0	13/10/2019	7,7
19/10/2019	20	19/10/2019	0	19/10/2019	8,3
27/10/2019	60	27/10/2019	110	27/10/2019	9
3/11/2019	60	3/11/2019	110	3/11/2019	9
10/11/2019	20	10/11/2019	30	10/11/2019	7,4

Figura C.3: Tabla parámetros del agua de cisterna
Fuente: Autoría propia

Cloros		Alcalinidad		pH	
Volcán de Tamadaba	Análisis de Agua SSMM CI	Volcán de Tamadaba	Análisis de Agua SSMM AI	Volcán de Tamadaba	Análisis de Agua SSMM pH
	Economizador de Proa		Economizador de Proa		Economizador de Proa
3/1/2019	20	3/1/2019	130	3/1/2019	10,5
10/1/2019	20	10/1/2019	130	10/1/2019	10
16/1/2019	40	16/1/2019	170	16/1/2019	10
23/1/2019	40	23/1/2019	170	23/1/2019	10
2/2/2019	40	2/2/2019	170	2/2/2019	10
7/2/2019	40	7/2/2019	170	7/2/2019	10
16/2/2019	40	16/2/2019	170	16/2/2019	10,5
21/2/19	40	21/2/19	170	21/2/19	10
1/3/2019	40	1/3/2019	170	1/3/2019	10
8/3/2019	40	8/3/2019	170	8/3/2019	10
13/3/2019	40	13/3/2019	170	13/3/2019	10
24/3/2019	40	24/3/2019	190	24/3/2019	10,5
31/3/2019	40	31/3/2019	190	31/3/2019	10,5
7/4/2019	40	7/4/2019	190	7/4/2019	10,5
14/4/2019	40	14/4/2019	190	14/4/2019	10,5
21/4/2019	40	21/4/2019	190	21/4/2019	10,5
28/4/2019	40	28/4/2019	190	28/4/2019	10
5/5/2019	40	5/5/2019	190	5/5/2019	10
12/5/2019	70	12/5/2019	270	12/5/2019	10,5
19/5/2019	40	19/5/2019	170	19/5/2019	10
25/5/2019	60	25/5/2019	150	25/5/2019	10
2/6/2019	60	2/6/2019	140	2/6/2019	10,5
9/6/2019	70	9/6/2019	160	9/6/2019	10,5
15/6/2019	80	15/6/2019	310	15/6/2019	11,5
22/6/2019	600	22/6/2019	250	22/6/2019	11
29/6/2019	100	29/6/2019	130	29/6/2019	10
6/7/2019	140	6/7/2019	270	6/7/2019	10
13/7/2019	140	13/7/2019	250	13/7/2019	10,5
19/7/2019	200	19/7/2019	250	19/7/2019	10,5
27/7/2019	120	27/7/2019	210	27/7/2019	11
31/7/2019	200	31/7/2019	230	31/7/2019	10,5
8/8/2019	240	8/8/2019	150	8/8/2019	11
15/8/2019	240	15/8/2019	160	15/8/2019	11
24/8/2019	270	24/8/2019	50	24/8/2019	10
8/9/2019	380	8/9/2019	80	8/9/2019	10,5
15/9/2019	340	15/9/2019	100	15/9/2019	10,5
22/9/2019	350	22/9/2019	150	22/9/2019	10
29/9/19	360	29/9/19	130	29/9/19	10
6/10/2019	-	6/10/2019	100	6/10/2019	-
13/10/2019	180	13/10/2019	110	13/10/2019	10
19/10/2019	80	19/10/2019	70	19/10/2019	8,5
27/10/2019	150	27/10/2019	70	27/10/2019	10
3/11/2019	160	3/11/2019	70	3/11/2019	10
10/11/2019	100	10/11/2019	70	10/11/2019	8,5

Figura C.5: Tabla parámetros del agua del economizador de proa
Fuente: Autoría propia

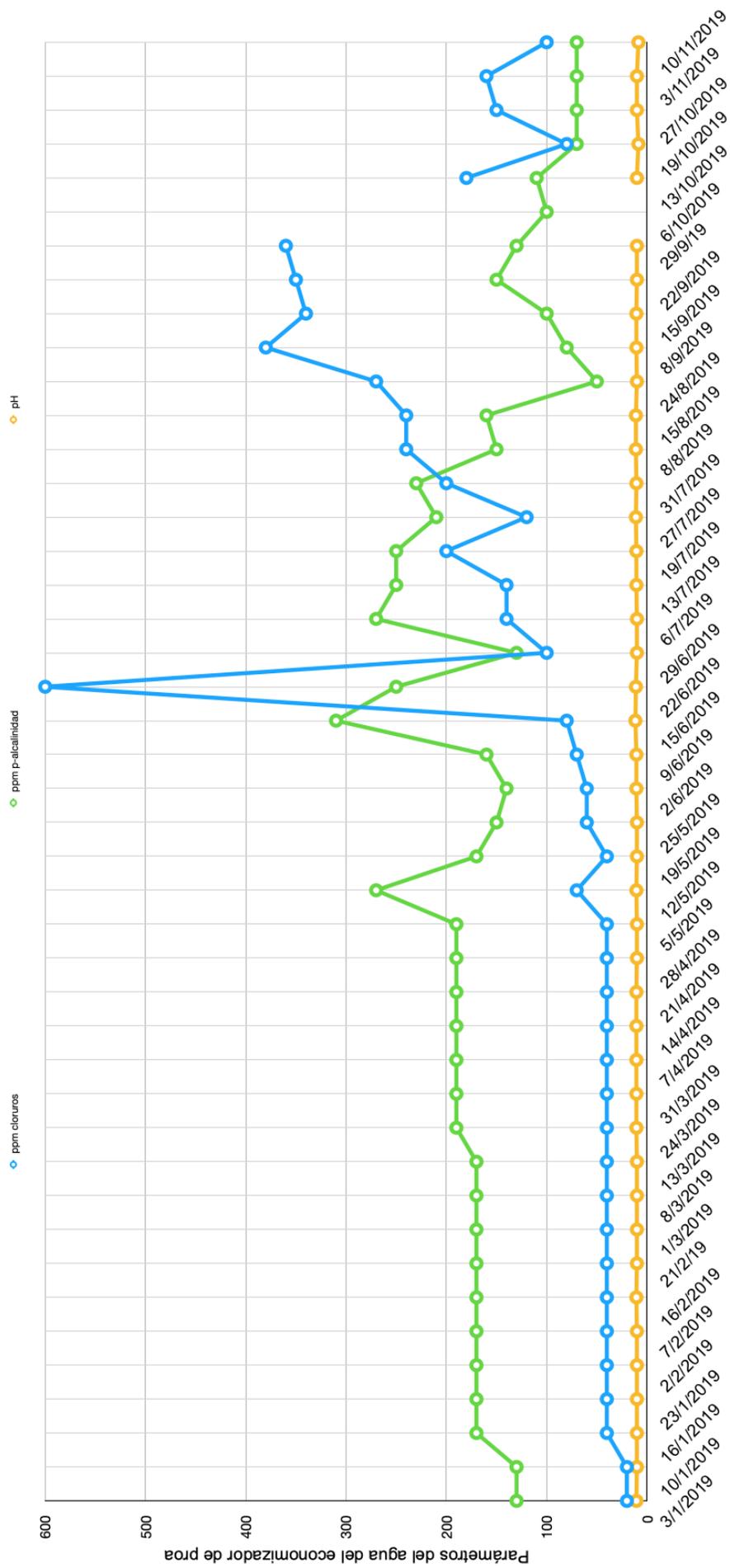


Figura C.6: Gráfica parámetros del agua del economizador de proa
Fuente: Autoría propia

Cloros		Alcalinidad		pH	
Volcán de Tamadaba	Análisis de Agua SSMM CI	Volcán de Tamadaba	Análisis de Agua SSMM AI	Volcán de Tamadaba	Análisis de Agua SSMM pH
	Economizador de Popa		Economizador de Popa		Economizador de Popa
3/1/2019	40	3/1/2019	150	3/1/2019	10
10/1/2019	20	10/1/2019	170	10/1/2019	10
16/1/2019	20	16/1/2019	150	16/1/2019	11
23/1/2019	20	23/1/2019	190	23/1/2019	10
2/2/2019	20	2/2/2019	190	2/2/2019	10
7/2/2019	20	7/2/2019	190	7/2/2019	10,5
16/2/2019	20	16/2/2019	190	16/2/2019	10,5
21/2/19	20	21/2/19	190	21/2/19	10,5
1/3/2019	20	1/3/2019	180	1/3/2019	10,5
8/3/2019	20	8/3/2019	170	8/3/2019	10,5
13/3/2019	20	13/3/2019	180	13/3/2019	10,5
24/3/2019	40	24/3/2019	190	24/3/2019	10,5
31/3/2019	40	31/3/2019	190	31/3/2019	10,5
7/4/2019	40	7/4/2019	190	7/4/2019	11
14/4/2019	20	14/4/2019	190	14/4/2019	10,5
21/4/2019	20	21/4/2019	170	21/4/2019	10,5
28/4/2019	40	28/4/2019	190	28/4/2019	10,5
5/5/2019	40	5/5/2019	190	5/5/2019	10
12/5/2019	60	12/5/2019	190	12/5/2019	10
19/5/2019	40	19/5/2019	150	19/5/2019	10
25/5/2019	40	25/5/2019	150	25/5/2019	10,5
2/6/2019	60	2/6/2019	140	2/6/2019	10,5
9/6/2019	60	9/6/2019	150	9/6/2019	10,5
15/6/2019	40	15/6/2019	210	15/6/2019	11
22/6/2019	600	22/6/2019	210	22/6/2019	11,5
29/6/2019	100	29/6/2019	280	29/6/2019	11
6/7/2019	0	6/7/2019	190	6/7/2019	10
13/7/2019	180	13/7/2019	150	13/7/2019	10,5
19/7/2019	180	19/7/2019	150	19/7/2019	10,5
27/7/2019	80	27/7/2019	170	27/7/2019	11
31/7/2019	220	31/7/2019	130	31/7/2019	10
8/8/2019	260	8/8/2019	190	8/8/2019	11,5
15/8/2019	250	15/8/2019	190	15/8/2019	11,5
24/8/2019	260	24/8/2019	50	24/8/2019	10
8/9/2019	360	8/9/2019	100	8/9/2019	9,5
15/9/2019	-	15/9/2019	120	15/9/2019	-
22/9/2019	100	22/9/2019	150	22/9/2019	10,5
29/9/19	160	29/9/19	130	29/9/19	10,5
6/10/2019	140	6/10/2019	150	6/10/2019	10,5
13/10/2019	120	13/10/2019	130	13/10/2019	10,5
19/10/2019	100	19/10/2019	100	19/10/2019	10
27/10/2019	80	27/10/2019	190	27/10/2019	10
3/11/2019	0	3/11/2019	190	3/11/2019	8,5
10/11/2019	0	10/11/2019	170	10/11/2019	8,5

Figura C.7: Tabla parámetros del agua del economizador de popa

Fuente: Autoría propia

Cloros		pH	
Volcán de Tamadaba	Análisis de Agua SSMM Cl	Volcán de Tamadaba	Análisis de Agua SSMM pH
	Agua Destilada		Agua Destilada
3/1/2019	0	3/1/2019	6,5
10/1/2019	0	10/1/2019	6,5
16/1/2019	0	16/1/2019	6,5
23/1/2019	0	23/1/2019	6,5
2/2/2019	0	2/2/2019	6,5
7/2/2019	0	7/2/2019	6,5
16/2/2019	0	16/2/2019	6,5
21/2/19	0	21/2/19	6,5
1/3/2019	0	1/3/2019	6,5
8/3/2019	0	8/3/2019	6,5
13/3/2019	0	13/3/2019	6,5
24/3/2019	0	24/3/2019	6,5
31/3/2019	0	31/3/2019	6,5
7/4/2019	0	7/4/2019	6,5
14/4/2019	0	14/4/2019	6,5
21/4/2019	0	21/4/2019	6,5
28/4/2019	0	28/4/2019	6,5
5/5/2019	0	5/5/2019	6,5
12/5/2019	0	12/5/2019	6
19/5/2019	20	19/5/2019	6,5
25/5/2019	0	25/5/2019	6,5
2/6/2019	20	2/6/2019	6,5
9/6/2019	0	9/6/2019	6,5
15/6/2019	0	15/6/2019	6,5
22/6/2019	0	22/6/2019	6,5
29/6/2019	0	29/6/2019	7
6/7/2019	0	6/7/2019	6,5
13/7/2019	0	13/7/2019	6,5
19/7/2019	0	19/7/2019	6,5
27/7/2019	0	27/7/2019	7
31/7/2019	0	31/7/2019	7,1
8/8/2019	0	8/8/2019	6,5
15/8/2019	0	15/8/2019	6,5
24/8/2019	0	24/8/2019	6,5
8/9/2019	0	8/9/2019	6,5
15/9/2019	0	15/9/2019	6,5
22/9/2019	0	22/9/2019	6,5
29/9/19	0	29/9/19	6,5
6/10/2019	0	6/10/2019	6,5
13/10/2019	0	13/10/2019	6,5
19/10/2019	0	19/10/2019	6,5
27/10/2019	0	27/10/2019	6,5
3/11/2019	0	3/11/2019	6,5
10/11/2019	0	10/11/2019	6,5

Figura C.9: Tabla parámetros del agua destilada
Fuente: Autoría propia

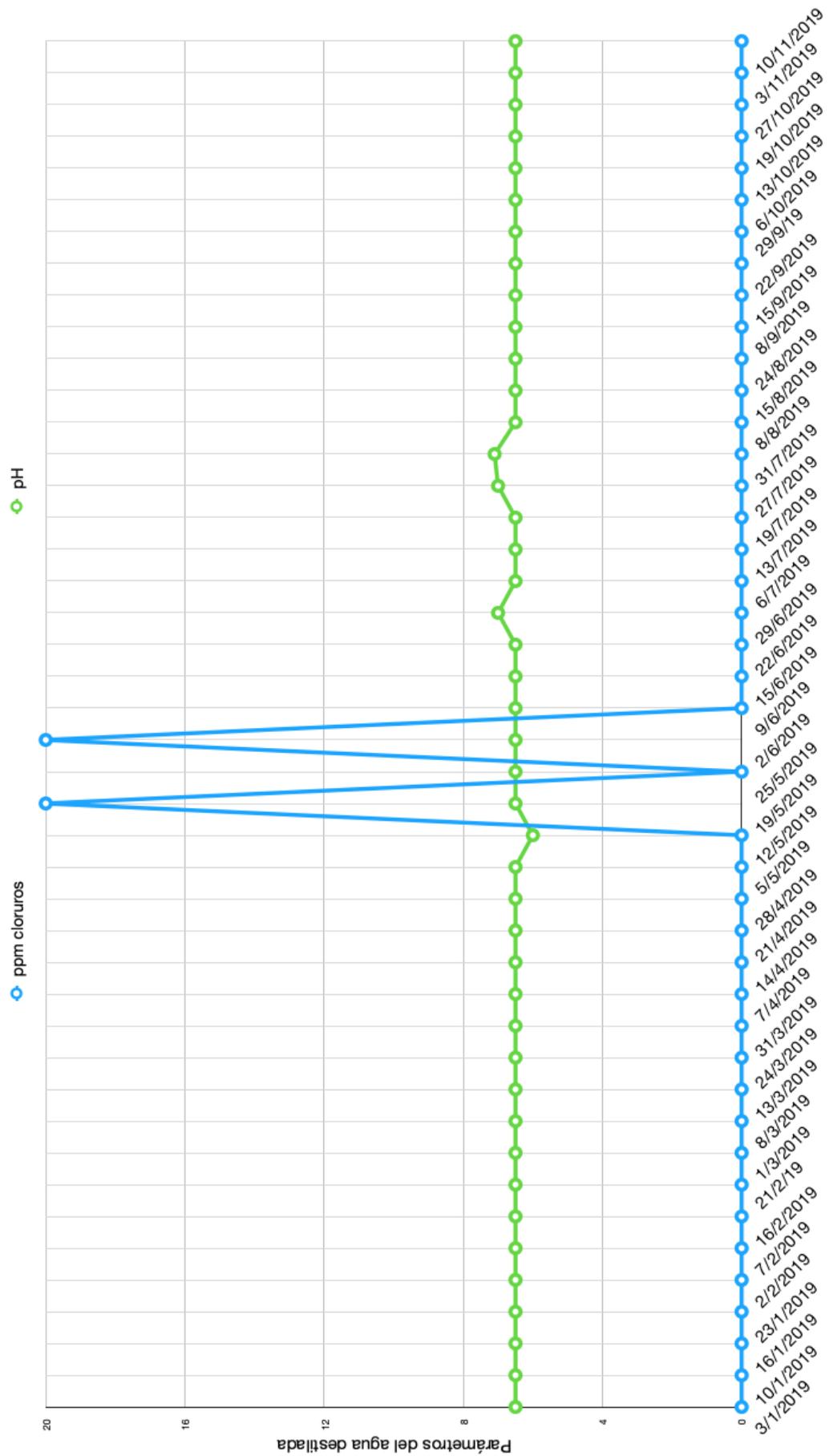


Figura C.10: Gráfica parámetros del agua destilada
Fuente: Autoría propia

Bibliografía

- [1] AALBORG, I., *Operation and maintenance MISSION™ XS-2V boiler*.
- [2] AALBORG, I., *Operation and maintenance steam boiler UNEX BH 1500 kg/h*.
- [3] FLANAGAN, G., *Feed Water Systems and Treatment*.
- [4] F.RAMIREZ. URL <http://www.elaguapotable.com /acondicionamiento.htm>, Mayo 2020.
- [5] GEFICO, E., *Manual de Instrucciones AQ-16/20A con válvulas de retención*.
- [6] HJBARRERAS. URL <http://www.hjbarreras.es/?page=lis-ferries&idp=33>, Marzo 2020.
- [7] IDEAM. URL <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Alcalinidad+total+en+agua+por+electrometrpdf/dd9a3610-8ff7-49bc-97eb-5306362466df>, Junio 2020.
- [8] KOHAN, A. L., *Manual de calderas*.
- [9] L. GERMAIN, J. R., L. COLAS, *Tratamiento de las aguas, redes de distribución de aguas potables e industriales, alimentación de calderas de vapor y circuitos de refrigeración*.
- [10] LENNTECH. URL <https://www.lenntech.es/zeolitas-aplicaciones.htm>, Mayo 2020.
- [11] LENNTECH. URL <https://www.lenntech.com/boiler/acidic-corrosion.htm>, Mayo 2020.
- [12] LENNTECH. URL <https://www.lenntech.com/applications/process/boiler/oxygen-attack.htm>, Mayo 2020.
- [13] LENNTECH. URL <https://www.lenntech.com/applications /process/boiler /carbon-dioxide-attack.htm>, Mayo 2020.
- [14] LENNTECH. URL <https://www.lenntech.com/applications /process/boiler /corrosion.htm>, Mayo 2020.
- [15] LENNTECH. URL <https://www.lenntech.es/aplicaciones /proceso/caldera /contactores-de-membrana.htm>, Mayo 2020.
- [16] LENNTECH. URL <https://www.lenntech.com/applications /process/boiler /foaming-priming.htm>, Mayo 2020.
- [17] MARGARITA JOSEFA LAPIDO RODRÍGUEZ, J. A. M. M., *Funcionamiento y pérdidas en calderas pirotubulares. Estudio de casos*.
- [18] MORENO, R. URL <https://tratamientodeaguass.com /tratamiento-de-aguas -para-calderas/>, Mayo 2020.
- [19] SANTACRUZMIPUERTO. URL <https://santacruzzipuerto.com/noticias/4/339>, Mayo 2020.
- [20] SARCO, S., *Enfriador de muestras Spirax Sarco*.

-
- [21] TRATAMIENTODEAGUAS. URL <https://tratamientodeaguass.com/polimeros-para-calderas/>, Mayo 2020.
- [22] WILHELMSSEN. URL <https://www.wilhelmsen.com/product-catalogue/products/marine-chemicals/test-kits-and-reagents/water-test-kits/spectrapak-311/?epieditmode=true>, Marzo 2020.
- [23] WILHELMSSEN, S. S. URL <https://www.wilhelmsen.com>.
- [24] WORLDVECTORLOGO. URL <https://worldvectorlogo.com/es/logo/naviera-armas>, Mayo 2020.
- [25] WÄRTSILÄ, F. O., *Manual de instrucciones Wärtsilä 12V46*.