

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA

Sección de Náutica, Máquinas y Radioelectrónica Naval

**Trabajo de Fin de Grado
de Tecnologías Marinas**

**Estudio termográfico de fallos y pérdidas térmicas
en instalaciones marítimas**

Presentado por

Samuel Gutiérrez Afonso

Santa Cruz de Tenerife, 13 de marzo de 2024

Autorización

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

Samuel Gutiérrez Afonso, ha realizado bajo mi dirección el trabajo de fin de grado titulado: *Estudio termográfico de fallos y pérdidas térmicas en instalaciones marítimas*.

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 13 de marzo de 2024.

Fdo.: Pedro Rivero Rodríguez
-Tutor del trabajo-

Resumen

Este trabajo se enmarca en el estudio y uso de la termografía para la obtención de imágenes térmicas de distintos componentes del buque. La finalidad no es otra, más que detectar distintos puntos térmicos donde el funcionamiento no sea el idóneo, y realizar un análisis de causa de fallos e intentar obtener posibles soluciones.

Se recopila información sobre el origen de la termografía, sobre el uso de las cámaras termográficas y la interpretación de los valores y representaciones que estas ofrecen, con el objetivo de obtener el mejor rendimiento del sistema.

Para identificar fallos se ha tenido que analizar los sistemas durante su recorrido para poder observar si existe algún punto crítico, susceptible a fallo. Una vez detectados los fallos, se han capturado los problemas y realizado mediciones para posteriormente poder realizar los cálculos de pérdida de energía térmica por radiación y convección natural que estos componentes sufren, con el fin de mejorar o subsanar tales problemas.

En aquel supuesto, en que se ha localizado una posible solución al problema, se hace una comprobación a posteriori, de las diferencias térmicas y se valora la efectividad de la solución o la posibilidad de resolverlo de otra forma más eficaz.

Con las capturas y parámetros obtenidos se estudian las mejoras que son viables en cada instalación, con la finalidad de mejorar el rendimiento energético de los distintos sistemas.

Abstract

This work carry out on the study and use of the thermography to obtain thermal images of different components of the ship. The purpose is to find different thermal points where the operation is not ideal and to analyse the failures and try to obtain possible solutions.

Information is collected on the origin of the thermography and on the use of thermal imaging cameras and the interpretation of the values and representations they offer, with the aim of obtaining the best performance of the system.

In order to identify faults, the systems had to be analysed during the journey to be able to observe if there is any critical point susceptible to failure. Once the faults have been detected, the problems have been captured and measurements have been made to be able to calculate the loss of thermal energy dur to radiation and natural convection that this components suffer, in order to improve or correct the problems.

In the event that a possible solution to the problems has been located, it is made a later check of the thermal differences and the effectiveness of the solution or the possibility of solving ir in a more efficient way is assessed.

With the captures and settings obtained, the improvements that are viable in each installation are studied, in order to improve the energy efficiency of the different systems.

Índice general

Lista de figuras	XII
Lista de tablas	XIII
1. Revisión y Antecedentes	1
2. Objetivos	3
3. Metodología	5
3.1. Instrumentos de medición empleados	5
3.2. Descripción de los parámetros reflejados en la pantalla	5
3.3. Parámetros que hay que ajustar para una medición eficiente	7
3.4. Elementos del primer sistema	10
3.5. Elementos del segundo sistema	11
3.6. Elementos del tercer sistema	13
3.7. Elementos del cuarto sistema	14
3.8. Elementos del quinto sistema	15
3.9. Detección de anomalías	17
3.10. Cálculo del calor transmitido por conductividad térmica	18
3.11. Cálculo del área	18
3.12. Cálculo de la potencia radiada	19
3.13. Cálculo de la potencia neta radiada	19
3.14. Cálculo del porcentaje de pérdida de calor evitada	20
3.15. Cálculo del calor transmitido por convección natural	20
4. Anomalías encontradas y cálculo de pérdidas térmicas	23
4.1. Aire acondicionado del control de máquinas	23
4.2. Grupos de frío del aire acondicionado del pasaje	26
4.3. Equipos de frío de la gambuza	30
4.4. Aire acondicionado del control de máquinas, 2º problema	32
4.5. Gambuza de congelado	33
4.6. Guardacalor de los economizadores defectuosos	35
4.7. Problemas en el turbocompresor y en las protecciones del colector de escape	42

5. Conclusiones	47
Anexos	51
A. Imágenes de los sistemas	51
Bibliografía	51

Índice de figuras

3.1. Cámara PCE-TC 30N	6
3.2. Valores en la pantalla	7
3.3. Negro, Blanco, Frío, Hierro y Arco iris	8
3.4. Ajuste de la emisividad	9
3.5. Compresor de aire acondicionado del control	10
3.6. Compresores de aire acondicionado de pasaje	12
3.7. Equipo frigorífico de las gambuzas	14
3.8. Economizador piro tubular	15
3.9. Turbo compresor ABB	17
3.10. Enfriador de aire de carga	18
3.11. Cómo medir los radios	19
4.1. Machete del Control de Máquinas	24
4.2. Compresor Congelado	24
4.3. Evaporador y Válvula de expansión termostática congelados	25
4.4. Ventilador agrietado y sin aletas	26
4.5. Aislante deteriorado 1	27
4.6. Aislante deteriorado 2	28
4.7. Aislante reparado	29
4.8. Con recalentamiento	30
4.9. Sin recalentamiento	31
4.10. Recalentamiento por el filtro separador de aceite	31
4.11. Condensador caliente	33
4.12. Temperaturas normales de funcionamiento	34
4.13. Hielo por la introducción de humedad	34
4.14. Junta de sellado trabada en la puerta	35
4.15. Chapa galvanizada.	36
4.16. Grieta en la chapa.	36
4.17. Desperfectos eco de popa.	37
4.18. Tapas de economizadores.	38
4.19. Pérdida en el turbo 4.	43

4.20. Waste Gate anulada y sin by-pass	44
4.21. Esquema del turbo	45
4.22. Tapas de protección del colector	46
A.1. Sala de aire acondicionado del pasaje	51
A.2. Temperatura de las tapas del economizador de proa	52
A.3. Temperatura de las tapas del economizador de popa	53
A.4. Temperatura ambiente de la sala de economizadores	54
A.5. Grupo de frío de aire acondicionado del control	54
A.6. Compresor congelado por fallo en el ventilador	55
A.7. Hielo en la gambuza de congelado	55
A.8. Sala de los economizadores	56

Índice de tablas

3.1. Características técnicas	6
3.2. Emisividad de los materiales	10
4.1. Diferencias de temperaturas sin y con aislante	32
4.2. Temperatura irradiada por las tapas de los economizadores	37
4.3. Potencia neta perdida por cada tapa	39
4.4. Calor transmitido por convección natural de los dos economizadores	42

1 Revisión y Antecedentes

La termografía se basa en la medición de la radiación infrarroja, la cual es imperceptible para ser detectada por el ojo humano. Esta técnica permite obtener las distintas temperaturas de un cuerpo sin contacto.

La temperatura se detecta en distintos rangos, los cuales se reflejan según unas paletas de colores que van desde el violeta hasta el rojo. Este cambio de color es de manera progresiva, y va en función de la radiación detectada. [1]

La radiación térmica fue descubierta por el astrónomo Wilhelm Herschel en los comienzos del siglo XIX. Este descubrimiento fue de forma inesperada, pues se obtuvo mientras se realizaban pruebas con prismas ópticos para poder dividir los colores según sus diferentes rangos de temperatura.

Las primeras visualizaciones de los diferentes rangos de temperaturas que se median con el infrarrojo las obtuvo John Herschel, hijo del descubridor. Esto fue en 1840, para ello utilizó una fina capa de aceite, y estudio su evaporación al impactar los rayos de luz en ella. Se podía apreciar la imagen térmica sobre la superficie reflejada del aceite en forma de espectro visible. John pudo reflejar en el papel esta imagen térmica por primera vez, y pese a que era una representación vulgar, era la primera representación termográfica. [11]

Años más adelante, en 1880, Langley inventó el bolómetro, que consistía en una lámina oscurecida de platino unida a un puente de Wheatstone sobre la que incidía la radiación infrarroja. Esto permitió detectar el calor que desprendía un animal voluminoso a cientos de metros.

No fue hasta 1920 donde se empezó a medir esta radiación calorífica que emite un cuerpo por la energía que contiene, esta la libera en forma de temperatura. [14]

La termografía se empezó a aplicar principalmente en el ámbito militar, durante la Segunda Guerra Mundial, más concretamente para el lanzamiento de misiles guiados, los cuales disponían de sensores de temperatura para dirigirse al punto caliente, el objetivo. También permitía a los militares detectar puntos calientes, como por ejemplo a los contrarios en la oscuridad de la noche.

Las primeras cámaras termográficas eran muy voluminosas, difíciles de transportar, no como las que podemos encontrar hoy en día, que pueden ser incluso de bolsillo. En los años 80 aparecieron las primeras cámaras termográficas de menor tamaño y más manejables. [1]

En los años 90, con los avances tecnológicos de la época, se empezaron a comercializar las primeras cámaras manejables tanto para el ámbito militar como civil.

Con las mejoras tecnológicas se abarató el coste de producción, por lo que eran algo más alcanzables para la economía de la época. Estas máquinas nos permitían visualizar distintos objetos en la oscuridad, entre la niebla o el humo, bajo el suelo e incluso localizar un iceberg. [11]

2 Objetivos

Se va a realizar un trabajo de fin de grado, en el cual se tomarán mediciones de las pérdidas térmicas de los sistemas frigoríficos, de los generadores de vapor, de los de aire de carga y gases de escape. La finalidad es intentar mejorar la eficiencia energética, o en su defecto saber dónde se producen las pérdidas de energía térmica para en el futuro poder trabajar sobre ellas y realizar progresos energéticos.

Los objetivos principales de este trabajo son:

- Estudiar los componentes principales de la instalación.
- Estudiar el medio y cómo afecta a las pérdidas térmicas.
- Obtener mediante capturas térmicas las temperaturas anormales de funcionamiento y las normales una vez subsanados los problemas que así procedan.
- Calcular las pérdidas térmicas por radiación y convección detectadas en los diferentes componentes de los sistemas del buque.
- Obtener soluciones para minimizar esas pérdidas y mejorar el rendimiento energético en los supuestos que así lo permitan.

3 Metodología

Para poder realizar las mediciones de las pérdidas térmicas con la cámara, se requiere tener en cuenta una serie de pautas para que sea lo más satisfactoria posible. También se tiene que realizar algunos cálculos de forma matemática para que se obtengan numéricamente las pérdidas que se producen en los distintos sistemas que sea necesario.

Uno de los ajustes más importantes que se tiene que realizar a la hora de tomar mediciones son los valores de la emisividad en función del tipo de superficie, al igual que saber elegir la paleta de colores que más resalte los cambios térmicos.

3.1 Instrumentos de medición empleados

Para realizar este trabajo se necesita hacer uso de una cámara termográfica, esta es de la marca PCE, que a continuación se expondrán sus principales funciones y características:

- La marca de la cámara es la PCE instruments, más concretamente el modelo PCE-TC 30N. Esta es capaz de transformar la energía emitida por un material en una imagen que se obtiene en la pantalla, la nitidez dependerá de la paleta de colores y en función de la temperatura.
- En la figura 3.1 se puede apreciar una imagen de la cámara.
- Por otro lado, en la tabla 3.1 se pueden apreciar las características técnicas de dicha cámara.
- También se pueden apreciar en la figura 3.2 los valores reflejados en la pantalla y una descripción de cada uno de ellos.

3.2 Descripción de los parámetros reflejados en la pantalla

- En la pantalla se puede obtener una variedad de colores según la paleta elegida, y las zonas en las que se esté incidiendo.
Esta cámara dispone de 5 paletas de colores distintas, se elige en función de la apreciación de cada persona de lo que se esté midiendo, del tipo de superficie y del brillo, pues todo esto afecta a la hora de verse más nítido y claro en la pantalla.
Ajustando la paleta a la más que convenga, se puede obtener una visualización más clara de las diferentes escalas térmicas. También se puede distinguir las diferentes temperaturas por la intensidad de los colores, que puede ser temperaturas más bajas o altas.
A la derecha de la pantalla se muestra la escala de colores como se aprecia en la figura 3.2, la cual en la parte más baja están los colores que indican las menores temperaturas y en la alta las mayores.
- Se dispone de la temperatura máxima y mínima en la parte inferior izquierda de la pantalla, y también en la imagen, siendo una numeración de color rojo la máxima y de color verde la mínima.
- La indicación de temperatura en el centro de la imagen de lo que se está midiendo se ve en la parte superior izquierda y también se refleja de color blanco en el centro.
- En el centro arriba se observa el grado de emisividad que se encuentra seleccionado.



Figura 3.1: Cámara PCE-TC 30N

Fuente: [9]

Especificaciones ópticas

Rango de temperatura:	-20 ... + 450 °C (-4 °F ... 842 °F)
Precisión:	±2°C o ±2° % del valor medio hasta 300°C ±5 °C del valor medio a > 300°C
Campo visual (FOV)	35 ° x 26 °
Distancia mínima	0,15 m
Resolución	160 x 120 pixeles
Sensibilidad térmica	0,07 °C
Longitud de honda	8 ... 14 µm
Enfoque	Enfoque fijo
Calibración de la medición	Auto
Número de Spots	3
Número de rangos de medición	1
Memoria	
Memoria	Tarjeta SD integrada de 3 Gb para más de 20000 imágenes
Formato de imagen	JPG
Configuración	
Operación de configuración	Desconexión automática, Intensidad (brillo), idioma, unidad de temperatura, Hora, Spot
Idioma	Alemán, Inglés, Chino, italiano
Alimentación	
Acumulador	Acumulador interno, recargable, aprox.2800 mAh
Tiempo de funcionamiento	2 ... 3 horas
Alimentación	100 ... 240 CVAC 50 / 60 Hz
Interfaz	Micro USB para cargar el acumulador y para transferir datos al ordenador.
Desconexión automática	Ajustable tras 5, 20 minutos o desactivado
Condiciones ambientales	
Temperatura operativa:	0 ... 45°C
Temperatura de almacenamiento:	-20 ... + 60°C
Humedad relativa	< 85 % H.r. (sin condensación)
Dimensiones	96 x 72 x 226 mm
Peso	389g

Tabla 3.1: Características técnicas

Fuente: [9]

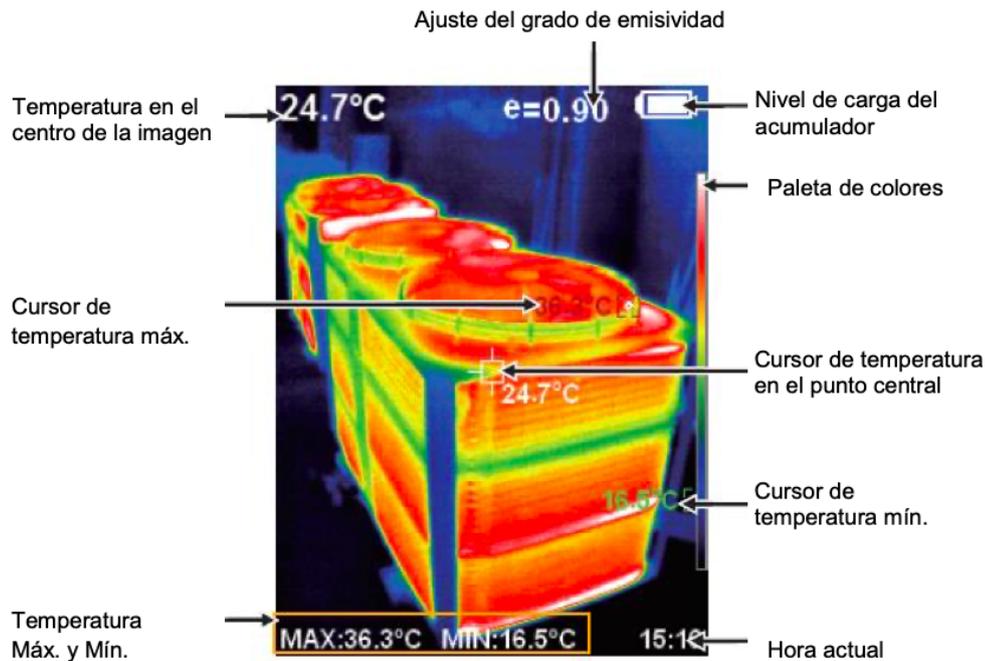


Figura 3.2: Valores en la pantalla

Fuente: [9]

3.3 Parámetros que hay que ajustar para una medición eficiente

Existen dos parámetros que hay que ajustar para que la medición sea lo más precisa y efectiva posible. Uno es la **paleta de colores** que va más en función del operador, y la más importante, la **emisividad** que depende del tipo de material o superficie que vamos a medir.

- Esta cámara ofrece **5 paletas de colores** diferentes que se pueden ver en la figura 3.3, estas son: negro, blanco, frío, hierro y arco iris, los cuales se pueden elegir durante el examen termográfico, con el fin de elegir la paleta que más se ajuste a las necesidades. Cada paleta tiene una interpretación, pues suelen tener colores más vivos o fríos, pero esto no quiere decir que ninguna sea mejor que otra. Sino que cada una se ajusta a los diferentes materiales a inspeccionar y refleja con tonos e intensidades diferentes, cuáles son las partes más calientes y más frías del objeto que se inspecciona. Por lo que la elección de la paleta, va en función del operario, no todos aprecian de igual forma los cambios de temperatura en la imagen de la pantalla. [7]
- Una de las cosas más importantes que hay que tener en cuenta a la hora de tomar mediciones es reconocer el tipo de material o superficie para ajustar los valores de la emisividad. Este es el parámetro más significativo en la medición.
- La **emisividad** es algo que el ojo humano no es capaz de captar, pero con aparatos diseñados para tal fin, se puede observar la capacidad de distintos materiales para transferir o reflejar radiación. La radiación va unida de la mano con la temperatura, pues a mayor temperatura mayor emisión de radiación. Destacar que cada material dispone de una emisividad distinta, por lo que hay que tener en cuenta esto para poder hacer una correcta medición. En la cámara termográfica hay que poner los valores adecuados para su medición. Estos valores van en una escala de 0.0 hasta 1.0. Cuanto menor sea el valor de emisividad, mayor error se puede obtener en la medición. [5]
- En esta cámara se puede ajustar la emisividad en 4 grados, que es lo más recomendable, pero también puedes ajustarlo de forma manual, y personalizarlo al valor de emisividad que más

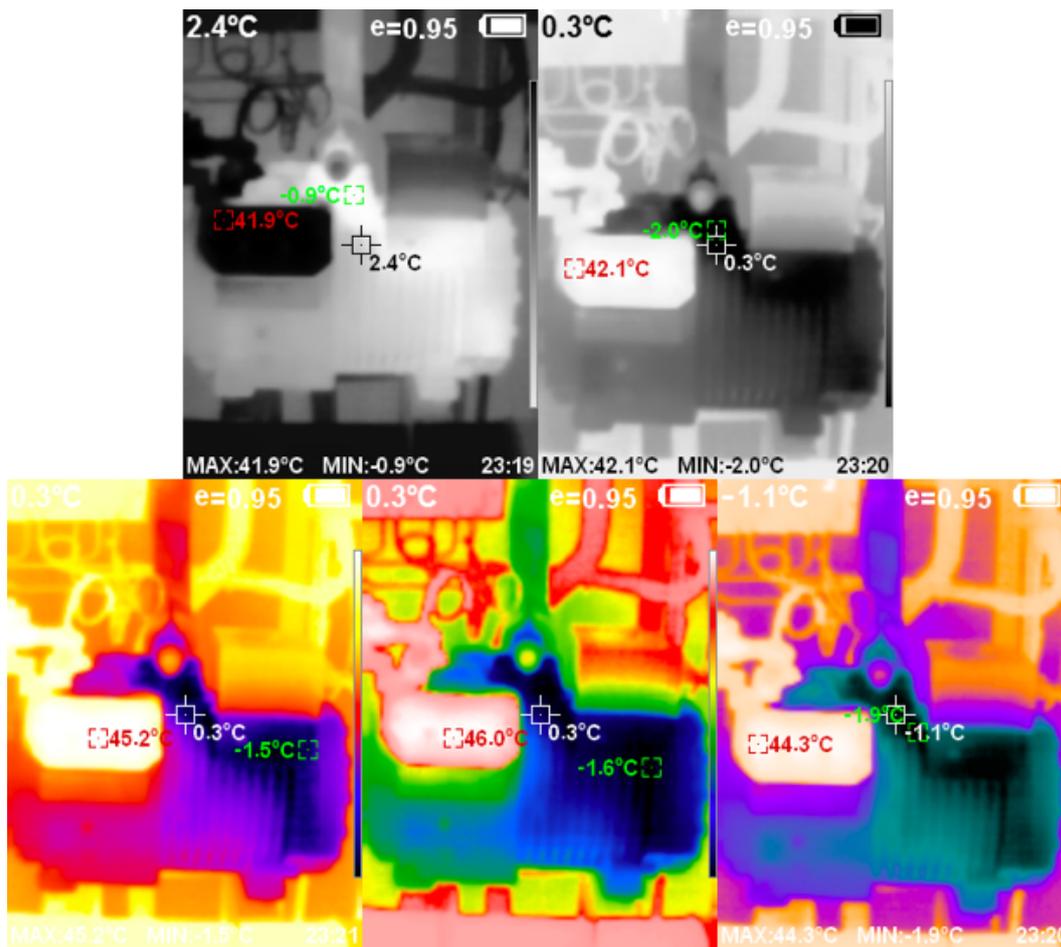


Figura 3.3: Negro, Blanco, Frío, Hierro y Arco iris
Fuente: Recopilación propia

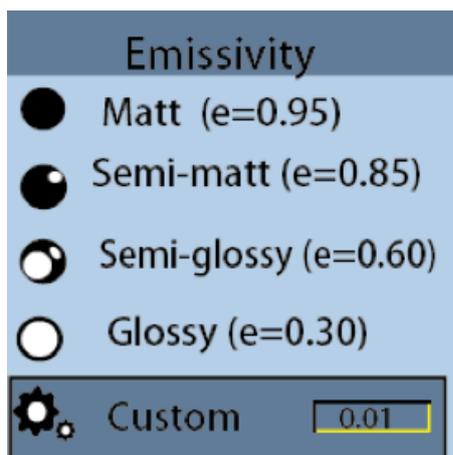


Figura 3.4: Ajuste de la emisividad
Fuente: [9]

creas conveniente. En la figura 3.4 se aprecian los distintos valores que se disponen, pues están predeterminados por el fabricante. Dependiendo del tipo de material al que se va a tomar su medición térmica, se ajusta la emisividad según la tabla 3.2 para hacer una medición lo más precisa posible.

La **radiación** consiste en la transferencia de energía sin contacto. Como mejor se produce esta transferencia es en el vacío, cuando por medio hay sólidos o líquidos es peor o nula. Esta transmisión de calor se produce por medio de ondas.

Todos los materiales emiten radiación térmica y la absorben al mismo tiempo. Dependiendo del tipo de material y su temperatura, emitirá más o menos.

Las ondas van a la velocidad de la luz, es por esto que con la cámara térmica se obtienen los resultados a tiempo real.

Los ejemplos más claros se aprecian en el sol, en las microondas, emisoras...

Hoy en día, la radiación permite producir electricidad por la energía radiada por el sol. [12]

La **convección** es la transmisión de energía calorífica de un punto a otro. Esto sucede cuando se calienta un líquido o un gas. Pues al calentarse la capa superficial que está en contacto con el punto caliente, aumenta su temperatura y cambia su densidad, lo que conlleva a una disminución de la densidad y asciende. La parte más fría desciende por la diferencia de densidades y se produce el movimiento de las moléculas. Este movimiento de moléculas se produce con el fin de igualar las temperaturas. Si este movimiento se produce en función de la gravedad y la densidad, se le denomina convección natural, pero si este movimiento es producido por algo exterior, como un ventilador o bomba, se le llama convección forzada. [4]

El cuerpo que tiene un valor de irradiación de 1.0 se le denomina como “**cuerpo negro**” pues tiene la propiedad de irradiar energía infrarroja por completo, por lo que es un radiador perfecto. Pero esto es en la teoría, pues los materiales no son perfectos. Esto no significa que sea de color negro, sino que absorben toda la radiación que les llega, siempre siendo su valor 1. [2]

La piel humana es casi un radiador perfecto, pero no lo es porque no tiene un valor de 1.0 sino que en su defecto es de 0.98.

En la extensa exposición de cámaras que se pueden encontrar en el mercado, la mayoría disponen de ajustes de los parámetros de la emisividad dependiendo del tipo de material que se quiera examinar.

Al ajustar la emisividad al tipo de material o superficie, se obtendrá una medición de las temperaturas más exactas y con menos error, algo que puede afectar demasiado a los resultados.

Pero como ya se mencionó anteriormente, es más precisa cuando tiene valores cercanos al 1.0. [6]

Este cuerpo mencionado en los párrafos anteriores no es más que aquel que absorbe toda la energía infrarroja que recibe, sin tener en cuenta la frecuencia o el ángulo de incidencia. Este cuerpo negro lleva este nombre porque absorbe todo tipo de colores de la luz que incide en él. Esta incidencia de colores es lo que produce la irradiación térmica del cuerpo, esa energía que emite es lo que se conoce

Material	Grado de emisividad	Material	Grado de emisividad
Acero inoxidable	0,59	PVC	0,91 ... 0,93
Betún	0,90 ... 0,98	Tejido (negro)	0,98
Hormigón	0,94	Piel humana	0,98
Cemento	0,96	Espuma	0,75 ... 0,80
Arena	0,90	Polvo de carbón vegetal	0,96
Tierra	0,92 ... 0,96	Barniz	0,80 ... 0,95
Agua	0,92 ... 0,96	Barniz mate	0,97
Galvanizado	0,28	Hierro fundido	0,81
Hielo	0,96 ... 0,98	Goma negra	0,94
Nieve	0,83	Plástico	0,85 ... 0,95
Aluminio anodizado	0,77	Aislante térmico	0,85
Cerámica	0,90 ... 0,94	Papel	0,70 ... 0,94
Mármol	0,94	Óxido de cromo	0,81
Escayola	0,80 ... 0,90	Óxido de cobre	0,78
Mortero	0,89 ... 0,91	Hierro oxidado	0,91 ... 0,96
Ladrillo	0,93 ... 0,96	Textiles	0,90
Cables	0,90		

Tabla 3.2: Emisividad de los materiales
[9], [17], [19]

como radiación del cuerpo negro. Los cuerpos emiten energía incluso en el vacío, pero a temperatura ambiente la energía radiada es mínima y esto es porque la longitud de onda es más larga que la luz visible (menor frecuencia). Al aumentar la temperatura, también lo hace la energía emitida y la longitud de onda, es por ello que cambian de color los cuerpos al aumentar su temperatura. La energía que irradia un cuerpo depende también del tipo de superficie, pues una superficie negra o rugosa emite más energía que una superficie lisa o brillante. Esto se puede apreciar en la energía que emite un filamento de carbón prendido, en comparación con un hilo de platino a la misma temperatura, pues el carbón emite mayor radiación. La Ley de Kirchhoff expresa que un cuerpo que es buen emisor de energía también es buen absorbente de ella. Por ello es que los cuerpos negros se consideran los radiadores perfectos. Por lo que se llega a la conclusión de que la emisividad de un cuerpo es la capacidad que este tiene para emitir energía infrarroja. [20]

3.4 Elementos del primer sistema



Figura 3.5: Compresor de aire acondicionado del control
Fuente: Recopilación propia

Compresor

- Marca: Bitzer

- Modelo: 4 DC- 7.2Y
- Tipo de compresor: Alternativo semi hermético

Gas refrigerante

- Tipo: R-449A
- Sustituto: del R-404A y R-507
- Es una mezcla HFC+HFO, por lo cual no daña la capa de ozono.

Condensador

- Marca: Integasa
- Modelo: 11-24-4/61

Bomba de agua de condensación, SW

- Marca: Azcue
- Modelo: MN 32/250

Unidad climatizadora

- Marca: SOVA
- Modelo: EV-10

3.5 Elementos del segundo sistema

Este sistema de aire acondicionado está compuesto por 3 plantas enfriadoras, pero solo se tiene en funcionamiento, una cada mes.

Cada unidad enfriadora está compuesta por dos motores y dos compresores, como se puede apreciar en la figura 3.6. Cada una es independiente de las otras, y son capaces por separado de cubrir la demanda normal del buque.

Compresor

- Marca: Bitzer
- Modelo: OSK-7471-K-Y
- Tipo de compresor: de tornillo
- Desplazamiento: $250 \text{ m}^3/\text{h}$
- Potencia frigorífica: $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ 83.050 W
- Peso: 188 kg

Motor eléctrico

- Marca: ABB
- Modelo: 75 kW, IP-23, 380V- III- 50 Hz

Gas refrigerante



Figura 3.6: Compresores de aire acondicionado de pasaje
Fuente: Recopilación propia

- Tipo: R-449A
- Sustituto: del R-404A y R-507
- Es una mezcla HFC+HFO, por lo cual no daña la capa de ozono.

Condensador

- Marca: Integasa
- Modelo: HACB- 16-250-2

Bomba de agua de condensación, SW

- Marca: Azcue
- Modelo: VM 100/26 A
- Caudal: 120 m^3/h
- Presión: 15 m.c.a
- Potencia: 11 kW
- Velocidad: 1.450 rpm

Enfriador de agua dulce

- Marca: Integasa
- Modelo: PTR-45-25-4P-2C

Bomba de agua dulce

- Marca: Azcue
- Modelo: MN 80/315
- Caudal: 86 m^3/h
- Presión: 30 m.c.a
- Potencia: 15 kW
- Velocidad de giro: 1.450 rpm

3.6 Elementos del tercer sistema

Este sistema es el de refrigeración de las gambuzas del barco, en la que se mantienen todos los víveres a la temperatura requerida. Está compuesta por 3 unidades de refrigeración, cada una formada por un motor eléctrico y un compresor. Son los encargados de 2 gambuzas de refrigeración y dos de congelado. Tan solo se tienen en uso dos unidades, la tercera está de reserva. Solo se pone en servicio si alguna de las primeras falla o se les hace mantenimiento. Es por lo mencionado anteriormente que solo disponen de 2 acumuladores de refrigerante y dos condensadores para los 3 equipos, esto se puede apreciar en la figura 3.7.

Compresor

- Marca: Bitzer
- Modelo: IV
- Tipo de compresor: Alternativo abierto.

Motor eléctrico

- Marca: ABB
- Modelo: M2AA 100 LB
- Potencia: 3 kW
- Tensión: 400V -III -50 Hz
- Velocidad de giro: 1500 rpm
- Tipo: R-449A
- Sustituto: del R-404A y R-507
- Es una mezcla HFC+HFO, por lo cual no daña la capa de ozono.

Bomba de agua de condensación, SW

- Marca: Azcue
- Modelo: CP 40/130

Separador de aceite

- Marca: AC & R
- Modelo: S-5185

Condensador

- Marca: Integasa
- Modelo: CFB-11-10-2/6

Evaporadores de las gambuzas

- Marca: Frimetel
- Modelo: MVG-80

La información de estos 3 sistemas anteriores se encuentra en los manuales de la empresa Tugal. Estos están dispuestos de forma física en el control de máquinas. [18]



Figura 3.7: Equipo frigorífico de las gambuzas
Fuente: Recopilación propia

3.7 Elementos del cuarto sistema

Este sistema, a diferencia de los anteriores, es de vapor. Más concretamente, es una instalación de recuperación de la energía que aún tiene los gases de escape procedente de la combustión de los motores principales.

Está formada por dos economizadores piro tubulares, que se encuentran ubicados en la cubierta número 8 en la chimenea, uno por cada tubo de escape de los MMPP. Su función es la de calentar el agua de alimentación de estas calderas, que se encuentra en contacto directo con los haces tubulares por los cuales pasan los gases de escape, para hacer hervir este agua y generar vapor.

El fin de esto es recuperar la energía que aún se dispone en los gases de escape, con el fin de no desperdiciar esa energía a la atmósfera sino transformarla, para generar vapor, que se usa para muchos sistemas. Durante el estadío en puerto, los motores se encuentran parados, por lo que se genera vapor con la caldera pirotubular, que se alimenta con diésel. Pero durante la navegación esta se para y se genera vapor con los recuperadores de calor, por lo que el uso de estos hace que se disminuya el consumo de combustible durante la travesía.

Algunos servicios para los que se usa el vapor son: calentar los tanques de combustible, los de lodos, para calentar el agua y mantener la temperatura de los motores cuando están parados y para calentar el agua sanitaria. [10]

Características del economizador

Las características se encuentran en los manuales del economizador AALBORG que están dispuestos en la sala de máquinas. [8]

- Marca: AALBORG
- Modelo: MISSION XS-2V
- Tipo de recuperador: Pirotubular
- Dimensiones: 3,15 x 2,15 m
- Diámetro y espesor de la protección: 6,80 m x 7,5 cm
- Generación de vapor: 1,5 T/h
- Presión de diseño: 9 bar
- Presión de trabajo: 7 bar
- Temperatura de trabajo: 170,4 °C

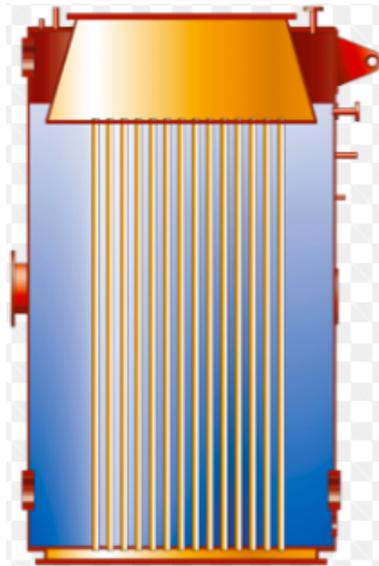


Figura 3.8: Economizador piro tubular

Fuente: [15]

3.8 Elementos del quinto sistema

Este es el sistema de aire de carga y la protección térmica del colector de gases de escape.

En la sala de máquinas están dispuestos dos motores WÄRTSILÄ 12V46, en los que inspeccionamos el sistema de gases de escape y de admisión.

El de aire de admisión está formado por dos filtros, dos turbocompresores, dos enfriadores de aire de carga y los colectores de admisión. Esto es uno por cada lado de la "V".

En cambio, el sistema de gases de escape lo componen las turbinas de gases, los dos turbos y el colector de escape.

Este último está protegido por unas tapas, de aluminio anodizado, con el fin de disipar la temperatura de escape que rondan a la salida de los cilindros una media de 380 °C. El fin de estas protecciones es que no se transmita esa temperatura a toda la sala de máquinas para poder trabajar en ella. También para que no le afecte a los demás componentes de la instalación, canalizando este calor al exterior.

Igualmente tienen la función de proteger al personal ante quemaduras, pues a veces se tienen que cambiar inyectores o piezas de la parte alta del motor y sin esas protecciones sería inviable trabajar. Incluso pasado 12 h desde que se paran los motores, el colector ronda los 100 °C e incluso los supera. Dispone de un sistema que une el colector de admisión por medio de una válvula con el de escape. Este sistema es llamado By-pass o válvula de derivación de aire de carga.

También hay una válvula Waste Gate de gases de escape, por la cual los gases provenientes de la combustión son derivados por ella, hasta el colector a la salida del turbo sin pasar por la turbina de este.

Funcionamiento del turbo, del enfriador de aire de carga, del by-pass y la Waste Gate de escape

El **Turbo** está formado por la turbina de gases de escape y la turbina de compresión de aire de admisión.

Su rendimiento más óptimo es al 85 %, pues es cuando más bajo se encuentra el consumo en función de la potencia que suministra, dispone de una buena presión de aire de carga y la temperatura de los gases de escape no es demasiado elevada.

Cuando los gases de escape procedentes de la combustión inciden en los álabes de la turbina, la hacen girar, y como el eje es solidario a la turbina compresora, la hace girar. Al producirse esto, aspira aire de la sala de máquinas, haciéndolo pasar por el proceso de filtración atravesando la filtrina exterior. En la turbina se comprime el aire a una presión que va en función de la carga que

tenga el motor, por el paso de hélice que se tenga metida, pero suele rondar entre 1,5 y 2,5 bar de aire de carga. En este proceso, el aire sufre un aumento de temperatura, el cual tiene que disminuir para que se pueda introducir en los cilindros.

Se hace circular atravesando un enfriador de aire de carga de doble etapa, que usa el agua del motor para bajar la temperatura. El aire entra al enfriador por el lado de agua de alta temperatura (HT) y pasa por el de baja (LT) antes de entrar al colector de admisión. [21]

El **Sistema By-pass** vulgarmente se le conoce como válvula de alivio de presión. Este está unido por medio de tubos y una válvula de mariposa desde el colector de admisión hasta el tubo de entrada de gases de escape a la turbina del Tc.

Su función es la de aliviar la sobrepresión en el colector de admisión en momentos dados al variar la carga del motor y superar la presión tarada en el presostato de alta de aire de carga. La válvula de mariposa anteriormente mencionada es la que se encarga de conectar el conducto de admisión con el de escape. Así, una vez el presostato llegado a la presión tarada, manda señal al controlador y este manda señal para que actúe la válvula y alivie la sobrepresión del colector al lado de gases de escape.

El funcionamiento del sistema By-pass, tiene como misión la de proteger los motores de las contrapresiones.

Mencionar que cada motor está formado por una válvula By-pass y una Waste Gate, pues el tubo de salida después del turbo es común. Lo que sí existe es una tubería en forma de "Y" en la entrada de gases de cada turbo y una "Y" en la salida del colector de admisión, esto es para unir los dos colectores a la misma válvula by-pass y Waste Gate. Esto se puede apreciar en la figura 4.20.

Durante el arranque de los motores, la válvula by-pass se abre un instante, y parte del aire de admisión se envía a la turbina del lado de gases para igualar las presiones, y facilitar que el turbo coja más rpm en un menor tiempo. Esto es con la finalidad de mejorar el arranque y sea menos brusco para el turbo la puesta en marcha. Esta válvula es controlada de manera electrónica, dependiendo del valor que el sensor PCT601 que se encuentra en el colector de admisión le envíe al convertidor. Este, en función de la carga que tenga el motor y el valor de presión del sensor, lo transforma en un impulso eléctrico y le manda la señal a la válvula para controlar su apertura y aliviar la presión de aire de carga.

Por otro lado, el **Sistema Waste Gate** va unido al mismo tubo de entrada de gases de escape, y tiene un pinchazo que bypasea el turbo, con una válvula de accionamiento neumático. Esta se acciona proporcionalmente en función de la carga del motor, pero nunca antes del 85% de carga. Esta es detectada por un presostato, al cual el sensor que se encuentra ubicado en la entrada del turbo por el lado de gases de escape le envía la señal. Estos pasan a través de esta válvula sin pasar por la turbina, para no aumentar el volumen de aire de carga. Libera un poco el caudal que atraviesa por la turbina, evitando que aumente el del lado de aspiración.

Su función es la de igualar la presión del colector de escape con la de admisión. Pues si aumenta la presión de gases de escape, hace girar a mayor velocidad la turbina y, por tanto, comprime más la parte compresora.

Destacar que las válvulas by-pass y la Waste Gate no pueden estar accionadas al mismo tiempo. Pues, como se puede apreciar en la figura 4.21, si las dos están abiertas, los gases de escape en la salida del turbo se introducirían en la admisión, o la presión de admisión se liberaría a la salida y no se produciría una mezcla idónea en la cámara de combustión de los cilindros por déficit del caudal de aire. Tanto el paso de gases de escape a la admisión como la liberación de presión del colector de admisión provocaría una nube de humo negro por el escape, por falta de oxígeno o exceso de combustible, ya que el aire que se introduce es pobre en O_2

Características del sistema de alimentación de aire y del sistema de expulsión de gases de escape

Turbo compresor

- Marca: ABB
- Modelo: TPL73-A30

- Tipo: de turbina axial
- T^o máxima: 650 °C
- Presión máxima de carga: 3,10 bar
- Caudal máximo: 18 m³/s
- Velocidad de giro máxima: 20.087 rpm
- Lubricación: con el aceite del motor



Figura 3.9: Turbo compresor ABB
Fuente: Recopilación propia

Enfriador de aire de carga

- Marca: GEA Maschinen Kühltechnik
- Tipo: 110/33/13+10/2 de doble etapa, HT y LT
- Presión de trabajo de aire: 2,8 bar
- Presión de trabajo de agua: 4 bar
- Pruebas de presión a: 8 bar

Estos dos elementos anteriores se pueden apreciar en la figura 3.9 y 3.10. La información y características de este sistema se encuentran en el manual que está dispuesto en el control de máquinas. [21]

3.9 Detección de anomalías

Con la cámara térmica se realiza un examen exhaustivo de los componentes de los sistemas para poder detectar alguna anomalía que repercuta en el rendimiento de dicho sistema. En los sistemas frigoríficos lleva un orden, se comienza por el compresor, se sigue por las tuberías de cobre y su recubrimiento de aislante térmico, el condensador y, por último, el evaporador.



Figura 3.10: Enfriador de aire de carga
Fuente: [16]

3.10 Cálculo del calor transmitido por conductividad térmica

La conductividad térmica no es más que la transferencia física de calor de un punto a otro, es decir, la capacidad que tiene dicho material para dicha transferencia. Para calcularla se tiene que utilizar la **Fórmula de Fourier**, que se aprecia en la ecuación 3.1, con la cual se obtiene la cantidad de energía que se pierde por las anomalías encontradas en los sistemas.

$$\mathbf{q} = \lambda \left(\frac{A}{L} \right) (t_a - t_b) \longrightarrow W \quad (3.1)$$

- λ : Conductividad térmica
- A: Área
- L: Longitud
- t_a : Temperatura exterior
- t_b : Temperatura interior

3.11 Cálculo del área

Para calcular el área afectada, se tiene que hacer mediciones de todo el perímetro afectado para que se pueda realizar el cálculo y obtener la cantidad de energía que se pierde en esa área. Para que se pueda obtener el área de una superficie irregular, se tiene que usar la fórmula del área de un rectángulo y la del triángulo. Pues los tramos afectados se tienen que seccionar para que se obtenga el área de la superficie afectada y se pueda realizar el sumatorio de toda el área afectada.

Para calcular el área de una circunferencia y de un óvalo, se requiere obtener sus radios. En la figura 3.10 se observa cómo se obtiene el radio de una circunferencia y de un óvalo.

- **Fórmula del área del rectángulo.**

$$A = b * h \longrightarrow m^2 \quad (3.2)$$

b : base del rectángulo en m
h : altura del rectángulo en m

- **Fórmula del área del triángulo.**

$$A = \frac{(b * h)}{2} \longrightarrow m^2 \quad (3.3)$$

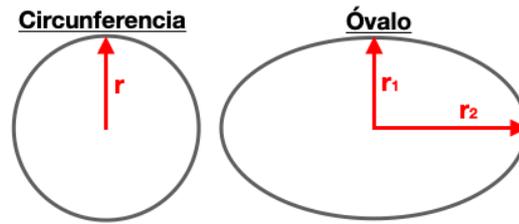


Figura 3.11: Cómo medir los radios

Fuente: Edición propia

b : base del rectángulo en m
h : altura del rectángulo en m

- **Fórmula del área de la circunferencia.**

$$A = \pi * r^2 \longrightarrow m^2 \quad (3.4)$$

π : 3,1416
r : radio de la circunferencia

- **Fórmula del área de un óvalo.**

$$A = r_1 * r_2 * \pi \longrightarrow m^2 \quad (3.5)$$

r_1 : radio en el eje de las Y
 r_2 : radio en el eje de las X
 π : 3,1416

3.12 Cálculo de la potencia radiada

Para calcular la potencia radiada por un cuerpo se utiliza la Ley de Stefan-Boltzmann [13]. Se tiene que calcular el área de la que se quiere obtener la potencia radiada, que en este caso es la zona afectada. También la temperatura en ese punto y pasarla a Kelvin; $1^\circ\text{C} = 273,15 \text{ K}$.

- **Fórmula de la potencia radiada.**

$$Q_r = e * \sigma * A * T^4 \longrightarrow W \quad (3.6)$$

Q_r : potencia radiada
e : emisividad
 σ : constante de Stefan-Boltzmann: $5,67 * 10^{-8} \longrightarrow \text{W}/\text{m}^2 * \text{K}^4$
A : área $\longrightarrow m^2$
T: temperatura en K

3.13 Cálculo de la potencia neta radiada

Para calcular la potencia neta en cuerpos que no son negros, simplemente se tiene que usar la fórmula anterior, pero calculando la diferencia de temperatura entre la del medio y la radiada por el cuerpo, en este caso la zona afectada.

- **Fórmula de la potencia neta radiada.**

$$Q_r = e * \sigma * A * (T^4 - T_m^4) \longrightarrow W \quad (3.7)$$

Q_r : potencia radiada
e : emisividad
 σ : constante de Stefan-Boltzmann: $5,67 * 10^{-8} \longrightarrow \text{W}/\text{m}^2 * \text{K}^4$
A : Área $\longrightarrow m^2$
T: temperatura en la zona afectada en K
 T_m : temperatura del medio en K

3.14 Cálculo del porcentaje de pérdida de calor evitada

Para calcular las pérdidas evitadas, se tiene que haber calculado anteriormente las pérdidas térmicas antes y después de solucionar el problema.

- Fórmula del porcentaje de pérdidas evitadas.

$$M = \left(\frac{q_{tsin} * q_{tc}}{q_{tsin}} \right) * 100 \longrightarrow \% \quad (3.8)$$

M: % de pérdidas térmicas evitadas
 q_{tsin} : pérdidas totales antes de solucionar el problema
 q_{tc} : pérdidas totales después de corregir el problema

3.15 Cálculo del calor transmitido por convección natural

Para calcular el calor transmitido por convección, se tiene que previamente obtener una serie de parámetros. Estos son la temperatura de las tapas y la del aire, el área, diámetro y medidas entre otros que se pueden observar a continuación.

Para realizar los siguientes cálculos de convección, se tiene que tener en cuenta que el economizador es un cilindro colocado en posición vertical, por el cual el aire pasa desde la parte de abajo hacia arriba, no lo atraviesa. Es por ello que se tiene que tener en cuenta esto para ejecutar los cálculos. Pues en las fórmulas del coeficiente de proporcionalidad de convección y la de Grashof no se usaría el diámetro, pues el aire no rodea el cilindro.

Para ello, antes se tiene que saber si la curvatura del cilindro se puede despreciar y tratarse como una plancha plana y vertical.

La fórmula 3.9, permite saber si se puede tratar el cilindro del economizador como una plancha plana y vertical o no. [3]

Si la condición de la fórmula anteriormente mencionada se cumple, como solo interesa saber el calor que se pierde por convección en las tapas, se utiliza como diámetro la altura de cada tapa.

- Fórmula del cilindro vertical para saber si se puede tratar como una plancha plana vertical.

$$D \geq \left(\frac{35 * L}{Gr_L^{1/4}} \right) \quad (3.9)$$

D: diámetro del cilindro
 L: altura del cilindro

- Fórmula del calor transmitido por convección natural.

$$q = \alpha * A * (t_a - t_b) \longrightarrow W \quad (3.10)$$

$$\alpha = \left(\frac{Nu * \lambda}{d} \right) \longrightarrow W/m^2 * ^\circ C \quad (3.11)$$

$$Nu = B * (Gr * Pr)^n \quad (3.12)$$

$$Gr = \left(\frac{g * \beta * \Delta T * d^3}{\nu^2} \right) \quad (3.13)$$

$$\beta = \left(\frac{1}{T_a} \right) \longrightarrow K^{-1} \quad (3.14)$$

q: calor transmitido por convección natural
 α : coeficiente de proporcionalidad de convección
 λ : conductividad
A : área
 T_a : temperatura de la fuente de calor
 T_b : temperatura del aire
 N_u : valor de Nusselt
B: constante = 0,54
n: constante = 0,25
 $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
 ν^2 : viscosidad del aire = $1,59 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
Gr: número de Grashof
Pr: número de Prandtl del aire = 0,702
 ΔT : diferencia de temperatura en $^{\circ}\text{C}$
d: diámetro
 $\beta = \left(\frac{1}{T_a}\right)$

4 Anomalías encontradas y cálculo de pérdidas térmicas

En este apartado se muestran anomalías que afectan a la eficiencia energética de los equipos frigoríficos, de climatización, de generación de vapor y extracción de gases de escape. Para ello, se inspeccionan todos los componentes de los sistemas a distintos regímenes de carga, con el fin de poder detectar fallos y, si es posible, en algún caso solucionarlo o minimizar sus pérdidas.

El buque Volcán de Tamadaba, en el cual se realizaron estas mediciones, está compuesto por 3 sistemas frigoríficos a inspeccionar, 1 sistema de recuperación de energía de los gases de escape y un sistema de sobrealimentación de aire de carga, los cuales son:

- 1º El aire acondicionado del control de máquinas.
- 2º Los grupos de frío del aire acondicionado del pasaje.
- 3º Los equipos de frío de la gambuza.
- 4º Recuperadores de calor de gases de escape (economizadores).
- 5º Turbocompresor y sistema Waste Gate.

4.1 Aire acondicionado del control de máquinas

En el aire acondicionado del control comenzó a formarse escarcha en la tubería de retorno del evaporador y en la aspiración del compresor.

Se inspecciona y se encuentra un fallo, el *ventilador centrífugo de doble óido en tandem* estaba roto y no impulsaba suficiente flujo de aire. Cuando se desmontó, se encontró que uno de los ventiladores no tenía ninguna paleta, pues se habían desarmado todas y también el eje que une los dos ventiladores se había partido.

La falta de aire frío en el control se empezó a notar. Se percibía el calor en el control, pues los aparatos y los seccionadores de los cuadros eléctricos, por los cuales circulaba corriente, se estaban calentando, como se aprecia en la figura 4.1. Pues el fin del aire acondicionado del control de máquinas es refrigerar la sala, para refrigerar todos los componentes eléctricos de los cuadros y no salten por sobre temperatura o se fundan los componentes provocando un corto circuito.

En la figura 4.1 se puede apreciar la diferencia de temperatura, la cual llega a alcanzar los valores de 43,1°C en el centro de la figura. Es por ello que, como se observa a la derecha de la propia figura, en el indicador de colores, el centro y parte con mayor temperatura se encuentra entre amarillo y blanco, y marcados los números en rojo, 43,1°C la mayor temperatura, en blanco 38,8 °C la temperatura intermedia y ya fuera del interruptor en uso la menor temperatura, en verde que son 33,6°C. Esto es como consecuencia de la falta de refrigeración del local, derivado de la rotura del ventilador centrífugo. La media de la sala suele rondar los 22°C y los aparatos sobre 35 °C cuando están en uso.

Tras trabajar en el equipo, se consigue dejar en funcionamiento un ventilador y, como remplazo del otro, se sitúa en su lugar uno portátil, de palas, como solución provisional hasta recibir uno nuevo,



Figura 4.1: Machete del Control de Máquinas
Fuente: Recopilación propia

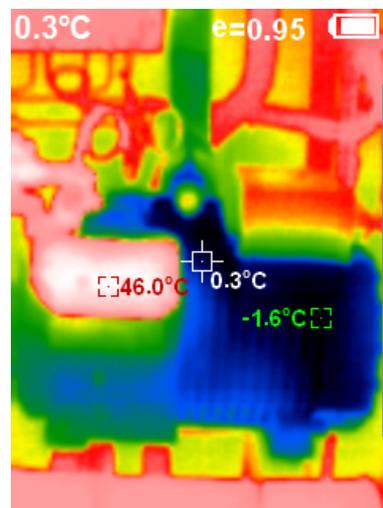


Figura 4.2: Compresor Congelado
Fuente: Recopilación propia

pero pasado unas horas se congelaba todo el compresor y la tubería de aspiración. Esto es como consecuencia de que la válvula de expansión termostática está calculada para un caudal de aire mayor, por lo que al no estar diseñada para este nuevo caudal, se va de sus parámetros de funcionamiento, y aunque está actuando, no es lo suficiente y está pasando líquido, e incluso del evaporador y llegando al compresor. En el anexo A podemos observar cómo incluso llega a congelarse el compresor en la figura A.6. Al congelarse el evaporador y la tubería, se terminaba parando el compresor por baja presión de freón en la aspiración.

Como se puede ver en la imagen termográfica 4.2, el compresor está a $-1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura y esto puede ser por varios motivos.

1º Caudal de aire deficiente. Si la ventilación no es la adecuada y se introduce aire nuevo por la puerta del control de máquinas, se obtiene como resultado la introducción de humedad al circuito, la cual es la que se transforma en hielo. Si el caudal que pasa por el evaporador es menor al de diseño, genera que el refrigerante al pasar por las VET, que está regulada para un caudal mayor de aire, expande el líquido, y se produzca el cambio térmico, y como consecuencia el cambio de estado en el principio del evaporador. Es por ello que se produce la congelación de la humedad en el exterior de las aletas del evaporador y por consiguiente a lo largo de la tubería de aspiración del compresor,



Figura 4.3: Evaporador y Válvula de expansión termostática congelados

Fuente: Recopilación propia

y si no se hacen desescarches, incluso puede llegar al compresor, como se aprecia en la figura 4.2 y 4.3.

2º Mala regulación o problemas en la válvula de expansión termostática. Si la válvula está mal tarada, puede dejar paso a una cantidad de refrigerante excesiva al evaporador, lo que genera una caída drástica de la temperatura y por lo tanto, conlleva la congelación del evaporador e incluso la tubería de aspiración del compresor y este.

Por otro lado, puede ser que el sensor de bulbo esté defectuoso, y no actúe lo suficiente el diafragma de la válvula, y esta deja pasar más cantidad de refrigerante al evaporador.

Esta también puede estar gripada u obstruida y no regula el flujo y provoca que se congele.

3º Exceso de refrigerante. Esto solo sucede por un fallo humano, al saturar demasiado la instalación. Esto lo que genera que llegue mucho líquido al evaporador y se produzca una depresión de la temperatura y se congele. Para que ello se produzca debe funcionar mal la válvula de expansión termostática. Tendría que estar dejando pasar gotas al evaporador. Puede ser porque se ha introducido aire en el sistema de refrigeración y la humedad se cristaliza en el orificio calibrado, no dejando cerrar la aguja de la válvula.

Como se puede observar en la figura 4.4, ha sido un cúmulo de sucesos los que han generado la congelación del evaporador y del compresor. Empezando por los problemas del ventilador centrífugo. Pues el primer problema que sucedió fue la rotura del eje que une los dos ventiladores, ya que se salió el cojinete de la caja como se ve en la parte inferior de la figura 4.4, lo cual generó la rotura del eje. El segundo problema se produjo al destruirse uno de los ventiladores, pues se desarmaron todas las aletas, como se observa en la figura 4.4 señalada con la flecha roja. Esto fue a raíz de soldar el eje, pues quedó desequilibrado, ya que se soldó en el lugar. Y en tercer lugar, junto con la rotura de los alabes, se fisuró el núcleo del ventilador que quedaba, pues como se aprecia en la figura 4.4 con las flechas amarillas, quedó inutilizado.

La congelación del evaporador se generó por el deficiente caudal de aire, y la congelación del compresor al retornar el gas frío al compresor por no parar el grupo y seguir dejándolo en funcionamiento, siendo conscientes del mal estado del ventilador.



Figura 4.4: Ventilador agrietado y sin aletas
Fuente: Recopilación propia

4.2 Grupos de frío del aire acondicionado del pasaje

Se comienza a analizar la instalación, sobre todo las líneas de gas y de agua, para detectar alguna anomalía en el recorrido del refrigerante. Se encontraron lugares donde la tubería estaba al descubierto, sin aislante térmico, en contacto directo con el aire. Como se puede deducir al nombrar el aislante térmico, es en la tubería que va desde las válvulas de expansión hasta la entrada al compresor. El material de estas es el acero, por lo que se tiene que ajustar la emisividad en la cámara. La puede ajustar según la tabla 3.2, entre los valores comprendidos entre el 0,91 y 0,96. Como tiene un poco de óxido, se le ha dado un valor de 0,95, que también es un valor que viene prefijado en la cámara.

Este desperfecto genera un intercambio de temperatura, y que se caliente el gas que pasa por la tubería. Si son muchas las roturas del aislante a lo largo de toda la línea, genera un aumento de la temperatura del gas que le llega a la aspiración del compresor, y por consiguiente un aumento de la temperatura de descarga del mismo.

En la figura 4.5, se puede apreciar el color azul-negro, la zona en la cual el aislante térmico está defectuoso, pues marca $13,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ que, como indica el rango de colores, es el lugar más frío y donde se producen las pérdidas, pues en el resto de la tubería el aislante está bien y marca una temperatura uniforme de $17,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Las pérdidas en este tramo las calcularán en el apartado A.

En la figura 4.6, el aislante no estaba despegado ni le faltaba, sino que se encontraba raspado y levantado por partes, porque es un lugar de paso. Como se puede apreciar, el cambio de temperatura no se aprecia tan claro como en la primera figura, pero aunque no se refleja en esta figura, la temperatura exterior del aislante es de $17,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Haciendo uso de la cámara termográfica, se puede apreciar que existen pérdidas térmicas, aunque no se aprecian como en la anterior figura. Las pérdidas en este tramo se calcularán en el apartado B.

■ A) Cálculo del área afectada del primer desperfecto.

Este desperfecto se tiene que dividir en dos rectángulos y un triángulo para obtener el área. Para ello se toman las medidas totales, las cuales se han reflejado a papel para calcular las

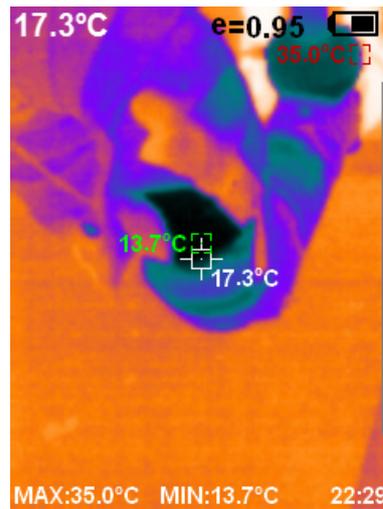


Figura 4.5: Aislante deteriorado 1
Fuente: Recopilación propia

medidas de los lados de los rectángulos y triángulos.

Para el cálculo del A_1 y el A_2 se hace uso de la fórmula 3.2
En cambio, para el cálculo del A_3 se hace uso de la fórmula 3.3

$$A_1 = 0,103 * 0,026 = 0,0027m^2$$

$$A_2 = 0,042 * 0,037 = 0,0016m^2$$

$$A_3 = \frac{(0,061*0,037)}{2} = 0,0011m^2$$

$$\sum A = 0,0054m^2$$

■ **Cálculo del calor transmitido por conductividad térmica de la figura 4.5.**

Para calcular la conductividad se necesita saber algunos valores:

λ : es la conductividad térmica del aislante 0,040 W/m °C

L: el espesor del aislante. 0,05 m

t_a : temperatura exterior del aislante 17,3 °C

t_b : temperatura interior del aislante 13,7 °C

Para este cálculo se hace uso de la fórmula 3.1

$$q_1 = 0,040 * \left(\frac{0,0054}{0,05}\right) * (17,3 - 13,7) = 0,016W$$

• **B) Cálculo del área afectada del segundo desperfecto.**

En este desperfecto, igual que en el apartado A, se tiene que fraccionar. En este caso, en un rectángulo y tres triángulos para obtener el área.

Para el cálculo del A_1 se hace uso de la fórmula 3.2

En cambio, para el cálculo del A_2 , A_3 y A_4 se hace uso de la fórmula 3.3

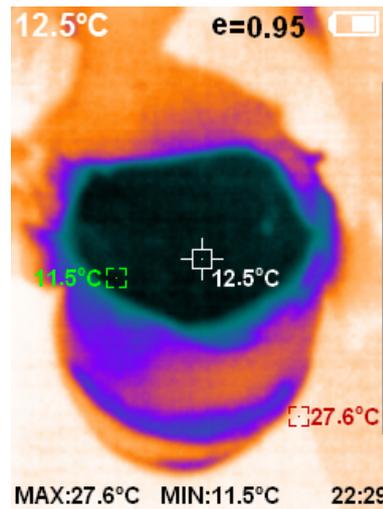


Figura 4.6: Aislante deteriorado 2
Fuente: Recopilación propia

$$A_1 = 0,120 * 0,080 = 0,0096m^2$$

$$A_2 = \frac{(0,0352*0,0628)}{2} = 0,0011m^2$$

$$A_3 = 0,0009m^2$$

$$A_4 = 0,0012m^2$$

$$\sum A = 0,0128m^2$$

■ **Cálculo del calor transmitido por conductividad térmica de la figura 4.6.**

Para calcular la conductividad se requiere saber algunos valores:

En esta captura, la temperatura exterior es de 17,7 °C

λ : es la conductividad térmica del aislante 0,040 W/m °C

L: el espesor del aislante. 0,05 m

t_a : temperatura exterior del aislante 17,7 °C

t_b : temperatura interior del aislante 11,5 °C

Para este cálculo se hace uso de la fórmula 3.1

$$q_2 = 0,040 * \left(\frac{0,0128}{0,05}\right) * (17,7 - 11,5) = 0,06W$$

■ **Cálculo de las pérdidas térmicas totales transmitidas por conductividad**

$$\sum q = q_1 + q_2 \rightarrow W \quad (4.1)$$

$$\sum q_{tsin} = 0,16 + 0,06 = 0,22W$$

La energía que se pierde en estos desperfectos encontrados no es muy relevante, pues es muy pequeño el área, pero si son muchas, pueden afectar negativamente a la eficiencia del sistema. En este caso, la instalación absorbe energía del medio, como se puede apreciar en la diferencia de temperatura.

Destacar que las pérdidas en las tuberías no solo vienen dadas por el estado o tipo de aislante térmico, también hay que tener en cuenta el material, espesor de la tubería, estado y la temperatura del ambiente.



Figura 4.7: Aislante reparado
Fuente: Recopilación propia

Después de solucionar el problema del recubrimiento de las tuberías con el material aislante para los sistemas frigoríficos, se modifica la emisividad a 0,85 como figura en la tabla 3.2, y se realizan mediciones transcurrido un día en funcionamiento, y se observa cómo ya las temperaturas en esos puntos se encuentran aproximadamente a 18 °C como se aprecia en la figura 4.7. Esto quiere decir que la pérdida de energía que se producía en ese punto al robarle calor al medio se han minimizado. Estas pérdidas energéticas no eran muy importantes porque es un área muy pequeña para las dimensiones del sistema, pero se subsanaron los daños y, por mínimo que sea, la instalación reduce su temperatura de trabajo.

Se han vuelto a calcular las pérdidas en estos dos desperfectos con el fin de obtener el porcentaje de mejoras.

A continuación se exponen brevemente los resultados de las pérdidas térmicas totales después de renovar el aislante. Haciendo uso de la fórmula 3.8, se obtendrá el % de mejoras que se han conseguido.

La temperatura exterior del ambiente es de 26,1 °C

En la figura 4.7 se puede ver que el valor fuera del aislante nuevo es de 18°C.

$$q_1 = 0,035W$$

$$q_2 = 0,083W$$

$$\sum q_{tc} = 0,12W$$

$$M = \left(\frac{0,22 * 0,12}{0,22} \right) * 100 \rightarrow 45,45 \%$$

Se han conseguido en estos dos desperfectos unas mejoras del 45,45%. Por lo que se ha mejorado el rendimiento del sistema.

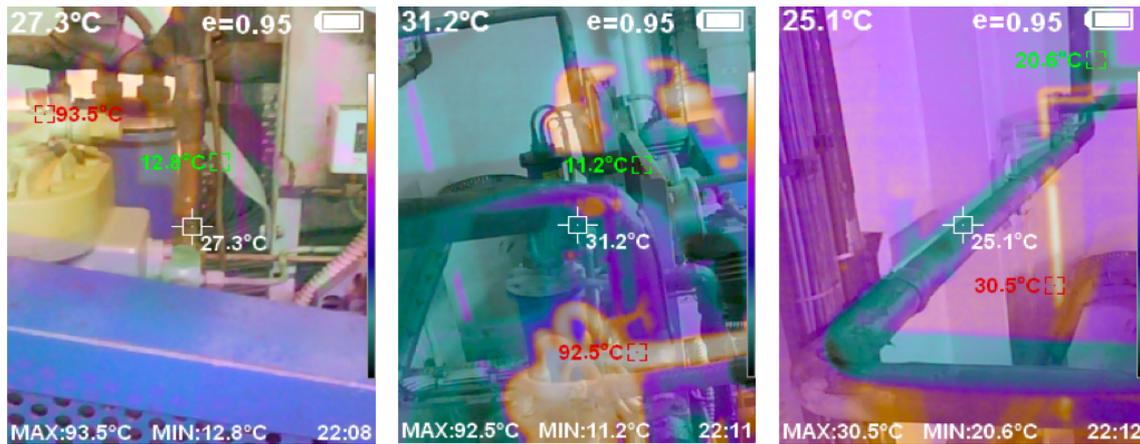


Figura 4.8: Con recalentamiento
Fuente: Recopilación propia

4.3 Equipos de frío de la gambuza

Se empieza realizando un análisis de las líneas con el fin de detectar alguna anomalía. Todo parecía normal, pero por la zona más cercana al compresor se encuentra una anomalía. Se trata de un calentamiento en la tubería que retorna el refrigerante al compresor. Esto es por la ubicación del filtro separador de aceite que se encuentra en la salida del compresor. Está dispuesto en la parte inferior de la tubería de aspiración y el calor que irradia incide en la tubería de gas que entra al compresor, como se puede ver en la figura 4.10 y le transmite calor. Se ve claramente en la imagen térmica el punto más caliente, resaltado de color amarillo casi tirando a blanco. Esto es la entrada del gas proveniente de la salida del compresor a alta presión y temperatura. Este entra al separador de aceite, que, como marca en la parte inferior de la imagen, alcanza más de 90 °C. Esto es un error de diseño, pues aunque en la imagen termográfica anterior no se aprecia, se ha inspeccionado el estado del aislante y no se encontraba defectuoso, por lo que es por la ubicación del filtro.

En el análisis se aprecia cómo la temperatura antes de llegar a la curva de la tubería tiene una temperatura de 25,1 °C y al pasar por la zona afectada aumenta su temperatura hasta 31,2 °C. Por lo que en la aspiración del compresor se encuentra a una temperatura de 27,3 °C. Estos pasos de cambio térmico se pueden apreciar en el conjunto de imágenes de la figura 4.8.

Gracias a la termografía se ha detectado este problema, y se han tomado capturas en distintos puntos del sistema para ver cómo afecta este calentamiento a las temperaturas no solo en ese punto, sino a lo largo de su recorrido. Si el gas entra más caliente que la temperatura para la cual se calculó la instalación, se ven afectados todos los puntos, pues la válvula de expansión termostática y todo el circuito están diseñados para un funcionamiento normal a una cierta temperatura, pero si no es así, y aumenta la temperatura, se genera un aumento en la salida del compresor y, por tanto, cambia las condiciones de estado en el circuito. Esto lo que genera es un recalentamiento de todo el circuito.

Para analizar cuál sería su correcto funcionamiento, se ha recurrido a interponer unas láminas de material aislante entre el separador de aceite y la tubería para que el calor no incida directamente en la tubería de aspiración del compresor. Con ello se debe disminuir el problema y notar mejorías térmicas tanto en la tubería ubicada sobre el separador de aceite, como en la aspiración y la descarga del compresor.

Después de puestas las láminas de aislante y pasado media hora de funcionamiento, se vuelve a tomar capturas de los mismos puntos del sistema para que se pueda hacer una comparativa de temperaturas, como se pueden ver en el conjunto de imágenes de la figura 4.9.

En la siguiente tabla 4.1 se puede ver una comparativa de las temperaturas. En la parte izquierda se encuentran las temperaturas con el problema mencionado anteriormente. En la parte derecha



Figura 4.9: Sin recalentamiento
Fuente: Recopilación propia

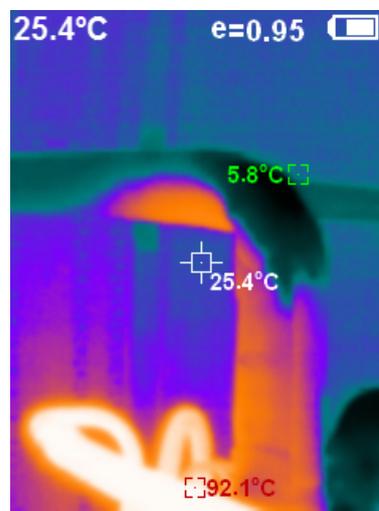


Figura 4.10: Recalentamiento por el filtro separador de aceite
Fuente: Recopilación propia

se encuentran las temperaturas después de interponer las láminas de material aislante sobre el separador de aceite para disipar el calor y no se transfiera a la tubería de aspiración.

En la tabla 4.1 se puede ver cómo el aumento de temperatura afecta a todo el sistema. Se aprecia cómo los parámetros en la salida del evaporador se ven afectados al pasar por encima del separador de aceite, aumentando su temperatura 6,1 °C por la energía térmica que irradia el separador de aceite. Es por ello que al tomar la temperatura directamente en la entrada al compresor, se encuentra a 27,3 °C, la cual debería ser menor de 25°C.

El compresor, al comprimir el gas, hace aumentar la presión y la temperatura del gas, pues estos parámetros son directamente proporcionales en los ciclos de refrigeración.

La salida del compresor se encuentra a 93,5 °C. Después de poner la placa aislante, se puede ver cómo se notan las mejoras en todo el sistema, han descendido las temperaturas. Se puede observar en la figura 4.9 cómo la imagen del centro ha disminuido la temperatura sobre el separador de aceite hasta 5,5 °C menos. Por lo consiguiente, en la aspiración se encuentra a 5,6 °C menos y la salida a 3,7 °C menos, con respecto a los parámetros de la figura 4.8.

Para mejorar el rendimiento del sistema se podrían hacer varias modificaciones o mejoras.

- La primera, la más sencilla y económica, sería aislar mejor la tubería o el separador para disminuir el recalentamiento, pues como se puede ver en la figura 4.9 en la imagen del centro, con

Tramo	Recalentamiento	Sin Recalentamiento
Salida del evaporador	25,1 °C	24,8 °C
Sobre el separador de aceite	31,2 °C	25,7 °C
Aspiración del compresor	27,3 °C	21,7 °C
Descarga del compresor	93,5 °C	89,8 °C

Tabla 4.1: Diferencias de temperaturas sin y con aislante

unas simples láminas de aislante, el calor se disipa y no se transfiere a la tubería. Pues en esa imagen se puede ver en el centro, abajo, de color amarillo, cómo la temperatura que irradia no traspasa la lámina aislante y llega a la tubería de aspiración. Por lo tanto, con un buen recubrimiento aislante, el rendimiento del sistema sería más eficiente como se ha demostrado.

- En segundo lugar, sería un cambio que afectaría a la ubicación de las tuberías. Se necesitaría rediseñar la trayectoria de las tuberías para que no pasen cerca del filtro, ya que al irradiar calor, si se coloca por abajo también le afectaría. Esto es por el tipo de transmisión que afecta en todas las direcciones.

4.4 Aire acondicionado del control de máquinas, 2º problema

El compresor de aire acondicionado del control de máquinas se estaba parando por alta presión, lo cual es un indicativo de que algo no funciona correctamente.

Se rearma el presostato de alta presión para que se pueda poner en funcionamiento y comprobar las presiones y las temperaturas durante su funcionamiento para que se defina lo que le pasa. Se pone en marcha y se ve cómo subió la presión y nuevamente saltó la alarma de temperatura y se volvió a parar por alta presión. El termómetro del agua salada del condensador marcaba casi 50°C. Esto suele ser indicativo de que el condensador estaba obstruido, pero lo extraño era que se le había hecho mantenimiento hace 2 semanas y se suele hacer cada 30 días y durante ese periodo no suele dar fallo.

Con el uso de la cámara termográfica, en la figura 4.11, se puede apreciar cómo la tubería de salida del condensador que aparece en color amarillo se encuentra muy alta en comparación con la del agua de mar. Pues lo normal es que exista un salto térmico de unos 10 grados como mucho, pero en este caso es casi de 20 grados, cosa que no es normal.

Se desconecta la alimentación del compresor en el magneto térmico, también la de la bomba de agua salada y del motor eléctrico que mueve el ventilador centrífugo. Se pone mano a la obra para ver qué podía suceder.

- Se comienza cerrando las válvulas de entrada y salida del condensador, las de la bomba de agua salada y también la salida del costado al mar. Esto es para trabajar de forma segura y evitar que entre agua al barco.
- Seguidamente se sacan las tapas laterales del condensador para proceder a baquetear los tubos interiores de cobre, por los cuales pasa el agua salada que hace que descienda la temperatura del gas procedente del compresor y se produce el cambio de estado a líquido. Al sacar las tapas no se obtuvo el resultado esperado, pues no tenía mucha suciedad como normalmente. Se pasó la baqueta y se limpiaron todos los tubos, pero no se atascaba como cuando estaba sucio y obstruido. Se sanearon las tapas con un estropajo, se colocaron las juntas nuevas de las tapas con un poco de aproximador. Se apretaron todos los tornillos y se abrieron las válvulas. Se puso la alimentación del magneto térmico de la bomba de agua salada y se puso en marcha, verificamos que no existían pérdidas. Se subieron los magnetos térmicos tanto del ventilador como del compresor y se puso el equipo en funcionamiento.



Figura 4.11: Condensador caliente
Fuente: Recopilación propia

Transcurridos unos 20 minutos, nuevamente sucedió lo mismo, se volvió a parar por alta presión.

- Se sacó la tubería de salida del condensador y se comprobó el caudal de agua que salía del condensador y era el adecuado. Se conectó la salida del condensador con una manguera a un pocete y estuvo funcionando correctamente el equipo, no trabajaba a las altas presiones como anteriormente. Por lo que se dio por hecho que el problema estaba desde la salida del condensador hasta la válvula de costado.

Se comenzó a extraer la tubería, pero como era de esperar, estaba libre, pues hacía 2 meses que se sacó y limpió. En cambio, la válvula del costado a la cual se atornilla esta tubería por la cara de dentro del barco estaba bien, pero al abrir la válvula apenas entraba agua, se podía ver una especie de mejillones y caracolas que obstruían la tubería, por lo que el caudal de salida no era el adecuado. Al no ser el caudal de salida el ideal, permanece mayor tiempo el agua en el condensador y se calienta, como se aprecia en la figura 4.11, afectando esto al cambio térmico. Ello genera que el gas no se condense correctamente, por lo que en la salida del condensador existe aún gas, por consiguiente no disminuye la presión y produce la parada del equipo.

Esto es porque a la salida del condensador, si el cambio térmico es el ideal, solo debe de salir refrigerante en estado líquido.

Con ayuda de una varilla se golpearon las incrustaciones y se fueron desprendiendo los mejillones y caracolas. Comenzó a entrar bastante agua, por lo que una vez limpia la válvula del costado y la salida se cerró esta, pues se tenía una piscina de agua salada en esa zona. Se montó la tubería y se volvió a poner en funcionamiento la instalación. Pasadas 2 horas, aún el equipo seguía en funcionamiento, sin pararse por alta presión ni temperatura, por lo que el problema ya estaba resuelto.

- Nuevamente se capturaron unas tomas para ver que el problema se había solucionado y, como se aprecia en la figura 4.12, ya los valores no eran tan desproporcionados, estaban dentro de lo razonable. La entrada a unos 24 °C y la salida, un par de grados más altos. Pasadas esas 2 horas, se volvió a tomar temperatura y solo existía un cambio de temperatura de 6 °C.

4.5 Gambuza de congelado

Una mañana, mientras el engrasador realizaba su ronda de seguridad, informa de que la gambuza de congelado se encontraba a unos +2 °C, cosa que no es normal, pues tiene que estar a -18 °C. Se fue a inspeccionar qué pasaba, y por sorpresa, había un pedazo de junta de sellado de la puerta de la cámara colgando de la parte baja de la puerta. Al abrir la puerta, se encontró con que la base de



Figura 4.12: Temperaturas normales de funcionamiento
Fuente: Recopilación propia

esta estaba llena de hielo por la parte inferior.

Cuando sacaron las baldas de acero inoxidable, seguro que arrancaron la el perfil de sellado de la puerta sin darse cuenta, y al cerrar la puerta quedó trabada. Como se aprecia en la figura 4.13, el hielo se fue formando alrededor del trozo de junta, por donde entraba la humedad y se producía el hielo. En esta figura se encuentra marcado con una flecha de color rojo el lugar donde se ve el surco por donde estaba el trozo de junta y con puntos azules discontinuos la longitud.

También se puede ver cómo se fue congelando todo el evaporador y la válvula de expansión, creándose una capa de hielo considerable. Esto se puede apreciar en el anexo, en la figura A.7.



Figura 4.13: Hielo por la introducción de humedad
Fuente: Recopilación propia

El fallo era evidente, pero se tomaron unas capturas termográficas para ver por dónde entraba la humedad. Se cambió la emisividad de la cámara, pues en este caso se trataba de acero inoxidable y se tuvo que poner a 0,59.

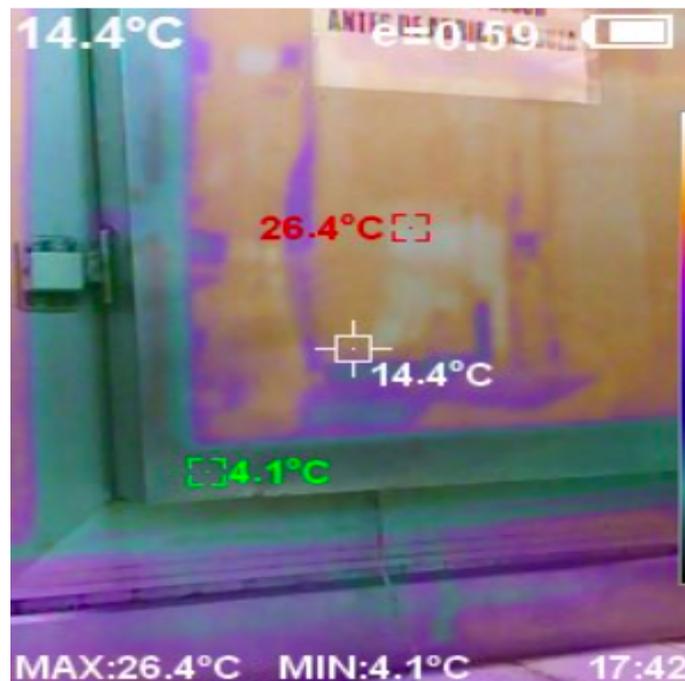


Figura 4.14: Junta de sellado trabada en la puerta

Fuente: Recopilación propia

En la figura 4.14 se puede apreciar cómo, por culpa del perfil de sellado que se ve en la figura, la puerta no cerraba herméticamente y se producía la introducción de humedad.

4.6 Guardacalor de los economizadores defectuosos

- Los economizadores están recubiertos por una capa aislante de lana de roca con un espesor de 75 mm, y está protegida por unas planchas de galvanizado, por lo que para poder realizar el estudio de anomalías con la cámara térmica se tiene que poner la emisividad a 0,28, el cual es el valor del galvanizado como se aprecia en la tabla 3.2 de la emisividad de los materiales.

En el economizador de proa se encontró un cuadrado de chapa galvanizada por el cual irradiaba calor. En la figura termográfica 4.15 se puede apreciar cómo se ve claramente que el aislante de lana de roca o se encuentra defectuoso o en su defecto no existe. La chapa ronda unos 70 °C y en ese punto sobrepasa los 150 °C.

También se encontró en una unión de chapas, deterioros y óxidos. Se observaba cómo la lana se había descompuesto, dejando escapar la temperatura al recinto. En ese lugar alcanza su máxima temperatura sobre los 110 °C, como se aprecia en la figura 4.16.

En cuanto al aislante del economizador de popa, destacar que, al igual que en el de proa, existían defectos. Había una grieta considerable en el recubrimiento, por la cual se aprecia el óxido y el deterioro de la lana de roca. En este caso, su temperatura llegaba a alcanzar casi los 120 °C como se aprecia en la figura 4.17 en la parte izquierda. En la misma figura en la parte derecha, se puede apreciar la temperatura de esa zona, en la que en su exterior no se observaba ningún desperfecto aparente, pero algo pasaba, pues en esa zona se alcanzaba los casi 120 °C cuando la temperatura media del aislante son unos 75 °C.

Se informó de que se captaba en la imagen termográfica una anomalía de exceso de temperatura en ese lugar y comentaron que hace unos años se fisuró el economizador, y un taller se metió dentro por unos registros en la parte de agua, y soldaron una chapa de hierro fundido por esa zona, que seguro era por ello que se veía así, pues se puso otro tipo de material aislante.

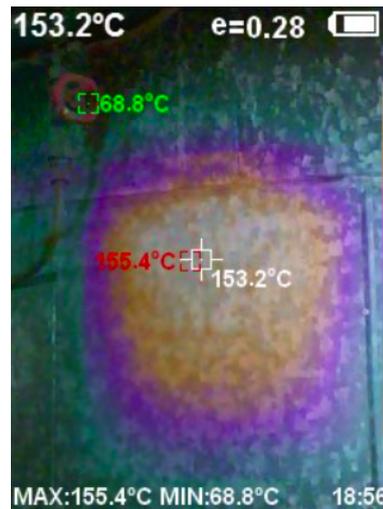


Figura 4.15: Chapa galvanizada.
Fuente: Recopilación propia

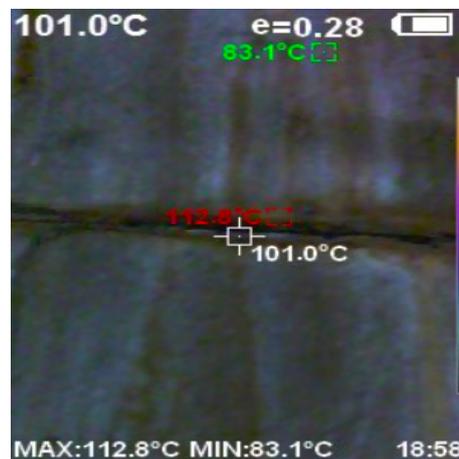


Figura 4.16: Grieta en la chapa.
Fuente: Recopilación propia

- En los dos economizadores se encontraron pérdidas, pero las más relevantes eran por las tapas, por lo que de cara a realizar los cálculos de la energía radiada, se toman capturas y mediciones de las tapas de registro. A todas les falta la carcasa aislante y chapa que traen originalmente cuando sale de fábrica. Los trabajadores las han ido quitando a medida que se iban reparando las tapas y nunca se pusieron, porque se gripan los tornillos a consecuencia de las altas temperaturas.

Estas son de hierro fundido como la estructura del economizador, por lo que siguiendo la tabla 3.2 de emisividad de los materiales, se cambia el valor de la cámara a 0,81, con el fin de realizar los cálculos de la manera más exacta posible.

Cada economizador está compuesto por 4 tapas de menor tamaño en la parte baja, y 6 en la alta. Al estar sin protección, no se disipa mucho la temperatura, como puede hacerlo si tuviese que atravesar la capa de lana de roca. Estas se observan en la figura 4.18 en la parte izquierda. En cuanto a las tapas de mayor tamaño, está compuesto por 2, una arriba y otra abajo que se aprecian en la figura 4.18 en la parte derecha.

En la tabla 4.2 se reflejan las temperaturas que se irradia por cada tapa, con el fin de realizar los cálculos pertinentes. La temperatura media de la sala ronda los 38,4 °C, según los parámetros tomados con el pirómetro.

Estos parámetros se ven reflejados en el anexo A, en las figuras A2, A3 y A4.

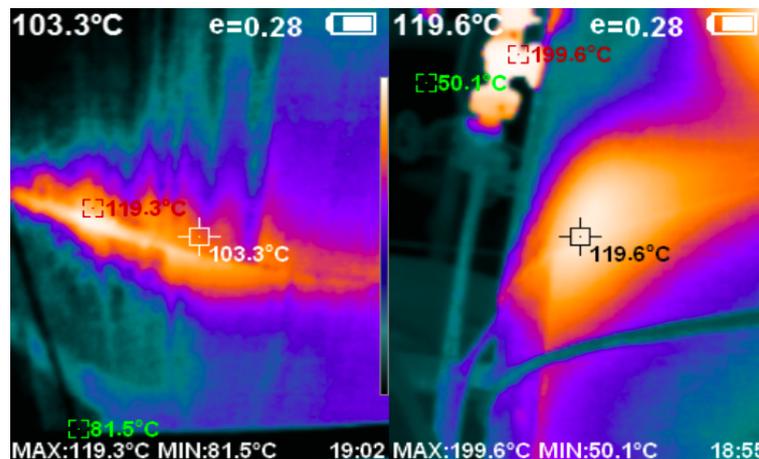


Figura 4.17: Desperfectos eco de popa.
Fuente: Recopilación propia

Economizador	Tº tapas grandes	Tº tapas pequeñas	Unidad
Proa	190,6	189	ºC
	189,6	189,2	ºC
		188,8	ºC
		189,8	ºC
		178	ºC
		191	ºC
		191,9	ºC
		192,4	ºC
		190,8	ºC
		191,4	ºC
Popa	190,3	188,6	ºC
	191,3	184,5	ºC
		190,1	ºC
		183,9	ºC
		190,7	ºC
		189,9	ºC
		192	ºC
		191	ºC
		191,8	ºC
		190,3	ºC

Tabla 4.2: Temperatura irradiada por las tapas de los economizadores

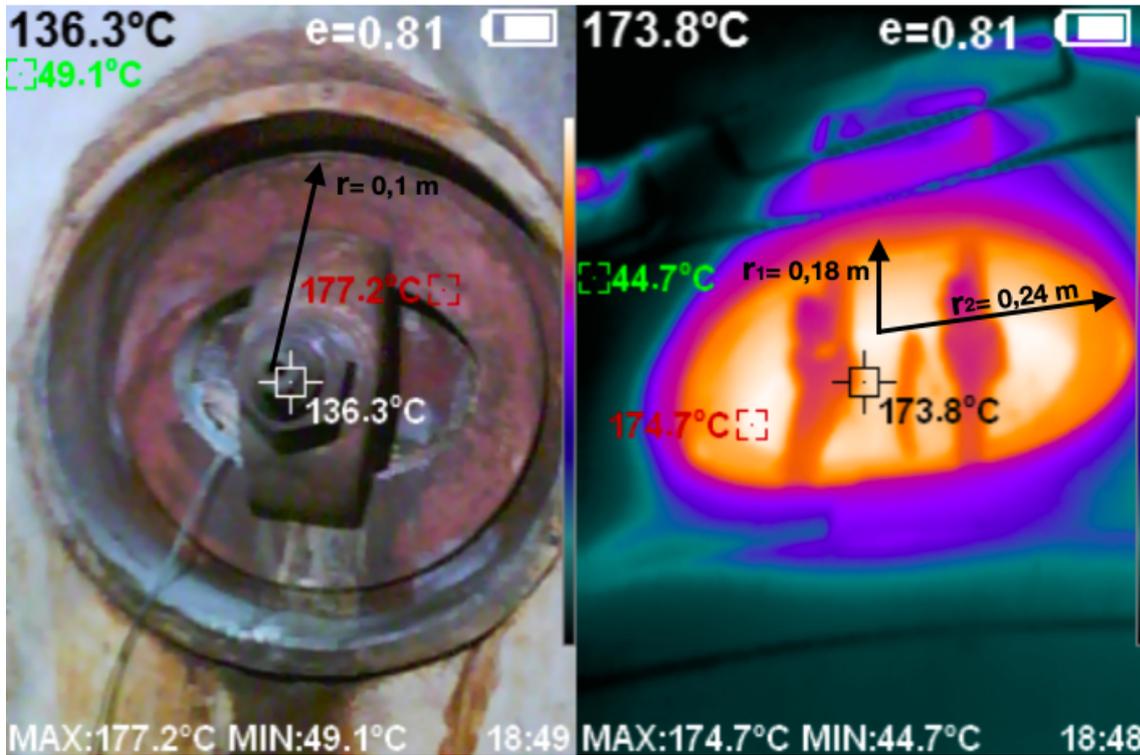


Figura 4.18: Tapas de economizadores.

Fuente: Recopilación propia

- Para calcular el área, se tiene que tener en cuenta la forma de las tapas, pues las pequeñas son redondas y las grandes tienen forma de óvalo. Para calcular el área se tienen que tomar las mediciones de distintas formas. En la figura 3.10 se aprecia cómo se toman las mediciones pertinentes para calcular el área en cada caso.
- Las medidas obtenidas de los dos tipos de tapas son:
 - El radio de las pequeñas $\rightarrow r = 0,1 \text{ m}$
 - En las grandes al ser en forma de óvalo hay dos radios: $\rightarrow r_1 = 0,18 \text{ y } r_2 = 0,24 \text{ m}$
- **A) Cálculo del área de las tapas pequeñas.**

Haciendo uso de la fórmula 3.4, se calcula el área de las tapas redondas.

$$A_p = \pi * 0,1^2 = 0,031m^2$$

- **B) Cálculo del área de las tapas grandes.**

Haciendo uso de la fórmula 3.5, se calcula el área de las tapas ovaladas.

$$A_g = 0,18 * 0,24 * \pi = 0,136m^2$$

- **C) Cálculo de la potencia neta radiada por la tapa pequeña.**

Para poder realizar estos cálculos se necesitan los valores siguientes. Algunos se tienen que tomar y otros son parámetros constantes.

Se hace uso de la fórmula 3.7 para este cálculo.

Economizador	Qr tapas grandes	Qr tapas pequeñas	Unidad
Proa	230,05	51,53	W
	227,57	51,65	W
		51,42	W
		51,98	W
		40,51	W
		52,67	W
		53,18	W
		53,47	W
		52,55	W
		52,89	W
	Popa	229,3	51,31
231,8		49,04	W
		52,15	W
		48,71	W
		52,49	W
		52,04	W
		53,23	W
		52,67	W
		53,12	W
		52,27	W

Tabla 4.3: Potencia neta perdida por cada tapa

$$\begin{aligned}
 e &= 0,81 \\
 \sigma &= 5,67 * 10^{-8} \rightarrow W/m^2 * K^4 \\
 A &= 0,031 m^2 \\
 T &= 189 \text{ } ^\circ\text{C} = 462,15 \text{ K} \\
 T_m &= 38,4 \text{ } ^\circ\text{C} = 311,55 \text{ K}
 \end{aligned}$$

$$Qr = 0,81 * 5,67 * 10^{-8} * 0,031 * (462,15^4 - 311,55^4) = \mathbf{51,53 \text{ W}}$$

■ **D) Cálculo de la potencia neta radiada por la tapa grande.**

Se hace uso de la fórmula 3.7 para este cálculo.

$$\begin{aligned}
 e &= 0,81 \\
 \sigma &= 5,67 * 10^{-8} \rightarrow W/m^2 * K^4 \\
 A &= 0,136 m^2 \\
 T &= 190,6 \text{ } ^\circ\text{C} = 463,75 \text{ K} \\
 T_m &= 38,4 \text{ } ^\circ\text{C} = 311,55 \text{ K}
 \end{aligned}$$

$$Qr = 0,81 * 5,67 * 10^{-8} * 0,136 * (463,75^4 - 311,55^4) = \mathbf{230,05 \text{ W}}$$

- Como se puede apreciar en la tabla 4.3 todas las tapas del mismo tamaño están radiando aproximadamente la misma cantidad de energía. Para saber la cantidad total de energía que se irradia solamente por las tapas, se tiene que calcular el sumatorio de Qr.

Al calcular los economizadores, por separado, se puede apreciar que ambos irradian la misma cantidad de energía, pues el de proa 970 W y el de popa 978 W. Con ello no solo se obtiene lo que irradia, sino que refleja que las temperaturas de los gases de escape son similares, por lo que los motores se encuentran funcionando en condiciones similares, en cuanto a parámetros y valores.

No existen anomalías graves en el funcionamiento, ni en la inyección, en la comparación de las temperaturas que desprenden las tapas de un economizador y otro.

$$Qr_t = \Sigma Qr \longrightarrow \mathbf{1948,63 \text{ W}} \quad (4.2)$$

La cantidad de energía que irradia por las tapas afecta a la generación de vapor, pues esa energía que se transmite al medio y no se aprovecha para el cambio de estado del agua. Si fuese una sola tapa, no afectaría demasiado, pero al ser muchas tapas, abarcan un gran área por la que se pierde mucha energía.

Como son economizadores, no afecta económicamente, pues generan vapor de sobra. A lo que si afecta, es a la zona de trabajo por el aumento de temperatura.

En cambio, si fuera en una caldera, en la que se consume combustible solamente para generar vapor, si se tendría en cuenta. Pues las calderas generan vapor a demanda, y si parte del calor que genera se pierde por las tapas, bajaría el rendimiento de esta y aumentaría el consumo de combustible.

■ **E) Cálculo de la potencia neta radiada si mantuviesen su protección original.**

Para realizar este cálculo se han obtenido las temperaturas del aislante alrededor de las tapas, que es el original.

La media de estas temperaturas son: las pequeñas $\longrightarrow 63,84 \text{ }^\circ\text{C}$ y las grandes $\longrightarrow 72,28 \text{ }^\circ\text{C}$
Con estas se calcula la potencia neta que irradiaría, que como se espera es mucho menor.

Se utiliza la fórmula 3.7 y los datos del apartado C y D tan solo cambiando las temperaturas, por las anteriores que son con aislante en las tapas.

$$-T_p \longrightarrow 63,84 \text{ }^\circ\text{C} = 336,99 \text{ K}$$

$$-T_g \longrightarrow 72,28 \text{ }^\circ\text{C} = 345,43 \text{ K}$$

$-Qr_t$: potencia neta radiada por las tapas pequeñas

$-Qr_T$: potencia neta radiada por las tapas grandes

$$Qr_t = 99 \text{ W}$$

$$Qr_T = 120,32 \text{ W}$$

$$\Sigma Qr = 219,32 \text{ W}$$

La diferencia entre mantener los economizadores bien aislados es considerable, pues la radiación es bastante menor, es de **1729,31 W** menos. Con esta diferencial, se reducirían mucho las condiciones extremas a las que se trabaja en esta zona, ya que, como se pueden ver en la figuras A.4 del anexo, se está trabajando a una temperatura ambiente de $38,4 \text{ }^\circ\text{C}$.

Por lo tanto, del punto de vista de la seguridad y bienestar en el puesto de trabajo, favorece tener colocadas las protecciones como indica el fabricante. Esto conlleva a la disminución de las fatigas o mermas en el puesto de trabajo, a causa de las elevadas temperaturas que se transmiten por estas tapas.

■ **F) Cálculo del calor transmitido por convección natural**

Lo primero que se tiene que resolver, es si se puede tratar estos cilindros como planchas verticales. Para ello se hace uso de la fórmula 3.9.

$$6,8 \geq \left(\frac{35 \cdot 3,15}{(5,859705903 \cdot 10^{11})^{1/4}} \right) \Rightarrow 6,8 \geq 0,126$$

D: 6,8 m

L: 3,15 m

Gr: $5,859705903 \cdot 10^{11}$; Este resultado se ha calculado con la temperatura media del economizador, la cual es de $189,80 \text{ }^\circ\text{C}$

Como se puede ver en el punto E, se cumple el requisito para realizar el cálculo del calor transmitido por convección en los economizadores, como si se tratara de una plancha vertical.

Para obtener el calor transmitido por convección natural en cada tapa, se debe obtener el valor de Grashof y Nusselt. Esto es para poder obtener el coeficiente de proporcionalidad y con estos el valor del calor transmitido.

En las tapas pequeñas:

Para estos cálculos se hace uso de las fórmulas: 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 y 3.14

$$q_1 = 7,298 * 0,031 * (189 - 38,4) \longrightarrow \mathbf{34,07 \text{ W}}$$

$$\Delta T = 189 - 38,4 = 150,6^\circ C$$

$$\alpha = \left(\frac{54,67 * 0,0267}{0,2} \right) \longrightarrow 7,298 W/m^2 * ^\circ C$$

$$N_u = 0,54 * (149602791 * 0,702)^{0,25} \longrightarrow 54,67$$

$$Gr = \left(\frac{9,81 * 0,0032 * 150,6 * 0,2^3}{(1,59 * 10^{-5})^2} \right) \longrightarrow 149602791$$

$$\beta = \left(\frac{1}{311,55} \right) \longrightarrow 0,0032 K^{-1}$$

α : coeficiente de proporcionalidad de convección

λ : conductividad del aire $0,0267 \text{ W/m} * ^\circ C$

A : área m^2

T_a : $189^\circ C$

T_b : $38,4^\circ C = 311,55 \text{ K}$

N_u : valor de Nusselt

B : constante = $0,54$

n : constante = $0,25$

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$

ν^2 : viscosidad del aire = $1,59 * 10^{-5} m^2/s$

Gr : número de Grashof

Pr : número de Prandtl del aire = $0,702$

d : cómo se calcula como una lámina vertical, es la altura de la tapa = $0,2 \text{ m}$

$$\beta = \left(\frac{1}{T_a} \right)$$

En las tapas grandes:

Para estos cálculos también se hace uso de las fórmulas: 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 y 3.14

$$q_{g1} = 6,32 * 0,136 * (190,6 - 38,4) \longrightarrow \mathbf{130,82 \text{ W}}$$

$$\Delta T = 190,6 - 38,4 = 152,2^\circ C$$

$$\alpha = \left(\frac{85,18 * 0,0267}{0,36} \right) \longrightarrow 6,32 W/m^2 * ^\circ C$$

$$N_u = 0,54 * (881752890,1 * 0,702)^{0,25} \longrightarrow 85,18$$

$$Gr = \left(\frac{9,81 * 0,0032 * 152,2 * 0,36^3}{(1,59 * 10^{-5})^2} \right) \longrightarrow 881752890,1$$

$$\beta = \left(\frac{1}{311,55} \right) \longrightarrow 0,0032 K^{-1}$$

T_a : $190,6^\circ C$

T_b : $38,4^\circ C = 311,55 \text{ K}$

d : es la altura de la tapa = $0,36 \text{ m}$

Economizador	q tapas grandes	q tapas pequeñas	Unidad
Proa	130,82	34,07	W
	129,75	34,13	W
		34,02	W
		34,3	W
		30,99	W
		34,63	W
		34,88	W
		35,04	W
		34,58	W
		34,77	W
Popa	130,35	33,94	W
	131,42	32,79	W
		34,38	W
		32,66	W
		34,56	W
		34,33	W
		34,9	W
		34,63	W
		34,86	W
		34,42	W

Tabla 4.4: Calor transmitido por convección natural de los dos economizadores

En la siguiente tabla se ha calculado el calor transmitido por convección natural en cada tapa usando las temperaturas de la tabla 4.2.

En total se obtiene un sumatorio de transmisión de calor por convección de 1205,15 W, el cual se podría minimizar con la reposición de las protecciones aislantes que se les extrajeron en las zonas de las tapas.

En definitiva, si se instalaran estas protecciones en las tapas, la temperatura ambiente se vería considerablemente reducida, mejorando las condiciones de trabajo en ese lugar, y también mejoraría la producción de vapor, aunque ese no es el principal problema, pues esa energía que se pierde se transmitiría al agua que contiene el economizador y con ello aumentaría el volumen de producción de vapor.

4.7 Problemas en el turbocompresor y en las protecciones del colector de escape

Se inspecciona con la cámara térmica los motores principales, y se observa cómo se ve en el turbocompresor la entrada del aire a la parte compresora.

Los turbos están protegidos por un protector de aluminio, por lo que para obtener una buena definición de las capturas térmicas se ha puesto la emisividad al 0,77 como indica la tabla de emisividad 3.2.

Se inspeccionan los 4 turbos de los principales y se comparan entre ellos. Los tres primeros aparentemente se encuentran funcionando de manera equilibrada entre ellos. En cuanto a la visión termográfica, no se observaba nada distinto el uno del otro.

En el cuarto se empezó a captar que había algo extraño, pero no se descifraba qué era lo que le pasaba. Se cambió de carta de colores para ver si apreciaba lo que era, pero no se distinguía. Por lo tanto, se cambió a la paleta de Arco Iris, que suele ser la mejor para ver los cambios térmicos, pero tampoco se distinguió lo que sucedía. Se pensó que era la batería, pero tenía carga. Se apagó la cámara, se encendió y se seguían viendo cosas raras. Pues se tomó la captura a una distancia de 1 o 2 m, había momentos en los que se producía un cambio de color. Lo que quiere decir que cambiaba la temperatura.

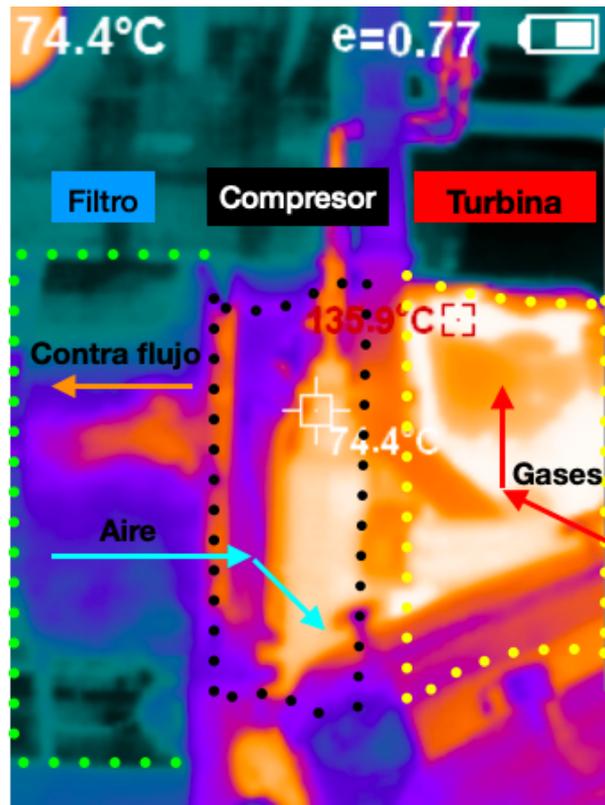


Figura 4.19: Pérdida en el turbo 4.

Fuente: Recopilación propia

Se tomó capturas desde la proa del motor a unos 6 m de distancia y se comenzó a ver lo que captaba la cámara. Se ve cómo el aire entraba por el filtro a la parte compresora, pero había momentos, que costó capturarlos porque sucedía en milésimas de segundo. El aire era rechazado, saliendo a contra flujo, más caliente hacia el filtro, como se puede apreciar en la figura 4.19.

Lo primero que se piensa es que los gases de escape se estaban comunicando con la parte compresora y salían parte de esos gases por el filtro, como se ve en la imagen térmica.

Se indagó el despiece del turbo cargador y el manual de funcionamiento, se encuentra que para que ello sucediese, debería saltar la alarma de alta temperatura en el colector de admisión, e incluso ver cómo aumenta la temperatura de agua de refrigeración del aire de carga, situaciones que en ningún momento se producían.

En el manual se observa que para que los gases de escape lleguen a salir por el filtro tienen que pasar primero el retén de aceite por el lado de escape, el aceite de lubricación de los cojinetes del rotor, y el retén por el lado del compresor. Si pasan estos dos retenes, se tendrían señales de que algo está mal, pues debe aumentar las temperaturas en la salida de la turbina, porque se empieza a quemar aceite motor en el lado de gases de escape que se encuentran a alta temperatura, y por el lado de compresión debería comenzar a verse restos de aceite por el filtro, y ninguno de estos dos casos se daban.

El manual hablaba de una válvula que comunicaba el lado de gases de escape con el colector de admisión, y otra que bypassa la turbina de gases de escape, así que se inspeccionaron esos circuitos para ver si se estaba comunicando por ahí, pero se termografió el circuito y se encontraba incomunicado por dos válvulas neumáticas.

Con ayuda del manual se intentó entender qué era lo que pasaba, pero estaba fuera de los conocimientos lo que sucedía. No se podía apreciar cuál era el fallo para que se produjese este flujo de gases de escape al filtro de aspiración.

Se observó la temperatura de gases de escape, la de entrada y salida del Tc, la de carga, la del colector y las de agua de LT y HT de los enfriadores de aire de carga y todo estaba dentro de los parámetros de funcionamiento normal.



Figura 4.20: Waste Gate anulada y sin by-pass
Fuente: Recopilación propia

Se le comunicó al jefe de máquinas y dijo que se inspeccionara bien por lo que podía suceder ese fenómeno, que tenía algo que ver con las Waste Gate.

Una vez los motores parados, se inspeccionó sobre la reductora y se empezó a inspeccionar el circuito. Se observó cómo en un extremo de las tuberías donde actúa la by-pass, se encontraba una brida ciega y otras en la salida de los colectores de admisión, por lo que este sistema estaba anulado. También faltaba la válvula by-pass y en la Waste Gate se encontraban los cables desconectados.

En la figura 4.20 se puede ver en la parte baja donde se ve la bota de seguridad, las bridas ciegas del colector de admisión, falta la válvula by-pass que va donde está la brida ciega en la tubería. A la derecha de la foto, de color azul, se encuentra el actuador de la Waste Gate y ella. El tubo que se tiene en el centro, se ve cómo se ramifica en dos y se conecta a la entrada de gases de cada turbocompresor. Es aquí donde se puede empezar a comprender lo que sucedía y captaba la cámara.

Estas válvulas en ningún momento actuaban, pues la by-pass no existía, por lo que no puede dejar pasar el flujo de aire del colector de admisión al de escape, y la otra no puede accionarse porque no está alimentada eléctricamente.

Las válvulas Waste Gate y by-pass están diseñadas para la protección y optimización de los motores sobrealimentados. Al no estar en funcionamiento, no se puede aliviar la sobrepresión del colector o evitar que aumente el caudal de admisión.

La Waste Gate estaba diseñada para que el motor, al superar una carga del 85 %, comenzara a actuar la válvula de forma progresiva a medida que aumenta la carga. Mientras que la by-pass del colector abre en banda cuando llega a la presión máxima que está tarado el presostato, que en estos motores está a 2,6 bar.

Haciendo uso de la figura 4.21, se va a explicar el recorrido de los gases por medio de estas válvulas. La tubería A es la salida por la cual se libera la sobrepresión del colector de admisión. Pasa por la válvula By-pass 5, cuando la abre el actuador 6. Sigue su camino por la tubería B y se libera la presión en la entrada de los turbos, por el lado de gases.

Por otro lado, cuando se detecta una sobrecarga, los gases de escape circulan por el tubo B, se abre

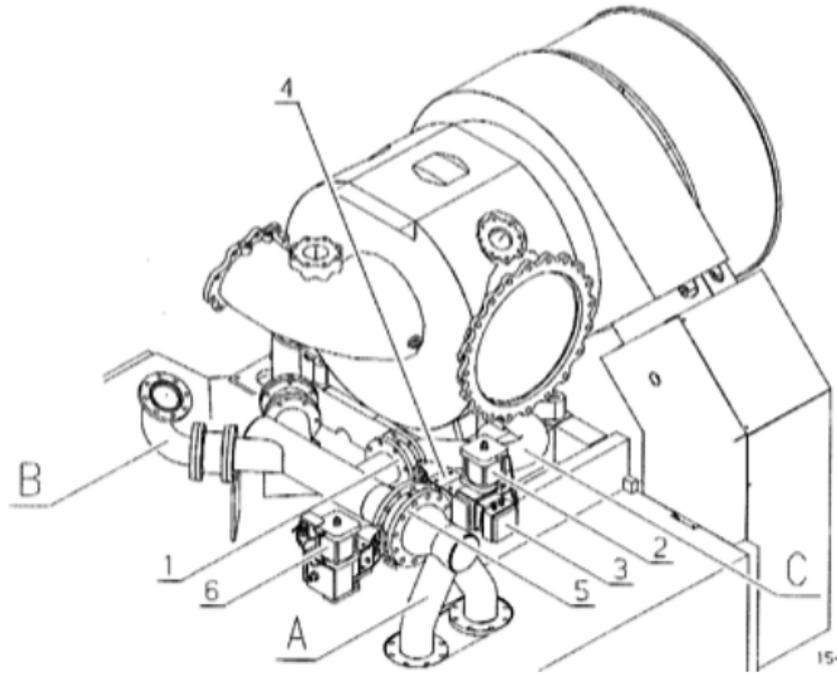


Figura 4.21: Esquema del turbo

Fuente: [21]

la válvula 1, por medio del actuador 3, y entra a la salida del turbo hacia el tubo de escape por la tubería C.

Lo que se produce en la figura 4.19, no es que los gases de escape se estén colando en parte y saliendo por el filtro, ni que se estén colando por la by-pass.

Lo que sucede es que al anular estos sistemas de seguridad, el motor no es capaz de consumir todo el aire que introduce el turbocompresor, y retrocede algo de aire de admisión, a mayor temperatura de la que entra, venciendo la parte compresora. Esto es momentáneo, porque el compresor lo que hace es aumentar la presión y el caudal y es imposible que durante mucho tiempo retroceda a contra flujo el aire caliente.

Esto puede suceder en los cambios de paso de la hélice, o sobretodo al aumentar o reducir carga en las maniobras de llegada y salida de puerto, pues se le baja o aumenta el paso a las hélices que son de paso variable.

Las mediciones se estaban realizando llegando a puerto, por lo que pudo suceder que se estuviese bajando la carga y por ello se observaba en la termografía alguna fuga de aire, por el filtro, más caliente que el que aspiraba el turbo.

Esto genera de forma momentánea que se frene el turbo un poco y esto no es bueno ni para los alabes ni cojinetes del eje del rotor. Pues al frenarse genera vibraciones, y el turbo es una pieza que requiere de un funcionamiento óptimo.

La solución para este problema sería poner en servicio este sistema que venía de fábrica. Pues nadie mejor que los fabricantes e ingenieros para saber los comportamientos de sus motores y componentes. Si ellos diseñaron este sistema, lo mejor por seguridad y rendimiento es mantenerlo operativo.

Por otro lado, se realizan capturas termográficas por las zonas de escape, con la misma emisividad que en los turbos, y se observa en las tapas de aluminio, que van protegiendo los colectores de escape como están irradiando temperatura. Esta se disipa por las uniones de las tapas, que no sellan de manera hermética. Sobre ellas llevan unas bandas de aluminio con lana de roca en su interior, para sellar mejor, pero ya de tantas veces que se han sacado, acaba fugando calor, como se puede apreciar en la figura 4.22.

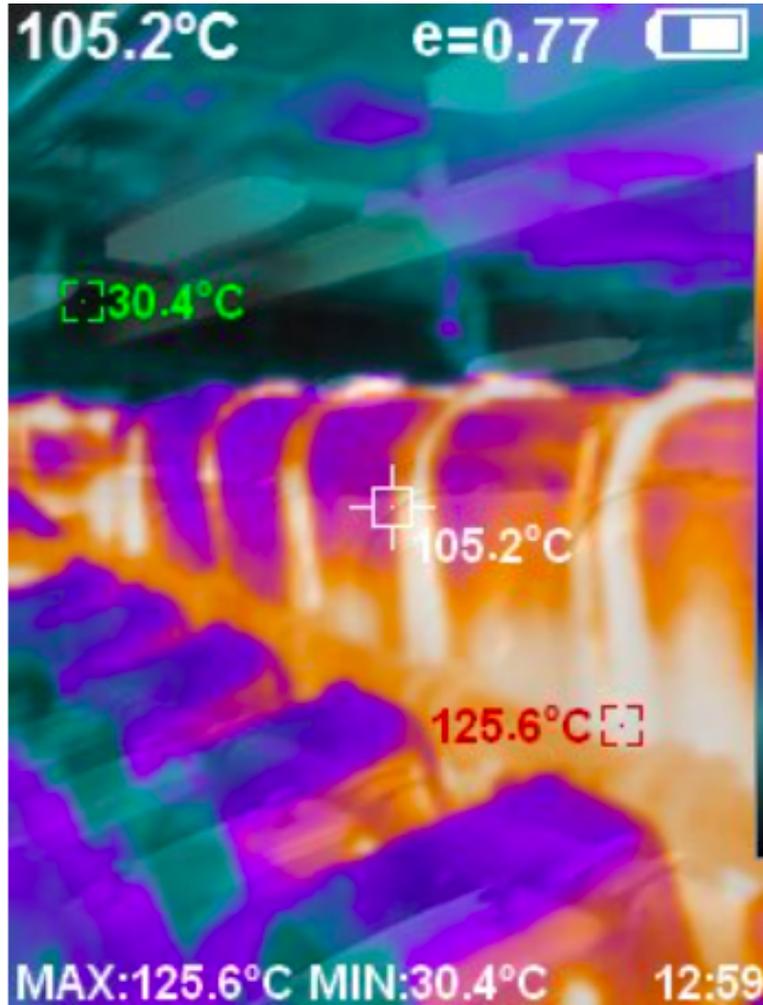


Figura 4.22: Tapas de protección del colector
Fuente: Recopilación propia

Para solucionar este inconveniente, se podría realizar un pedido de tapas nuevas y protecciones, pues están todas dobladas y ovaladas. Esto es porque al sacarlas con patas de cabra para reapretar el colector y revisar el estado de las expansiones de gases, se extraen las tapas todos los meses.

5 Conclusiones

1. La termografía es una de las herramientas más versátiles para detectar fallos de origen calorífico, pues permite detectarlos de forma rápida, incluso antes de que se produzca la avería.

Muestra una imagen de las diferentes temperaturas que produce un sistema, sin necesidad de desmontarlo o detener su funcionamiento.

2. Haciendo uso de esta técnica se permite realizar mantenimientos predictivos, mejorar el rendimiento, reducir costos por averías y poder programar mantenimientos en cuanto al ámbito mecánico se refiere.

3. Como ejemplo de dichas labores de mantenimiento, se pueden poner los casos tratados en este trabajo:

- El aire acondicionado del control es un equipo crítico, pues es el encargado de mantener la sala del control de máquinas a una temperatura normal. El fin de este sistema es que no se incremente la temperatura de los equipos que controlan los parámetros de la sala de máquinas. El uso de la termografía ayuda a la detección temprana de anomalías, pudiendo adelantarse a fallos que mantengan el equipo fuera de servicio. Se puede apreciar en la figura 4.1 cómo al caer este sistema, empezó a subir la temperatura de los aparatos electrónicos. Si esto perdura en el tiempo, se puede generar una avería que perjudicaría la obtención y ejecución de ciertos controles, incluso dejarlos fuera de servicio.
- En los grupos de aire acondicionado de pasaje se han detectado con la cámara ciertos fallos que, pese a que no son considerables, se producen pérdidas de energía. Algunos sin la ayuda de la termografía no serían detectables. Se realizaron mediciones antes y después de subsanar los fallos y se ha visto cómo han mejorado las condiciones. Se calcularon las mejoras obteniendo un 45,6 %, por lo que pese a que no eran de gran consideración, a largo plazo se ha mejorado la eficiencia de la instalación.
- En la gambuza se capturó un problema que existía desde el montaje del equipo, pero era imperceptible a simple vista. Se estaba recalentando el refrigerante a la entrada del compresor, fruto de una mala ubicación del filtro separador de aceite. Este se encuentra a la salida del compresor, he irradia calor en el tubo de retorno del refrigerante en la aspiración elevando su temperatura. Esto sin el uso de la termografía no es detectable. Se realizaron pruebas, obteniendo resultados satisfactorios, al colocar una lámina de aislante anteriormente mencionada sobre el filtro. Se captó cómo descendieron las temperaturas en general, sobretudo en la aspiración. Con esto se consigue mejorar el rendimiento térmico del fluido y su vida útil. Se presentó una serie de soluciones para poder minimizar este inconveniente, para subsanarlo en el futuro, en las cuales se requería de modificaciones del sistema. Esto generaría una mejora en la vida de los fluidos y las condiciones de trabajo del compresor.
- En cuanto a los economizadores, destacar que el uso de la termografía ha sido esencial para detectar problemas, tales como la falta de aislante en alguna zona, pues se encuentra bajo el chapado, por lo que no se puede percibir sin ella o sin desmontarlo. En cambio, por las

tapas se podía apreciar que existían pérdidas térmicas, pues al pasar se notaba la radiación de temperatura por esas zonas.

Los cálculos reflejan la energía que se pierde, siendo de más de 1900 W, en cambio, si se colocaran las protecciones de las tapas, se minimizaría a poco más de 200 W.

Este sistema genera vapor a partir de gases residuales, por lo que estas pérdidas no mejorarían mucho el rendimiento, pero sí las condiciones de trabajo en esa sala.

- Por otro lado, en el sistema de gases de escape, quizás fue el que más costó detectar y ajustar la cámara para comprender lo que estaba sucediendo. Pues no se encontraba la paleta de colores que mejor se ajustara para diferenciar con claridad lo que sucedía. Esta anomalía sería indetectable por cualquier otro método, pues si no es detectando el calor que emite ese contraflujo, no se apreciaría, al ser momentáneo. El calor que radiaba por el filtro no era continuo, solo cuando se producía ese contra flujo, por lo que la termografía no es algo que con una sola captura se comprenda lo que sucede. Este es un claro ejemplo de ello. La única solución que se observa para ello, y más que una solución, es una recomendación, sería montar y dejar operativo este sistema como fue diseñado por el fabricante.

Anexos

A Imágenes de los sistemas



Figura A.1: Sala de aire acondicionado del pasaje
Fuente: Recopilación propia

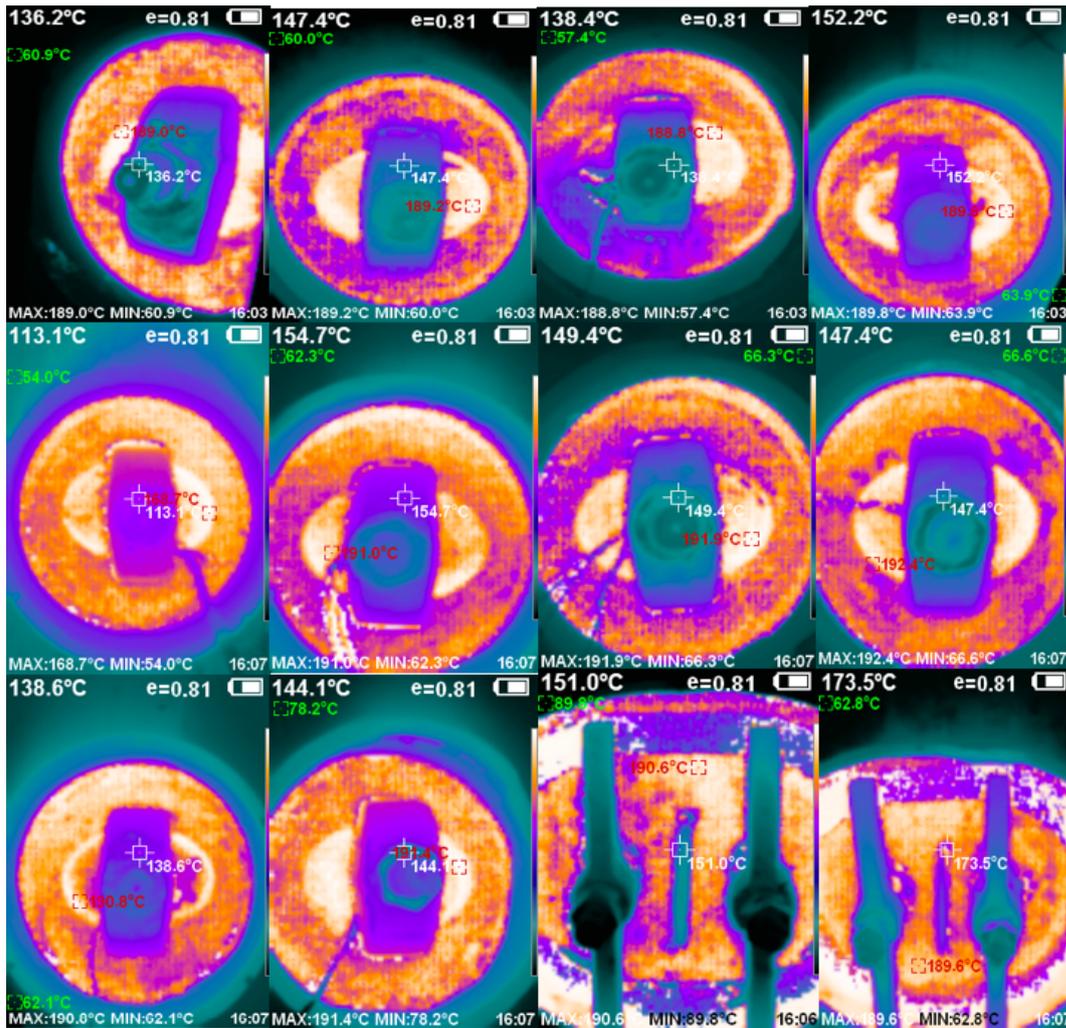


Figura A.2: Temperatura de las tapas del economizador de proa
Fuente: Recopilación propia

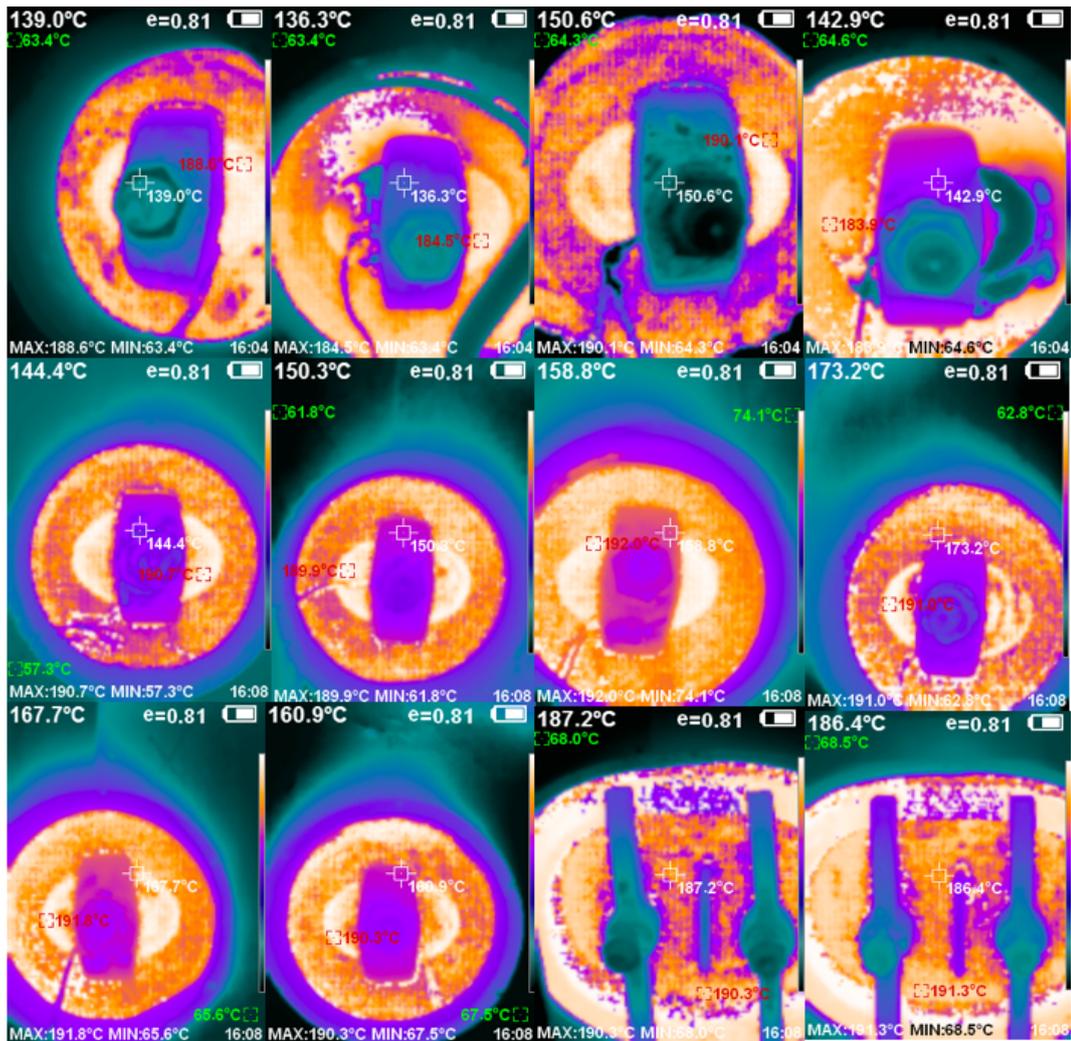


Figura A.3: Temperatura de las tapas del economizador de popa
 Fuente: Recopilación propia

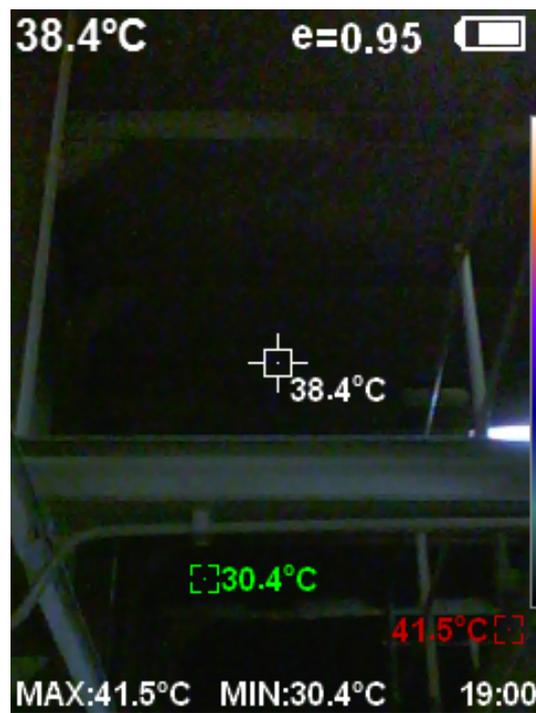


Figura A.4: Temperatura ambiente de la sala de economizadores
Fuente: Recopilación propia



Figura A.5: Grupo de frío de aire acondicionado del control
Fuente: Recopilación propia

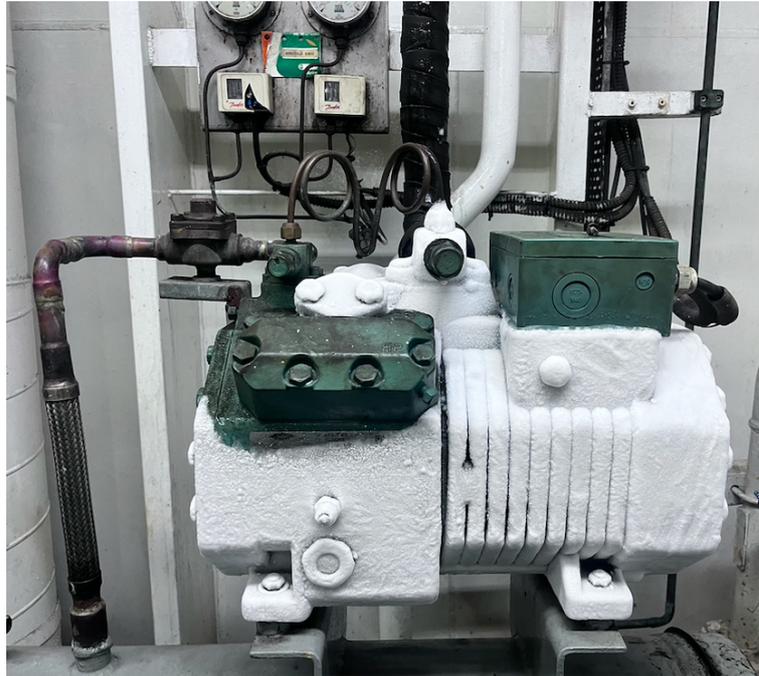


Figura A.6: Compresor congelado por fallo en el ventilador
Fuente: Recopilación propia



Figura A.7: Hielo en la gamba de congelado
Fuente: Recopilación propia



Figura A.8: Sala de los economizadores
Fuente: Recopilación propia

Bibliografía

- [1] “Historia de la Termografía y las Cámaras Térmicas”. [en línea], consultado el 15 de noviembre de 2022. <https://www.camaratermica.info/historia-de-la-termografia/>.
- [2] CONESA, J., *Mecanismos de transferencia de calor*. <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/34475/1/Mecanismos>[en línea], consultado el 21 de enero de 2024.
- [3] DE GUANAJUATO, U., “Clase digital 8. Convección natural”. [en línea], consultado el 12 de febrero de 2024. <https://blogs.ugto.mx/rea/clase-digital-8-conveccion-natural/>.
- [4] DOMINGO, A. M., *Apuntes de Transmisión del Calor*. <https://oa.upm.es/6935/1/amd-apuntes-transmision-calor.pdf>, [en línea], consultado el 20 de enero de 2024.
- [5] EDISA, “La emisividad y su efecto en la medición de temperaturas”. [en línea], consultado el 22 de febrero de 2023. <https://www.sedisa.com.pe/servicios/blog/la-emisividad-y-su-efecto-en-la-medicion-de-temperaturas>.
- [6] FLUKE, “Cómo funcionan y por qué pueden ser necesarias”. [en línea], consultado el 24 de febrero de 2022. <https://www.fluke.com/es-ar/informacion/blog/captura-de-imagenes-termograficas/como-afecta-la-emisividad-a-las-camaras-termograficas>.
- [7] GROUP, S., “¿Cuál es la mejor paleta de color?” [en línea], consultado el 22 de julio de 2023. <https://www.thesnellgroup.com/blog/cual-es-la-mejor-paleta-de-color>.
- [8] INDUSTRIES, A., *Manual de Instrucciones, Instalación de la caldera*. 2019.
- [9] INSTRUMENTS, *Manual de instrucciones*. https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/camara-termografica-pce-instruments-camara-termografica-pce-tc-30n-det_5929926.htm, [en línea], consultado el 15 de enero de 2024.
- [10] MASTERSI, “Que es un economizador de vapor”. [en línea], consultado el 24 de enero de 2024. <https://www.mastersi.com.pe/mastersi/blog/255-que-es-un-economizador-para-calderas-de-vapor>.
- [11] MELGOSA REVILLAS, S., *Guía de la Termografía infrarroja, Aplicaciones en ahorro y eficiencia energética*. <https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2011/11/Guia-de-la-Termografia-Infrarroja-Aplicaciones-en-Ahorro-y-Eficiencia-Energetica-fenercom-2011.pdf>, [en línea], consultado el 12 de junio de 2023.
- [12] MELGOSA REVILLAS, S., *Guía de la Termografía infrarroja, Aplicaciones en ahorro y eficiencia energética*. <https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2011/11/Guia-de-la-Termografia-Infrarroja-Aplicaciones-en-Ahorro-y-Eficiencia-Energetica-fenercom-2011.pdf>, [en línea], consultado el 29 de enero de 2024.
- [13] NAVE, R., “Ley de Stefan-Boltzmann”. [en línea], consultado el 12 de enero de 2024. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/thermo/stefan.html>.
- [14] PROMAX, “Cómo funcionan y por qué pueden ser necesarias”. [en línea], consultado el 16 de noviembre de 2022. <https://www.promax.es/esp/noticias/400/camara-termografica-como-funcionan-y-por-que-pueden-ser-necesarias/>.

-
- [15] S.A., A. L. I., “Aalborg XS-2V”. [en línea], consultado el 24 de enero de 2024. <https://www.alfalaval.es/productos-y-soluciones/transferencia-de-calor/calderas/economizador-de-gases-de-escape/aalborg-xs-2v/>.
- [16] S.A., G. I., “Refrigerador de aire de sobrealimentación”. [en línea], consultado el 2 de febrero de 2024. <https://www.directindustry.es/prod/gea-polacel-cooling-towers-bv/product-104805-1731829.html>.
- [17] THERMOMETRE.FR, “tabla de emisividad”. [en línea], consultado el 14 de enero de 2024. <https://www.termometro.com/blogs/guia-de-termometro/tabla-de-emisividad>.
- [18] TUCAL, *Manual Aire acondicionado C 1653*. 2006.
- [19] VISIOTECH, “Emisividad en cámaras termográficas portátiles”. [en línea], consultado el 5 de enero de 2024. <https://support.visiotechsecurity.com/hc/es/articles/360012930300-Emisividad-en-cámaras-termográficas-portátiles>.
- [20] WIKIPEDIA, “Cuerpo negro”. [en línea], consultado el 15 de agosto de 2023. https://es.wikipedia.org/wiki/Cuerpo_negro.
- [21] WÁRTSILA, B., *Engine Manual*. 2006.