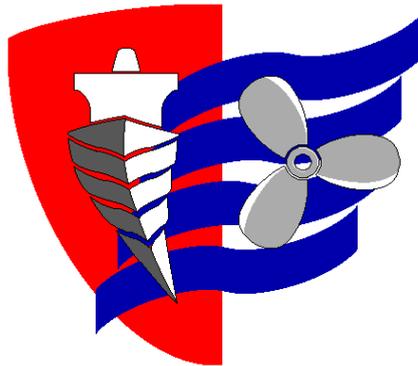


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**ESTUDIO TÉCNICO DE COGENERACIÓN
EN LOS BUQUES**

**COGENERATION TECHNICAL RESEARCH
ON VESSELS**

Para acceder al Título de Grado en

INGENIERÍA MARÍTIMA

Autor: Jorge Losada Fernández

Director: Antonio Vega Omaña

Diciembre - 2016

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Trabajo Fin de Grado

**ESTUDIO TÉCNICO DE
COGENERACIÓN EN LOS BUQUES**

**COGENERATION TECHNICAL
RESEARCH ON VESSELS**

Para acceder al Título de Grado en

INGENIERÍA MARÍTIMA

Diciembre – 2016



ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	4
SUMMARY	6
PALABRAS CLAVE	8
KEYWORDS	9
1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 Análisis técnico y económico de las instalaciones de los buques	13
1.2 Elementos de una Cogeneración.....	18
1.3 Beneficios y ahorro en la Cogeneración.....	21
2. PLANTEAMIENTO – IMPLEMENTACIÓN DE LOS PROCESOS	23
2.1 Situación Energética Actual	24
2.2 Cogeneración en la actualidad	28
2.2.1 MACIs	30
2.2.2 TV y TG	32
2.3 Normativa	37
3. METODOLOGÍA Y DESARROLLO – ANÁLISIS DE INSTALACIONES REALES	40
3.1 Cogeneración en la instalación de producción de agua dulce a bordo del “Sevilla Knutsen”	40
3.2 Explicación Circuito Refrigeración Motores	45
3.3 Esquemas de la Instalación	47
4. CONCLUSIONES	61
ANEXO I	62
5. BIBLIOGRAFÍA	63
AVISO:	68



RESUMEN

La humanidad se enfrenta a un período de cambio que marcará el futuro energético mundial, el cambio climático nos amenaza y al mismo tiempo es un reto para conseguir disminuir la contaminación y mejorar nuestra calidad de vida.

La temperatura del planeta lleva aumentando durante las últimas décadas de forma alarmante, y de seguir así, estaríamos acelerando la destrucción de nuestra casa, donde vivimos y que por tanto debemos cuidar.

Los gases de “efecto invernadero” (GEI) son los protagonistas del cambio climático, al expulsarlos a la atmósfera, estamos creando una protección térmica a la tierra que lejos de proteger, hace que la temperatura de la tierra aumente progresivamente año a año. Por lo que, cuanto mayor es la concentración de GEI mayor es la energía térmica que se queda atrapada. Éste “efecto invernadero” está causando muchos desajustes en los ecosistemas, ya que la temperatura global ha cambiado radicalmente en los últimos años.

El Dióxido de Carbono, el Metano o los Óxidos de Azufre son gases que favorecen éste fenómeno, y que por lo tanto acentúan el cambio en el clima global. Debido a que la temperatura podría aumentar entre 2,4°C y 6,4°C hacia fines de este siglo, la comunidad científica está luchando para que la situación cambie totalmente.

Al mismo tiempo, la población mundial sigue creciendo, aumentando la necesidad de energía, por lo que el reto es aún mayor, llevando a la industria global hacia la eficiencia energética, a la búsqueda de la implementación de los procesos energéticos o a la instalación y búsqueda de nuevas energías renovables.

En éste sentido, la Cogeneración supone un ahorro energético muy grande, que al ir unido a un ahorro económico, ofrece una gran ventaja para las instalaciones industriales en tierra y para las plantas de propulsión en los buques.



La Cogeneración lleva presente aproximadamente 100 años en instalaciones terrestres, pero también hace décadas que las instalaciones en los buques están inmersas en procesos de Cogeneración, aunque quizá no se les ha dado la importancia que merecen. En este momento de cambio hacia las energías limpias y a la eficiencia de las mismas, los buques se han convertido en un campo de pruebas idóneo.

En este **Trabajo Fin de Grado** desarrollaré cuales son las instalaciones presentes en los mismos y que ahorro suponen, así como el beneficio que están generando al planeta, mediante la disminución del consumo de combustibles fósiles y los gases contaminantes unidos a éstos.



SUMMARY

Humanity is facing a period of change that will mark the future global energy, climate change threatens us and at the same time, is a challenge for reducing pollution and improving our quality of life.

The planet temperature is increasing worryingly over the past decades, and if we go on like this, we would be accelerating the destruction of our house, where we live and therefore the place we should care.

“Greenhouse gases” (GHGs) are the climate change main characters, when they are driven out into the atmosphere, we are creating a thermal Earth protection that far from protecting, causes the Earth temperature increases progressively year by year. Thus, the higher the concentration of GHG, the greater the thermal energy that is trapped. This "greenhouse effect" is causing many disorders in ecosystems, since global temperature has changed radically in recent years.

Carbon Dioxide, Methane and Sulfur Oxides are gases that promote this phenomenon, and therefore emphasize the global climate change. Because the temperature could rise between 2.4 ° C and 6.4 ° C by the end of this century, the scientific community is struggling to change the situation.

Simultaneously, the world population continues growing, increasing the energy need, so the challenge is even greater, leading the global industry towards energetic efficiency, the pursuit of the energy processes implementation and/or installation and search for new renewable energies.

In this sense, Cogeneration is a very big energy savings that go hand in saving money, is a great advantage for industrial facilities on land and propulsion plants on ships.



To talk about Cogeneration, we have to talk about the ground facilities, as it has been present since 100 years ago, but we must also talk about the ships, because the facilities on ships carry Cogeneration processes involved. It may not have been given all the importance they deserve, but currently, in this time of change to clean energy and efficiency of them, the vessels have become an ideal field tests.

In this **Final Project** I will develop these facilities and savings which represent. Such as, the profit generated to the planet by reducing fossil fuel consumption and pollutant gases linked to them.



PALABRAS CLAVE

Cogeneración

Ciclo Combinado

Turbina de gas y vapor

MACI – Motor Alternativo de Combustión Interna

GEI – Gases de Efecto Invernadero

ECA – Zonas de Control de Emisiones

Tep – Tonelada Equivalente de Petróleo

MGO – Combustible Diésel Marino

LSFO – Combustible Fuel Oil Marino con bajo contenido en azufre (<1%)

DFDE – Propulsión con Motores Eléctricos alimentados por MACIs, combustible dual

ME-GI – Motor principal alimentado con gas mediante inyección



KEYWORDS

Cogeneration

Combined Cycle

Gas and steam turbine

MACI – Alternative Combustion Engine

GEI – Greenhouse gases

ECA – Emission Control Area

Tep (Toe) – Tonne of oil equivalent

MGO – Marine Gas Oil

LSFO – Low Sulphur Fuel Oil

DFDE – Dual Fuel Diesel Electric

ME-GI – Main Engine Gas Injection

1. INTRODUCCIÓN

La Cogeneración, tal como vemos en la *Imagen 1*, es la generación paralela de energía térmica y mecánica. La mayoría de las veces, en las centrales de tierra, esta energía mecánica se utiliza para accionar un generador produciendo por tanto energía eléctrica. Mientras que en los buques, la energía mecánica es directamente usada para la propulsión del mismo, y otra parte es transformada en energía eléctrica para alimentar a los equipos consumidores.



Imagen 1: Esquema del proceso de Cogeneración.

Imagen de elaboración propia (Jorge Losada, 2016) Basada en la información que proporcionan las tres primeras fuentes documentales de la bibliografía sobre la definición de Cogeneración.

Normalmente la cogeneración se da en el marco de una industria con un consumo térmico (en forma de vapor, agua caliente o fría o gases calientes) y un consumo eléctrico. La cogeneración aporta toda o parte de las energías térmica y eléctrica. En las instalaciones en tierra el excedente de energía eléctrica se exporta a la red en unas condiciones técnicas y económicas reguladas legalmente. Por el contrario, en los buques se emplea para cubrir las necesidades de consumo diario a bordo.

La instalación de los buques puede verse en la *Imagen 15*.

Dentro del marco de una industria existen dos grandes tipos de cogeneración (ver *Imagen 2*).

- **Cogeneración de cabeza o superior.**

Se utiliza una maquina térmica (motor o turbina) que produce energía mecánica y térmica, las cuales se aprovechan de diferentes formas según sean las necesidades de la fábrica o buque. Es con diferencia la más habitual cuando se habla de cogeneración. En el caso de los buques, la energía térmica suele utilizarse para la producción de vapor de agua de servicio mediante economizadores.

- **Cogeneración de cola o inferior.**

Se aprovecha alguna fuente de calor que produce la industria, generalmente en forma de gases o aire caliente. En este caso la cogeneración está formada por una caldera de recuperación pudiendo completarse con una turbina de vapor.

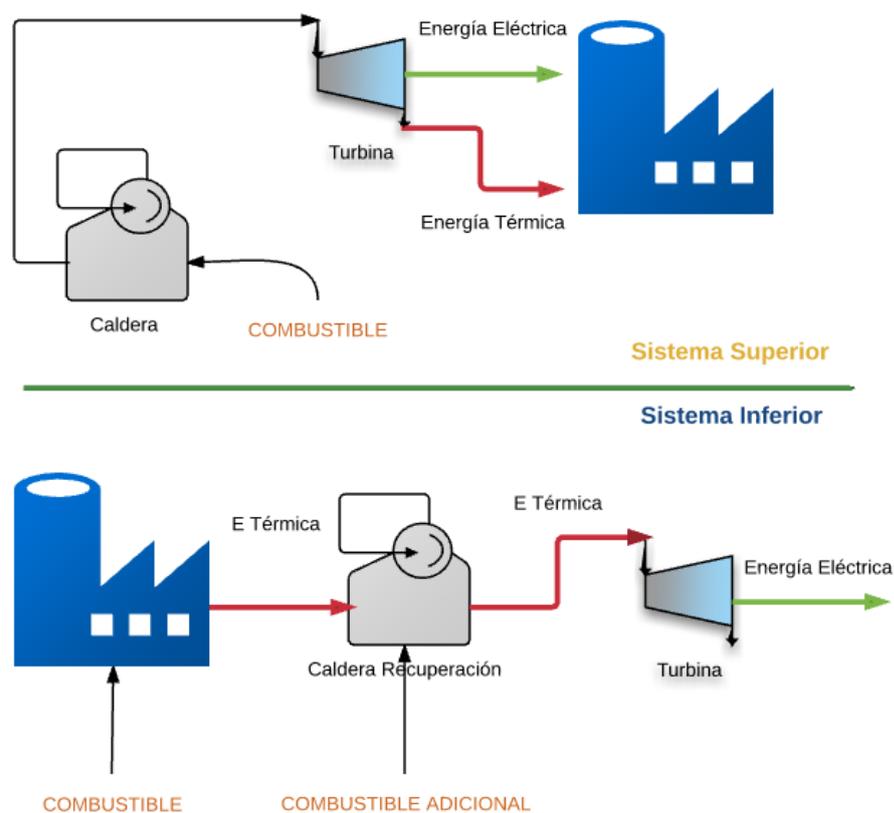


Imagen 2: Cogeneración Superior e Inferior, diferencias.

Imagen de elaboración propia. (Jorge Losada, 2016). Basada en la información que proporcionan las tres primeras fuentes documentales de la bibliografía.

La Cogeneración supone un sistema de producción eléctrica descentralizado frente al sistema tradicional que se centra en grandes instalaciones generadoras. Es un concepto que ya tiene más de un siglo, iniciándose en USA. En España, algunos datos significativos del año 2011 son los siguientes:

6.110 MW instalados	900 instalaciones
1,4 M puestos trabajo	4.500 M€
12% demanda eléctrica	Ahorro 1.500.000 tep/año

Tabla 1: Datos de Cogeneración en España.

Tabla realizada a partir de datos seleccionados de la página web de ACOGEN.

(Fuente: <http://www.acogen.es/cogeneracion-espana.php>)

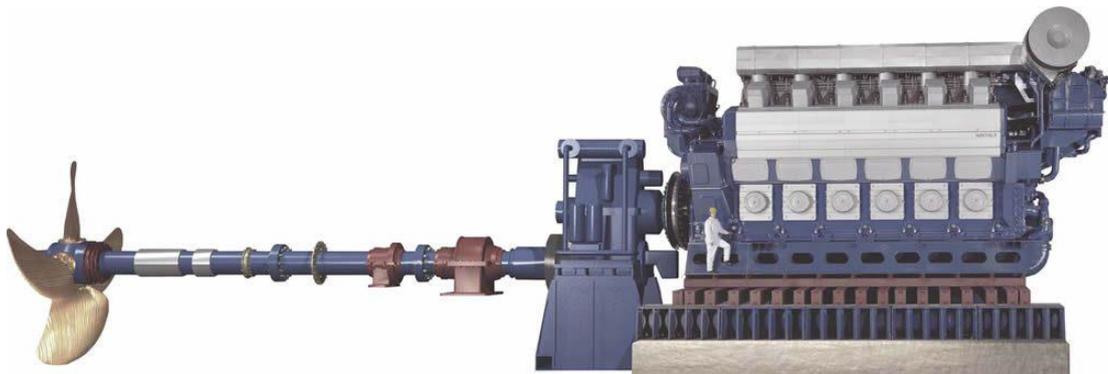


Imagen 3: Esquema de un MACI con el eje de cola y la hélice de propulsión.

(Fuente: [http://artimagesfrom.com/world-s-biggest/1.bp.blogspot.com/TtqRFQj3xx0*UdZQA_YQaAl*AAAAAIDU*oPVO8ram6IM*s800*enginediaq.jpg/](http://artimagesfrom.com/world-s-biggest/1.bp.blogspot.com*/TtqRFQj3xx0*UdZQA_YQaAl*AAAAAIDU*oPVO8ram6IM*s800*enginediaq.jpg/))*

La cogeneración se desarrolla principalmente en España mediante plantas de Motores de Combustión Interna Alternativos, además se está apostando por combustibles más respetuosos con el medio ambiente, como es el Gas Natural. Ya que las instalaciones de Cogeneración consumen aproximadamente un 20% del consumo nacional de Gas Natural.

1.1 Análisis técnico y económico de las instalaciones de los buques

La gran justificación de la cogeneración es que mejora el rendimiento global comparado con la producción convencional. Es decir, aprovecha la energía del combustible primario de forma mucho más eficiente.

Los motores alternativos de combustión interna convierten la energía química encerrada en los combustibles, en energía mecánica y térmica. A través de un alternador acoplado al motor, se genera también energía eléctrica. La energía mecánica se utiliza en la propulsión mientras que la energía térmica se consigue de los gases de escape y del agua caliente de los circuitos de refrigeración.

En las siguientes figuras se muestran las dos instalaciones, la convencional requiere 133 unidades de energía y la segunda 113 unidades de energía:

a) Convencional o patrón

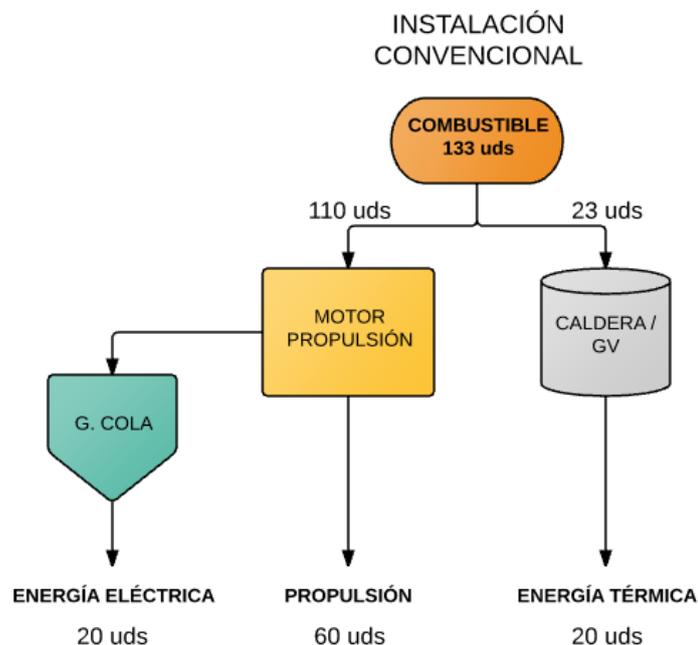


Imagen 4: Análisis energético de Instalación Convencional en un buque.

Imagen de elaboración propia para explicar de forma gráfica el análisis energético.

Toma la energía química del combustible (123 uds), se transforman 100 uds de ésta energía en mecánica mediante un motor alternativo de combustión interna (MACI), consiguiendo 60 uds para la propulsión del buque. A su vez, mediante el generador de cola, transformamos la energía mecánica del eje del motor en energía eléctrica mediante un alternador, consiguiendo 20 uds de energía eléctrica.

Por otro lado, utilizamos 23 uds de energía del combustible para quemarlas en una caldera o generador de vapor, consiguiendo 20 uds de energía térmica para procesos del buque. Finalmente obtenemos 100 uds de energía desglosadas como vemos en la imagen superior.

Se suponen pérdidas de energía en el MACI del 27%, un rendimiento eléctrico del 38% y un rendimiento del GV del 90%.

b) Cogeneración

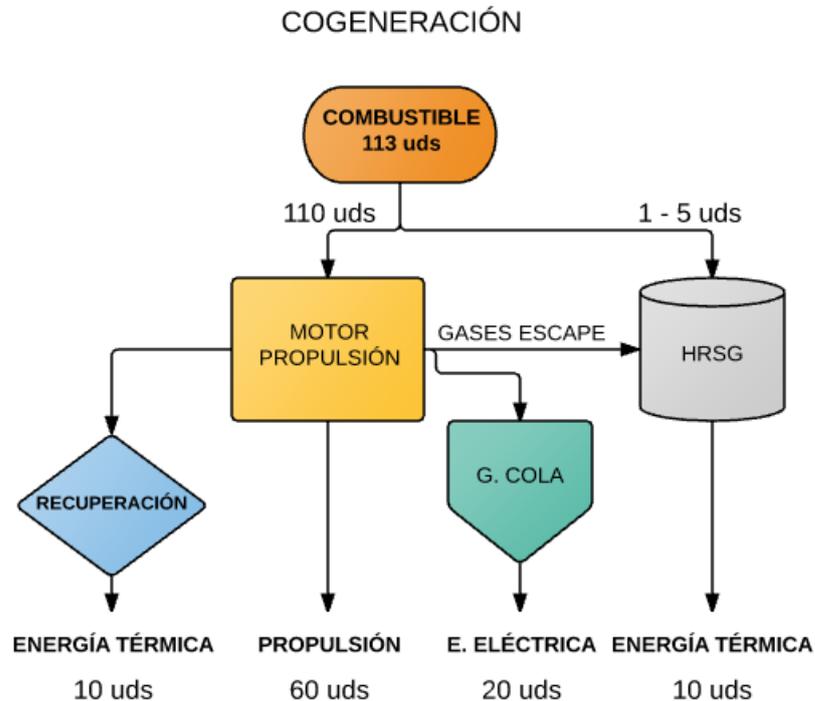


Imagen 5: Análisis energético de Instalación de Cogeneración en un buque
Imagen de elaboración propia para explicar de forma gráfica el análisis energético.



En éste caso tomamos 113 uds de energía proveniente del combustible, transformamos 110 uds de ésta energía en mecánica, consiguiendo 60 uds para la propulsión del buque. A su vez, mediante el generador de cola, transformamos la energía mecánica del eje del motor en energía eléctrica mediante un alternador, consiguiendo 20 uds de energía eléctrica. Y además, con una recuperación de la energía térmica (recuperación de energía del 10%) existente en los gases de escape y del agua de refrigeración (recuperación de energía del 9%), conseguimos 20 uds de energía térmica extra, 10 uds del lado de agua de refrigeración y 10 uds en los gases de escape del motor mediante la caldera de recuperación (HRSG).

Ahora solo necesitamos destinar de 1 a 5 uds de energía del combustible para quemarlas en el HRSG, consiguiendo igualmente 20 uds de energía térmica para el buque sumando ambos procesos. Ésta variación de unidades de energía depende de la carga del motor y de la demanda de vapor o de agua caliente de la caldera de recuperación.

Así también obtenemos 100 uds de energía, pero en este caso, mediante 113 uds de energía del combustible, por lo que en comparación con el sistema convencional obtenemos un ahorro de:

$$\text{Ahorro} = \left[\left(\frac{133}{113} \right) - 1 \right] * 100 = 17,69 \%$$

Se han considerado unas pérdidas inferiores en el MACI, ya que existe un aprovechamiento de la energía térmica de éste, por lo que se estiman éstas pérdidas en un 18%, siendo iguales las pérdidas eléctricas en el GC y teniendo un rendimiento en el HRSG del 57%.

Para ver más claramente lo que acabo de explicar, muestro a continuación una tabla donde se puede ver las características energéticas de los motores de gas para cogeneración de forma generalizada:

Rendimiento Eléctrico	39%	Recuperación de Calor		42-48%
		C. Refrigeración aceite	4%	
		C. Refrigeración Cilindros	22%	
		Gases de Escape	16-22%	
		Hasta 110°C	22%	
		Hasta 145°C	20%	
Hasta 200°C	16%			

Tabla 2: Explicación gráfica del rendimiento eléctrico y térmico desglosado de un MACI.

Tabla de elaboración propia basada en los datos de la siguiente fuente:

(http://www.caib.es/conselleries/industria/dgener/user/portaenergia/pla_eficiencia_energetica/produccioenergia_2.es.html)

“Por lo tanto, sumando el rendimiento eléctrico y térmico podemos conseguir una eficiencia global desde el 81% hasta el 87%, dependiendo del aprovechamiento de la energía de los gases de escape”.

(Motores Alternativos de Combustión Interna (MACI) de gas. (n.d.) Página Web del Gobierno de las Islas Baleares: http://www.caib.es/conselleries/industria/dgener/user/portaenergia/pla_eficiencia_energetica/produccioenergia_2.es.html, visitada en 13/11/2016, 2016)

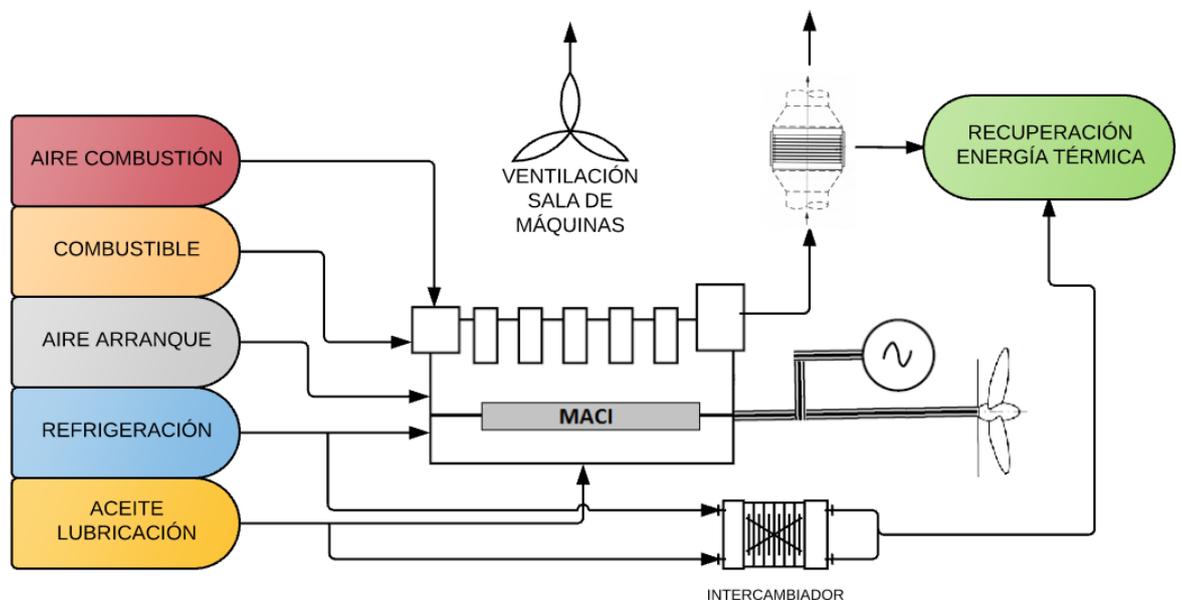


Imagen 6: Esquema completo de un MACI.

Imagen de elaboración propia realizada gracias a los conocimientos adquiridos en mi etapa profesional.
(Jorge Losada, 2016)

Siguiendo con el esquema anterior, y considerando un rendimiento del MACI de un 40%, tenemos los siguientes datos:

- ✓ Introducimos 1000 kW de combustible
- ✓ Rendimiento del MACI del 40%

La instalación que muestro a continuación es un ejemplo de la que expondré más adelante en el *punto 3* del presente TFG.

Para comparar los beneficios de dicha instalación, utilizaré la de un buque de las mismas características, produciendo agua dulce mediante un sistema de Ósmosis Inversa o utilizando vapor de agua del sistema de vapor del buque (no condensado).

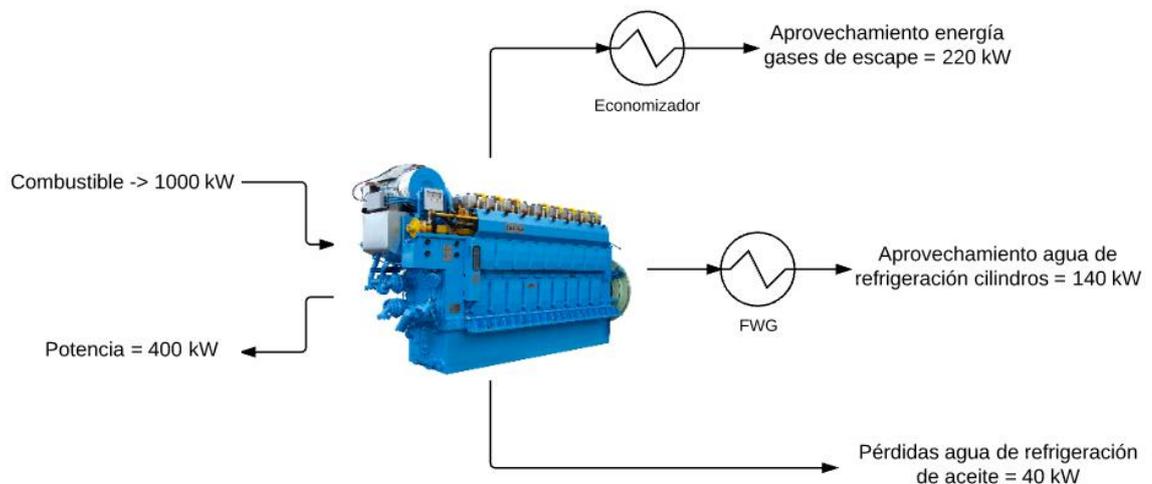


Imagen 7: Ejemplo balance energético MACI

Imagen de elaboración propia, basada en la información de la siguiente fuente (Lozano et al., 2004a)

(http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642007000500010 visitada el 11/11/2016)

Por lo que con el sistema de aprovechamiento de la energía térmica tanto de los gases de escape como del agua de refrigeración de cilindros del motor, se consigue un ahorro de 360 kW de energía con respecto a los 1000 kW de combustible en un MACI con un rendimiento del 40%.

1.2 Elementos de una Cogeneración

“Los principales elementos presentes en una Cogeneración son los siguientes:”

(ELEMENTOS DE UNA PLANTA DE COGENERACIÓN. (n.d.) Página Web Plantas de Cogeneración. Copyright © Renove Tecnología S.L 2009-2013: <http://www.plantasdecogeneracion.com/index.php/las-plantas-de-cogeneracion> , Visitada el 10/11/2016)

1. *“Fuente de energía primaria o combustible”.*
2. *“El elemento motor. Es el encargado de convertir energía térmica o química en mecánica.”*



Imagen 8: Estator extraído en una Turbina de Gas.

(Fuente: <http://scandasia.com/breakthrough-for-swedish-gas-turbine-in-china/>)

3. *“El sistema de aprovechamiento de energía mecánica. Generalmente formado por un alternador que la transforma en eléctrica y la propulsión, además de elementos acoplados como compresores, bombas, etc, donde la energía mecánica se aprovecha directamente.”*
4. *“El sistema de aprovechamiento de calor”. Como veremos más adelante, mediante calderas recuperadoras de calor de gases de escape o intercambiadores de calor (economizadores), “o incluso unidades de absorción que producen frío a partir de este calor de bajo rango.”*



5. *“Sistemas de refrigeración. Siempre hay un remanente de energía térmica contenida en el combustible que no será aprovechada en la planta y debe ser evacuada. Los intercambiadores suelen ser elementos habituales de estos sistemas.”* Como veremos en el caso del generador de agua dulce, los buques utilizan esa energía para producir agua potable. *“Un objetivo muy importante del diseño de una planta de cogeneración es minimizar esta cantidad de calor desaprovechada y evacuada a la atmósfera.”*

6. *“Sistema de tratamiento de agua. Tanto el sistema de refrigeración como el de aprovechamiento de calor requieren unas especificaciones en las características físico-químicas del fluido que utilizan que requiere de una serie de sistemas para su tratamiento y control.”*

7. *“Sistema de control. Se encarga de la gestión de las instalaciones.”*

8. *“Sistema eléctrico. Permite tanto la alimentación de los equipos auxiliares como el desempeño del balance eléctrico de la planta.”*

Los equipos que componen una cogeneración son:

a) Equipo principal

- Turbina
- Motores
- Calderas de vapor (con quemador)
- Caldera de recuperación (ciclo de calor)
- Turbinas de vapor (en combinación con algún equipo anterior)
- Una combinación de varios de los equipos anteriores

b) Equipo de aprovechamiento de calor

- Calderas de recuperación, con o sin postcombustión para producción de vapor y/o agua caliente
- Máquinas de absorción, para producción de frío
- Aprovechamiento directo gases de escape

c) Equipos y sistemas auxiliares e instalaciones

- Aire comprimido
- Sistema de refrigeración
- Sistema de aceite
- Sistema de almacenamiento de combustible
- Sistema de ventilación
- Sistema eléctrico
- Sistema de control
- Protección antiincendios
- Equipamiento vario: tubería y valvulería, aislamiento, calorifugado, polipastos y puentes grúa
- Instalaciones: naves, racks para tuberías, estructuras, soportes...



Imagen 9: Racks de Tuberías explicativo del párrafo anterior

(Fuente: <http://proteccioncontracaidas.com/fall-arrest-systems/energy-fall-protection/pipe-racks.asp>)

1.3 Beneficios y ahorro en la Cogeneración

Una mayor eficiencia supone una mejora medioambiental evidente, puesto que la contaminación es proporcional a la cantidad de combustible primario utilizado (sobre la base de que el combustible tanto en la cogeneración como en el sistema convencional es el mismo ya que la disponibilidad de combustible suele ser común a un país o región).

En definitiva las ventajas de la cogeneración se derivan fundamentalmente de su mayor eficiencia: ahorro de energía primaria, mejoras medioambientales y económicas.



Imagen 10: Ahorro energético

(Fuente: <http://www.inti.gob.ar/sabercomo/sc108/inti6.php>)

Los beneficios que van asociados a las instalaciones de las que hablaré posteriormente son los siguientes: (Página Web de ACOGEN (n.d.), 1999, ventajas de la Cogeneración: <http://www.acogen.org/informe/cogeneracion/bcg/beneficios.html> , Visitada el 11/11/2016)

- > *“Ahorro energético y reducción de emisiones de GEI.”*
- > *“Ahorro económico en la operación asociado al ahorro de combustible.”*
- > *“Actúa como motor de inversión, innovación, desarrollo económico y creación de empleo.”*



Los principales beneficios respecto al medio ambiente son: (Página Web de ACOGEN, (n.d.), 1999, Ventajas de la Cogeneración: <http://www.acogen.org/ventajas.php> , Visitada el 11/11/2016)

- > *“Ahorra millones de tep/año de energía primaria en todo el mundo.”*
- > *“Ahorra al año 40 millones de m³ de agua.”*
- > *“Evita 7 millones de toneladas de CO₂ al año.”*
- > La reducción del consumo de energía por mejoras en eficiencia y en extensión del uso de combustibles más limpios tiene un impacto directo en la reducción de las emisiones de efecto invernadero y en la mitigación del cambio climático.



2. PLANTEAMIENTO – IMPLEMENTACIÓN DE LOS PROCESOS

Debido a la nueva legislación adoptada por la OMI y la UE con respecto a la reducción de emisiones de CO₂, NO_x, SO_x y otras partículas en los buques, se presenta un problema importante para la industria marítima, que tendrá que iniciar el cambio hacia la utilización de combustibles más respetuosos con el medio ambiente y/o modificar sus instalaciones.

Otro pilar fundamental que lo sustenta es el ahorro económico que las empresas armadoras han conseguido instalando procesos de Cogeneración en sus buques, ya que aunque se incremente la inversión inicial, el ahorro a medio y largo plazo lo hace rentable. Por ello, el empleo de combustibles menos contaminantes, como es el caso del gas natural, unido a la cogeneración, es un asunto de vital importancia para los diseños de los barcos del futuro, empezando a ser una realidad en el presente.

En la actualidad es difícil encontrar un barco de reciente construcción que no cuente con un aprovechamiento de la energía térmica residual que existe en los gases de escape de los motores. Siendo en sus inicios algo experimental, ha llegado a ser imprescindible en el diagrama de proceso del vapor de agua o agua caliente de un buque.

Todo esto pone de manifiesto que las nuevas formas de aprovechamiento de energía residual (normalmente térmica) cobrarán aún mayor relevancia en el futuro, como es el caso del aprovechamiento de la energía de los gases de escape, citado anteriormente y que ya existe desde hace muchos años.

La normativa que regula los contaminantes presentes en los gases de escape ha conducido a la industria marítima a una búsqueda de la mejora de la eficiencia de las instalaciones de la flota mundial. Por ello, la cogeneración en los barcos ha representado un punto de partida muy importante durante las últimas décadas.

2.1 Situación Energética Actual

Las nuevas regulaciones con respecto a la contaminación por gases de escape de los buques han creado la necesidad de pensar en distintas soluciones para poder cumplirlas. El uso de energías renovables todavía está lejos, puesto que en la actualidad son tecnologías subdesarrolladas en el sector naval y, además, presentan incertidumbres, por lo que la implementación de las instalaciones mejorando su rendimiento junto con el consumo de combustibles “limpios” hace que la Cogeneración entre en juego claramente.



Imagen 11: LNG Powered

(Fuente: <http://www.lngworldnews.com/south-korea-eyes-dominance-in-lng-fueled-vessels-sector/>)

El cambio a MGO o a LSFO (aunque éste último ya no puede usarse en las zonas ECA), es decir, la utilización de combustibles destilados de bajo contenido en azufre, supone un aumento en el precio de entre un 10%, en el caso del LSFO, y un 55% en el caso del MGO, con respecto al HFO.

El MGO posee un contenido de azufre del 0,1%, por lo que los gases de escape generados cumplen con los requisitos legales. Al ser un combustible que ya se emplea en los buques, el comportamiento de los motores y demás equipamiento de la máquina ya es conocido. Destaca la comodidad en su uso, ya que se eliminarían gran cantidad de equipos de tratamiento de combustible (calentadores, número de depuradoras o purificadoras, filtros...) en comparación con el HFO.

Sin embargo, y como principal desventaja, se encuentra la económica, el coste de operación sería muy alto. La diferencia económica actual en comparación con el HFO se sitúa aproximadamente en 200 \$/ton (según estimación del precio medio en los principales puertos). Por lo tanto, en buques mercantes que navegan un número de millas elevado por año, sería totalmente inviable a largo plazo.



(Fuente: <http://www.comologia.com/como-invertir-en-petroleo/>) Imagen 12: Gráfica simbólica del precio del barril de Petróleo

En el caso del LSFO, el contenido de azufre depende del refinamiento que se le haya efectuado al combustible, pero los combustibles actuales de este tipo se sitúan en un 1,5% en contenido de Azufre. Esto indica que en las zonas ECA, según la nueva normativa, un buque no podría navegar consumiendo éste combustible, ya que superaría los límites establecidos.

Y en cuanto a las demás zonas, a partir del año 2020 o en su defecto el 2025, tampoco podría hacerlo, por lo que puede ser una medida temporal para los buques que no naveguen por las zonas de control.

La tendencia a usar gas natural como combustible marino está ganando fuerza como una alternativa limpia, debido a que reduce significativamente los contaminantes presentes en los gases de escape, además de disminuir la dependencia del petróleo pesado que se utiliza actualmente.

Los primeros buques en utilizarlo son los de línea regular, donde actualmente se puede asegurar el suministro de éste combustible. Como el ferry que vemos en la *imagen 13*, de la compañía “Fjord Line”.



Imagen 13: “MS Stavangerfjord”, buque propulsado por LNG

(Fuente: <http://worldmaritimeneews.com/archives/88467/norway-bergen-fosen-delivers-mv-stavangerfjord-to-fjord-line/>)

La compañía ofrece el transporte de pasajeros en sus líneas regulares por Noruega. Posee dos buques únicamente propulsados por LNG, el “MS Stavangerfjord” y el “MS Bergensfjord”. El abastecimiento de combustible se efectúa por medio de camiones cisterna especialmente preparados para éste propósito, existiendo también la posibilidad de que se lleve a cabo por medio de un buque de suministro de LNG. Actualmente, hay varios proyectos en marcha, destaca la unión entre las compañías “Klaipėdos Nafta” y “Bomin Linde LNG”, que ya están haciendo realidad éste tipo de buques de suministro, y se espera que para el año 2017 entre en operación en la zona del Mar Báltico.

El gas natural, es conocido con las siglas LNG, debido a que se transporta en estado líquido por cuestiones principalmente volumétricas. Está compuesto en mayor medida (85 - 98 %) por Metano (CH₄), y es el hidrocarburo con mejor rendimiento como combustible en términos de cantidad de energía desarrollada por % de C. Así que su utilización también reduce las emisiones de otro contaminante, el CO₂, aproximadamente en un 20 % en comparación con el MDO.

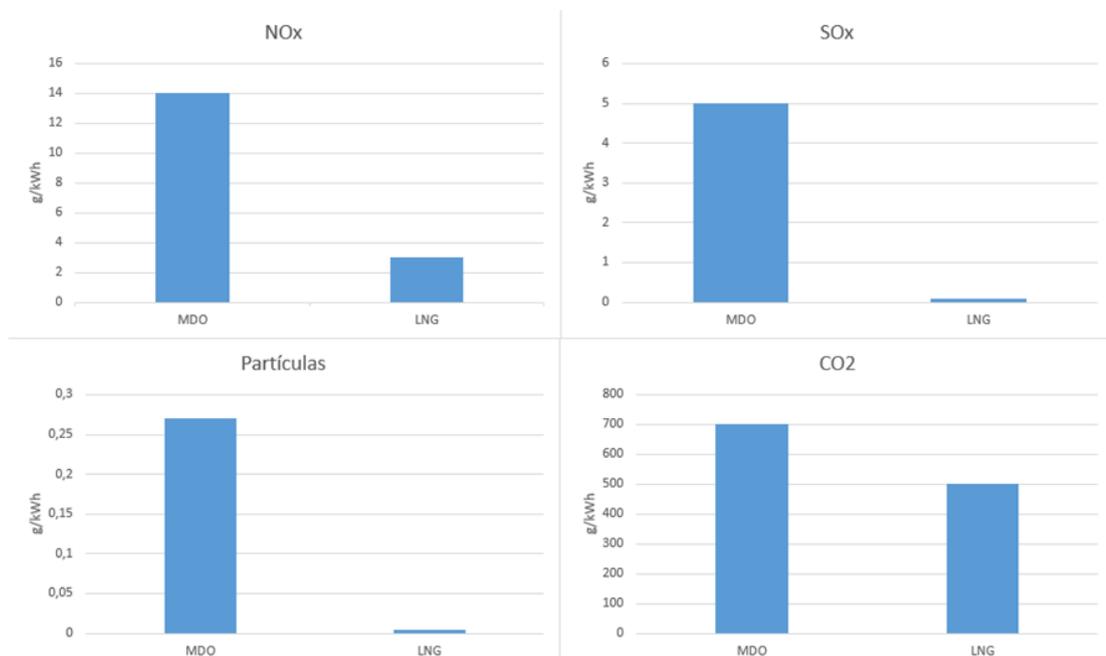


Imagen 14: Comparación de emisiones de LNG y MDO 1%S.

Imagen de elaboración propia basada en la siguiente información:

<http://www.lnqbunkering.org/sites/default/files/2011%20marintek%20LNG%20fuelled%20ships.pdf>

Además posee unas características de quemado óptimas para el motor, reduciendo el gasto de aceite lubricante y mejorando la limpieza del mismo, lo que significa un mantenimiento menos tedioso. Otra importante cualidad es que es más ligero que el aire y tiene una elevada temperatura de ignición, es un combustible seguro.

En palabras de la sociedad de clasificación “Det Norske Veritas” (DNV), el LNG se convertirá en el combustible del futuro, estando presente en un 90% de los buques mercantes en un plazo de aproximadamente 40 años.



2.2 Cogeneración en la actualidad

“El presidente de la Asociación Española de Cogeneración “ACOGEN”, señaló que “la reforma energética ha supuesto un fuerte impacto en la cogeneración”, que ha hecho que se reduzca la producción un 15% comparada del 25% de la potencia instalada y del 35% de las 1.066 instalaciones que no han funcionado en 2015. La retribución se ha reducido en 1.100 millones de euros anuales, un tercio de su facturación eléctrica.”

(Declaraciones Presidente ACOGEN en LA VANGUARDIA, (n.d.), 15/06/2016 13:47, © La Vanguardia Ediciones: <http://www.lavanguardia.com/vida/20160615/402525196231/economia-energia-acogen-pide-que-el-proximo-gobierno-tome-las-medidas-oportunas-para-reactivar-la-cogeneracion.html> , Visitada el 05/11/2016)

En el Boletín electrónico “La Asamblea pre-electoral que abrirá un nuevo ciclo”, de la Sociedad Española de Cogeneración, podemos ver los siguientes datos: (Página Web ACOGEN, Pérez Palacio, A., 2015 <http://www.acogen.es/nuevonews/2015/noviembre/indexcompleto.html> , Visitada el 01/11/2016)

“Pese a las cientos de plantas que han parado en el trienio de la reforma energética, la cogeneración sigue produciendo con alta eficiencia el 10% de la electricidad española, atendiendo las necesidades de energía térmica en más de 600 industrias, ahorrando en energía más de 1,6 millones de toneladas equivalentes de petróleo y siendo clave para el sector gasista porque supone el 22% de todo el consumo nacional de gas natural, 40% de lo consumido por la industria.

La cogeneración aporta competitividad a la industria porque el 20% del PIB industrial - 23.000 millones de euros- se fabrica con ella y el 50% de esos productos se exportan y porque 200.000 personas tienen su empleo directamente asociado en industrias que cogeneran. También juega también un papel fundamental en el medioambiente industrial y en su acción por el clima, contribuyendo a reducir emisiones, especialmente las de CO₂ asociadas a la actividad industrial, ahorrando el 2% de las emisiones nacionales de CO₂.”

Por lo que aun pasando por un momento difícil, la cogeneración sigue denotando los valores por los que destacó desde el principio, ahorro de combustible primario con beneficio económico y medioambiental.



La crisis no ha achacado tanto al sector naval como a las instalaciones terrestres, al menos en lo que se refiere a la construcción de plantas de propulsión, equipadas con procesos de generación de varios tipos de energía mediante un único combustible primario.

2.2.1 MACIs

Los motores más utilizados en Cogeneración en industrias de tierra son los que queman gas, en concreto los de Gas Natural, al ser un combustible muy limpio que ofrece unas condiciones energéticas óptimas.

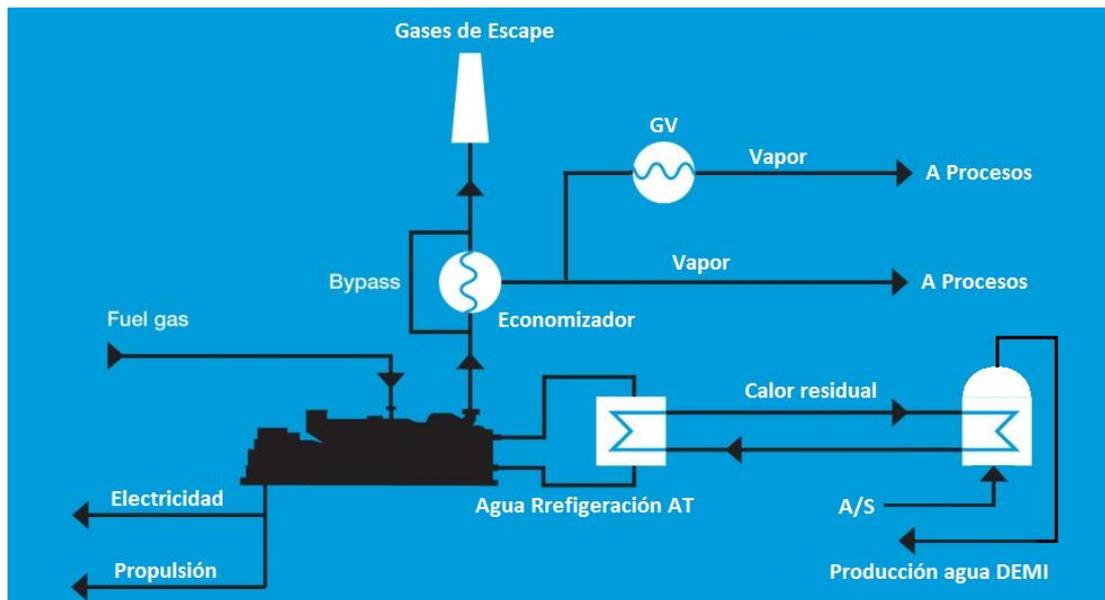


Imagen 15: Esquema de funcionamiento de un MACI con Cogeneración

(Imagen traducida y modificada de la siguiente fuente: <http://www.flow-ar.com/soluciones/cogeneracion.htm>)

Con respecto a los motores de gas en los buques, los primeros barcos que experimentaron con ellos han sido los LNG/c, ya que al ser buques que transportan el Gas Natural (Metano) no necesitan tener depósitos adicionales para su almacenaje. Estos barcos llevan instalada una planta de tratamiento del Gas Natural para que pueda ser quemado en los motores.

Esta planta suele llamarse ERM (Estación de Regulación y Medida). Aunque el proceso es más complicado, ya que la regulación del gas se realiza con respecto a la presión y temperatura, por lo que existen compresores que aumentan la presión del mismo y calentadores/enfriadores en función de la temperatura necesaria.



Como se ha podido experimentar en los buques LNG/c con diferentes tipos de motores (4T DFDE, 2T ME-GI...), el GN es el combustible del futuro, permitiendo el cumplimiento con la normativa de emisiones y reduciendo el mantenimiento en equipos. Ya sea introduciéndolo a alta presión en el interior del cilindro, como a presiones bajas antes de la válvula de admisión, ha dejado buenos resultados tanto para las navieras como para los propios fabricantes de motores.

Los motores Dual Fuel pueden ser de 2 y 4 tiempos, al igual que los que operan solo con gas, la principal diferencia es el ciclo termodinámico que siguen, en modo gas, el motor funciona según el ciclo Otto con una combustión pobre, pero en este caso la ignición de la mezcla de aire se efectúa por medio de la inyección de una pequeña cantidad de combustible diésel (piloto) en la cámara de combustión en lugar de por una bujía de encendido. El combustible diésel inyectado es normalmente menos de 1% del combustible total.

En el modo diésel, el motor funciona según el ciclo diésel normal, con combustible diésel inyectado a alta presión justo antes del punto muerto superior. Los primeros motores Dual Fuel eran de 4 tiempos, mientras que en la actualidad ya existen los de 2 tiempos, tanto de baja como de alta presión del combustible.

Esto también va unido al siguiente punto, en los motores 2 tiempos de gas, el combustible entra en la cámara de combustión a alta presión a unos 300 bar y en baja presión a unos 15 bar, mientras que en los motores de 4 tiempos a gas la presión de éste está entre 5 y 6 bar.

2.2.2 TV y TG

Las turbinas de gas, transforman la energía química encerrada en el gas en energía mecánica y térmica. Suelen estar acopladas a un generador que transforma la energía mecánica en eléctrica. A su vez, está compuesta por toda una serie de equipos auxiliares (*skids*) que proporcionan las condiciones necesarias para su funcionamiento.

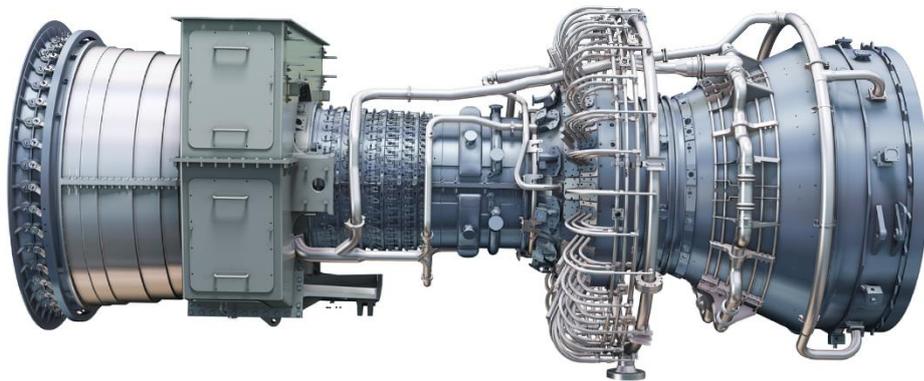


Imagen 16: Turbina de Gas Aero-derivada LM 6000

(Fuente: <https://powergen.gepower.com/products/aeroderivative-gas-turbines/lm6000-gas-turbine-family.html>)

Una turbina de gas está formada por un compresor rotativo de dos cuerpos, uno de baja y otro de alta presión, una cámara de combustión y una turbina de expansión, también con dos etapas como en el caso del compresor.

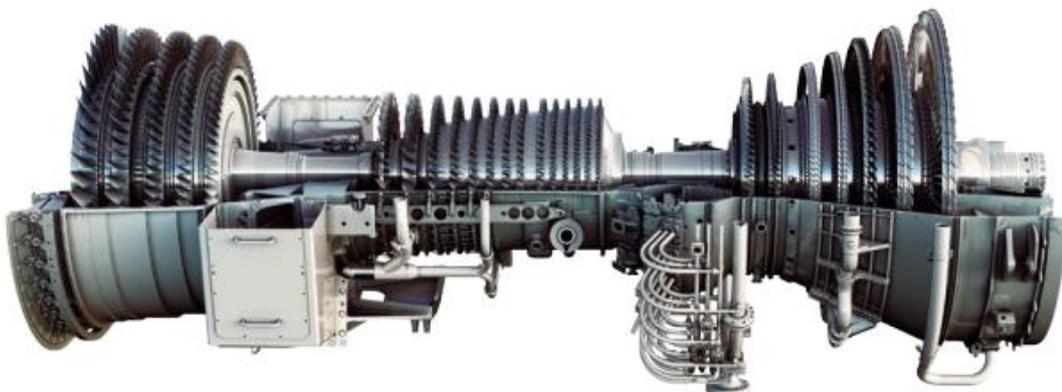


Imagen 17: Turbina de gas LM6000 con corte transversal para ver el interior

(Fuente: LM6000 GAS TURBINE (60 Hz) FACTSHEET GE - https://powergen.gepower.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en_US/documents/product/gas%20turbines/Fact%20Sheet/LM6000-60Hz-fact-sheet-2016.pdf)

Estos turbogeneradores siguen el ciclo termodinámico de Brayton, donde el aire es aspirado de la atmósfera y comprimido mediante el compresor rotativo, que levanta la presión necesaria para su entrada en la cámara de combustión, donde se produce la ignición del combustible, desarrollando una gran energía en la mezcla que se expandiona en la turbina hasta llegar a la presión atmosférica.

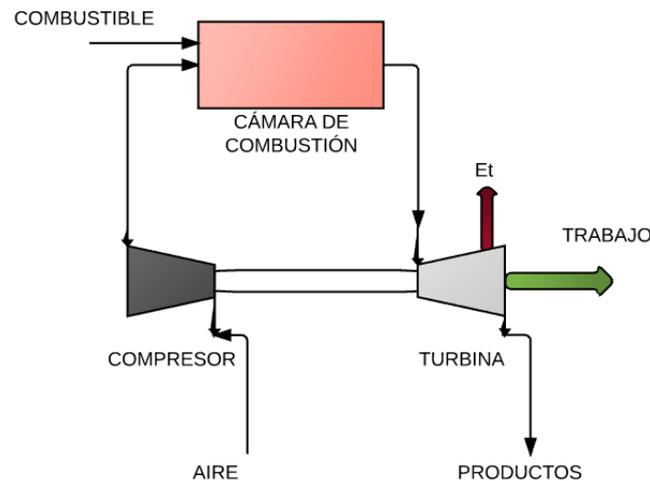


Imagen 18: Ciclo de Brayton

Imagen de elaboración propia basada en el Ciclo de Brayton (Jorge Losada, 2016)

Estos equipos son especialmente sensibles, pero al mismo tiempo, son capaces de generar grandes potencias con un rendimiento óptimo. Su utilización en los buques no es notable, ya que como su mejor aplicación es a cargas fijas, generando un gran consumo cuando ésta varía. Destacan por su rapidez en el arranque, consiguiendo llegar a carga base en poco tiempo en comparación con MACIs y Turbinas de Vapor.

Las calderas de vapor con quemador como equipo principal, deben combinarse con una turbina de vapor para producir electricidad, no se usan en cogeneración en plantas de tierra excepto que el combustible sea muy problemático y no pueda quemarse en motores y/o turbinas. En el ámbito marítimo existen buques con propulsión mediante turbinas, los llamados coloquialmente "turbineros", véase como ejemplo los buques LNG/c con propulsión por turbina de vapor con una salida de potencia de 28.000 kW.

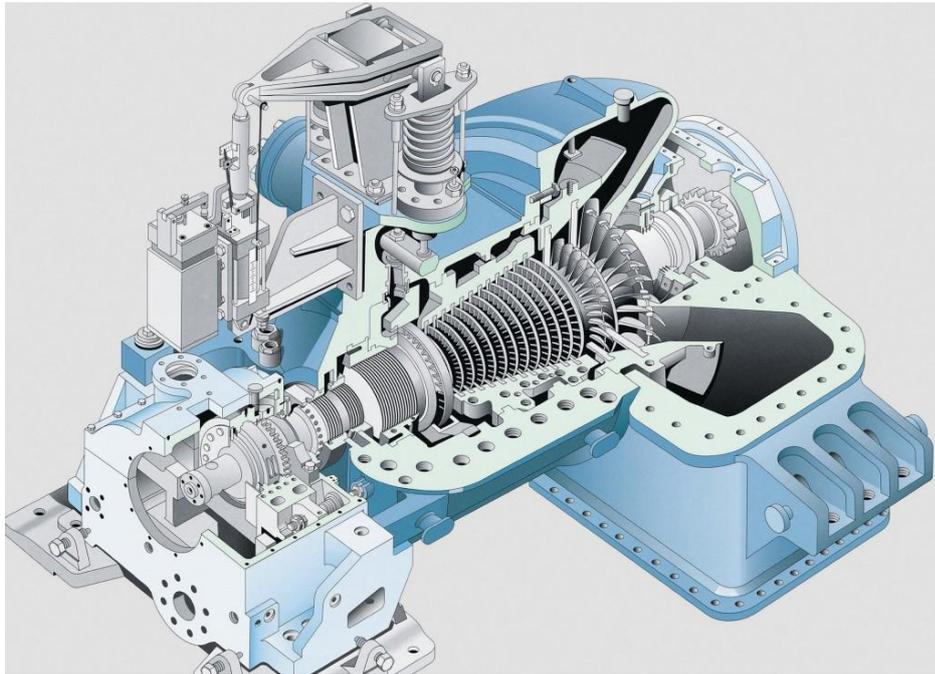


Imagen 19: Turbina de vapor

(Fuente: <http://dim.usal.es/eps/mmt/?p=1033>)

En instalaciones de tierra las turbinas de vapor se utilizan en combinación con alguno de los equipos anteriores. Si dicha combinación es con una turbina de gas se da lugar al llamado ciclo combinado.

Existen varias posibilidades en cuanto a la combinación de una caldera con quemador, donde se produce el vapor que alimenta a la turbina:

- Turbina de vapor a contrapresión: el vapor sale de la turbina en unas condiciones adecuadas para el aprovechamiento en el buque, aunque no es muy común.
- Turbina de vapor con extracción y a condensación. Se hace una extracción controlada de vapor en las condiciones demandadas para el proceso, el resto del vapor se sigue turbinando hasta la condensación. Es el más común, se utiliza cuando el nivel de vapor demandado (Presión y Temperatura) es alto.

- Turbina de vapor a condensación: todo el vapor se lleva a condensación. En este caso para que haya cogeneración sería necesario que también hubiese un flujo de vapor de la caldera que fuese al proceso.

Con este planteamiento de planta en un buque, se efectúa el aprovechamiento del vapor generado en las calderas para varios procesos. En la siguiente imagen vemos ilustrado cómo se realiza:

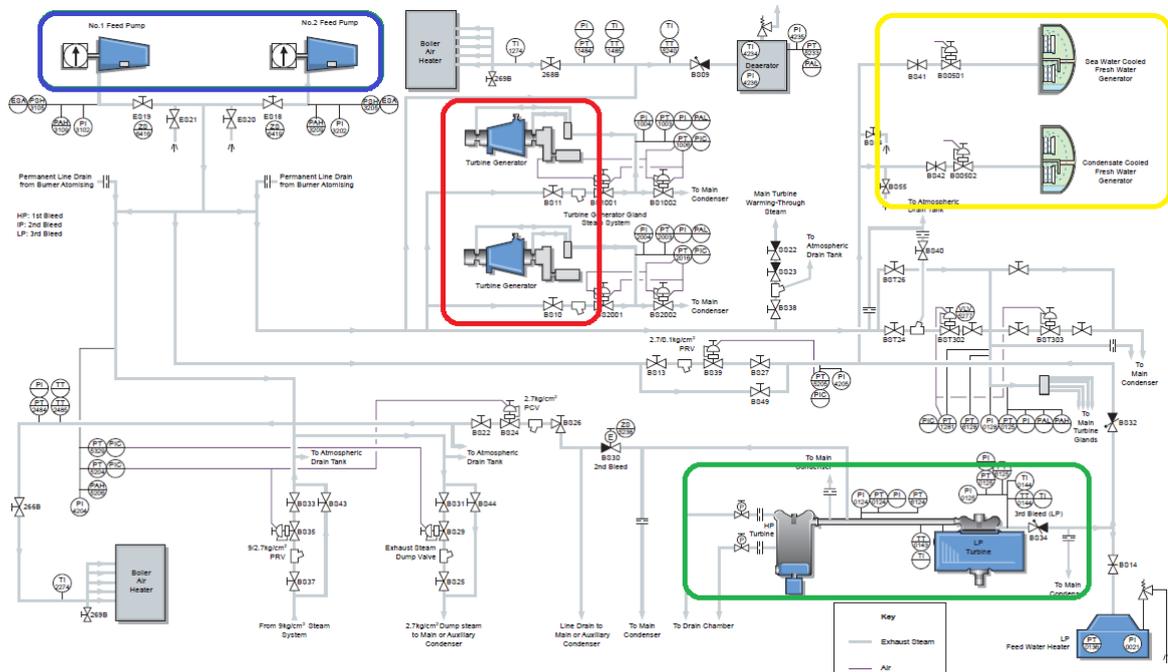


Imagen 20: Esquema de vapor principal de buque propulsado con turbina de vapor.

(Fuente: Machinery Manual – LNG/c “Sevilla Knutsen”)

En el recuadro amarillo observamos un sistema de aprovechamiento del vapor condensado para la producción de agua desmineralizada a través de “Fresh Water Generators”, que son evaporadores flash de dos etapas que trabajan en vacío.

En el recuadro azul están las bombas de agua de alimentación a las calderas, que son propulsadas por el eje de una turbina de vapor, accionada por el vapor generado.



En el recuadro rojo tenemos dos generadores de electricidad, accionados ambos por turbinas de vapor, también mediante el aprovechamiento del vapor de agua del proceso.

Finalmente, en el recuadro verde está el cuerpo de baja de la turbina principal de vapor, que es la que alimenta a estos tres últimos elementos que he mencionado.

2.3 Normativa

En el **Anexo VI del Convenio MARPOL 73/78**, figuran tres capítulos y seis apéndices, en los cuales encontramos las reglas para prevenir y reducir al mínimo la contaminación ocasionada por los buques. En él también figuran las zonas especiales, donde se realizan los controles más estrictos.

Adoptado en el Protocolo de 1997 y en vigor en 2005:

- Regula emisiones de gases de combustión para SO_x, NO_x, PM y VOC.
- Controla la emisión de gases que afectan a la capa de ozono.
- Regula la incineración de basuras a bordo.

Ha sido revisado en 2008, y ésta revisión entró en vigor en el mes de julio de 2010. Además, en un capítulo adoptado en 2011 se establecen medidas técnicas y operacionales obligatorias de eficiencia energética encaminadas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de los buques.

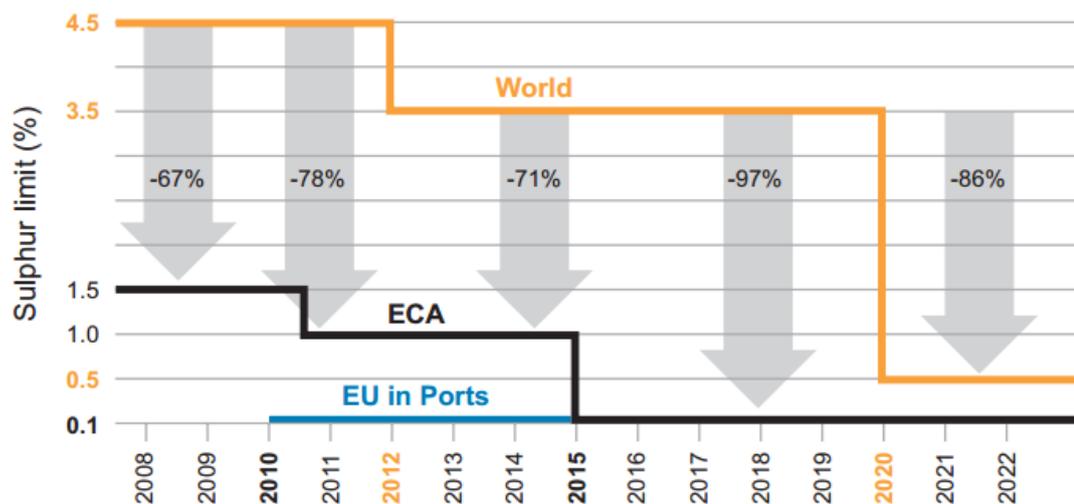


Imagen 21: Esquema cronológico de las Normas de control de contenido de Azufre en los combustibles.

(Fuente: <http://cdn.wartsila.com/docs/default-source/product-files/eqc/white-paper-o-env-2014-exhaust-gas.pdf?sfvrsn=18>)



Con respecto a las directivas europeas, en las estrategias desarrolladas para 2020, la Unión Europea, expone lo siguiente: (Página Web Unión Europea, (n.d.) Objetivos en materia de Energía y cambio climático de la UE, Última actualización: 16/11/2016, https://europa.eu/european-union/topics/climate-action_es , Visitada el 16/11/2016)

“La UE se ha impuesto objetivos vinculantes en materia de energía y cambio climático con el fin de:

- Reducir las emisiones de efecto invernadero de la UE un 20%, como mínimo, con respecto a las de 1990.*
- Aumentar al 20% la parte de las energías renovables en el consumo total de la UE.*
- Mejorar la eficiencia energética para reducir el consumo de energía primaria un 20% con respecto al previsto.*

La UE se ha ofrecido a aumentar la reducción de emisiones de un 20% a un 30% antes de 2020 si otras economías importantes se comprometen a asumir su parte correspondiente de esfuerzo de reducción global.

En Octubre de 2014 los responsables de la UE acordaron nuevos objetivos en materia de clima y energía para 2030. Entre ellos figuran:

- Una reducción del 40% (como mínimo), con respecto a los niveles de 1990, de las emisiones de gases de efecto invernadero*
- Una cuota mínima del 27% de energía procedente de fuentes renovables*
- Una mejora mínima del 27% en eficiencia energética*

A largo plazo, será necesario reducir aún más las emisiones para evitar que el cambio climático alcance niveles peligrosos. La UE se ha comprometido a reducir sus emisiones, antes de 2050, entre un 80% y un 95% con respecto a los niveles de 1990 como parte del esfuerzo colectivo de los países desarrollados por hacer lo mismo.”

Para que se respeten éstos límites, se han creado en todo el mundo Zonas de Control de Emisiones (ECAs), y se han distribuido según el tráfico marítimo, siendo el principio de algo que se pretende en todo el mundo, pero que llevará su tiempo instaurar, en la *Imagen 22* se pueden ver cuáles son esas zonas.



Imagen 22: Zonas de Control de Emisiones (ECAs) y posibles zonas futuras en el mundo.

(Fuente: <http://adi-analytics.com/wp-content/uploads/2015/06/World-ECA-Map.png>)

La siguiente tabla muestra las diferentes estrategias que se pueden adaptar para cumplir con la Normativa anteriormente citada, con los costes asociados que conlleva tanto en la modalidad de conversión de un buque ya existente y la de nueva construcción.

Estrategia para cumplimiento	Conversión	Nueva Construcción
MGO - conversión del motor, SCR y EGR	180 000 USD + 75 USD/kW	140 000 USD + 63 USD/kW
HFO y Scrubber - Scrubber y SCR	600 USD/kW	2 200 USD/kW*
LNG Dual Fuel 4 tiempos - instalación LNG (tanques...)	800 USD/kW	1 600 USD/kW*
LNG Dual Fuel 2 tiempos Alta Presión - instalación LNG (tanques...)	700 USD/kW	1 500 USD/kW*
LNG 4 tiempos ignición por chispa - instalación LNG (tanques...)	800 USD/kW	1 600 USD/kW*

*Incluyendo Motores, Generadores...

Tabla 3: De elaboración propia, información traducida del *Reporte RE20126210-01-00-B SSPA de la Organización Marítima Internacional (Johan Algell, Alexandra Bakosch y Björn Forsman - SSPA SWEDEN AB)*. En el punto 3.6.1 (pág. 53 de 123) de dicho documento elabora esta tabla con información de precios de los diferentes astilleros y fabricantes de motores, que han sido obtenidos del *DMA study, appendix 3 (DMA 2012)*.

3. METODOLOGÍA Y DESARROLLO – ANÁLISIS DE INSTALACIONES REALES

A continuación analizaré los elementos de cogeneración presentes en la planta de propulsión y generación de energía eléctrica del buque LNG/c “Sevilla Knutsen”.

3.1 Cogeneración en la instalación de producción de agua dulce a bordo del “Sevilla Knutsen”

El generador de agua dulce utiliza el calor residual del agua de refrigeración de camisas de los generadores para producir el agua potable, evaporando el agua de mar debido al vacío, que permite al agua de alimentación evaporarse por debajo de los 45 °C.

El generador de agua dulce se basa en dos sistemas de intercambiadores de calor de placas, actuando uno como evaporador y el otro como condensador. La eyectora de agua permite la condición de vacío en la cámara del evaporador, conduciendo el agua de mar a través de la eyectora.

El agua de alimentación se evapora debido a la condición de vacío. Las gotas de agua son recogidas en la parte del condensador, para llegar a este



Imagen 23: FWG – Imagen propia.

punto han atravesado una desviación montada encima del evaporador y un separador de partículas incorporado en la zona intermedia del interior del equipo.



Las gotas de agua separadas caen nuevamente dentro de la salmuera, que es extraída por la bomba del eyector.

El vapor “desalado”, que pasa a través del separador de partículas, será aspirado en el condensador de placas donde se condensa mediante el agua de mar entrante, que se encuentra a menor temperatura.

El agua destilada saldrá por la bomba de agua dulce y es controlada por el salinómetro. De este modo, si tiene un alto contenido en sal, la válvula electromagnética se encargará de hacer recircular el agua.

Los termómetros están instalados para el control del agua de mar y el agua de enfriamiento del condensador y el evaporador. Estos termómetros permiten control de las temperaturas de calefacción y enfriamiento. El salinómetro está conectado con la alarma para registrar salinidad muy alta.

Características

> Unidad de Desalinización

Tipo: DF 23 / 30.

Capacidad: 30 m³ / día.

Salinidad: máx. 10 ppm.

Bomba del destilado, motor 1.5 kW: 2,5 m³ / h x 3 bar.

Fuente eléctrica: 3 x 440 V, 60 Hz.

> Calefacción media para el evaporador

Caudal de agua de la chaqueta: 75 m³/h.

Temperatura de la entrada: 80°C.

Presión de funcionamiento: 4 bar.

Caída de presión: 0,4 bar.

Consumo de calor, aprox.: 910 kW (782600 kcal/h) *Calculado en el Anexo 1

- > Enfriamiento medio para el condensador

Caudal de agua de mar: 75 m³ / h.

Temperatura de la entrada: 32 °C.

Presión de funcionamiento: 4 bar.

- > Unidad dosificadora del agua de alimentación

Tipo: Vacío (caudalímetro).

Capacidad: 2 ~ 259 ml / h.

Capacidad del tanque de química: 50 L.



Imagen 24: Interior FWG – Imagen propia.

Los generadores de agua dulce son alimentados con agua de mar mediante dos bombas, cuyo flujo además de alimentar el generador, también pasa por el eyector del agua de mar.

Cada una de las bombas del eyector es centrífuga y tiene suficiente caudal para suministrar el 100% del caudal requerido de agua de mar para un generador de agua dulce.



Características

- > Bombas del eyector del FWG

Fabricante: Shinko Ind. Ltd.

Nº de unidades: 2.

Tipo: SVSI25-2M.

Capacidad: 72 m³/h x 4,2 bar.

Motor: 18,5 kW, 1800 rpm.

- > Generador de agua dulce.

Fabricante: Donghwa Entec.

Nº de unidades: 2.

Tipo: DF 23 / 30, placas, una sola etapa.

Capacidad: 30 m³/ día.

Temperatura nominal del agua de mar: 32 °C.

Procedimiento de funcionamiento para el generador N° 1.

Comprobar que la tubería de agua de mar está en condiciones y que se está utilizando la bomba N° I FWG y el generador de agua dulce N° 1.

Asegurarse de que todos los indicadores de presión y válvulas de instrumentación estén abiertas y de que la instrumentación está leyendo correctamente.

Configurar las válvulas como en la tabla siguiente:

Válvula	Descripción	Posición
CW070	V/V aspiración Bba. N°1 FWG	Abierta
CW071	V/V descarga Bba. N°1 FWG	Abierta
CW085	V/V de con. desc. Bba. N° 1 y 2 FWG	Cerrada
CW073	V/V ent. a.mar FWG N° 1	Abierta
CW074	V/V sal. a.mar FWG N°1	Abierta
CW106	V/V desc. al mar FWG N°1	Abierta

Tabla 4: Procedimiento FWG 1

Fuente: (Machinery Manual – LG/c “Sevilla Knutsen”)



Arrancar la bomba del FWG Nº 1 y confirmar que el eyector está funcionando y que está fluyendo el agua adecuada para una operación correcta del generador del agua dulce.

Procedimiento de funcionamiento para el generador Nº 2

Mismo que el anterior utilizando la bomba Nº 2 FWG y el generador de agua dulce Nº 2 y configurando las válvulas como en la tabla siguiente:

Válvula	Descripción	Posición
CW080	V/V aspiración Bba. Nº2 FWG	Abierta
CW081	V/V descarga Bba. Nº2 FWG	Abierta
CW085	V/V de con. desc. Bba. Nº 1 y 2 FWG	Cerrada
CW082	V/V ent. a.mar FWG Nº 2	Abierta
CW083	V/V sal. a.mar FWG Nº2	Abierta
CW105	V/V desc. al mar FWG Nº2	Abierta

Tabla 5: Procedimiento FWG 2

Fuente: (Machinery Manual – LG/c “Sevilla Knutsen”)



3.2 Explicación Circuito Refrigeración Motores

Los generadores principales tienen sistemas de enfriamiento de agua dulce que se dividen en la alta temperatura (HT) y en circuitos de baja temperatura (LT).

El circuito de HT tiene una bomba de circulación de HT que suministra el agua de enfriamiento a las chaquetas del generador, culata y también al enfriador de aire. El circuito de LT tiene una bomba de circulación de LT que suministra el agua de refrigeración también al enfriador de aire LT y al refrigerador de aceite de lubricación (LO). El calor residual del circuito de HT se utiliza en los generadores de agua dulce.

Sistema de refrigeración de agua dulce LT

El agua dulce circula por cada uno de los sistemas de baja temperatura mediante una bomba de circulación de LT. Durante los periodos de mantenimiento, el agua usada en este sistema se puede drenar del motor al tanque limpio de la sentina. El sistema de baja temperatura es controlado por una bomba de circulación accionada por el motor y una válvula de tres vías de control para regular la temperatura del aire de carga en 41 °C.

Sistema de refrigeración con agua dulce HT

El sistema principal de refrigeración de camisas de los generadores utiliza el mismo agua que el sistema de enfriamiento LT y se diseña para pasar una proporción de la descarga de las bombas a través del precalentador del agua de la chaqueta. El precalentador mantiene la temperatura del agua principal del enfriamiento de la camisa del motor cuando el motor principal está al ralentí, en baja carga o cuando el motor está frío antes de arrancar.

El agua fluye alrededor de los cilindros y culatas antes de dejar el motor y de pasar a una tubería común que suministra agua al enfriador de aire de HT. El sistema de alta temperatura es controlado por una bomba de circulación accionada por el motor y

una válvula de tres vías de control para regular la temperatura del agua, dejando el motor con 91 °C.

Los generadores de agua dulce pueden ser by-paseados cuando el generador está a baja carga (o al ralentí) o cuando la producción de agua dulce no es necesaria. Un circuito cerrado de agua caliente en el sistema de calefacción del generador de agua dulce permite que los generadores puedan ser manipulados cuando el sistema principal de chaquetas del motor del generador esté en carga baja. Los generadores de agua dulce extraen el calor residual del agua de circulación de refrigeración de camisas que reduce de esta forma la carga térmica en los intercambiadores principales.

Aquí muestro la tabla de datos del agua de refrigeración de alta temperatura del Motor Principal, que influye directamente en el funcionamiento de los FWG.

High Temperature Cooling Water System, HT

	Unit	12V50DF		9L50DF	
		Gas	HFO/MDF	Gas	HFO/MDF
Pressure at engine, after pump, nom. (PT 401)	bar	2.5+static		2.5+static	
Pressure at engine, after pump, max. (PT 401)	bar	4.8		4.8	
Temp. before cylinders, approx. (TE 401)	°C	74		74	
Temperature after cylinders, approx. (TE 402)	°C	82		82	
Temperature after charger air cooler, nom.	°C	91		91	
Capacity of engine driven pump, nom.	m ³ /h	270		200	
Pressure drop over engine, total	bar	0.5		0.5	
Pressure drop in external system, max.	bar	1.5		1.5	
Pressure from expansion tank	bar	0.7~1.5		0.7~1.5	
Water volume in engine	m ³	1.7		1.5	

Imagen 25: Características Sistema de Refrigeración Alta Temperatura

(Fuente: Machinery Manual – LG/c “Sevilla Knutsen”)



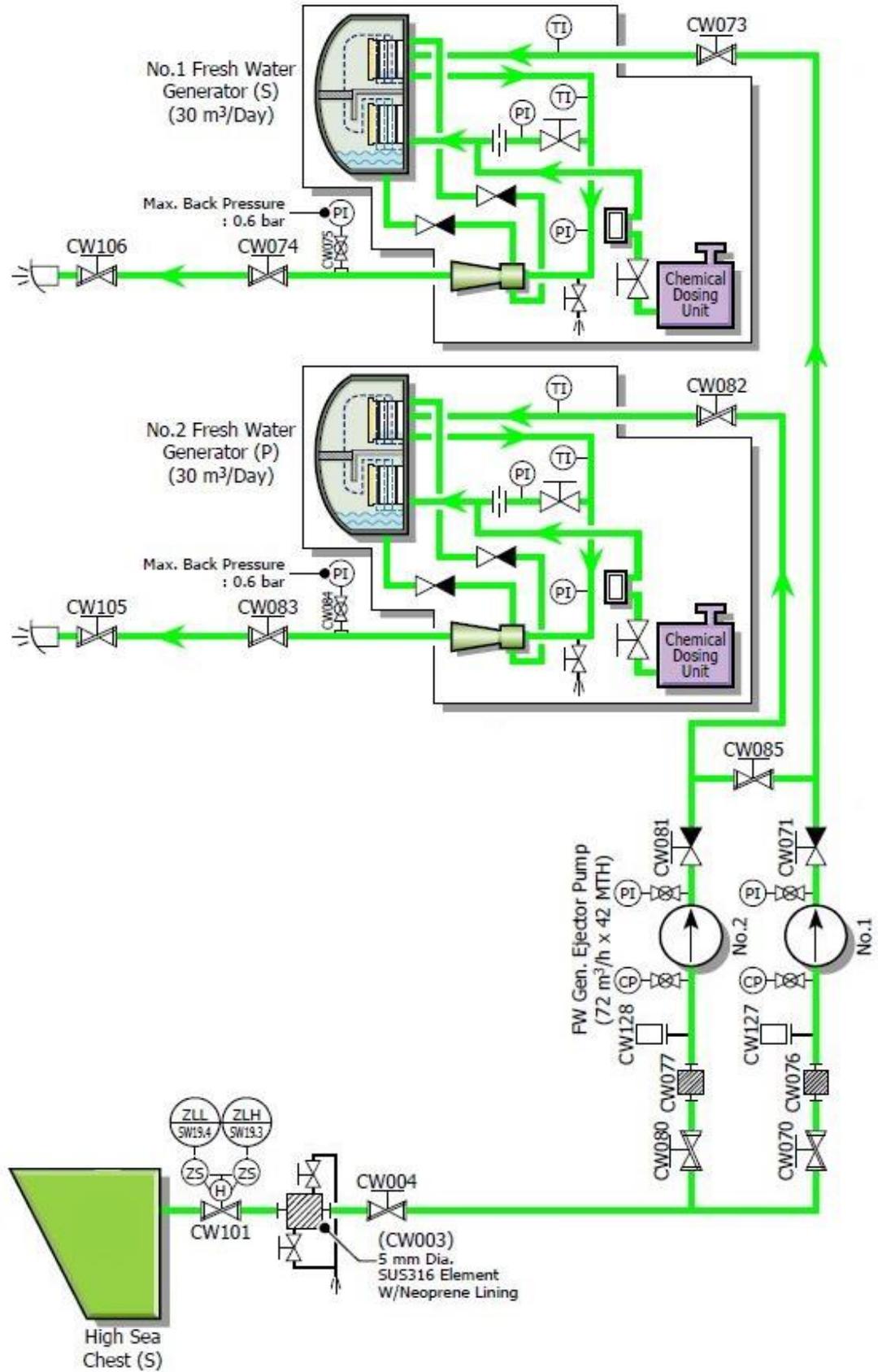
3.3 Esquemas de la Instalación

El primer esquema que se muestra (*Esquema 1*) es el de la línea de agua de mar, la cual alimenta al evaporador, donde se evapora por efecto de la energía térmica transmitida desde el agua de camisas y la presión de vacío en la cámara. También alimenta con agua de mar al condensador, en la cámara superior, encargado de refrigerar el agua de mar evaporada en el circuito.

Como se ve en el esquema, el agua de mar es aportada por el “High Sea Chest”, para después ser impulsada por las bombas eyectoras hacia los Generadores de Agua Destilada donde, tras pasar por el condensador, van hacia un eyector que aprovecha la presión ejercida anteriormente por las bombas eyectoras para absorber el aire del interior del evaporador y generar vacío en su interior por medio del Efecto Venturi. A partir de aquí el agua es expulsada de nuevo al mar.

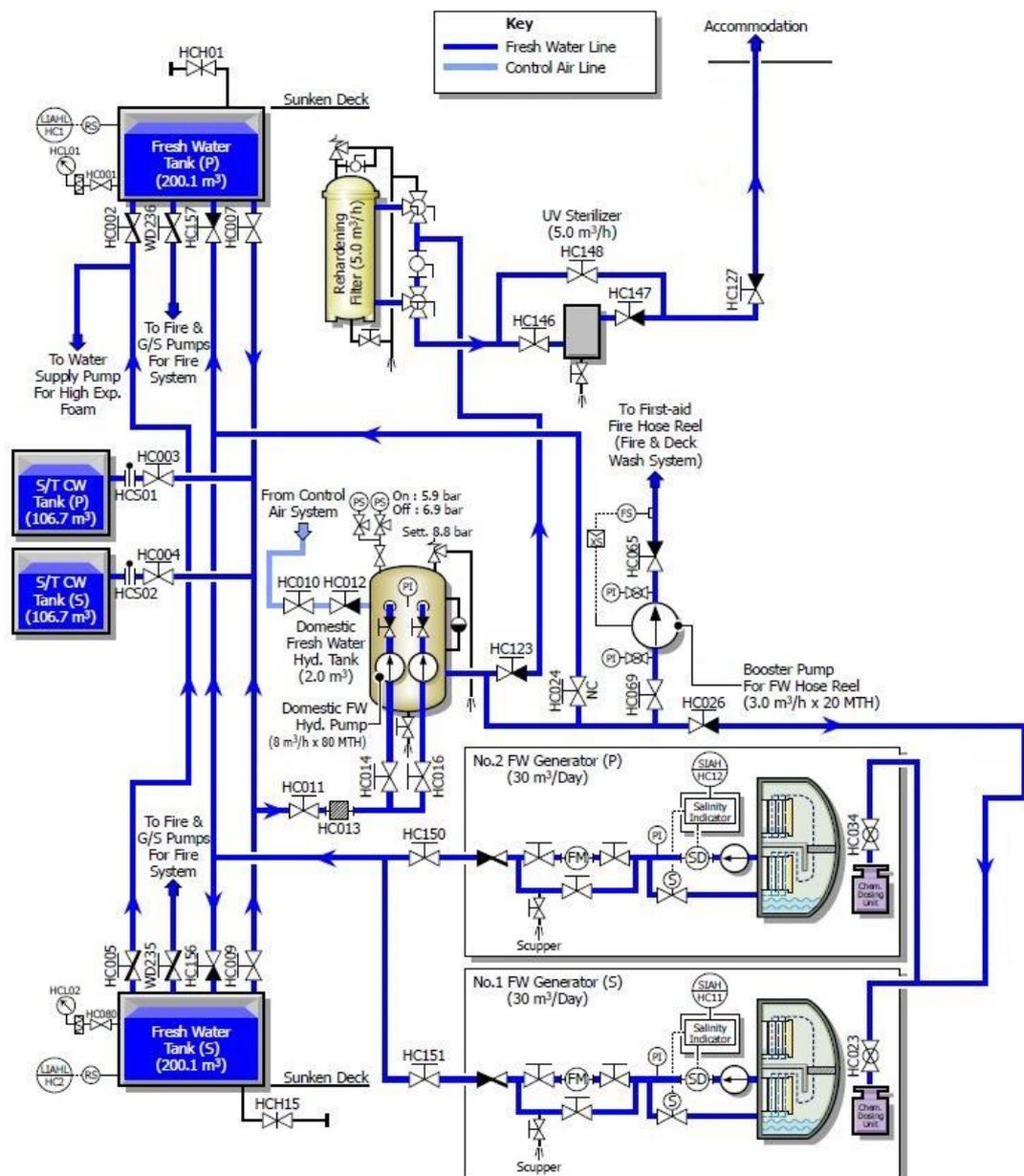
Existe una válvula que regula el caudal de entrada de agua de mar al evaporador, unido a otra entrada de agua química para su tratamiento. Éste punto es importante ya que el agua de mar que va al evaporador será utilizada posteriormente para consumo humano, por lo que aquí ya comienza su adecuación química.

Las bombas eyectoras están diseñadas para que cada una opere con un evaporador, es decir, la bomba N^o1 con el evaporador N^o1 y la N^o2 con el evaporador N^o2. Aunque mediante la válvula CW085 se puede cambiar éste diseño para solventar posibles problemas con los equipos, o para contrarrestar un mal funcionamiento de una de las bombas, abriendo la válvula y equilibrando la presión en ambos evaporadores.



Esquema 1: Esquema de agua salada de los FWG
(Fuente: Machinery Manual LNG/c "Sevilla Knutsen")

El *Esquema 2* es la línea de agua de servicios, la cual es generada en los evaporadores o generadores de agua destilada. Como vemos en la imagen inferior, los dos FWG suministran agua destilada a dos tanques de almacenamiento, uno a babor y otro a estribor. Desde ahí, el agua se dirige al tanque Hidróforo, donde a través de unas bombas y aire comprimido en la parte superior, se presuriza el interior y es capaz de aportar agua a la línea aún con grandes consumos simultáneos. Antes de dirigirse a la acomodación, el agua pasa por un sistema de mineralización.



Esquema 2: Esquema de agua dulce de los FWG (Fuente: Machinery Manual – LG/c “Sevilla Knutsen”)



El *Esquema 3* es el conjunto de todos los anteriores, confluyendo en el evaporador o generador de agua dulce, donde se introducen cada uno donde le corresponde, dándole sentido al proceso.

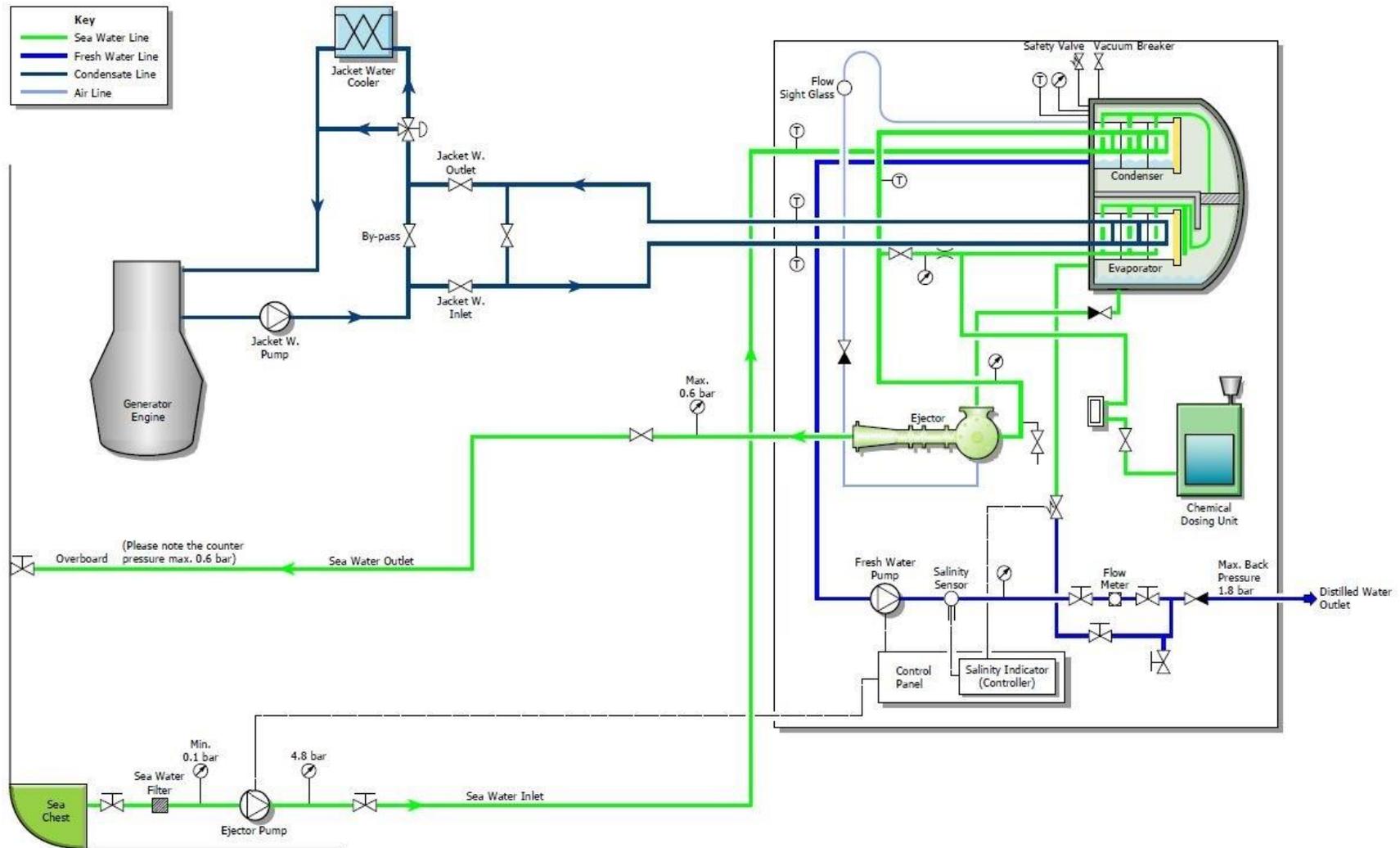
En primer lugar, en la zona superior izquierda podemos ver el circuito de refrigeración de agua de camisas del motor, que es impulsada por una bomba centrífuga y controlada por las válvulas de by-pass a la entrada y salida, respectivamente, del FWG. Ésta se introduce dentro de un intercambiador de calor, que en éste caso actúa como evaporador de agua de mar mediante la transferencia de energía térmica procedente del agua de camisas, como ya habíamos visto anteriormente.

Las líneas verdes en el esquema simbolizan el agua de mar, obteniéndola del sello, e introduciéndola a través de la bomba eyectora en otro intercambiador ubicado en la parte superior del FWG, actuando ahora como condensador del agua de mar evaporada en el proceso anterior, dejando paso a agua destilada.

En el proceso también existe un tratamiento del agua que se utiliza en FWG, el cual podemos ver en el esquema en la parte inferior derecha con el nombre en inglés de *“Chemical Dosing Unit”*.

El agua destilada de la que hablaba antes es impulsada hacia los tanques de almacenamiento por la bomba de agua destilada, que se encuentra a la salida del condensador.

Como elemento principal del proceso tenemos el eyector, en el centro del esquema, y es el que consigue efectuar el vacío en el interior del FWG y así poder emplear el calor residual del agua de refrigeración del motor para la producción de agua destilada para el consumo en el buque.



Esquema 3: Esquema de funcionamiento de los FWG (Fuente: Machinery Manual – LG/c “Sevilla Knutsen”)



La planta generadora de vapor consiste en dos calderas auxiliares y dos economizadores de gases de escape. El vapor es necesario a bordo, tanto para calentar el fuel como para diversos servicios auxiliares del buque.

En la mar, la demanda de vapor debería ser satisfecha con el vapor creado en los dos economizadores de gases de escape, usando las bombas de agua de circulación. En este caso, las calderas auxiliares se mantendrían en reserva listas para arrancar en caso de que hubiese una caída de presión de vapor.

Los economizadores se encuentran en una cubierta superior a los motores principales, de manera que pueda recuperar parte del calor residual de los gases de escape proveniente de éstos. Las calderas auxiliares se necesitan en el momento en el que la demanda de vapor excede la producción llevada a cabo por los economizadores.

Normalmente las calderas sólo están funcionando a carga parcial durante la estancia en puerto del buque, ya que durante la navegación el caudal de vapor suministrado por los economizadores es suficiente, dando lugar a muy pocos arranques de los generadores de vapor.



En la siguiente página podemos observar el *Esquema 4* del Panel de Control del buque, que se encarga de controlar todo el sistema de vapor.

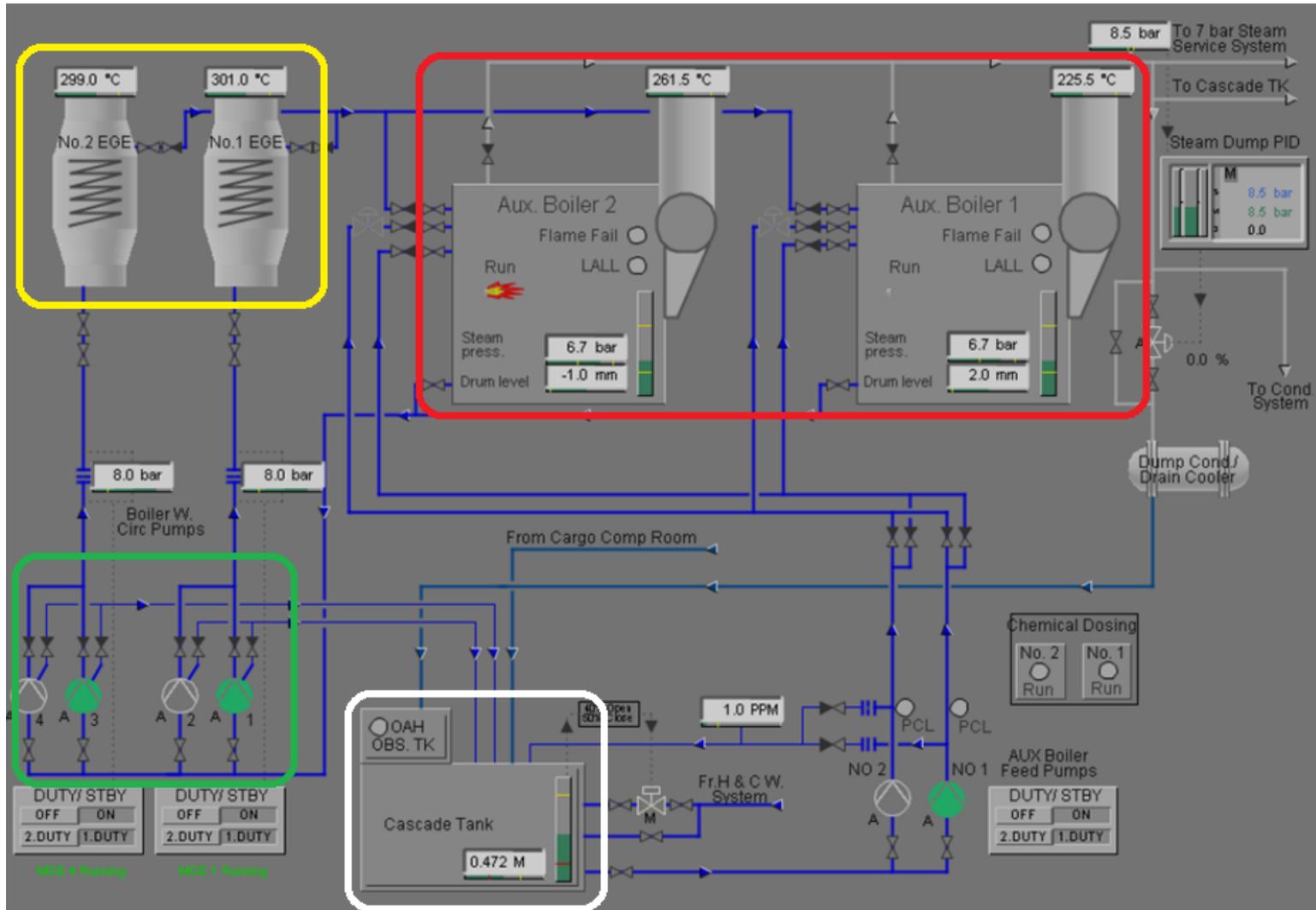
En el cuadro blanco se encuentra el “Cascade Tank”, donde se almacena el agua del circuito (condensado), que alimenta con agua de proceso tanto a los generadores de vapor como a los economizadores.

En el cuadro verde se pueden ver las bombas de circulación del circuito agua/vapor, que alimentan con agua del “Cascade Tank” a los economizadores. Estas bombas suelen estar una en marcha y la otra en Stand-by. Como tenemos dos economizadores, hay un total de cuatro bombas de circulación, dos por cada economizador.

En el cuadrado amarillo tenemos los dos Economizadores, trabajando a una temperatura de unos 300°C, dirigiendo a su vez el vapor hacia las calderas. Los gases de escape atraviesan el intercambiador existente en el interior del economizador y se produce una transferencia térmica desde éstos hasta el agua del proceso, haciendo un cambio de estado a vapor y dirigiéndose a las calderas.

Finalmente en el cuadro rojo podemos ver las calderas, funcionando ambas en Stand-by pero con una de ellas como “master” y otra como “slave”. Esto quiere decir que si se produce una pérdida de carga, la caldera designada como “master” será la encargada de encender el mechero y comenzar a generar el vapor de agua necesario.

Las otras bombas que se pueden ver en el esquema corresponden a las bombas de alimentación para las calderas, cuya misión no es más que suministrarles la cantidad de agua necesaria, controlada a través del nivel que tiene cada una de ellas.



Esquema 4: Esquema del Panel de Control del Circuito agua/vapor (Fuente: Machinery Manual – LG/c “Sevilla Knutsen”)



El sistema de agua de alimentación forma parte de la planta de generación de vapor que trabaja con agua de alimentación del “Cascade Tank” a la caldera a través de las bombas de alimentación de agua de las calderas auxiliares.

La cantidad de agua que pasa a la caldera está automáticamente controlada por la válvula de regulación de agua de alimentación, de acuerdo con la variación del nivel de agua en el colector y la presión de vapor en la caldera auxiliar.

Dos bombas de alimentación aspiran del “Cascade Tank” y cada una de ellas es capaz de suministrar un caudal a la caldera de $16 \text{ m}^3/\text{h}$ a 14 bar. En condiciones normales de funcionamiento una está trabajando y la otra en stand-by, pudiendo entrar en servicio en el momento que se produzca un fallo en la que está trabajando.

Las bombas de circulación de agua de la caldera están diseñadas para abastecer las necesidades de los economizadores en condiciones normales de navegación, cuando las calderas auxiliares no están en marcha y solamente los economizadores están produciendo vapor. De este modo, dos de las cuatro bombas de circulación aspiran de los colectores de las calderas auxiliares y cada una suministra un caudal de $20 \text{ m}^3/\text{h}$ a una presión de 3,5 bar.

La cantidad de agua que alimenta a los economizadores está controlada automáticamente por las válvulas de regulación del agua de alimentación, de acuerdo a la variación en el nivel de los economizadores y la presión de vapor en los paneles de control del economizador.

Cuando sólo el economizador está produciendo vapor, una de las bombas de circulación se encuentra en operación mientras la otra está en stand-by. Existe una conexión directa desde las bombas de circulación al economizador, de igual forma que lo hacían las bombas de agua de alimentación con la caldera. Tan pronto como el agua entra en el economizador y se pone en contacto con los gases de escape recibiendo la transferencia de calor, ésta se convierte en una mezcla de vapor



saturado y agua. Luego el agua es separada del vapor.

Si la demanda de vapor decayese por alguna razón, la válvula de regulación del agua de alimentación reducirá automáticamente la cantidad de agua a la caldera pero las bombas de alimentación continuarán trabajando normalmente. Cada bomba de alimentación y cada bomba de agua de circulación están pues, diseñadas para que retorne una pequeña cantidad de la descarga de vuelta al “Cascade Tank” para prevenir que se sobrecalienten esporádicamente.

El agua de alimentación es suministrada normalmente a través del regulador de agua de alimentación, pero tiene una línea de emergencia auxiliar independiente por la que también puede ser suministrada.

Características

Bombas de agua de alimentación

Fabricante: Shinko Ind. Ltd.

Nº de unidades: 2.

Tipo: centrífuga.

Modelo: SHQ50MH.

Capacidad: 16 m³ / h x 14 bar.

Motor: 22 kW, 3555 rpm.

Bombas de agua de circulación.

Fabricante: Shinlco Ind. Ltd.

Nº de unidades: 4.

Tipo: centrífuga.

Modelo: BT40-5.

Capacidad: 20 m³ / h x 3.5 bar

Motor: 5,5 kW, 3525 rpm.



Procedimiento de preparación del economizador para el sistema de agua de circulación.

Hay que tener en cuenta que los economizadores funcionarán respecto a sus motores generadores y que el sistema de la caldera auxiliar nº1 esté seleccionado como “master” para los economizadores de gases de escape. La caldera auxiliar nº2 estará seleccionada como reserva (slave).

I. Comprobar que los economizadores se encuentran llenos de agua en sus niveles de operación correctos y que las bombas de alimentación de las calderas auxiliares están en modo remoto.

II. Asegurarse que los economizadores se encuentran operativos y que todas las válvulas de instrumentación y manómetros estén abiertas/operativos, permitiendo unas lecturas correctas.

III. Configurar las tablas de la siguiente forma:

Válvula	Descripción	Posición
C7, C8, C307, C308	V/V de drenaje de los economizadores	Cerrada
C53	V/V de aspiración de los Economizadores	Abierta
C55	V/V de descarga de los Economizadores	Abierta
C19	V/V de descarga de la Caldera N°1 a la aspiración de las Bbas de agua de Circulación	Abierta
C21	V/V de aspiración de la Caldera N°1 desde los Economizadores	Abierta
C19	V/V de descarga de la Caldera N°2 a la aspiración de las Bbas de agua de Circulación	Cerrada
C21	V/V de aspiración de la Caldera N°2 desde los Economizadores	Cerrada
SG201	V/V de aspiración de la Bba de circulación N°1	Abierta
SG205	V/V de descarga de la Bba de circulación N°1	Abierta
SG209	V/V de retorno de la Bba de circulación No1 al Tk Cascada	Abierta
SG202	V/V de aspiración de la Bba de circulación N°2	Abierta
SG206	V/V de descarga de la Bba de circulación N°2	Abierta
SG210	V/V de retorno de la Bba de circulación N°2 al Tk Cascada	Abierta
SG203	V/V de aspiración de la Bba de circulación N°3	Abierta
SG207	V/V de descarga de la Bba de circulación N°3	Abierta
SG211	V/V de retorno de la Bba de circulación N°3 al Tk Cascada	Abierta
SG204	V/V de aspiración de la Bba de circulación N°4	Abierta
SG208	V/V de descarga de la Bba de circulación N°4	Abierta
SG212	V/V de retorno de la Bba de circulación N°4 al Tk Cascada	Abierta
-	V/V de aislamiento del Economizador N°1	Abierta
-	V/V de aislamiento del Economizador N°2	Abierta

Fuente: (Machinery Manual – LG/c “Sevilla Knutsen”)



IV. Arrancar la bomba de agua de circulación seleccionada para cada economizador. Existe un orificio en cada línea de entrada de agua de circulación, el cual evita una pérdida súbita en la presión de vapor de la caldera y del nivel de agua.

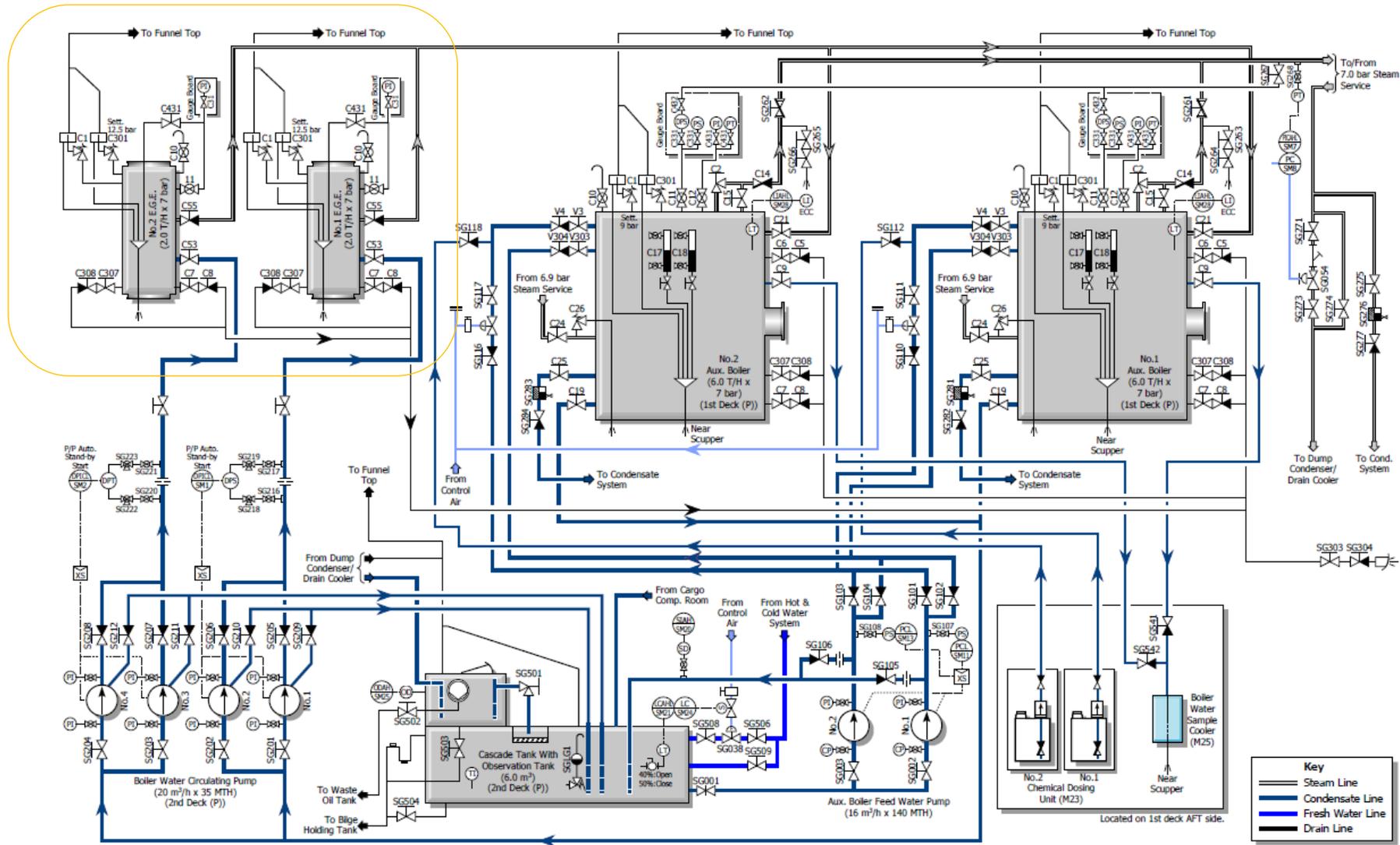
V. Abrir la válvula de venteo para asegurarse de que no hay aire en la línea y cerrarla de nuevo una vez comprobado.

Las calderas auxiliares pararán en el momento que los economizadores sean capaces de generar suficiente vapor por sí solos como para satisfacer la demanda del buque.



En el siguiente esquema P&ID se puede ver un cuadrado amarillo señalando los economizadores. (*Esquema 5*)

En él podemos observar en él todas las líneas salientes y entrantes además de la instrumentación, válvulas y la unidad de dosaje químico.



Esquema 5: Esquema P&ID del circuito de agua/vapor (Fuente: Machinery Manual – LG/c “Sevilla Knutsen”)



4. CONCLUSIONES

Durante mi experiencia profesional he podido trabajar en varias Plantas de Energía, donde he comprobado de primera mano cómo funciona la cogeneración. Es un sistema energético muy beneficioso, que **mejora en el rendimiento**, como hemos visto en el punto 1.1 del presente trabajo, permitiendo el ahorro de combustible. Y no sólo eso, al existir menor número de equipos asociados a cada proceso, en labores de mantenimiento también se experimenta una **mejora económica y de tiempo**, visto en el apartado 1.3. El coste inicial superior se ve rentabilizado por todos éstos factores, por lo que la cogeneración aporta un **beneficio evidente**, siendo más visible en los siguientes puntos:

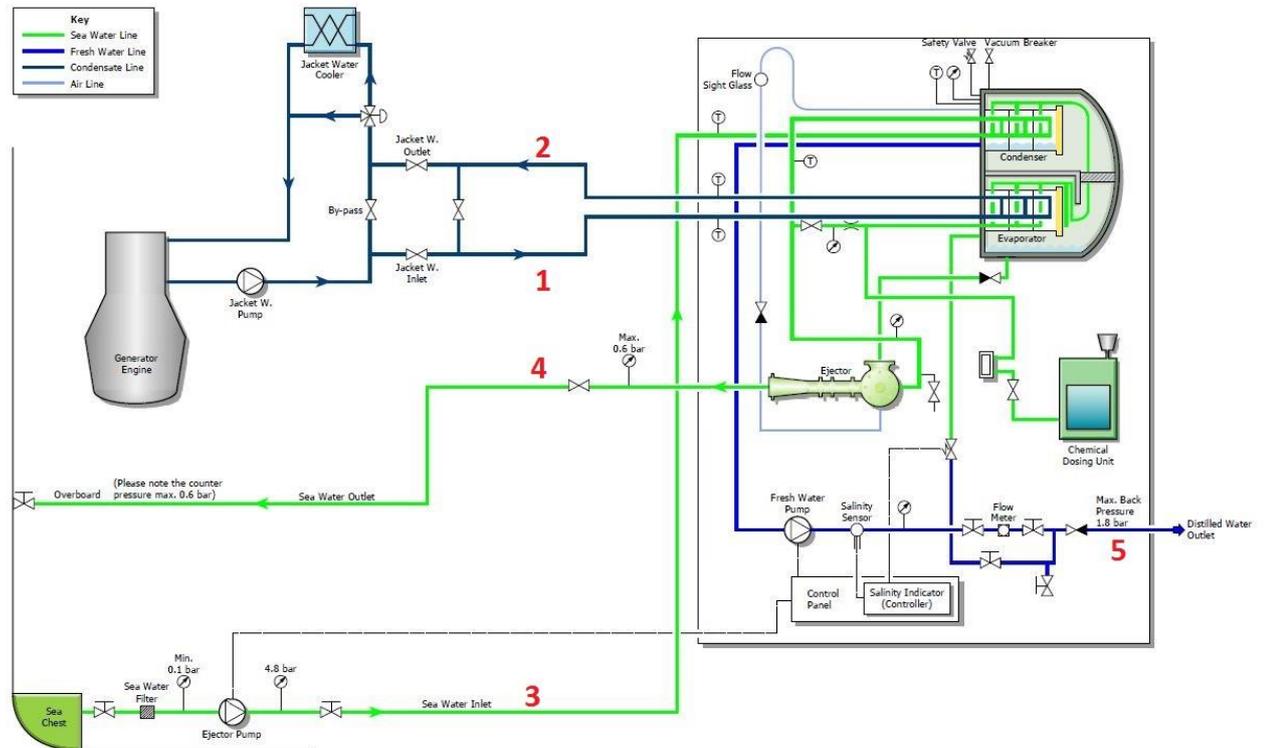
La **reducción del consumo energético** hace que las reservas de combustibles actuales se incrementen, favoreciendo económica y medioambientalmente no sólo a la comunidad industrial, sino a todo el mundo.

La **eficiencia energética**, objetivo claro en cualquier proceso de cogeneración puesto que con la misma cantidad de energía primaria, se consigue implementar los procesos industriales, es un punto clave para llegar a conseguir la sostenibilidad energética, que favorece económica y socialmente tanto al tejido industrial de las empresas de tierra como al sector naval.

El uso de **combustibles más limpios** favorece la reducción de las emisiones de efecto invernadero, punto clave para conseguir que el cambio climático se elimine definitivamente. Es el caso del Gas Natural, que como hemos visto en el punto 2.1, reduce las emisiones de CO₂ asociadas a la utilización de combustibles fósiles, así como NO_x, SO_x y partículas en suspensión.

ANEXO I

Cálculo del ahorro energético en los Generadores de Agua Dulce:



Fuente imagen: (Machinery Manual – LG/c “Sevilla Knutsen”)

$$Q = m * (h_s - h_e)$$

$m = \text{kg} / \text{s}$

$h = \text{kJ} / \text{kg}$

PUNTO	TEMPERATURA (°C)	PRESIÓN (bar)	ENTALPIA (kJ/kg)	CAUDAL (kg/s)	CAUDAL (m3/h)
1	80	4	353,23	20,83	75,00
2	73,9	3,6	309,62		
3	32	4	100,88	21,40	75,00
4	28	3,2	117,58		
5	-	1,7	-	-	1,25

$$Q_{1-2} = 908,54 \text{ kWt}$$

$$Q_{3-4} = 357,31 \text{ kWt}$$



5. BIBLIOGRAFÍA

SANTIAGO GARCÍA GARRIDO, DIEGO FRAILE CHICO

“COGENERACIÓN: DISEÑO, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS”

Editorial Díaz de Santos. Año de edición: 2008. ISBN: 978-84-7978-845-2

XAVIER ELÍAS CASTELLS

“LA RECUPERACIÓN DE LA ENERGÍA. COGENERACIÓN, INTERCAMBIADORES Y
REGENERADORES DE CALOR”

Editorial Díaz de Santos. Año de edición: 2012. ISBN: 978-84-9969-136-7

MARIO VILLARES MARTÍN

“COGENERACIÓN”

Editorial Fundación CONFEMETAL. Año 2ª edición: 2003. ISBN: 9788495428158

MOTORES ALTERNATIVOS DE COMBUSTIÓN INTERNA (MACI) DE GAS.

(n.d.) Página Web del Gobierno de las Islas Baleares, 2016, visitada 13/11/2016:

http://www.caib.es/conselleries/industria/dgener/user/portalenergia/pla_eficiencia_energetica/produccioenergia_2.es.html

ELEMENTOS DE UNA PLANTA DE COGENERACIÓN.

(n.d.) Página Web Plantas de Cogeneración. Copyright © Renove Tecnología S.L

2009-2013, Visitada el 10/11/2016:

<http://www.plantasdecogeneracion.com/index.php/las-plantas-de-cogeneracion>



ACOGEN, BENEFICIOS COGENERACIÓN

Página Web de ACOGEN (n.d.), 1999, Visitada 11/11/2016:

<http://www.acogen.org/informe/cogeneracion/bcg/beneficios.html>

ACOGEN, VENTAJAS COGENERACIÓN

Página Web de ACOGEN, (n.d.), 1999, Visitada el 11/11/2016:

<http://www.acogen.org/ventajas.php>

DECLARACIONES PRESIDENTE DE “ACOGEN” EN PERIÓDICO VIRTUAL

LA VANGUARDIA, (n.d.), 15/06/2016 13:47, © La Vanguardia Ediciones, Visitada el 05/11/2016:

<http://www.lavanguardia.com/vida/20160615/402525196231/economia-energia-acogen-pide-que-el-proximo-gobierno-tome-las-medidas-oportunas-para-reactivar-la-cogeneracion.html>

Boletín electrónico “La Asamblea pre-electoral que abrirá un nuevo ciclo”

Página Web ACOGEN, Pérez Palacio, A., 2015 , Visitada el 01/11/2016:

<http://www.acogen.es/nuevonews/2015/noviembre/indexcompleto.html>

OBJETIVOS EN MATERIA DE ENERGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO DE LA UE

Página Web Unión Europea, (n.d.), Última actualización: 16/11/2016, Visitada el 16/11/2016:

https://europa.eu/european-union/topics/climate-action_es



BOLETÍN DE ESTADÍSTICAS ENERGÉTICAS DE COGENERACIÓN. AÑO 2014

Ministerio de industria: Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía. (n.d.)

Estudios, Informes y Estadísticas, 7ª Edición. Junio 2016, Visitado el 16/11/2016:

<http://idae.es/index.php/idpag.802/relcategoria.1368/relmenu.363/mod.pags/mem.detalle>

COGENERA MÉXICO

® Derechos Reservados, Cogenera México, 2012, (n.d.), visitado el 12/10/2016:

<http://www.cogeneramexico.org.mx/>

CONOCIMIENTOS PROPIOS Y DOCUMENTACIÓN DEL BUQUE

LNG/c SEVILLA KNUITSEN

Machinery Manual (Review Draft 29/04/2010) DSME Shipyards ®

JOHAN ALGELL, ALEXANDRA BAKOSCH Y BJÖRN FORSMAN

“Feasibility Study on LNG Fuelled Short Sea and Coastal Shipping in the Wider Caribbean Region” - Reporte RE20126210-01-00-B SSPA de la **Organización**

Marítima Internacional (SSPA SWEDEN AB). En el punto 3.6.1 (pág. 53 de 123) de dicho documento elabora esta tabla con información de precios de los diferentes astilleros y fabricantes de motores, que han sido obtenidos del DMA study, appendix 3 (DMA 2012).

ALEJANDRO RIVERA-ALVAREZ, MICHAEL J. COLEMAN, JUAN C. ORDONEZ

“Ship Weight Reduction and Efficiency Enhancement Through Combined Power Cycles”

Department of Mechanical Engineering and Center for Advanced Power Systems, Florida State University, 2015. Pág. 9 - 10.



MIGUEL A. LOZANO Y JOSÉ RAMOS

“Análisis Energético y Económico de Sistemas Simples de Cogeneración”

“Thermodynamic and Economic Analysis of Simple Cogeneration Systems”

Universidad de Zaragoza, Departamento de Ingeniería Mecánica, GITSE-I3A

Información Tecnológica-Vol. 18 N°4-2007, pág.: 75-84

EQUIPOS DE ÓSMOSIS INVERSA “CULLIGAN”

© 2015 Culligan España (n.d.), Visitado el 14/11/2016:

<http://www.culligan.es/productos-industrial/equipos-de-osmosis-inversa/>

CONVENIO INTERNACIONAL PARA PREVENIR LA CONTAMINACIÓN POR LOS BUQUES (MARPOL)

Organización Marítima Internacional, © Propiedad intelectual 2016 Organización Marítima Internacional, (n.d.), Visitada el 16/11/2016:

<http://www.imo.org/es/About/Conventions/ListOfConventions/Paginas/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-%28MARPOL%29.aspx>

REGULACIONES DNV CON RESPECTO A MOTORES DE GAS Y A BUQUES EQUIPADOS CON ÉSTOS

Copyright © DNV GL AS 2016, (n.d.) Visitada el 16/11/2016

<https://www.dnvgl.com/maritime/lng/engines-for-gas-fuelled-ships.html>

WÄRTSILÄ WEB SITE – MOTORES DE GAS E INSTALACIONES

© 2016 Wärtsilä, (n.d.) Visitada el 16/11/2016

<http://www.wartsila.com/oil-gas/why-us/lng-gas>



2016 WORLD LNG REPORT - LNG 18 CONFERENCE & EXHIBITION EDITION

2016 Edition, (n.d), International Gas Union (IGU), Sponsored by Chevron.

pág. 10 – 80.



AVISO:

Este documento es el resultado del Trabajo Fin de Grado de un alumno, siendo su autor responsable de su contenido.

Se trata por tanto de un trabajo académico que puede contener errores detectados por el tribunal y que pueden no haber sido corregidos por el autor en la presente edición.

Debido a dicha orientación académica no debe hacerse un uso profesional de su contenido.

Este tipo de trabajos, junto con su defensa, pueden haber obtenido una nota que oscila entre 5 y 10 puntos, por lo que la calidad y el número de errores que puedan contener difieren en gran medida entre unos trabajos y otros,

La Universidad de Cantabria, la Escuela Técnica Superior de Náutica, los miembros del Tribunal de Trabajos Fin de Grado así como el profesor tutor/director no son responsables del contenido último de este Trabajo.”