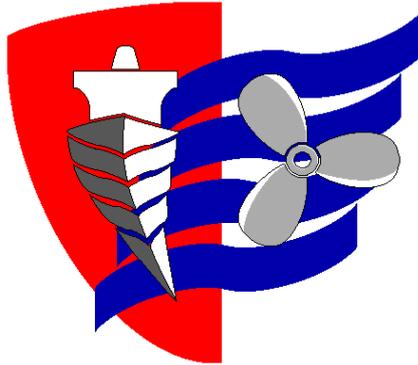


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Máster

**GENERACIÓN DE H₂ A BORDO DE
UN BUQUE LNG/C**

H₂ GENERATION ON BOARD LNG/C

Para acceder al Título de Máster Universitario en
INGENIERÍA MARINA

Autor: Manuel Fernández Taboada

Director: Javier García Gutiérrez

Diciembre - 2022

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Trabajo Fin de Máster

**GENERACIÓN DE H₂ A BORDO DE
UN LNG/C**

H₂ GENERATION ON BOARD LNG/C

Para acceder al Título de Máster Universitario en
INGENIERÍA MARINA

DICIEMBRE - 2022

AVISO:

Este documento es el resultado del Trabajo Fin de Máster 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 Máster, así como el profesor tutor/director no son responsables del contenido último de este Trabajo.”



Índice

1. Resumen.....	9
1.1. Abstract.....	9
2. Palabras clave.....	10
2.1. Key words.....	10
3. Memoria.....	11
3.1. Objetivo.....	12
3.2. Alcance del trabajo.....	12
3.3. LNG y B.O.G.....	13
3.3.1. Cálculo del B.O.G.....	13
3.3.2. B.O.G. en casos reales.....	16
3.3.2.1. Viaje 1.....	17
3.3.2.2. Viaje 2.....	19
3.3.2.3. Viaje 3.....	22
3.3.2.4. Viaje 4.....	24
3.3.2.5. Viaje 5.....	26
3.3.3. Influencia de las condiciones de aislamiento en el B.O.G.....	28
3.3.4. Influencia de las condiciones ambientales en el B.O.G.....	33
3.3.5. Disponibilidad de B.O.G. para la generación de H ₂	36
3.4. Generación de H ₂	37
3.4.1. Control del proceso.....	39
3.5. Planta de generación de H ₂	42
3.5.2. Suministro de O ₂	46
3.5.5. Compresor de H ₂	52
3.6. Planta de generación eléctrica.....	52
3.6.1. Fuel Cell System.....	53
3.6.2. PEMFC.....	54
3.6.3. Dimensionamiento de la planta.....	56
3.6.3.1. Consumo de H ₂	57
3.6.3.2. Almacenamiento de H ₂	58
3.6.4. Conversión eléctrica.....	59
3.6.4.1. Conversor DC-DC.....	59



3.6.4.2. Inversor DC/AC.....	60
3.7. Disposición general de la planta de reformado.	61
3.8. Pros y contras de la instalación.	65
3.9. Conclusiones.	66
3.10. Bibliografía.....	67
4. Anexo. Cálculos.....	69
4.1. Cálculo de consumo y dimensionamiento de la planta.	70
4.1.1. Consumo de H ₂	70
4.1.2. Almacenamiento de H ₂	71
4.1.3. Cantidades necesarias de reactivos para la generación de H ₂	72
4.1.4. Emisiones de CO ₂	73
5. Anexo. Planos.....	75

Índice de ilustraciones.

Gráfica 1. B.O.G y consumo durante el viaje 1. Fuente: El autor.	19
Gráfica 2. B.O.G y consumo durante el viaje 2. Fuente: El autor.	21
Gráfica 3. B.O.G y consumo durante el viaje 3. Fuente: El autor.	23
Ilustración 1. Partes de las membranas primaria y secundaria. (DSME 2009).....	29
Ilustración 2. Producción de H ₂ en función de la temperatura del proceso WGSR. (Wei-Hsin Chen 2010).....	40
Ilustración 3. Pantalla de Control del Mist Separator en el sistema integrado de automatización (IAS). Fuente: El autor.	44
Ilustración 4. Tren de válvulas de suministro de gas. (DSME 2009).....	45
Ilustración 5. Planta de generación de agua destilada. (Wärtsila s.f.).....	48
Ilustración 6. Eyector de mezcla CH ₄ y vapor de agua. Fuente: El autor.	49
Ilustración 7. Esquema del reformador autotérmico. Fuente: El autor.	50
Ilustración 8. Recalentador de vapor con gas de síntesis. Fuente: El autor.	51
Ilustración 9. Planta de generación eléctrica por pila de H ₂ . (C. Dall'Armi 2021)...	54
Ilustración 10. Funcionamiento y partes de una pila PEM. (Borah Munu 2016)	55
Ilustración 11. Cuadro eléctrico de Emergencia 220V. Fuente: El autor.....	61
Ilustración 12. Elementos de la planta de reformado. Fuente: El autor.	62



Índice de tablas.

Tabla 1. Propiedades del gas Metano. (DSME 2009).....	17
Tabla 2. Características del LNG cargado. Fuente: El autor.....	18
Tabla 3. Condiciones de la carga al final del viaje. Fuente: El autor.....	18
Tabla 4. Características del LNG remanente. Fuente: El autor.....	20
Tabla 5. Condiciones de la carga al consumir el remanente. Fuente: El autor.	21
Tabla 6. Características del LNG cargado en el viaje 3. Fuente: El autor.	22
Tabla 7. Condiciones de la carga al finalizar el viaje 3. Fuente: El autor.....	23
Tabla 8. Características del LNG remanente en el viaje 4. Fuente: El autor.	24
Tabla 9. Datos de la carga al finalizar el viaje 4. Fuente: El autor.	25
Tabla 10. Características de la carga en el viaje 5. Fuente: El autor.....	27
Tabla 11. Datos de la carga al finalizar el viaje 5. Fuente: El autor.	27
Tabla 12. Propiedades del sistema de contención. (Jeong y Shim 2017)	31
Tabla 13. Variación de CI en función de DT _{secondary} . Fuente: El autor.	32
Tabla 14. Coeficientes térmicos ambientales. (GAZTRANSPORT & TECHNIGAZ 2005)	34
Tabla 15. Variación de CT en función de T _{sw} y T _{air} . Fuente: El autor.	35
Tabla 16. Cálculo del B.O.G. disponible por viaje. Fuente: El autor.	36
Tabla 17. Moles de CH ₄ disponibles para el proceso de reformado. Fuente: Engineering Ecuation Solver.....	41
Tabla 18. Moles de aire necesarios para el proceso de reformado. Fuente: Engineering Ecuation Solver.....	41
Tabla 19. Moles de vapor de agua necesarios para el proceso de reformado. Fuente: Engineering Ecuation Solver.....	41
Tabla 20. Moles de H ₂ generados durante el proceso de reformado. Fuente: Engineering Ecuation Solver.....	42
Tabla 21. Características técnicas del compresor Low Duty. (DSME 2009)	44
Tabla 22. Características del compresor de aire de suministro. (TMC Standard Compressors – Entire Range)	46
Tabla 23. Características Técnicas del FWG multietapa. (Wärtsila s.f.)	47
Tabla 24. Características del compresor de H ₂ . (Taizhou Toplong Electrical&Mechanical Co.,ltd. 2019)	52



Tabla 25. Lista de equipos y grupos alimentados por el cuadro de 220V de emergencia. (DSME 2009).....	56
Tabla 26. Transformador de emergencia 440/230V. (DSME 2009).....	57
Tabla 26. Características de las botellas de almacenamiento a presión. (C. Dall'Armi 2021)	58
Tabla 27. Características de las botellas de almacenamiento a presión. (C. Dall'Armi 2021)	71
Tabla 28. Peso molar de los diferentes compuestos de la reacción. Fuente: Química, Tema 1. Grado en Tecnoloxías. Mariñas. UDC.....	72
Tabla 29. Cantidades de reactivos mínimas teóricas para la generación diaria de H ₂ . Fuente: El autor.	72
Tabla 30. Cantidad de aire necesaria a suministrar. Fuente: El autor.	73
Tabla 31. Emisiones de CO ₂ diarias. Fuente: El autor.	74



1. Resumen

Este trabajo estudiará el aprovechamiento del boil-off de un buque gasero, evaporación que tiene lugar debido a la transferencia de calor del entorno al interior de los tanques de carga. Este aprovechamiento se basa en la generación de hidrógeno a bordo, combustible limpio y de futuro que permite alimentar una pila de hidrógeno. Para la generación de hidrógeno se usará el método del reformado autotérmico, proceso muy eficiente y que se puede adaptar a las características de la planta energética del buque.

La pila alimentará los servicios de 220V del cuadro de Emergencia, usándose como ejemplo para otro tipo de aplicaciones. El dimensionamiento correcto de la planta, con la alimentación adecuada y pilas de mayor potencia, podrían servir para aplicaciones de mayor calado, como la propulsión del buque o la alimentación de la planta eléctrica al completo.

1.1. Abstract.

The following project is based on the study of how the boil-off gas of an LNG carrier can be used for hydrogen generation. This gas evaporation takes place inside the cargo tanks, as result of the heat transfer from the environment into the tanks. Hydrogen is a clean and promising fuel for the future of the marine industry, and can be used to feed a fuel cell stack, as it is going to be studied in the present work. Hydrogen generation will take place using the autothermal reforming method, which is a very efficient process and easy to adapt to the vessel power plant characteristics.

Hydrogen fuel cell will be installed to supply electric power to 220V Emergency switchboard, being an example for other type of applications. The correct sizing of the hydrogen energy plant, taking care of feeding amounts and fuel cell power, can be studied to bigger applications, as ship propulsion or electric power plant fully supply on board.



2. Palabras clave.

Hidrógeno

LNG/c

Generación

Boil-Off.

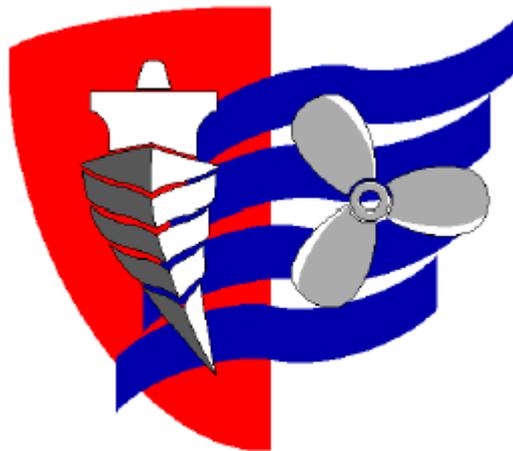
2.1. Key words.

Hydrogen

LNG/c

Generation

Boil-Off



3. Memoria.



3.1. Objetivo.

El objetivo de este trabajo de fin de máster es estudiar el aprovechamiento del boil-off generado a bordo, quemado sin aprovechamiento energético, para la generación de H₂. Este H₂ generado puede ser usado posteriormente en una pila de hidrógeno para servicios de a bordo. Se deben tener en cuenta varios puntos, enumerados a continuación:

- Cálculo de Boil-off generado durante un viaje, para obtener las cantidades que pueden ser destinadas a la generación de H₂.
- Proceso de generación de H₂ y partes de la planta, con el dimensionado de los equipos.
- Almacenamiento de H₂ y generación eléctrica mediante una pila de hidrógeno.

3.2. Alcance del trabajo

La transición energética y la búsqueda de nuevas tecnologías es primordial para combatir el cambio climático y afianzar el futuro del transporte marítimo. En este trabajo se mejor la eficiencia de un buque moderno actual con el aprovechamiento del metano evaporado de la carga, para la generación de hidrógeno gris.

Para la generación de hidrógeno se estudiará la instalación de un reformador autotérmico compacto, que necesitará metano, vapor de agua y aire para su funcionamiento. Se dimensionará la planta y se elegirán los equipos adecuados para el buque.

El hidrógeno generado se empleará para alimentar una pila de hidrógeno de baja potencia, que alimentará los servicios de 220V del cuadro de emergencia. La viabilidad y buen funcionamiento de esta instalación puede dar pie a instalaciones más grandes y al estudio del hidrógeno como combustible limpio y de futuro para el ámbito marino.



3.3. LNG y B.O.G.

El transporte de gas natural licuado se produce en unas condiciones térmicas muy extremas, con temperaturas en torno a -160 °C , dependiendo de las características del gas, siendo una operación compleja en donde toma una gran importancia el aislamiento térmico de los tanques y el sistema de contención de la carga. Ningún aislamiento es perfecto, ni tiene un 100% de efectividad, por lo que minimizar la transferencia de calor entre la carga y el exterior, con un gradiente de temperatura tan elevado, es primordial.

Este mínimo flujo de calor entre el exterior y la carga, sumado a otros factores como la presión ambiental, los movimientos del barco durante la navegación o los flujos internos de compuestos más pesados como etano o propano en el interior de los tanques generarán una evaporación constante de metano, el compuesto mayoritario y más ligero dentro de los que componen el gas natural licuado. Este fenómeno es conocido como Boil-off.

Al tratarse de un espacio cerrado, la evaporación del gas y la expansión generará un aumento de presión que debe ser controlado para mantener una presión constante en el interior de los tanques, dentro de unos límites de seguridad. Este exceso de presión se puede consumir en los motores de propulsión o generadores a bordo, que van adaptados para su funcionamiento con gas, motores duales. En muchas ocasiones, el volumen de metano evaporado es superior al consumo de los motores, por lo que debe ser quemado sin ningún tipo de aprovechamiento energético en la CGU, Gas Combustión Unit. En situaciones de riesgo también puede ser expulsado a la atmósfera por los palos de venteo.

3.3.1. Cálculo del B.O.G.

El Boil-off generado por la evaporación de la carga se puede monitorizar diariamente con el consumo de gas a bordo. Este consumo vendrá dado por la cantidad usada en los generadores, así como el exceso de gas quemado en la GCU, de manera que se



mantenga la presión de vapor dentro de unos límites seguros en el interior de los tanques de carga. Esta presión varía entre 80 mbar, con el tanque vacío y preparado para cargar, hasta los 230 mbar, que es la presión a la que está tarada la válvula automática de venteo a la atmósfera.

La presión de vapor sufre variaciones a lo largo del viaje, ya que hay que tener en cuenta periodos de movimiento de la carga, como zonas de oleaje, el consumo demandado por los motores, dependiendo de la velocidad que se necesita para llegar a destino, o las condiciones ambientales, con variaciones en la presión atmosférica y temperaturas, que tienen una gran influencia en la carga. Las características químicas y composición del gas natural licuado también influyen en la cantidad de boil-off generado, por lo que existe una fórmula que tiene en cuenta todos estos parámetros para el cálculo del boil-off diario generado por cada buque y viaje en concreto. La fórmula toma como variables las características del gas y las condiciones iniciales del viaje, así como las condiciones de llegada, previa descarga. También aplica coeficientes según las características del aislamiento térmico de los tanques de carga, y las condiciones ambientales durante el viaje. Esta fórmula es conocida como la fórmula Shell, ya que fue diseñada por el equipo técnico de Shell para calcular los ratios de evaporación de sus buques durante la expansión del proyecto de gas natural australiano (GAZTRANSPORT & TECHNIGAZ 2005).

$$B.O.R. = \frac{1}{C_T} * \frac{(V_1 d_1 - V_2 d_2)L + c_p V_2 d_2 (T_2 - T_1)}{d_m L_m V_1 t} - \frac{C_I}{d_m L_m V_1 t} \quad (\%)$$

El cálculo del factor de corrección para las temperaturas ambiente externas emplea la siguiente fórmula:

$$C_T = (1 - \alpha_{air} (45 - T_{air})) * (1 - \alpha_{sw} (32 - T_{sw})) * (1 - \alpha_{cof} (5 - T_{cof}))$$



El cálculo del factor de corrección para las características del aislamiento térmico emplea la siguiente fórmula:

$$C_I = \beta \frac{1,3}{2} \left[(h_{secondary} (\Delta T_{hull} + \Delta T_{secondary})) + (h_{primary} \Delta T_{secondary}) \right]$$

En el cálculo del ratio nominal, se compara el estado del gas al terminar la operación de carga con su estado final antes de la descarga, en un viaje determinado:

V_1	(m^3)	Volumen de LNG al finalizar la operación de carga.
V_2	(m^3)	Volumen de LNG al empezar la operación de descarga.
d_1	(kg/m^3)	Densidad del LNG al finalizar la operación de carga.
d_2	(kg/m^3)	Densidad del LNG al empezar la operación de descarga.
T_1	$(^{\circ}C)$	Temperatura del LNG al finalizar la operación de carga.
T_2	$(^{\circ}C)$	Temperatura del LNG al finalizar la operación de carga.
L	(kJ/kg)	Calor latente de vaporización de la carga de LNG.
C_p	$(kJ/kg^{\circ}C)$	Calor específico del LNG.
L_m	(kJ/kg)	Calor latente de vaporización del metano.
d_m	(kg/m^3)	Densidad del metano.
t	$(días)$	Días de viaje.

El factor de corrección para las condiciones ambientales compara las temperaturas medias y con las temperaturas teóricas nominales externas y su coeficiente de transmisividad, que es específico para cada buque:



$\alpha_{air}, \alpha_{sw}, \alpha_{coff}$	(kJ/m ² C)	Coefficientes específicos del buque.
T_{air}	(°C)	Temperatura media del aire durante el viaje.
T_{sw}	(°C)	Temperatura media del mar durante el viaje.
T_{coff}	(°C)	Temperatura media del cofferdam durante el viaje.

El factor de corrección para las características del aislamiento tiene en cuenta los espesores de las membranas de contención y las diferencias de temperatura entre el inicio y final de viaje, así como el coeficiente de aislamiento térmico propio del buque en sí:

β	(kJ/m ² C)	Coefficiente de aislamiento térmico propio del buque.
$h_{primary}$	(m)	Espesor de la membrana de aislamiento primaria.
$h_{secondary}$	(m)	Espesor de la membrana de aislamiento secundaria.
$\Delta T_{secondary}$	(°C)	Gradiente de temperatura en la membrana secundaria.
ΔT_{hull}	(°C)	Gradiente de temperatura en el cofferdam.

3.3.2. B.O.G. en casos reales.

Para obtener una visión lo más aproximada a la realidad se ha aplicado el proceso de cálculo del B.O.R., a 5 viajes diferentes realizados por un LNG/c de 173000 m³ de carga y propulsión DFDE. Cada uno de los viajes varía en cantidad de carga, composición del gas y condiciones externas y duración. De esta manera se busca obtener una cantidad media del boil off disponible en múltiples escenarios. Las diferentes composiciones del gas varían en función de su pureza, sea esta la cantidad de CH₄ puro, en contraposición con el contenido de gases pesados como el C₂H₆ o C₃H₈ entre otros.

Las variaciones en la densidad entre el comienzo y final de viaje son más notables en cargas con un porcentaje de compuestos más pesados, ya que estos se estratifican en las zonas más bajas del tanque, y debido a la evaporación del metano puro, el



compuesto más ligero, incrementan su porcentaje en masa al llegar a destino, aumentando la densidad del LNG. Las características del metano puro son:

Calor latente de vaporización (L_m)	511 kJ/kg (-161,6 °C)
Densidad (d_m)	425 kg/m ³ (-163,3 °C ; 1 bar)
Temperatura de vaporización	-161,6 °C (1 bar)

Tabla 1. Propiedades del gas Metano. (DSME 2009)

Estos datos son los habitualmente empleados en la fórmula del cálculo del B.O.G., siendo las condiciones normales del metano licuado como LNG. Cada uno de los cálculos del B.O.G. se comparará con el boil off estimado por diseño del buque y con el consumo real, que computa el volumen de gas consumido en los generadores DF y en la GCU.

3.3.2.1. Viaje 1.

El viaje a analizar es una carga de 150000 m³ de LNG en la terminal de Gladstone, Australia, que es descargada en la terminal de Ningbo, China, 11 días después. El período a analizar toma 10 días, desde el CTS final de carga en Gladstone, hasta la preparación para la descarga en Ningbo, antes del enfriamiento de líneas, ya que este proceso genera un incremento en la evaporación del metano que desvirtuaría los cálculos realizados.

Las características de la carga son las siguientes:



LNG CTS final Gladstone	
V₁	158576 m ³
d₁	420,98 kg/m ³
T₁	-160,1 °C
L	554,72 kJ/kg
c_p	2,2267 kJ/kgK
% CH₄	99,87%
% C₂H₆	0,02%
% N₂	0,10%

Tabla 2. Características del LNG cargado. Fuente: El autor.

Tal y como se puede apreciar, esta carga de LNG tiene un alto contenido en metano, de casi el 100%. Tras 10 días de viaje, al llegar a destino, se aprecia que una pequeña parte del líquido se ha evaporado, debido al boil-off, por lo que el espacio libre para el vapor y los movimientos de la carga es mayor.

La temperatura media del líquido ha aumentado unas décimas de grado, debido a la transferencia de calor entre las membranas y el LNG. La densidad también ha aumentado, ya que la evaporación del CH₄ incrementa el % en masa de compuestos más pesados como el C₂H₆, que se encuentran estratificados en el fondo de los tanques. El LNG analizado contiene un alto índice de metano en su composición, por lo que estas variaciones en la densidad no serán tan notables como en cargas con mayor contenido de pesados en su composición.

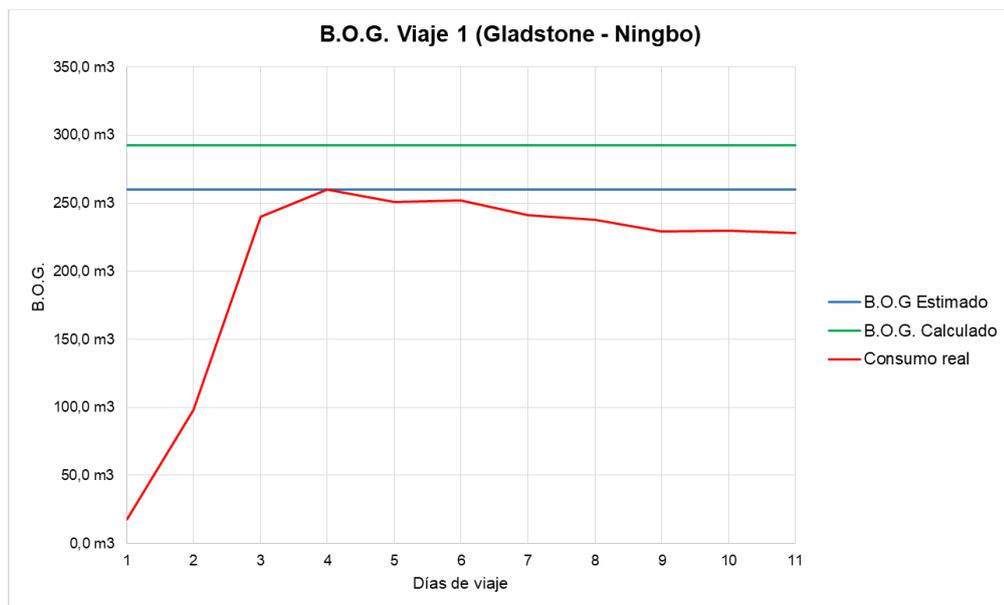
Los datos de la carga tomados a la llegada son los siguientes:

LNG Stand-by Ningbo	
V₂	156135,0 m ³
D₂	421,54 kg/m ³
T₁	-159,7 °C
L	554,72 kJ/kg
c_p	2,2267 kJ/kgK

Tabla 3. Condiciones de la carga al final del viaje. Fuente: El autor.



Aplicando la fórmula de cálculo del B.O.G, se obtiene un ratio del 0,17% de evaporación de la capacidad total de carga, superior al estimado por diseño de 0,15%. El B.O.G diario medio obtenido es de 292,5 m³. En la siguiente gráfica se puede comparar los valores medios calculados y estimados con el consumo real.



Gráfica 1. B.O.G y consumo durante el viaje 1. Fuente: El autor.

La diferencia entre el B.O.G. calculado y el consumo real se manifiesta en un aumento de presión de vapor en el interior de los tanques de carga, vapor no consumido ya que se mantuvo dentro de los límites establecidos de presión.

3.3.2.2. Viaje 2.

El viaje 2 se realiza en lastre, entre los puertos de Tongyeong (Corea del Sur) y Pampa Melchorita (Perú). Este viaje se hace con los tanques 1, 2 y 3 vacíos, y con un remanente en el tanque 4 de 3695,8 m³, líquido que se evaporará a lo largo del viaje para el consumo de los motores. La evaporación se puede mantener de forma natural



o forzarla con el Forcing LNG evaporator, intercambiador de calor con vapor que evapora el LNG según demanda.

En este viaje, se retrasa la carga durante 10 días, por lo que el remanente calculado para el viaje no es suficiente para llegar a destino, siendo necesaria la operación de generadores a HFO, controlando la presión del interior de los tanques con la GCU. El gas remanente fue cargado en Australia, en una carga completa, y los datos de inicio de viaje son los siguientes:

LNG CTS final Tongyeong	
V₁	3695,8 m ³
d₁	441,60 kg/m ³
T₁	-159,5°C
L	554,72 kJ/kg
c_p	2,205 kJ/kgK
% CH₄	94,15%
% C₂H₆	4,12%

Tabla 4. Características del LNG remanente. Fuente: El autor.

El viaje se inicia a gas y se mantiene durante 7 días, momento en el que se cambian las órdenes de viaje y se retrasa la carga. En ese momento se cambia a modo dual, con dos generadores a gas y uno a HFO, manteniendo esta configuración hasta el día 33, en el que se acaba el líquido remanente y la capacidad de evaporación del gas no es suficiente para alimentar los motores. A partir de este momento, se controla la presión interior de los tanques de carga, que se ve incrementada debido al aumento de temperatura paulatino, con la GCU.

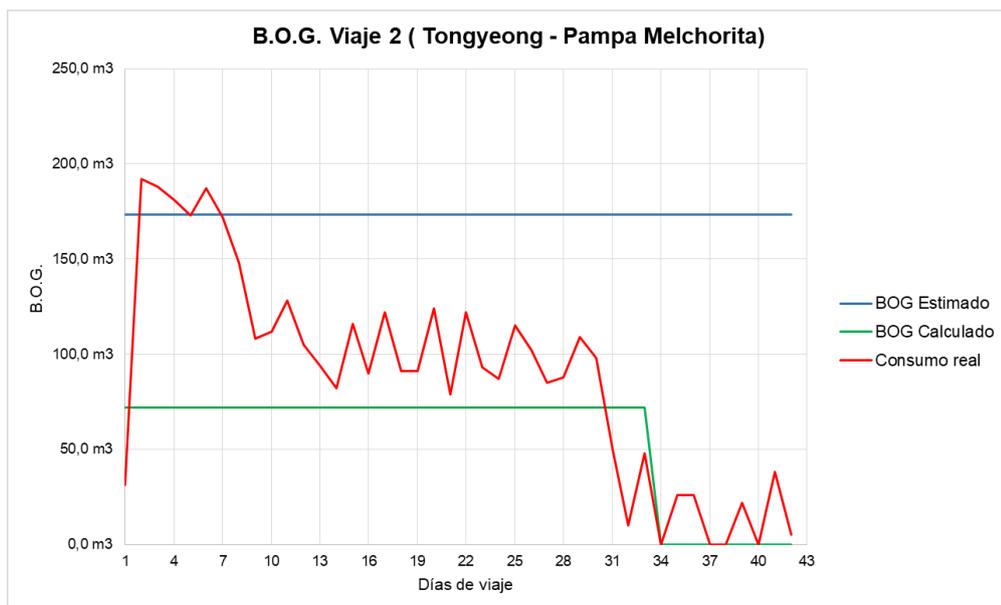
La fórmula para el B.O.G. se aplica solo hasta el día 33, momento en el que se acaba el líquido y ya no tiene sentido tener en cuenta el ratio de evaporación. Los datos de la carga el día 33 son los siguientes:



LNG CTS Noon 21-Feb	
V ₂	241,9 m ³
D ₂	441,60 kg/m ³
T ₁	-98,6 °C
L	554,72 kJ/kg
c _p	2,2267 kJ/kgK

Tabla 5. Condiciones de la carga al consumir el remanente. Fuente: El autor.

El ratio de B.O.G. obtenido es de 0,033% de la capacidad de carga total, con una media de 71,8 m³ al día, lo que hacen un total de 2371,8 m³. El B.O.G estimado, aplicando el ratio de diseño para viajes en lastre, 0,10%, suma un total de 7282,8 m³, que es la cantidad de remanente estimada para hacer un viaje de 42 días a gas. El consumo real final es superior al calculado, 3738 m³, ya que en los últimos días de viaje se sigue quemando gas en la GCU para mantener una presión constante dentro de los tanques, pese a no existir una cantidad de LNG líquido significativa para el cálculo del B.O.G. En la gráfica 2 se pueden apreciar estas variaciones en los consumos y los diferentes modos de operación del buque según la cantidad de gas disponible:



Gráfica 2. B.O.G y consumo durante el viaje 2. Fuente: El autor.



Durante la primera semana, el consumo real se aproxima al B.O.G estimado, con el barco operando en modo gas. Al cambiar las ordenes de viaje, se pasa a modo dual, disminuyendo el consumo y aproximándose al B.O.G calculado hasta que se agota el remanente, el día 33, y se fondea el barco a la espera de la carga. A lo largo de la última semana se producen picos de consumo en la GCU, para mantener la presión de vapor constante.

3.3.2.3. Viaje 3.

Tras la carga en Pampa Melchorita comienza el viaje 3, que lleva el buque hasta Boryeong, en Corea del Sur, empleando para ello 26 días. La carga es completa, 170785,4 m³ repartidos entre los 4 tanques. El gas cargado en Perú tiene una composición con mayores impurezas que el gas Australiano, con un % de metano en su composición inferior a la media, 90,1%. Esto conlleva una densidad mayor y una mayor diferencia con la densidad de finalización de viaje, cuando la composición del gas vea aumentado su % de gases pesados. Los datos de inicio de viaje son los siguientes:

LNG CTS final Pampa	
V ₁	170785,4 m ³
d ₁	449,92 kg/m ³
T ₁	-160,7 °C
L	543,12 kJ/kg
c _p	2,223 kJ/kgK
% CH ₄	90,10%
% C ₂ H ₆	9,14%

Tabla 6. Características del LNG cargado en el viaje 3. Fuente: El autor.

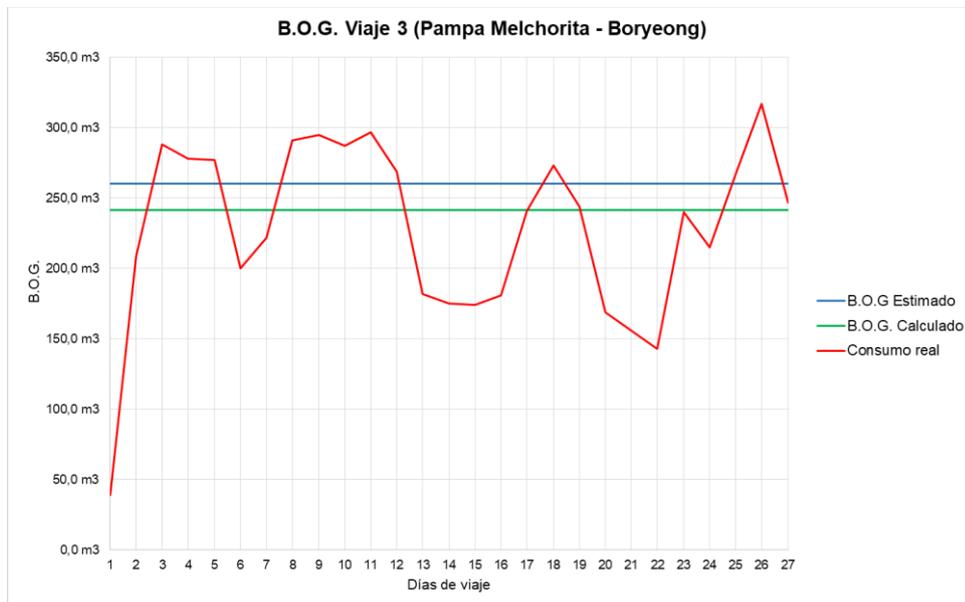
El viaje se hace en modo gas, con una velocidad elevada, lo que incrementa el consumo. En este viaje el consumo de gas en la GCU es casi mínimo, hasta los últimos días, donde se reduce la velocidad y se quema el exceso de B.O.G. para mantener la presión de vapor requerida para la entrada en la terminal de descarga. A la llegada a la terminal, los datos de la carga son los siguientes:

GENERACIÓN DE H₂ A BORDO DE UN BUQUE LNG/C

LNG CTS Noon 21-Feb	
V ₂	164895,8 m ³
D ₂	453,26 kg/m ³
T ₁	-159,5 °C
L	543,12 kJ/kg
c _p	2,223 kJ/kgK

Tabla 7. Condiciones de la carga al finalizar el viaje 3. Fuente: El autor.

El ratio obtenido fue de 0,14%, una media de 241,4 m³ al día, sumando un B.O.G. de 6277,6 m³ al finalizar el viaje. El ratio estimado es de 0,15% y el consumo real sumó 6020,03 m³ entre generadores y GCU. El cálculo para este viaje es muy aproximado al comportamiento real de la carga, ya que se dieron las condiciones óptimas para el viaje, esto es velocidad de diseño y buenas condiciones climatológicas.



Gráfica 3. B.O.G y consumo durante el viaje 3. Fuente: El autor.

A lo largo del viaje se pueden apreciar picos de consumo, necesarios para el control de la presión de vapor de los tanques. El consumo en “dientes de sierra” es típico de



los buques gaseros durante viajes largos, siempre oscilando en torno a los valores de B.O.G. estimados.

3.3.2.4. Viaje 4.

El viaje 4 es un viaje en lastre entre Boryeong y Punta Europa, en Guinea Ecuatorial. Este viaje dura 26 días y se realiza con un remanente de 6188 m³, líquido suficiente para realizar el viaje a gas y enfriar las líneas previa entrada a la terminal de carga. El gas remanente es el cargado en el viaje 3 en Pampa Melchorita, por lo que la composición se supondrá la misma. La concentración de gases pesados aumenta a lo largo del viaje, debido a la evaporación del metano, pero esta variación no se puede cuantificar, por lo que es necesario tomar la suposición como válida. Los datos de inicio de viaje son los siguientes:

LNG CTS final Boryeong	
V₁	6188,0 m ³
d₁	453,26 kg/m ³
T₁	-159,2 °C
L	543,12 kJ/kg
c_p	2,223 kJ/kgK
% CH₄	90,10%
% C₂H₆	9,14%

Tabla 8. Características del LNG remanente en el viaje 4. Fuente: El autor.

El viaje se hará en modo gas con una parada para relevos y provisión a medio camino, en donde se mantendrá el consumo para controlar la presión de vapor con la GCU. El viaje se realiza con unas condiciones climatológicas muy tranquilas y estables, por lo que no hay factores externos que incrementen la evaporación, como el balance y las bajas presiones atmosféricas. Los datos de la carga a la llegada son los siguientes:

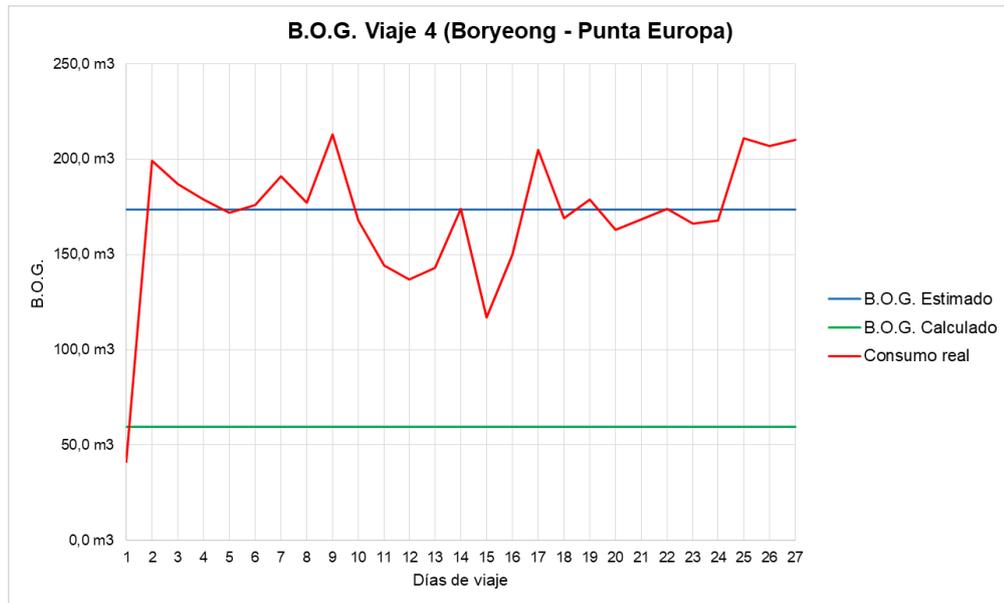


LNG CTS Inicial Punta Europa	
V₂	1558,5 m ³
D₂	453,26 kg/m ³
T₁	-151,3 °C
L	543,12 kJ/kg
c_p	2,223 kJ/kgK

Tabla 9. Datos de la carga al finalizar el viaje 4. Fuente: El autor.

El líquido remanente a la llegada es la cantidad necesaria para enfriar los tanques y las líneas durante la preparación del buque para la operación de carga. Este es un requerimiento bastante común ya que permite empezar a enfriar el buque antes de la llegada a la terminal y ahorrar tiempo en la operación. De no ser así, el enfriamiento tendría que correr por cuenta de la terminal, retrasando el inicio de la carga en varias horas.

El ratio diario de B.O.G. calculado es de 0,034%, muy inferior al estimado, que es de 0,10%. Con este ratio, el B.O.G. diario medio para todo el viaje es de 59,6 m³, bastante lejos del estimado, 173,4 m³, que en este viaje se aproxima a la media de consumo diario, salvando algunos picos de consumo, tal y como se puede apreciar en la gráfica:



Gráfica 4. B.O.G y consumo durante el viaje 4. Fuente: El autor.

Se aprecia como el consumo desde el primer día oscila en torno al B.O.G. estimado. En los últimos 3 días se observa un incremento del mismo debido al enfriamiento de líneas y tanques, ya que se incrementa la evaporación del líquido y es necesario quemar el exceso de B.O.G. en la GCU.

3.3.2.5. Viaje 5.

El viaje 5 es un viaje entre Punta Europa, Guinea Ecuatorial, e Incheon, Corea del sur, que se realiza en 27 días. En Punta Europa se realiza una carga total, llenando los tanques hasta un total de 170844,4 m³. El gas cargado tiene una alta pureza, con un contenido de metano del 95,6%, por lo que la cantidad de gases pesados será pequeña, disminuyendo la densidad media y la diferencia de densidades respecto a la de llegada. Los datos de la carga al inicio del viaje son los siguientes:



LNG CTS final Punta Europa	
V₁	170844,4 m ³
d₁	437,80 kg/m ³
T₁	-159,4 °C
L	551,5 kJ/kg
c_p	2,231 kJ/kgK
% CH₄	95,40%
% C₂H₆	4,24%

Tabla 10. Características de la carga en el viaje 5. Fuente: El autor.

El viaje se realiza a velocidad de crucero, con unas condiciones climatológicas estables y favorables la mayor parte del viaje, con un pequeño período de mala mar y balance durante los días 13 y 18 del viaje, lo que incrementa el ratio de evaporación y el gradiente de incremento de presión de vapor en el interior de los tanques, por lo que este exceso debe ser controlado y quemado con la GCU. En los últimos días de viaje también se incrementa la evaporación debido al proceso de enfriamiento de líneas, siendo necesario el uso de la GCU de nuevo. Los datos de la carga a la llegada a puerto son los siguientes:

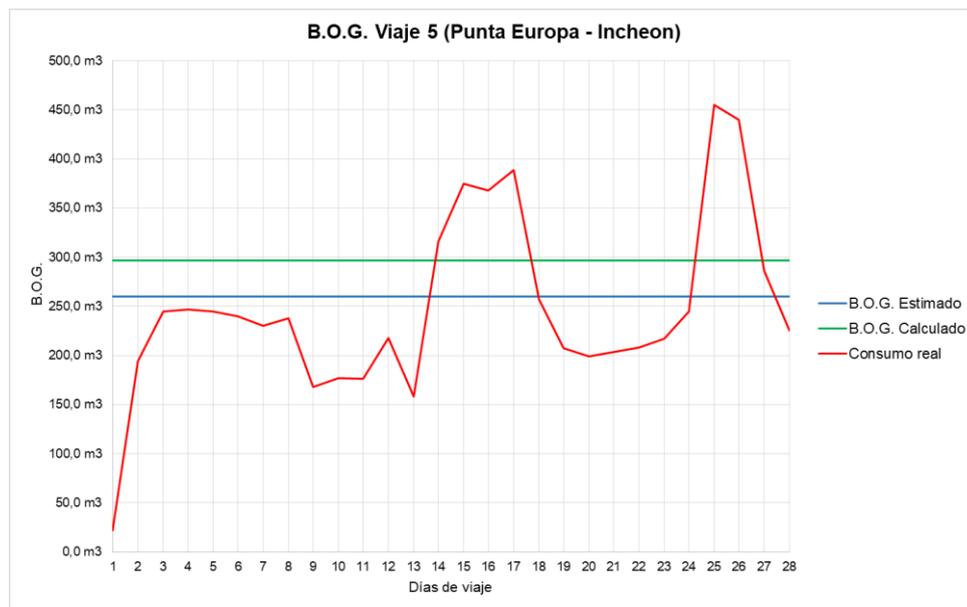
LNG CTS Inicial Incheon	
V₂	163544,4 m ³
D₂	439,90 kg/m ³
T₁	-159,1 °C
L	551,5 kJ/kg
c_p	2,231 kJ/kgK

Tabla 11. Datos de la carga al finalizar el viaje 5. Fuente: El autor.

Se puede apreciar la evaporación sufrida, con un notable descenso del volumen total de líquido, así como un pequeño aumento de la densidad del líquido, incremento mucho menor que en cargas menos puras. El ratio de B.O.G. calculado es de 0,17% de la capacidad de carga al día, superior al 0,15% estimado por diseño.



En la gráfica 5 se pueden apreciar los dos picos de consumo sufridos durante los días de mal tiempo y al término del viaje debido al proceso de enfriamiento de líneas.



Gráfica 5. B.O.G. y consumo durante el viaje 5. Fuente: El autor.

El B.O.G. calculado diario medio es de $296,9 \text{ m}^3$, que suman $8016,1 \text{ m}^3$, superior a los $7022,7 \text{ m}^3$ estimados. El consumo total a final de viaje suma $6745,1 \text{ m}^3$, cercano al estimado, pero que se ve incrementado por los dos picos de consumo de mediados y final de viaje.

3.3.3. Influencia de las condiciones de aislamiento en el B.O.G.

El aislamiento de los tanques de carga para los buques tanque de LNG está formado por membranas o “barreras” de aislamiento. Habitualmente la contención se realiza mediante cajones de madera de balsa, rellenos con un material aislante, como puede ser la perlita, lana de roca o fibra de vidrio. Estas membranas se separan del líquido de carga y de las otras barreras mediante un recubrimiento de planchas metálicas de Invar. El invar es una aleación de acero – níquel al 36% que entre sus propiedades destaca la



de sufrir mínimas contracciones y deformaciones bajo la influencia de variaciones térmicas y bajas temperaturas (DSME 2009).

El aislamiento del buque a analizar es del tipo NO 96, Mark II, diseñado por la empresa GTT (GazTransport & Technigaz) y cuenta con dos membranas, primaria y secundaria, formadas por cajones de madera de balsa rellenos de perlita y planchas de Invar a modo de separación y contención, tal y como se puede apreciar en la imagen.

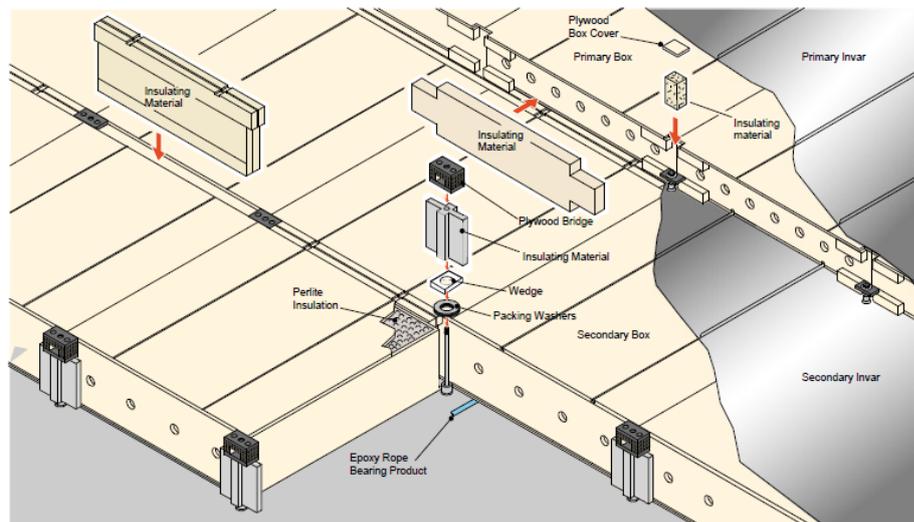


Ilustración 1. Partes de las membranas primaria y secundaria. (DSME 2009)

Las dos membranas mantienen la carga aislada térmicamente de los cofferdam que envuelven a los tanques de carga, espacios que van calefactados con glicol, para evitar que la humedad se condense y acabe congelando los espacios interiores del buque. Las planchas de Invar tienen 0,7 mm de espesor, mientras que la membrana primaria tiene 230 mm y la secundaria, 300 mm. Todas las cajas de cada membrana están comunicadas mediante pequeños orificios, por los que circula N₂. El nitrógeno se usa para evitar procesos corrosivos en el interior de las membranas, así como detectar cualquier fuga de LNG de los tanques de carga.



Los coeficientes de transferencia de calor de las membranas y sistema de contención de la carga, en conjunto, son muy bajos, por lo que la inercia térmica es muy baja. Una vez iniciado el proceso de carga, se produce una rápida transferencia de calor al gas licuado debido a la diferencia de temperaturas entre la superficie de la barrera primaria, unos -150 °C, y el LNG, bombeado a -163 °C. Este proceso de transferencia se estabiliza rápidamente, una vez que la superficie de la membrana alcanza la temperatura del LNG. A partir de este momento se inicia otro proceso mucho más lento, que es el de la transferencia de calor y disminución de la temperatura entre cada una de las capas de las membranas, proceso que se mantiene activo durante todo el viaje, y que provoca el aumento de la temperatura final de la carga en unas decenas de grado. Este proceso de transferencia se tiene en cuenta en el cálculo del B.O.G. mediante la aplicación del coeficiente CI.

Para el cálculo del coeficiente es necesario conocer las temperaturas iniciales y finales de las membranas y cofferdams, a fin de compararlas y ver los gradientes de temperatura finales. Todos los espacios de aislamiento cuentan con sensores que monitorizan la temperatura en cada una de las zonas del sistema de contención.

El coeficiente de aislamiento térmico, β , es único para cada buque y se calcula en función de las características de la membrana, la densidad del material aislante y la superficie expuesta al intercambio de calor con la carga. La fórmula empleada para su cálculo es la siguiente:

$$\beta = c_p * \rho * S \quad (1.1.4.)$$

Donde:

c_p	(kJ/kg°C)	Calor específico del aislamiento.
ρ	(kg/m ³)	Densidad del material aislante.
S	(m ²)	Superficie de aislamiento.



Teniendo en cuenta el calor específico y la densidad de la perlita, y tras el cálculo de toda la superficie aislante en las paredes del tanque, se puede obtener el valor de β :

c_p	0,387 kJ/kg°C
ρ	105 kg/m ³
S	30366,2 m ²
β	1233930,54 kJ/m°C

Tabla 12. Propiedades del sistema de contención. (Jeong y Shim 2017)

Con el fin de cuantificar la influencia del coeficiente de aislamiento, CI, en el cálculo del B.O.G. se realiza un cálculo del mismo en función del gradiente de temperatura en la membrana secundaria, $\Delta T_{\text{secondary}}$. El gradiente de temperatura en el casco, ΔT_{hull} , se supondrá constante, -3°C, ya que los cofferdam van calefactados con glicol y mantienen una temperatura casi constante durante todo el viaje, sufriendo pocas variaciones a lo largo de los viajes analizados.

El coeficiente CI obtenido se aplica al cálculo del B.O.R. en dos viajes tipo, en carga y en lastre, para determinar en qué condiciones tendría una influencia mayor sobre el resultado final.



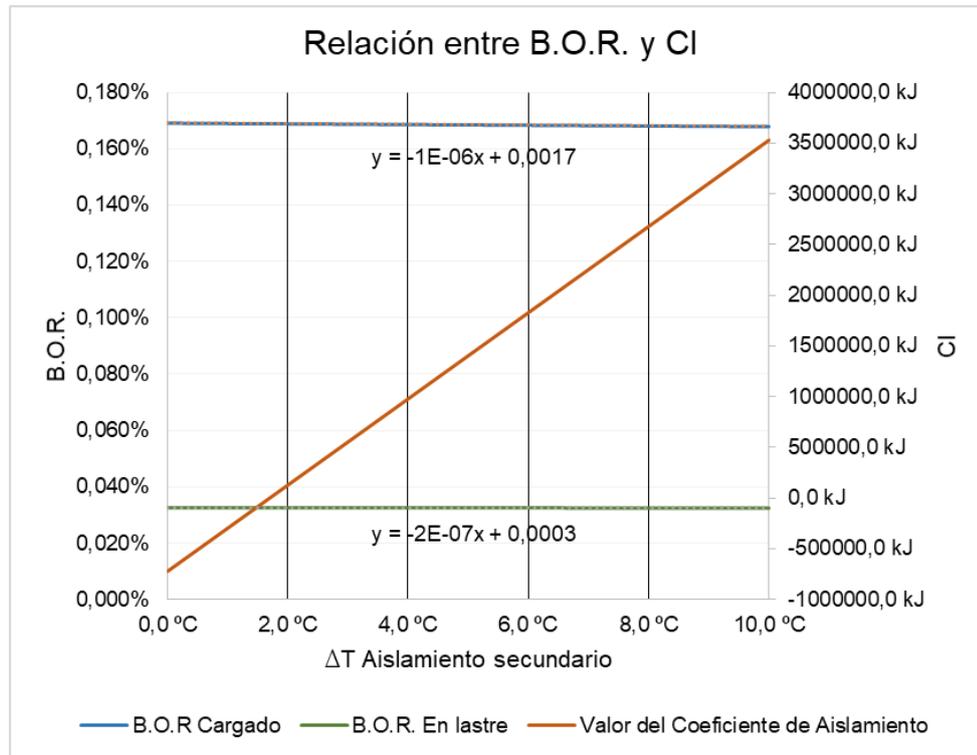
GENERACIÓN DE H₂ A BORDO DE UN BUQUE LNG/C

Valor CI en función de ΔT (En carga)		
Δ sec	CI	B.O.R.
0,0 °C	-721849,4 kJ	0,169%
0,5 °C	-509304,8 kJ	0,169%
1,0 °C	-296760,3 kJ	0,169%
1,5 °C	-84215,8 kJ	0,169%
2,0 °C	128328,8 kJ	0,169%
2,5 °C	340873,3 kJ	0,169%
3,0 °C	553417,8 kJ	0,169%
3,5 °C	765962,4 kJ	0,169%
4,0 °C	978506,9 kJ	0,169%
4,5 °C	1191051,5 kJ	0,169%
5,0 °C	1403596,0 kJ	0,168%
5,5 °C	1616140,5 kJ	0,168%
6,0 °C	1828685,1 kJ	0,168%
6,5 °C	2041229,6 kJ	0,168%
7,5 °C	2466318,7 kJ	0,168%
8,0 °C	2678863,2 kJ	0,168%
8,5 °C	2891407,7 kJ	0,168%
9,0 °C	3103952,3 kJ	0,168%
9,5 °C	3316496,8 kJ	0,168%
10,0 °C	3529041,3 kJ	0,168%

Valor CI en función de ΔT (En lastre)		
Δ sec	CI	B.O.R.
0,0 °C	-721849,4 kJ	0,033%
0,5 °C	-509304,8 kJ	0,033%
1,0 °C	-296760,3 kJ	0,033%
1,5 °C	-84215,8 kJ	0,033%
2,0 °C	128328,8 kJ	0,033%
2,5 °C	340873,3 kJ	0,033%
3,0 °C	553417,8 kJ	0,033%
3,5 °C	765962,4 kJ	0,033%
4,0 °C	978506,9 kJ	0,033%
4,5 °C	1191051,5 kJ	0,033%
5,0 °C	1403596,0 kJ	0,033%
5,5 °C	1616140,5 kJ	0,033%
6,0 °C	1828685,1 kJ	0,033%
6,5 °C	2041229,6 kJ	0,033%
7,5 °C	2466318,7 kJ	0,032%
8,0 °C	2678863,2 kJ	0,032%
8,5 °C	2891407,7 kJ	0,032%
9,0 °C	3103952,3 kJ	0,032%
9,5 °C	3316496,8 kJ	0,032%
10,0 °C	3529041,3 kJ	0,032%

Tabla 13. Variación de CI en función de $\Delta T_{\text{secondary}}$. Fuente: El autor.

Al representar los valores obtenidos en una gráfica se aprecia la variación del coeficiente con el incremento del gradiente de temperatura y como afecta este coeficiente al ratio de evaporación.



Gráfica 6. Relación entre B.O.R. y CI. Fuente: El autor.

La gráfica muestra cómo, pese a la gran variación de CI en función del gradiente de temperatura, este apenas tiene influencia en el cálculo del B.O.G., que se mantiene casi constante. La pendiente de las ecuaciones sugiere que la influencia, aun siendo mínima, influye en mayor medida para los viajes en carga, ya que la superficie de transferencia de calor entre las membranas y el líquido será mayor.

3.3.4. Influencia de las condiciones ambientales en el B.O.G.

El transporte de LNG es muy sensible con las condiciones ambientales existentes, tanto marítimas como atmosféricas. Un viaje con mala mar hace que el boil off generado sea mucho mayor, debido a los movimientos de la carga. Así mismo, las variaciones en la presión atmosférica modifican los valores de la presión de vapor en el interior de los tanques, variando también el consumo necesario para mantener la presión de vapor dentro de los límites de seguridad. El cálculo del B.O.G. tiene en



cuenta estos cambios mediante la aplicación del factor de corrección CT. Este factor toma como referencia las temperaturas medias del agua de mar, ambiente y cofferdam durante todo el viaje, y las compara con los valores nominales teóricos. A su vez, aplica los coeficientes de transmisividad térmica propios del buque en concreto, calculados durante sus pruebas de mar y gas. Los valores de los coeficientes para este buque son los siguientes:

α_{air}	0,00003 kJ/m°C
α_{sw}	0,00062 kJ/m°C
α_{coff}	0,00002 kJ/m°C

Tabla 14. Coeficientes térmicos ambientales. (GAZTRANSPORT & TECHNIGAZ 2005)

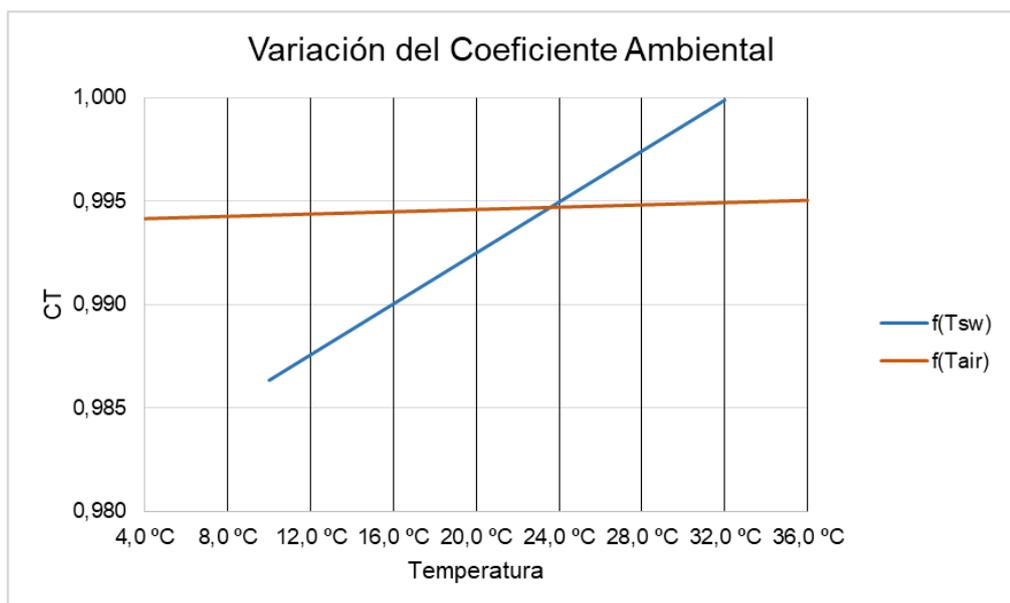
Para comprobar cómo afectan las condiciones meteorológicas al B.O.G. se calcula el coeficiente CT en función de la temperatura media del mar, T_{sw} , y de la temperatura media del aire, T_{air} . La temperatura media del cofferdam, T_{coff} , se supone constante y estimada en 14°C. Para realizar una estimación objetiva con las rutas marítimas habitualmente seguidas, se calcula CT para un rango de T_{sw} de entre 10°C y 32°C. El rango de T_{air} comprende entre 4°C y 36°C. Las tablas siguientes muestran la variación de CT en función de los valores de temperatura:



Variación de CT con T _{sw}		Variación de CT con T _{air}	
T _{sw}	CT	T _{air}	CT
10,0 °C	0,986	4,0 °C	0,994
12,0 °C	0,988	6,0 °C	0,994
14,0 °C	0,989	8,0 °C	0,994
16,0 °C	0,990	10,0 °C	0,994
18,0 °C	0,991	12,0 °C	0,994
20,0 °C	0,993	14,0 °C	0,994
22,0 °C	0,994	16,0 °C	0,994
24,0 °C	0,995	18,0 °C	0,995
26,0 °C	0,996	20,0 °C	0,995
28,0 °C	0,997	22,0 °C	0,995
30,0 °C	0,999	24,0 °C	0,995
32,0 °C	1,000	26,0 °C	0,995
		28,0 °C	0,995
		30,0 °C	0,995
		32,0 °C	0,995
		34,0 °C	0,995
		36,0 °C	0,995

Tabla 15. Variación de CT en función de T_{sw} y T_{air}. Fuente: El autor.

Los resultados se representan en la gráfica siguiente:

Gráfica 7. Variación de CT en función de T_{sw} y T_{air}. Fuente: El autor.



Se aprecia como la pendiente de CT en función de la temperatura del agua de mar es mucho más pronunciada que la resultante en función de la temperatura del aire. Esto se debe a la conductividad térmica de ambos medios, siendo mucho mayor la del agua y aumentando los gradientes de temperatura mucho más rápido al calentar las barreras de aislamiento. Por otra parte la superficie del tanque expuesta al aire es mucho menor que la sumergida, dado a que la mayor parte del mismo se encuentra envuelto en la estructura del buque.

3.3.5. Disponibilidad de B.O.G. para la generación de H₂.

Tras el análisis de los 5 viajes diferentes se puede calcular la disponibilidad de B.O.G. para su posterior reformado y transformación en H₂. Se tomará en cuenta la cantidad quemada en la GCU, cantidad que se cuantifica como consumo, y la diferencia entre el B.O.G. calculado y el consumo total. Esta diferencia marca el aumento de presión de vapor a lo largo del viaje, que es incrementada dentro de los límites de seguridad marcados. Los viajes en lastre analizados, el 2 y el 4, muestran un consumo superior al B.O.G. calculado, por lo que la diferencia será negativa y solo se tendrá en cuenta el consumo en la GCU.

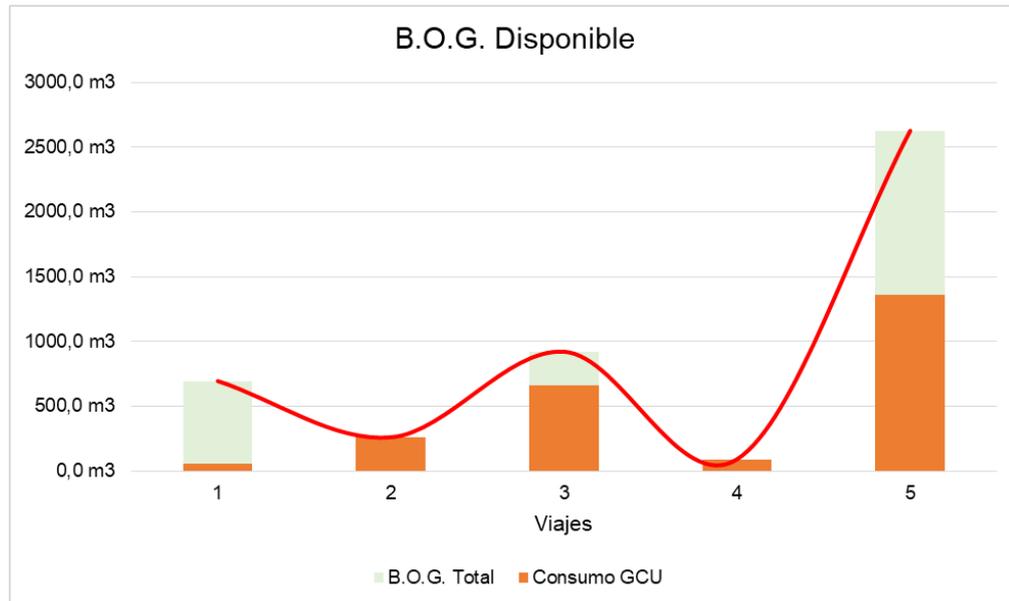
La cuantificación del B.O.G. en los viajes en lastre es mucho más compleja, ya que las superficies de evaporación son mucho mayores. Habitualmente, el remanente que se deja para el viaje se consume completamente, por lo que se debe tomar como B.O.G. la cantidad de líquido disponible al empezar el viaje, restándole la cantidad necesaria para el enfriamiento de líneas si este se hace antes de la llegada a la terminal.

	B.O.G.	Consumo	Diferencia	GCU	Disponible
Viaje 1	2925,0 m ³	2285,0 m ³	640,0 m ³	54,0 m ³	694,0 m ³
Viaje 2	2371,0 m ³	3738,0 m ³	-1367,0 m ³	260,0 m ³	260,0 m ³
Viaje 3	6277,6 m ³	6020,0 m ³	257,6 m ³	663,0 m ³	920,6 m ³
Viaje 4	1550,3 m ³	4420,0 m ³	-2869,7 m ³	90,0 m ³	90,0 m ³
Viaje 5	8016,1 m ³	6745,0 m ³	1271,1 m ³	1355,0 m ³	2626,1 m ³
Media	4228,0 m ³	4641,6 m ³	-413,6 m ³	484,4 m ³	918,1 m ³

Tabla 16. Cálculo del B.O.G. disponible por viaje. Fuente: El autor.



Tomando como referencia los 5 viajes, y las diferencias entre los viajes en carga y lastre, se obtiene una media de 918,1 m³ de B.O.G. disponibles por viaje.



Gráfica 8. B.O.G. disponible por viaje. Fuente: El autor.

Siendo la media de duración de 26,2 días por viaje, se calcula una disponibilidad de 35,04 m³ de B.O.G. diarios para su reformado a H₂. Si se tiene en cuenta solo los viajes en carga, cuando los cálculos son más exactos, la cantidad de B.O.G. disponible diariamente se eleva a 67,31 m³.

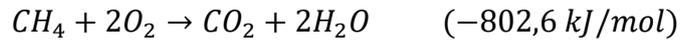
3.4. Generación de H₂.

Existen diferentes métodos para la generación de H₂ a partir de CH₄, pero para la aplicación a bordo se ha elegido el reformado autotérmico como la opción más adecuada, debido a sus características y eficiencia. El reformado autotérmico, *ATR*, combina los métodos de la oxidación parcial catalítica, *POM*, y el reformado por vapor, *SR*, mejorando el proceso mediante el desplazamiento catalítico de gas de agua, *WGSR*. En este método de generación, las reacciones exotérmicas del *POM* suministran el calor necesario para las reacciones endotérmicas de *SR*, dando lugar a una reacción final ligeramente exotérmica (Adriana García 2010).



Las reacciones que toman parte en el proceso son las siguientes (Wei-Hsin Chen 2010):

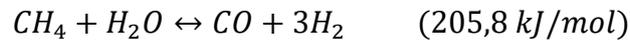
- Combustión.



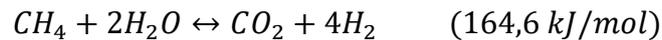
- *POM*.



- *SR 1*.



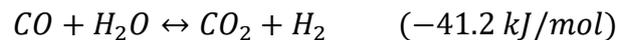
- *SR 2*.



- Reformado seco.



- *WGSR*.

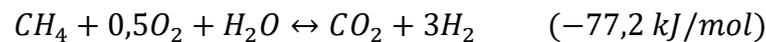


En la teoría, todas las reacciones se producen simultáneamente, donde las reacciones exotérmicas de *POM* y combustión liberan la energía necesaria para que se produzcan las reacciones endotérmicas de *SR1*, *SR2* y reformado seco de CO₂. En el caso práctico, la reacción tiene lugar en dos etapas. En la primera etapa, el suministro de oxígeno produce las reacciones de *POM* y Combustión, siendo estas las reacciones directas. Indirectamente, debido a la energía liberada y el vapor de agua suministrado, se producen las *SR1* y *SR2*, y el CO₂ liberado reacciona con el CH₄ para el reformado seco (Wei-Hsin Chen 2010). En la segunda etapa tiene lugar el *WGSR*, donde todo el CO reacciona con el agua para dar lugar a CO₂ y H₂.



3.4.1. Control del proceso.

Diferentes estudios en laboratorio han establecido los parámetros más favorables para la producción de hidrógeno. En este proceso, toman especial importancia los ratios CH₄/H₂O y O₂/CH₄, que deben ser administrados meticulosamente a fin de favorecer la reacción y maximizar la producción de hidrógeno. La reacción estequiométrica total es la siguiente:



Siguiendo la reacción estequiométrica, los ratios más adecuados son CH₄/H₂O=1 y O₂/CH₄=0,5. Menor cantidad de oxígeno mejora la producción de H₂, pero favorece las reacciones de reformado convirtiendo el proceso en endotérmico, siendo necesario un aporte de energía (Wei-Hsin Chen 2010). Mayores cantidades de vapor de agua no mejoran la producción, aumentando la demanda de energía para mantener la misma estable, por lo que CH₄/H₂O=1 es el valor adecuado.

El tercer parámetro que debe ser controlado es la temperatura de reacción. El proceso de *POM* tiene lugar a temperaturas entre 1000°C y 2000°C, donde todo el CH₄ es consumido. Aparentemente, entre estos valores de temperatura del *POM*, apenas existe variación en la generación final de H₂ (Wei-Hsin Chen 2010). En la segunda etapa del proceso, donde tiene lugar el *WGSR*, se establece como parámetros más favorables una temperatura de 750°C y una presión ambiente de 1 atm, donde el rango de conversión de H₂ oscila entre 2,47 en el peor escenario y 2,86 en el más favorable (Wei-Hsin Chen 2010). Esto indica que el control de temperatura debe realizarse en base a la segunda etapa del proceso, cuando ocurre el *WGSR*.

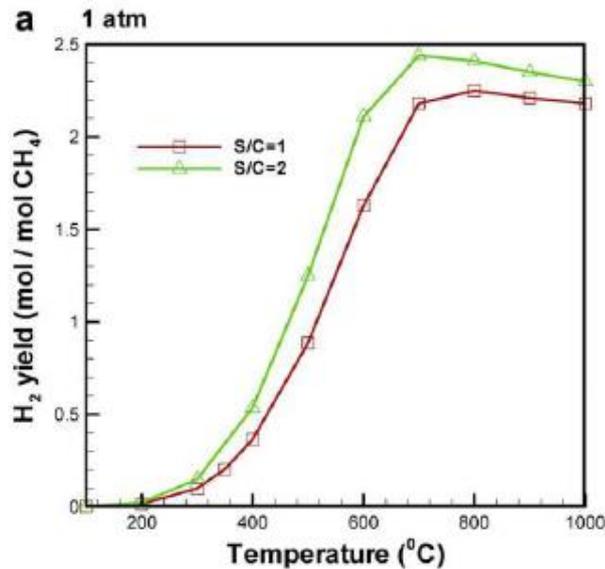


Ilustración 2. Producción de H₂ en función de la temperatura del proceso WGSR. (Wei-Hsin Chen 2010)

Tomando como referencia el ratio de conversión en el peor escenario, 2,47; la eficiencia global del proceso será de un 82,33%. El producto de la reacción es un gas de síntesis formado por CO₂ y H₂ que deberá ser tratado para extraer el hidrógeno y purificarlo. Además, en el reactor se producirán residuos de carbono procedentes de inquemados y del reformado seco.

3.4.2. Alimentación y productos del proceso.

Conociendo la mezcla estequiométrica necesaria para que se produzca la reacción se pueden establecer las cantidades mínimas de flujo necesarias para llevarla a cabo. La cantidad disponible de CH₄, calculada en la primera parte del trabajo, tras ser tratado y purificado, oscila entre 35,04 m³ diarios, como media general, con disponibilidad de hasta 67,31 m³ para los viajes cargados. Conociendo el peso molar del CH₄ y su densidad, se obtienen los moles diarios teóricos.

GENERACIÓN DE H₂ A BORDO DE UN BUQUE LNG/C

Disponibilidad CH ₄	
Peso molar	16,04 kg/kmol
ρ (-163,3°C)	425,0 kg/m ³
Moles diarios	928,4 kmol

Tabla 17. Moles de CH₄ disponibles para el proceso de reformado. Fuente: Engineering Ecuation Solver.

Conocida la cantidad de metano en moles disponible, se pueden calcular las cantidades de O₂ y vapor de agua necesarias para el proceso. El O₂ se suministrará mediante un compresor de aire, por lo que será necesaria conocer la cantidad de aire diaria total.

O ₂	
Peso molar	36 kg/kmol
% en Aire	20,9%
ρ (aire, 1 bar, 20°C)	1,189 kg/m ³
Moles diarios (Carga)	464,2 kmol
Cantidad diaria total (aire)	67250,1 m ³

Tabla 18. Moles de aire necesarios para el proceso de reformado. Fuente: Engineering Ecuation Solver.

La capacidad de la planta de reformado estará definida por la capacidad del compresor de aire de suministro, los m³/hora y la presión de descarga del mismo. El vapor de agua se suministrará de la misma línea de vapor de servicio a bordo, que es vapor saturado a 7 bares de presión. Para mejorar la eficiencia se recalentará con los gases de cola de la planta de reformado, hasta elevar su temperatura hasta 250 °C. En la siguiente tabla se muestran las cantidades necesarias:

H ₂ O	
Peso molar	18,02 kg/kmol
ρ (7 bar, 250°C)	2,974 kg/m ³
Moles diarios (Carga)	928,4 kmol
Cantidad diaria total	5625,5 m ³

Tabla 19. Moles de vapor de agua necesarios para el proceso de reformado. Fuente: Engineering Ecuation Solver.



La cantidad de H₂ generado vendrá limitada por la capacidad de la planta y de los recursos del barco, en especial la generación de vapor. La cantidad máxima que se podrá generar en una situación ideal, con el reformado completo de los 35,04 m³ de metano disponible diariamente, y teniendo en cuenta la eficiencia del proceso, 82,33%, será la siguiente:

H ₂	
Peso molar	2,016 kg/kmol
Densidad (700 °C, 2 bar)	0,050 kg/m ³
Moles generados	2290,6 kmol
Cantidad diaria total	46407,7 m ³

Tabla 20. Moles de H₂ generados durante el proceso de reformado. Fuente: Engineering Equation Solver.

Debe tenerse en cuenta de que las cantidades calculadas son las máximas que se podrían obtener con el B.O.G. disponible. La planta estará limitada por la capacidad del compresor de aire instalado para la alimentación, y sobre todo la disponibilidad de vapor y agua diaria. La capacidad de los generadores de agua dulce instalados en un buque del tipo DFDE es de 30 Tn/día, haciendo un total de 60 Tn/día con los dos generadores en marcha. Para el barco a analizar se propondrá la instalación de un generador de agua dulce multietapa que permita aumentar la disponibilidad de agua para la alimentación de la planta de reformado. Para barcos de nueva construcción se propone la instalación de generadores de agua dulce de mayor capacidad, para aumentar la disponibilidad.

La planta de reformado será flexible en funcionamiento, pudiendo ponerse en marcha en función de las necesidades del barco y de los recursos disponibles, empleándose la misma como un sustituto directo de la GCU, con beneficios añadidos.

3.5. Planta de generación de H₂.

La planta de generación de hidrógeno se divide en 3 partes diferenciadas. La primera parte es la de suministro y depuración del CH₄ proveniente del B.O.G., donde se



purifica y eliminan las impurezas contenidas en el gas. En segundo lugar el reformador autotérmico y catalizador, donde se genera el H₂ y se separa del gas de síntesis. Por último, la unidad de purificación de hidrógeno, donde se consigue la pureza adecuada para el funcionamiento de la célula energética. En los siguientes apartados se enumerarán y explicará el funcionamiento de los diferentes equipos que componen cada planta. En los anexos se mostrará la ubicación propuesta para cada equipo dentro del buque.

3.5.1. Unidad de suministro y depuración de CH₄.

Para el suministro de CH₄ desde los tanques y línea de vapor hasta los generadores y GCU se emplea un equipo de decantación y un compresor de gas de baja presión, denominado Low Duty. El mismo sistema se empleará para el suministro a la planta de reformado, instalando una unidad de filtrado que elimine las impurezas y cuerpos extraños en el gas. El sistema de decantación, denominado Mist Separator, separa los gases pesados que pueda contener el boil off del CH₄, depurando el vapor hasta casi una pureza del 99,9%.

- **Mist Separator.**

Se trata de un decantador de vapor, en el que se separan los gases en función de su densidad. La entrada es una mezcla de vapor procedente del B.O.G. junto con una pequeña cantidad de líquido inyectada a través del In-Line mixer, que permite mantener el vapor a una temperatura adecuada para su decantación, -159 °C. En su interior se separan los gases más pesados, como el C₂H₆ y el C₃H₈, del CH₄. Los pesados “caen” a un colector llamado pote, que es vaciado mediante un arrastre con N₂, cuando se alcanza el alto nivel. Estos pesados se devuelven al tanque de carga.

El CH₄ es expulsado del separador por la parte superior, como efecto de la presión de entrada, y se dirige a los compresores de gas. La capacidad de separación es de 13252 kg/h, con una pureza del flujo de salida del 99,9%.

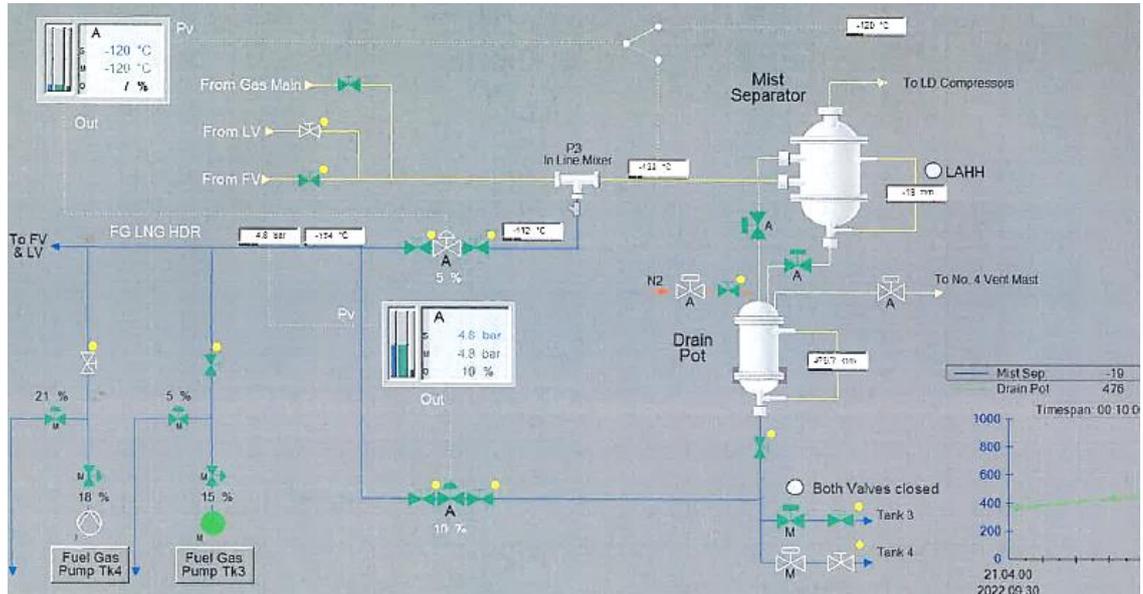


Ilustración 3. Pantalla de Control del Mist Separator en el sistema integrado de automatización (IAS). Fuente: El autor.

- **Low Duty.**

El buque cuenta con dos unidades de compresores de gas de baja presión, centrífugos de doble etapa, con difusores de geometría variable. Las características técnicas son las siguientes:

Compresor LD	
Fabricante	Atlas Copco
Modelo	GT-026 T2K2
Flujo de entrada	4500 m ³ /h
Flujo másico	6752 kg/h
Succión	1,06 bar
Descarga	6,5 bar
Temp. de entrada	-120,0 °C
Temp. de salida	7,7 °C
RPM	3552 rpm

Tabla 21. Características técnicas del compresor Low Duty. (DSME 2009)

El compresor es accionado por un motor eléctrico de 640 kW, alimentado por la línea de alta tensión de 6600 V. Ambas unidades se encuentran en la sala de compresores



de carga y una sola es suficiente para alimentar las unidades de gas de los generadores y GCU. La presión máxima de descarga es de 6,5 bar, pero la presión normal de funcionamiento es de 4,5 bar, que será la misma presión a la que suministre el gas al reformador autotérmico.

- **Gas Valve Unit (GVU).**

La unidad de suministro de gas, GVU, alimenta a cada uno de los generadores y a la GCU mediante un tren de válvulas y filtros que permiten, por una parte la depuración completa y limpieza del gas. Por la otra, el aislamiento completo de la unidad con la línea de alimentación de gas, mediante el inertizado con N₂. Una misma unidad se instalará para la alimentación de gas al reformador.

Cada una de las unidades está formada por el tren de válvulas de aislamiento, una válvula reguladora de presión, las válvulas de purgado con N₂ y dos filtros. El filtro de entrada es de 15 µm y el de salida de 5 µm, impidiendo el paso de cualquier impureza o partícula que pudiera ser arrastrada por el gas.

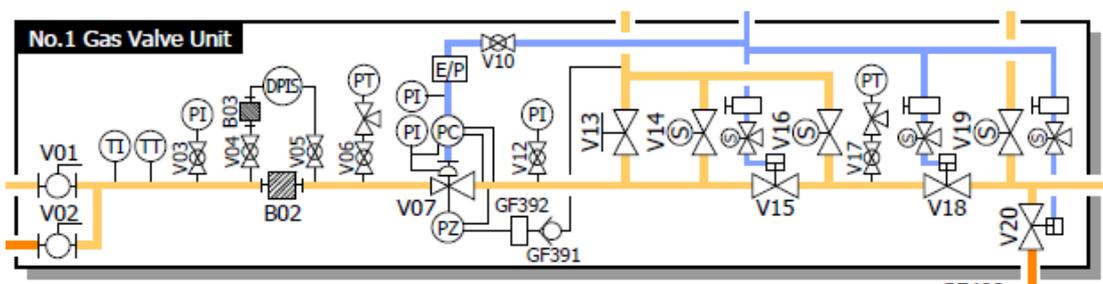


Ilustración 4. Tren de válvulas de suministro de gas. (DSME 2009)

Cada uno de las unidades se encuentra en una cámara aislada del resto de la máquina, con extracción de aire constante, para evitar la formación de bolsas de gas en el caso de una fuga. Cuando se pone en marcha, se realiza un inertizado de la línea con N₂ y a continuación un test de fugas a cada uno de los tramos de la línea, siendo controladas las solenoides de apertura y cierre del tren de válvulas por el IAS. Tras la comprobación de que toda la línea es segura, comienza el abastecimiento de gas.



3.5.2. Suministro de O₂.

El suministro de O₂ al reformador se realizará mediante un compresor de aire de la capacidad y presiones adecuadas para el reformado. Tal y como se expuso en la tabla 18, la cantidad necesaria de O₂ para el reformado total del CH₄ disponible es de 464,2 kmol. Teniendo en cuenta de que el O₂ estará disociado en el aire, será necesaria una cantidad muy elevada, por lo que se emplea aire comprimido para el abastecimiento.

La cantidad necesaria de aire diaria es de 79960,4 kg. Comprimiendo el aire a 7 bar se eleva la densidad hasta 7,671 kg/m³, siendo necesario un flujo de 434,32 kg/h de aire suministrado por el compresor. Con estos datos se elige un compresor apropiado para la planta de reformado. Entre diferentes casas de compresores se escoge el siguiente modelo:

Compresor	
Fabricante	Tam Rotor
Modelo	TMC 64-8
Tipo	Tornillo, refrigerado por agua
Potencia	64 kW
Presión	7 bar
Presión máx.	8 bar
Capacidad nom.	606,3 m ³ /h
Peso	1300 kg
Dimensiones (WxHxD)	1017x1752x1907 (mm)

Tabla 22. Características del compresor de aire de suministro. (TMC Standard Compressors – Entire Range)

El modelo elegido cumple sobradamente las capacidades de la planta, en un formato compacto que se instalará en el cuarto de compresores del buque.

3.5.3. Suministro de H₂O.

Para el suministro de vapor de agua se incrementará la capacidad de producción de agua destilada a bordo, con la instalación de un generador de agua dulce multietapa.

GENERACIÓN DE H₂ A BORDO DE UN BUQUE LNG/C

Este generador tendrá como fluido calefactor el agua de refrigeración de camisas de los motores generadores. Se instalará en la sala de máquinas y debido a la capacidad operativa solo se pondrá en funcionamiento en combinación con uno de los FWG de servicio parado. El agua generada se bombeará a las líneas de FW generales del buque, abasteciendo de agua técnica a la caldera en cantidad suficiente para llevar a cabo las operaciones de reformado.

Entre diferentes fabricantes se eligió la siguiente opción como la más adecuada para la planta de generación de agua dulce. Las características técnicas del generador son las siguientes:

FWG	
Fabricante	Wärtsilä
Modelo	MSF 115-5
Tipo	Generador Multietapa de agua técnica.
Potencia	915 kW
Capacidad nom.	115 ton/día
Conductividad	<4 μ S/cm
Peso (húmedo)	21000 kg
Dimensiones (WxHxD)	5700x2900x3000(mm)

Tabla 23. Características Técnicas del FWG multietapa. (Wärtsilä s.f.)

El generador multietapa aprovecha el calor residual del circuito de refrigeración de los motores para el calentamiento de agua de mar, denominada agua de alimentación de los generadores. Esta agua se introduce en la primera etapa a 80°C y una presión de cámara de -400 mbar A (3). Cada una de las consiguientes 3 etapas se encuentra a una temperatura y presión más baja, sin ser necesario un aporte extra de energía. El esquema de la planta es el siguiente:

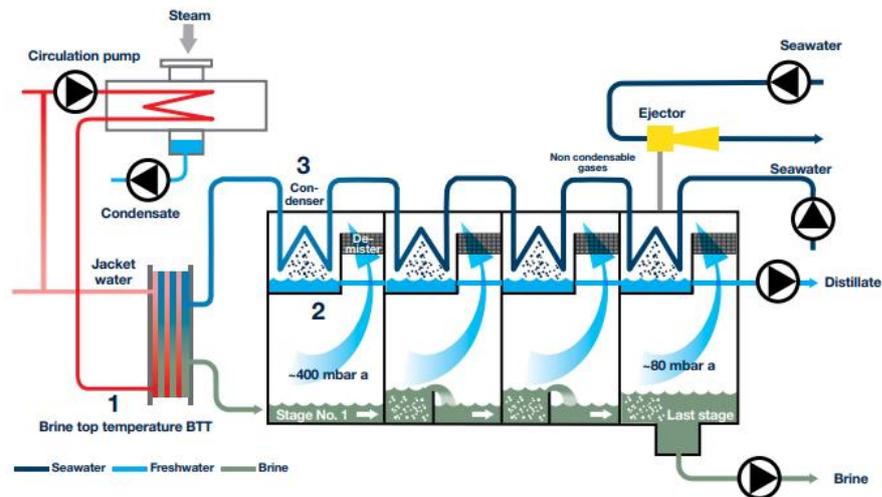


Ilustración 5. Planta de generación de agua destilada. (Wärtsilä s.f.).

El agua producida se podrá almacenar en los tanques de agua destilada de a bordo, pero mayoritariamente se destinará al suministro de agua técnica de la caldera. La caldera produce vapor saturado a 7 bar de presión, con una temperatura de 164,9 °C de salida. Se instalará un intercambiador de calor en el reformador para elevar esta temperatura hasta los 250°C requeridos, empleando los gases de cola del proceso de reformado.

3.5.4. Reformador Autotérmico.

Para el proceso de reformado se instalará un reformador cilíndrico compacto, con inyección directa de CH₄ y vapor de agua a 7 bar y 250°C, inyección parcial de oxígeno a lo largo del reformador, con tres quemadores para producir la ignición de la mezcla. El gas de síntesis proveniente del reformador, compuesto por CO₂ y H₂ pasará por un intercambiador de calor que recalentará el vapor de agua para elevar su temperatura desde la zona de saturación hasta los 250°C. Posteriormente, el gas de síntesis atravesará un separador catalítico donde se disociará la mezcla de gases. El H₂ continuará su camino hacia el compresor y botellas de almacenamiento y el CO₂ se exhaustará a la atmósfera por una chimenea.



- **Corriente de entrada.**

La corriente de entrada al reformador será una mezcla de CH₄ proveniente del compresor LD a 4,5 bar, inyectada a través de la unidad de válvulas de gas, *GVU*, mezclada con vapor de agua sobrecalentado a 250°C y 7 bar, proveniente de la caldera auxiliar y recalentado en el intercambiador de calor con los gases de cola del reformador. La mezcla se realizará a través de un eyector que absorberá el flujo de CH₄ dentro de la corriente de vapor de agua, para dar como resultado una corriente de entrada a 7 Bar y 250°C compuesta por ambos flujos.

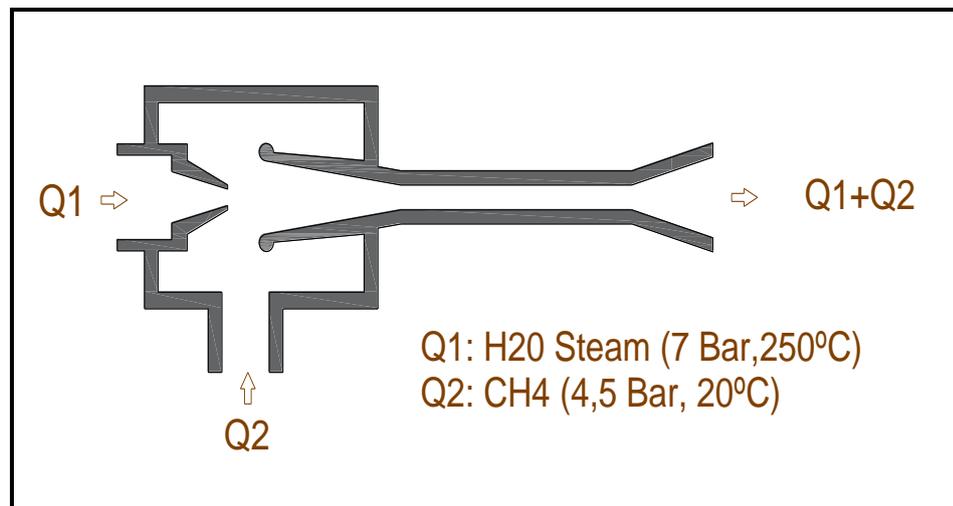


Ilustración 6. Eyector de mezcla CH₄ y vapor de agua. Fuente: El autor.

- **Reformador**

En el reformador se producen las reacciones químicas simultáneas que dan lugar al gas de síntesis rico en H₂. El reformador de tipo cilíndrico estará recubierto por óxidos de perovskita que actúan como catalizador, favoreciendo la reacción (Adriana García 2010). La admisión de oxígeno se realizará en varios puntos a lo largo del reformador, para favorecer el proceso de combustión y mantener una concentración de oxígeno igual en todo el hogar del reformador. Cada una de estas válvulas de admisión de



oxígeno contará con un electrodo que iniciará el proceso de combustión necesario para el reformado y oxidación parcial de la mezcla.

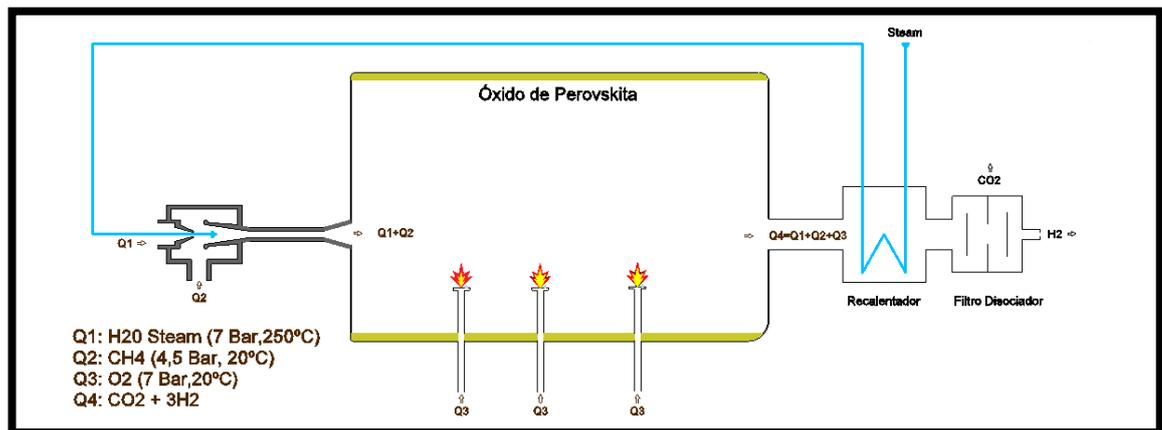


Ilustración 7. Esquema del reformador autotérmico. Fuente: El autor.

En el hogar del reformador se producirán las reacciones de combustión, oxidación parcial, reformado con vapor y WGSR. El gas de síntesis resultante del proceso de reformado tendrá una temperatura de salida de 750°C, formado por CO₂ y H₂. Este flujo de gases caliente se introducirá en un intercambiador de calor que cumplirá la función de recalentador del vapor de agua necesario para el proceso de reformado. La temperatura de salida de vapor del mismo será de 250°C. Por último, la corriente de gases de síntesis se dividirá en CO₂ y H₂ en el filtro disociador, donde el CO₂ será capturado por unas membranas en un filtro regenerativo, purificando la corriente de H₂ de salida hasta casi un 99,9%.

- **Intercambiador de calor**

El intercambiador de calor incrementará la temperatura del vapor de alimentación desde la temperatura de saturación a la que sale de la caldera hasta los 250 °C necesarios para el proceso de reformado, empleando para ello el gas de síntesis que sale del propio reformador. El intercambiador será de tipo acquotubular, con una



sección de tubos por la que circulará el vapor saturado y donde se aportará el calor necesario desde el gas de síntesis, que circulará a contraflujo del vapor. Los tubos serán aleteados para maximizar el intercambio de calor entre ambos fluidos.

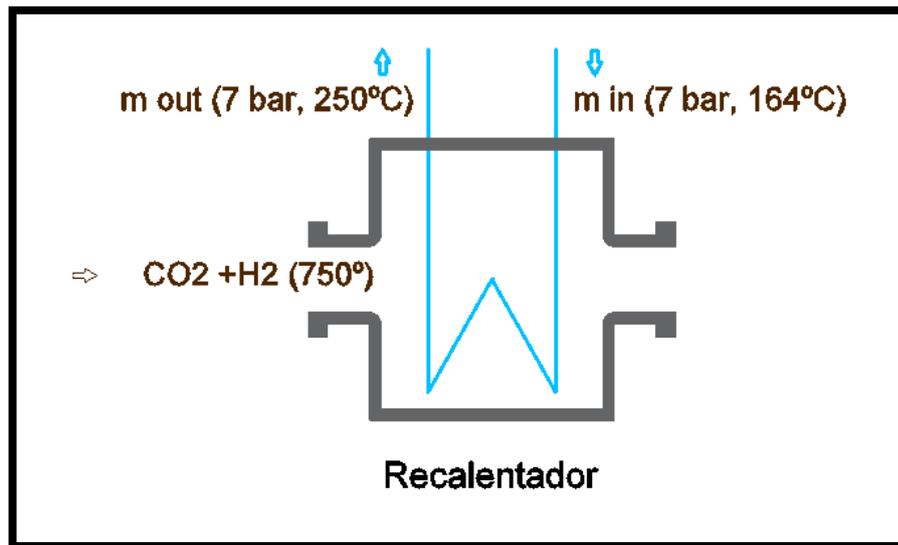


Ilustración 8. Recalentador de vapor con gas de síntesis. Fuente: El autor.

- **Filtro disociador**

El filtro disociador separará las diferentes moléculas de la corriente de gas de síntesis de manera física por medio de un material adsorbente. Para este proceso se tendrá en cuenta la volatilidad del H₂ y la afinidad del CO₂ con el lecho adsorbente que compondrá el filtro (Azcunaga y Gestoso Julio 2016).

El proceso es similar al de los secadores regenerativos de aire comprimido, pero captando el CO₂ en vez del H₂O contenido en el gas de síntesis. El proceso de purificación tendrá una etapa de adsorción y una de regeneración, donde se exhaustará el CO₂ captado a la atmósfera. El control de los procesos se hará mediante diferencias de presión y válvulas actuadas neumáticamente.



3.5.5. Compresor de H₂.

Para facilitar el almacenamiento del H₂ excedente en botellas a 350 bar, se instalará un pequeño compresor de diafragma que tendrá la aspiración en la salida del filtro disociador regenerativo de H₂. Mediante una válvula 3 vías se desviará el flujo de H₂ al compresor, elevando la presión de este hasta 350 bar, siendo almacenado en las 3 botellas de 2,5 m³ dispuestas para tal fin. El dimensionamiento de las botellas es estudiado en los apartados siguientes de esta memoria.

El compresor elegido es del tipo diafragma, un compresor industrial de gas comercial. Este compresor es del tipo recíprocativo volumétrico, con diafragma para evitar la contaminación del H₂ con impurezas o aceites del compresor. Las características técnicas son las siguientes:

Compresor	
Fabricante	Top Long Compressors
Modelo	GL2-30/4-350
Tipo	Recíprocativo, con diafragma. Refrigerado por agua.
Potencia	11 kW
Presión de aspiración	4 bar
Presión de descarga	350 bar
Capacidad nom.	30 m ³ /h
Peso	900 kg
Dimensiones (WxHxD)	1700x850x1150 (mm)

Tabla 24. Características del compresor de H₂. (Taizhou Toplong Electrical&Mechanical Co.,ltd. 2019)

El compresor se pondrá en marcha para llenar las botellas de almacenamiento cuando sea necesario y la logística de la planta así lo permita.

3.6. Planta de generación eléctrica.

El H₂ generado y comprimido se usará para alimentar una pila de hidrógeno y producir energía eléctrica. La pila generará una corriente eléctrica en DC que se transformará



al voltaje requerido y AC para suministrar corriente a la línea de 220V del cuadro eléctrico de emergencia.

3.6.1. Fuel Cell System.

El H₂ generado en el reformador servirá para alimentar una unidad eléctrica mediante pila de hidrógeno, que suministrará la potencia demandada por el cuadro de emergencia de 220V. La planta está compuesta por las siguientes partes:

- Almacenamiento de H₂.
- Regulador de presión.
- Módulo PEMFC.
- Soplador de aire.
- Intercambiador de calor.
- Equipo conversor electrónico.

El siguiente esquema muestra un plano de la planta, sin el equipo de conversión, que se instalará en el propio cuadro de emergencia. Este esquema de planta se eligió entre diferentes configuraciones por su simpleza y reducido tamaño.

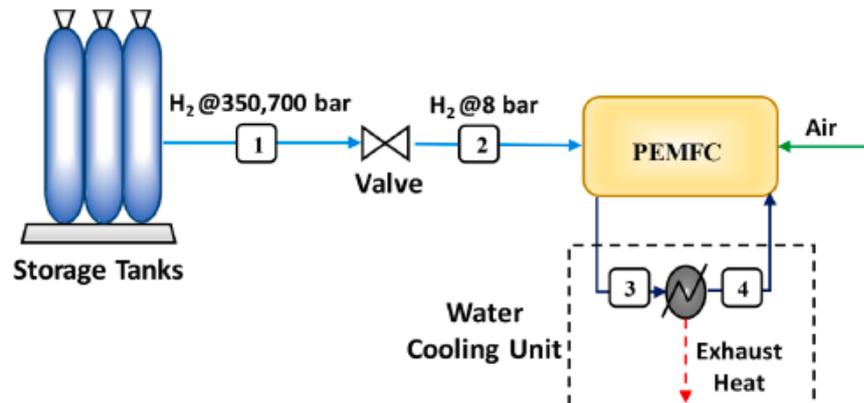


Ilustración 9. Planta de generación eléctrica por pila de H₂. (C. Dall'Armi 2021)

3.6.2. PEMFC.

Las pilas de combustible poliméricas, denominadas PEMFC, son pilas de gran densidad energética y bajas temperaturas de trabajo, inferiores a los 100 °C, siendo ideales para pequeñas aplicaciones y potencias, donde el espacio es reducido. Su funcionamiento se basa en el intercambio de protones a través del electrolito, que está formado por una membrana polimérica de gran conductividad. A través de esta membrana los iones H⁺ se desplazan del ánodo al cátodo, alimentado con O₂, generando H₂O y electricidad.

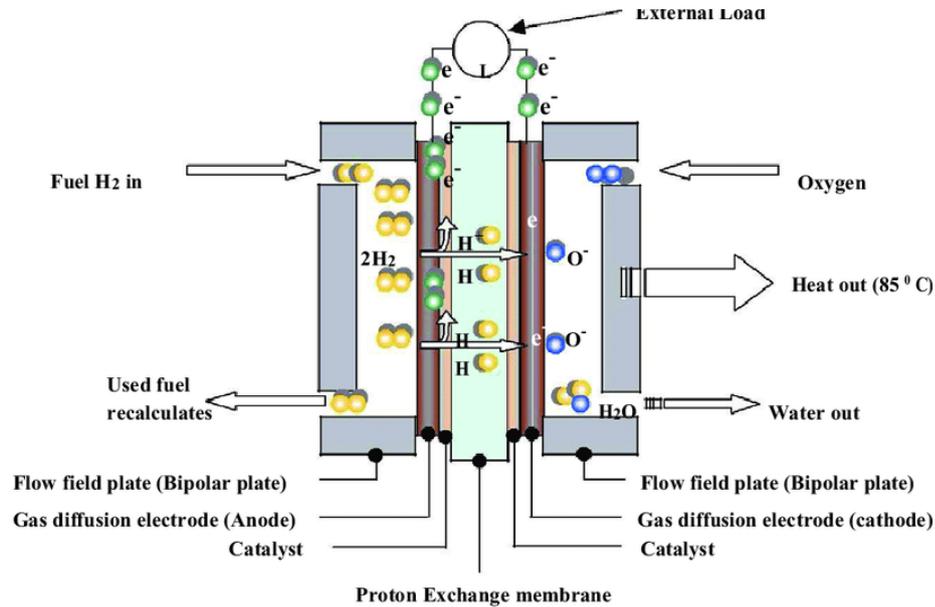
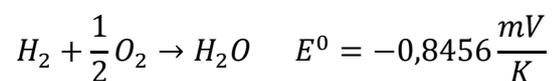


Ilustración 10. Funcionamiento y partes de una pila PEM. (Borah Munu 2016)

Su principal característica es la selectividad de la membrana polimérica, que es capaz de conducir protones pero no deja pasar los electrones, que son desviados a los electrodos para generar una corriente eléctrica. El electrodo más común es de carbono con moléculas de Pt a modo de catalizador.

El combustible es H₂ de gran pureza generado en el reformador. El comburente es O₂ suministrado por un compresor y el resultado de la reacción es H₂O y corriente eléctrica. La reacción estequiométrica es la siguiente:



La reacción toma lugar en celdas de intercambio. Cada una de las celdas es capaz de generar un potencial eléctrico de 0,7 V, siendo agrupadas para generar la potencia demandada final de la pila. La agrupación de celdas se denomina *Fuel Cell Stack* (Hui Xing 2021).



3.6.3. Dimensionamiento de la planta.

La planta se dimensionará en función de la potencia eléctrica demandada por el cuadro de emergencia de 220V del buque analizado. A continuación se muestra una lista con los equipos y grupos alimentados por el cuadro:

ESBD 220V FEEDER PANEL			
Código	Grupo	Breaker	I(A)
P08302	EM/CY TRANSFORMER	HiSD-403	400
P08701	ELD-1	HiBS-63	40
P08702	ELD-2	HiBE-103	100
P08703	ELD-3	HiBE-103	100
P08704	ELD-4	HiBS-63	15
P08705	LPD-4	HiBS-203	150
P08706	EPD-1	HiBE-103	60
P08707	BD-1	HiBS-63	15
P08801	ENGINE CONTROL CONSOLE	HiBS-63	30
P08802	PCB UNIT FOR SIGNAL LIGHT COLUMN A	HiBS-63	20
P08803	CARGO CONTROL CONSOLE	HiBS-63	20
P08804	W/H NAV. CONSOLE	HiBS-63	30
P08805	RP FOR LIFE BOAT BATT. CHARGER	HiBS-63	15
P08806	2 FREQ. CONVERTER (PRC) UPS PT SIDE	HiBS-63	30
P08807	UPS FOR SMS	HiBS-63	20
P08808	PCB UNIT FOR SIGNAL LIGHT COLUMN B	HiBS-63	20
P08901	NAVIGATION LIGHT (W/H NAV.)	HiBS-63	15
P08902	FIRE DETECTION CENTRAL PANEL	HiBS-63	15
P08904	H.E. FOAM MAIN PANEL	HiBS-63	15
P08905	W.B. LOCAL FIRE FIGHTING	HiBS-63	15
P08907	BATTERY CHARGER FOR EM/CY D/G	HiBS-63	15
P09001	L-JB-6001 (EM/CY GEN. ROOM LIGHT)	HiBS-63	10
P09002	L-JB-6001 (EM/CY GEN. ROOM RECEPTACLE)	HiBS-63	15
P09003	L-JB-6001 (S/G ROOM LIGHT)	HiBS-63	15
P09101	MACH. TALK-BACK MAIN UNIT (ECR)	HiBS-63	20
P09103	GMDSS CONSOLE (RADIO TABLE)	HiBS-63	30
P08903	HEATER FOR IMMERSION SUIT BOX	HiBS-63	15

Tabla 25. Lista de equipos y grupos alimentados por el cuadro de 220V de emergencia.

(DSME 2009)



La potencia necesaria para alimentar el cuadro de 220V es suministrada a través del transformador de emergencia 440V/230V. Las características de este transformador son las siguientes:

ESBD 440V FEEDER PANEL			
Código	Grupo	Breaker	I(A)
P08301	EM/CY TRANSFORMER (440/230V 1PH 30KVA x3)	HiBX-203NT	INST 2250

Tabla 26. Transformador de emergencia 440/230V. (DSME 2009)

La potencia total consumida por este transformador es de 30KVA x3, por lo que será necesaria una pila que sea capaz de suministrar esa potencia para alimentar el cuadro de alimentación de 220V.

Para esta aplicación se eligen las pilas del tipo PEM (Polymer Electrolyte Membrane), con una potencia que se mueve en el rango de 1 a 100 kW comúnmente (U.S. Department of Energy 2015). El modelo comercial elegido se denomina LT-PEMFC, una pila polimérica de baja temperatura, con una potencia pico de 120 kW y una eficiencia de 60% (S. Di Micco 2022). La temperatura de funcionamiento es de 70°C, no siendo necesaria la instalación de una unidad de refrigeración excesivamente grande.

3.6.3.1. Consumo de H₂.

El consumo de H₂ se calcula en función de la carga demandada y de la eficiencia de la pila. La eficiencia de conversión eléctrica de los modelos comerciales del tipo LT-PEMFC se mueve entre un 45 y un 60 %, en los casos más favorables (C. Dall'Armi 2021). Para el cálculo del consumo estimado se aplica una eficiencia del 45 %, el caso más desfavorable. La siguiente fórmula se aplica para el cálculo del consumo en un determinado período de tiempo:



$$H_{H_2} = \frac{\int_{t_0}^{t_{end}} P_{FC}(t) dt}{LHV_{H_2} \delta_{FC}}$$

Siendo:

- $P_{FC}(t)$ Potencia suministrada por la pila
- LHV_{H_2} Poder calorífico inferior del H₂ (120 MJ/kg)
- δ_{FC} Eficiencia eléctrica de la PEMFC.

Con una demanda constante de 100 kW durante 24 horas, el consumo de H₂ estimado es de 160 kg de H₂ diarios.

3.6.3.2. Almacenamiento de H₂.

La producción de H₂ a bordo se realiza de manera continua bajo demanda del usuario, por lo que el almacenamiento necesario es pequeño. Se ha establecido como almacenamiento mínimo la cantidad necesaria para abastecer la pila durante 24 horas ininterrumpidamente. La cantidad estimada es de 160 kg, que se almacenarán en botellas presurizadas.

Ya que la cantidad a almacenar no es excesivamente grande se usarán botellas de media presión, entre las diferentes opciones comerciales. La presión de almacenamiento será de 350 bares, con las siguientes características:

Botella tipo III 350 Bar	
Densidad energética gravimétrica	1,08 kWh/kg
Densidad energética volumétrica	0,39 kWh/l
Densidad H ₂ (350 bar, 20°C)	23,65 kg/m ³

Tabla 26. Características de las botellas de almacenamiento a presión. (C. Dall'Armi 2021)



En las condiciones de almacenamiento son necesarios 6,76 m³ de capacidad para el almacenamiento de los 160 kg de consumo diario estimados. Para tener un margen de capacidad se instalarán 3 botellas presurizadas de 2,5 m³ de volumen.

3.6.4. Conversión eléctrica.

La corriente eléctrica generada por la pila debe ser adaptada a las necesidades de los consumidores eléctricos, por lo que es necesaria la instalación de un equipo electrónico de transformación. Habitualmente, el voltaje máximo producido por una celda no supera los 1,0 V de DC, disminuyendo este valor cuanto más alta sea la intensidad de corriente requerida (Hui Xing 2021). Las celdas se combinan en series, formando grupos o “*stacks*”. El voltaje máximo de un *stack* está limitado por las características técnicas de la unidad, equipo de refrigeración y resistencia de los materiales, enumerando algunas. Para ajustar la potencia suministrada por la pila se modifica la configuración de las celdas, conectándolas en paralelo en vez de en serie, o ampliando el área de contacto entre ellas (Hui Xing 2021).

3.6.4.1. Conversor DC-DC.

Para adaptar el voltaje suministrado por la pila al voltaje requerido para su transformación a AC se emplea un convertidor de potencia electrónico. Este tipo de equipos modifican el nivel de tensión de entrada según las necesidades de la salida.

Su funcionamiento se basa en el almacenamiento de energía durante un breve espacio de tiempo para luego suministrarla a un voltaje diferente, adaptado a las necesidades (Perreault 2007). El almacenamiento puede ser magnético, mediante inductores, o eléctrico, con capacitores. Cualquier modelo comercial que se adapte a las características de la pila, con una salida de, como mínimo 240 V DC, será válido para esta aplicación.



3.6.4.2. Inversor DC/AC.

El inversor convierte la corriente continua suministrada por el convertidor DC/DC en corriente alterna, para alimentar el cuadro de emergencia de 220 V. El inversor regula la corriente de suministro para que la salida tenga la frecuencia, amplitud y magnitud requerida. El cuadro de Emergencia de 220 V debe ser alimentado con una frecuencia de 60 Hz, que será regulada por el inversor.

El proceso de conversión se realiza mediante un puente de diodos o transistores IGBT, controlados electrónicamente por una unidad de control. La corriente eléctrica de salida final será 230V AC, 60 Hz, conectado a barras mediante un breaker ubicado en el cuadro de Emergencia.

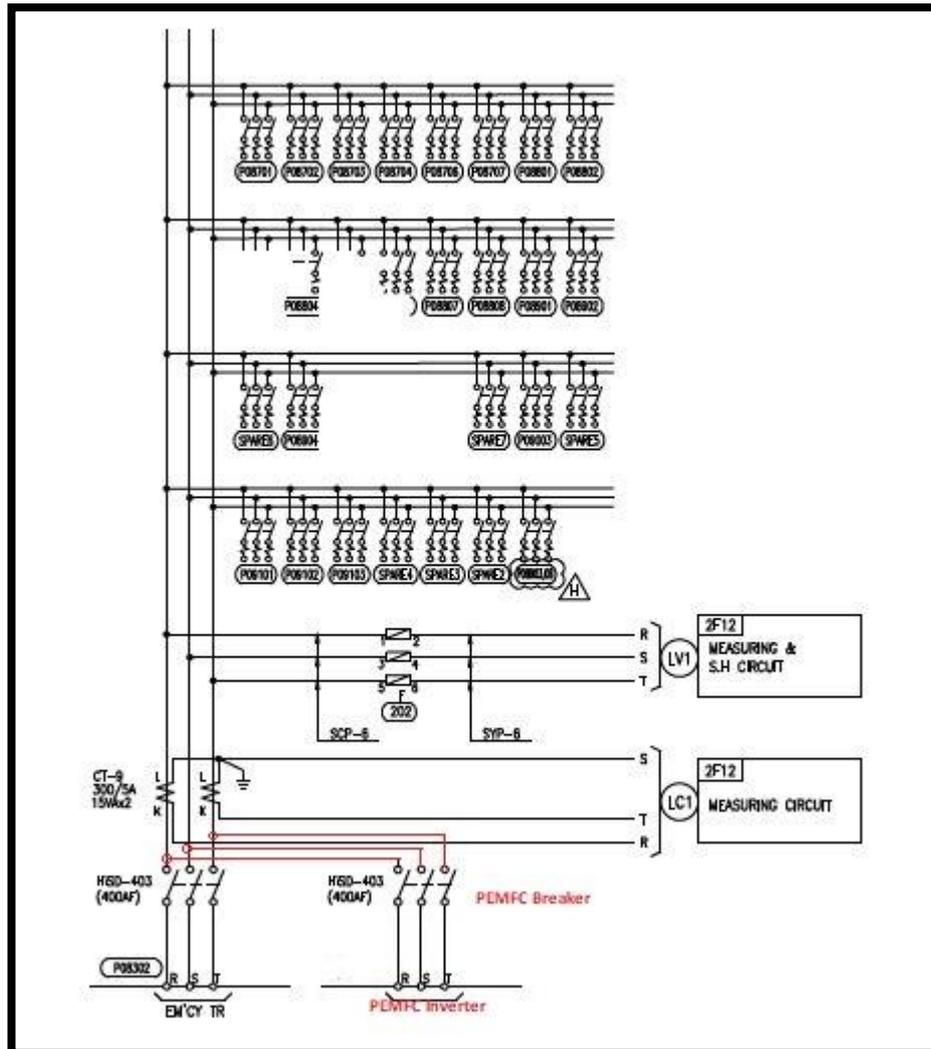


Ilustración 11. Cuadro eléctrico de Emergencia 220V. Fuente: El autor.

3.7. Disposición general de la planta de reformado.

La planta de reformado y gestión del H₂ a bordo cuenta con una larga lista de equipos que deben ser implementados y/o adaptados para su buen funcionamiento. Algunos de los equipos ya se encuentran a bordo, en la planta propulsora y de gestión de boil-off del buque, por lo que simplemente se necesitan modificaciones menores en líneas y adaptaciones para los requerimientos de la planta de reformado. En la siguiente imagen



se muestra un mímico con todos los elementos que componen la planta de reformado y gestión del H₂, y su instalación o adaptación en función de las características de la planta:

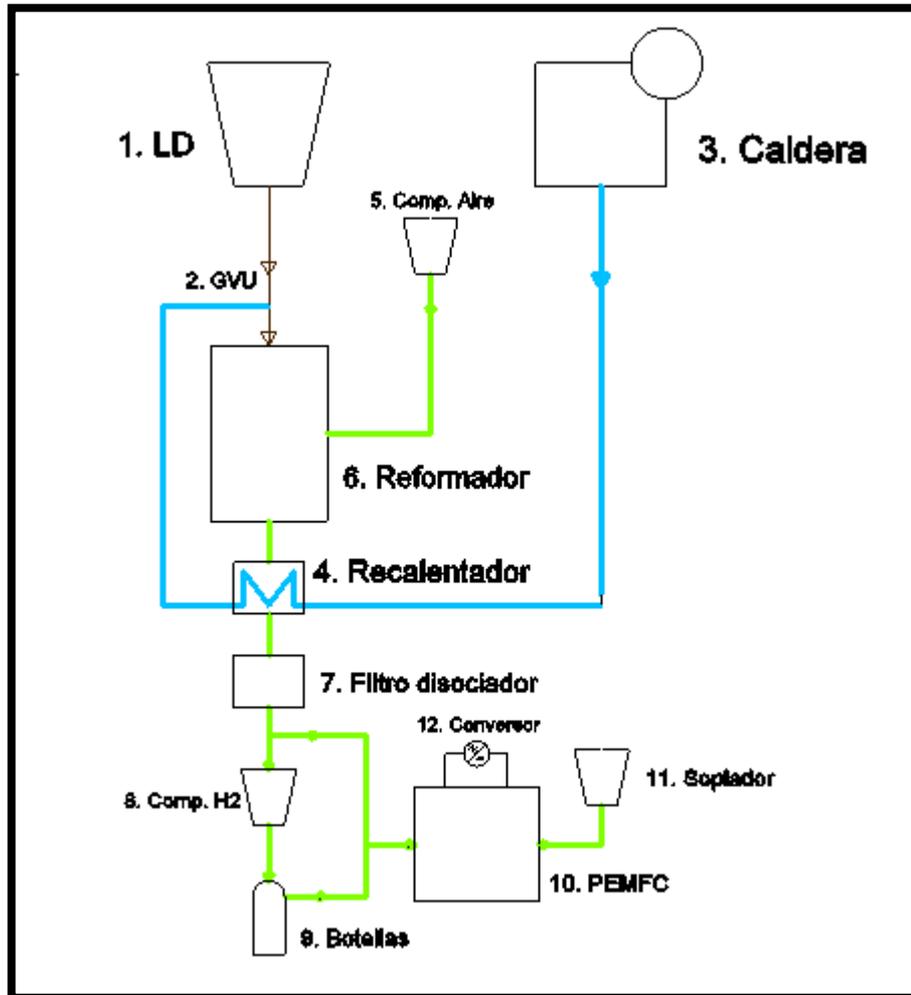


Ilustración 12. Elementos de la planta de reformado. Fuente: El autor.

1. Compresor Low Duty de CH₄.

El compresor LD se encuentra ya instalado a bordo del buque y no es necesaria ninguna modificación para adaptarlo a la planta de generación de H₂.



2. Tren de válvulas de CH₄ (GVU).

La GVU para el suministro de gas al reformador es idéntica a las ya instaladas a bordo para generadores y GCU, pero será necesaria la instalación de un equipo nuevo para abastecer la planta, con sus respectivos controles y sistemas de ventilación.

3. Caldera.

La caldera y planta de vapor no sufrirá ninguna modificación. Será necesario conectar una línea de abastecimiento de vapor al reformador para su posterior recalentado. Para no tener problemas de consumo de agua se propone a su vez el cambio de uno de los generadores de agua dulce por uno de mayor capacidad.

4. Recalentador.

Equipo instalado en conjunto con el reformador, empleando los gases de cola del proceso de reformado para elevar la temperatura del vapor hasta 250°C, vapor recalentado.

5. Compresor de aire.

Necesaria su instalación para abastecer de aire los quemadores del reformador. Será alimentado con la línea de 440V y su consumo variará en función de las necesidades de generación de H₂ y de la disponibilidad de CH₄.

6. Reformador Autotérmico.

Instalado en el cuarto de compresores, será de tipo compacto, con un hogar forrado de óxidos de perovskita que ejercerán de catalizador de la reacción. Necesitará de disponer de acceso al hogar para limpieza y cambio del catalizador cuando este se agote.

7. Filtro disociador regenerativo.

Equipo de nueva instalación, purificará la corriente de gas de síntesis para elevar la pureza del H₂. Es necesaria la instalación de un conducto de exhaustación del CO₂ eliminado de la corriente de gases.



8. Compresor de H₂.

Equipo instalado para facilitar el almacenamiento de la corriente de H₂ de exceso. Se alimenta con la red de 440V y solo se pone en funcionamiento cuando las botellas de almacenamiento se encuentran por debajo de su capacidad total y la generación de H₂ es superior al consumo.

9. Botellas de almacenamiento de H₂.

3 botellas de 2,5 m³ de volumen cada una y 350 bar de presión para poder abastecer la pila durante al menos un día entero en caso de parada de la planta de generación de H₂. Cuentan con válvulas de seguridad que ventean el H₂ a la atmósfera en caso de sobrepresión.

10. Pila de H₂ PEMFC.

Instalada en el cuarto del generador de emergencia, de tamaño compacto y con alimentación directa de H₂ y aire mediante el soplador. El retorno de H₂ se realizará a la línea de abastecimiento y como producto de la reacción se obtendrá H₂O que se retornará al tanque de agua destilada de abastecimiento de la planta de reformado.

11. Soplador de aire.

Abastecerá de O₂ la pila de hidrógeno para la generación eléctrica. Se instalará en el cuerpo del guardacalor junto al soplador del incinerador.

12. Conversor electrónico de potencia.

Instalado como un bloque electrónico en el cuadro de emergencia. Transforma la corriente continua de bajo voltaje generada por la pila a corriente alterna a 220V para la alimentación del cuadro eléctrico de 220V de emergencia. Para su acoplamiento a barras usará un breaker de las mismas características que el de salida del transformador de 440/220V.



3.8. Pros y contras de la instalación.

Tras el análisis de todas las partes que componen la planta de generación de hidrógeno propuesta, así como las características de cada uno de los equipos y los problemas en el proceso de reformado, se pueden extraer una serie de pros y contras para con la instalación de esta planta. Los pros, que deben ser valorados en buena medida al tratarse de una planta experimental, con vistas a implementar esta tecnología en un futuro, son los siguientes:

- Recuperación y aprovechamiento de la energía perdida en la GCU con el quemado del boil off de exceso.
- Ahorro energético con la alimentación de un cuadro eléctrico de 220V con una pila de hidrógeno.
- Instalación y prueba de un equipo de reformado autotérmico como tecnología para futuras construcciones.
- Aprendizaje en la gestión del H₂ a bordo para su futuro uso como combustible principal.
- Mejora de la eficiencia global de la planta eléctrica a bordo.

El principal contra para esta instalación es su fuerte inversión económica en contrapunto con el menor ahorro en combustible al tratarse de una planta de muy baja potencia. Tal y como se ha explicado, es una opción atractiva a estudiar para buques de nueva construcción, ya que el coste de instalación y adaptación de los equipos es mucho menor. A mayores, se pueden encontrar los siguientes puntos en contra:

- Emisiones de CO₂ para el proceso de reformado.
- Necesaria la regeneración del catalizador con cierta frecuencia, al acabarse sus elementos activos y contaminarse con partículas de carbono y carbonillas.
- Almacenamiento de H₂ a alta presión, 350 bar, creando una zona peligrosa a bordo debido a las botellas de almacenamiento.
- Proceso de reformado experimental a bordo de buques gaseros.



3.9. Conclusiones.

Con la realización de este trabajo se demuestra que se puede adaptar una tecnología novedosa y de futuro a la tecnología actual presente en el ámbito del transporte marítimo. La adaptación de una planta de gestión del boil-off en un gasero para la producción de H₂ se debe enfocar desde un punto de vista experimental para otro tipo de proyectos, como es el de buques gaseros “híbridos”, con propulsión convencional y eléctrica por pilas de hidrógeno, aprovechando el boil-off al completo.

Tras la realización de este trabajo se demuestra la viabilidad técnica de la generación de hidrógeno a bordo, adaptando una planta al espacio disponible y los equipos actuales sin problema. La viabilidad económica queda en entredicho cuando de la adaptación de un buque ya existente se trata. El cambio de equipos y disposición a bordo para hacer sitio a la planta no compensaría el ahorro a largo plazo de la mejora de eficiencia lograda con la pila de hidrógeno. Si es una buena opción para el ahorro si se trata de un buque en nueva construcción, donde los equipos pueden ser dimensionados teniendo en cuenta el consumo de la planta de generación de H₂ y la sala de máquinas y cuarto de compresores de gas pueden ser adaptados para acoger la planta de reformado aprovechando el espacio eficientemente.



3.10. Bibliografía.

- Adriana García, Luis García, Estefanía López, Norymar Becerra, et al.** «Reformado auto-térmico de metano con CO₂, vapor y O₂ a gas de síntesis.» *Avances en Química* 5, nº 2 (2010): 87-93.
- Arias Fernández, Ignacio.** «Generación de Hidrógeno en buques GNL.» 2017.
- Astobiza Tamame, Amaia.** *PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO POR OXIDACIÓN PARCIAL DE METANO SOBRE ESPINELAS DE ALUMINATO DE NÍQUEL.* Bilbao: Universidad de País Vasco, 2015.
- Azcunaga, Alejandro Ferraces, y Óscar López Gestoso.** *PLANTA DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO POR REFORMADO DE GAS NATURAL.* Santiago de Compostela: Universidade de Santiago de Compostela, Julio 2016.
- Borah Munu, Dhakate Sanjay.** *Expanded Graphite Composite based Bipolar Plate for PEM Fuel Cell.* 2016.
- C. Dall'Armi, D. Micheli, R. Taccani.** «Comparison of different plant layouts and fuel storage solutions for fuel cells utilization on a small ferry.» *International journal of hydrogen energy* (Elsevier) 46 (2021): 13878-13897.
- Drnevich, Raymond Francis.** Método de reformado de metano con vapor. España Patente 2 439 231. 25 de 09 de 2013.
- DSME.** «Cargo Operating Manual - Sevilla Knutsen.» Daewoo, 2009.
- GAZTRANSPORT & TECHNIGAZ.** «Boil-Off Rate Measurement.» 2005.
- Hui Xing, Charles Stuart, Stephen Spence, Hua Chen.** «Fuel Cell Power Systems for Maritime Applications: Progress and Perspectives.» *Sustainability* (MDPI) 13, nº 1213 (2021).
- Jeong, Hyeonwon, y W. Jaewoo Shim.** «CALCULATION OF BOIL-OFF GAS (BOG) GENERATION OF KC-1 MEMBRANE LNG TANK WITH HIGH



DENSITY RIGID POLYURETHANE FOAM BY NUMERICAL ANALYSIS.»
(POLISH MARITIME RESEARCH) 24, n° 1 (2017).

Perreault, David. «Introduction to DC/DC converters.» En *MIT OpenCourseWare: 6334 Power Electronics*, de David Perreault. Massachusetts, 2007.

S. Di Micco, L. Mastropasqua, V. Cigolotti, M. Minutillo, J. Brouwer. «A framework for the replacement analysis of a hydrogen-based polymer electrolyte membrane fuel cell technology on board ships: A step towards decarbonization in the maritime sector.» *Energy Conversion and Management* (Elsevier) 267, n° 115893 (2022).

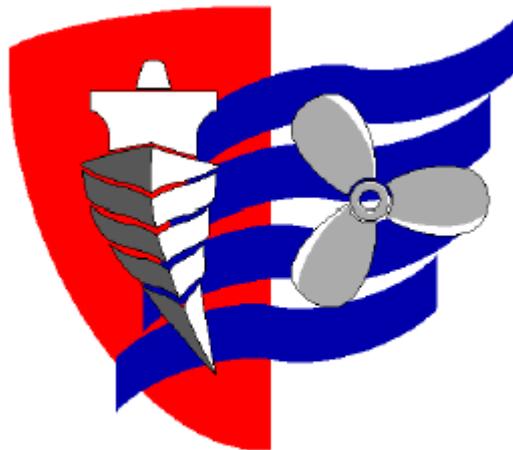
Taizhou Toplong Electrical&Mechanical Co.,ltd. *350 BAR INDUSTRIAL BOTTLING HYDROGEN MAKE UP GAS DIAPHRAGM COMPRESSOR.* Taizhou Toplong Electrical&Mechanical Co.,ltd. 2019. <https://www.high-pressure-compressors.com/product/350bar-industrial-bottling-hydrogen-make-up-gas-diaphragm-compressor.html> (último acceso: 8 de 11 de 2022).

U.S. Department of Energy. «Energy Efficiency & Renewable Energy.» *FUEL CELL TECHNOLOGIES OFFICE.* U.S. Department of Energy. November de 2015. hydrogenandfuelcells.energy.gov (último acceso: 27 de 9 de 2022).

Wärtsilä. *Wärtsilä Freshwater systems. s.f.*

<https://www.wartsila.com/waw/freshwater/multi-stage-flash-evaporators> (último acceso: 25 de 10 de 2022).

Wei-Hsin Chen, Mu-Rong Lin, Jau-Jang Lu, Yu Chao, Tzong-Shyng Leu. «Thermodynamic analysis of hydrogen production .» *Science Direct* 35 (2010): 11787-11797.



4. Anexo. Cálculos.



4.1. Cálculo de consumo y dimensionamiento de la planta.

En los siguientes apartados se realizarán y presentarán los cálculos para demostrar la viabilidad técnica de la planta, así como las cantidades necesarias a aportar para la generación de hidrógeno a bordo de un buque LNG/c. Para los cálculos se emplearán los valores mostrados en las fichas técnicas de los fabricantes de los equipos instalados, por lo que los datos obtenidos serán teóricos y con fines orientativos para el funcionamiento final de la planta.

4.1.1. Consumo de H₂.

Para dimensionar la planta se empezará por calcular la cantidad necesaria de hidrógeno para abastecer el consumo de la pila PEMFC diariamente. Se emplea la fórmula mostrada en el apartado 3.6.3.1., mostrada a continuación:

$$H_{H_2} = \frac{\int_{t_0}^{t_{end}} P_{FC}(t) dt}{LHV_{H_2} \delta_{FC}}$$

Para el cálculo se supone que la eficiencia de la pila, como situación más desfavorable, es de un 45%. Para la potencia suministrada, se supone que es de 100 kW constantes a lo largo del día, obteniéndose de esta manera el consumo máximo de H₂ diario y facilitando el cálculo.

$$H_{H_2} = \frac{100 \text{ kW} * 24 \text{ h} * 3600 \text{ s}}{120000 \text{ kJ/kg} * 0,45} = 160 \text{ kg}$$

El consumo máximo diario teórico es de 160 kg, que será la cantidad de hidrógeno necesaria almacenada para abastecer la pila ininterrumpidamente durante 24 horas.



4.1.2. Almacenamiento de H₂.

A bordo se dispondrán de botellas para almacenar los 160 kg necesarios para abastecer a potencia máxima la PEMFC. Se elige como mejor opción el almacenamiento a 350 bar, cuyas características, ya mostradas en la tabla 26, son las siguientes:

Botella tipo III 350 Bar	
Densidad energética gravimétrica	1,08 kWh/kg
Densidad energética volumétrica	0,39 kWh/l
Densidad H ₂ (350 bar, 20°C)	23,65 kg/m ³

Tabla 27. Características de las botellas de almacenamiento a presión. (C. Dall'Armi 2021)

A 350 bar, los 160 kg de H₂ necesarios tendrán el siguiente volumen, que será la capacidad mínima de las botellas:

$$V_{H_2} = \frac{H_{H_2}}{\rho_{H_2}} = \frac{160 \text{ kg}}{23,65 \text{ kg/m}^3} = 6,76 \text{ m}^3$$

El espacio mínimo necesario a bordo es de 6,76 m³. Para tener un margen de operación se propone instalar 3 botellas de 2,5 m³ cada una. Con esta cantidad, empleando el dato de la densidad energética volumétrica, se dispondrá a bordo de la siguiente energía en H₂:

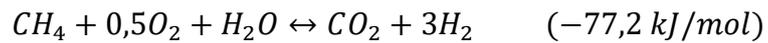
$$E_{H_2} = \varepsilon_{VH_2} V = 0,39 \text{ kWh/l} * 7,5 \text{ m}^3 * \frac{1000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} = 2925 \text{ kWh}$$

La cantidad almacenada de H₂ equivale a 2925 kWh. Para realizar una equivalencia energética con el LNG, se transforma este dato a unidades térmicas inglesas, btu, unidad de medida energética para el gas natural. La cantidad de energía almacenada en 7,5 m³ de H₂ es de 9980509,5 btu, que es la misma energía contenida en 284,6 m³ de gas natural.



4.1.3. Cantidades necesarias de reactivos para la generación de H₂.

Para la generación de 160 kg diarios de H₂ mediante el proceso de reformado autotérmico, se necesitarán las siguientes cantidades de H₂O, CH₄ y O₂. La reacción estequiométrica estipula que para la generación de 3 moles de H₂O son necesarios 1 mol de H₂O, 1 mol de CH₄ y 0,5 moles de O₂.



En el apartado 3.4.1. se menciona que el ratio de conversión más desfavorable para este tipo de reformado es de 2,47 moles de H₂. Este valor se usará para el cálculo de las cantidades necesarias. El peso molar de los compuestos es el siguiente:

Peso molar	
H ₂	2,02 kg/kmol
CH ₄	16,04 kg/kmol
O ₂	32,00 kg/kmol
H ₂ O	18,02 kg/kmol
CO ₂	44,01 kg/kmol

Tabla 28. Peso molar de los diferentes compuestos de la reacción. Fuente: Química, Tema 1. Grado en Tecnoloxías. Mariñas. UDC.

Teniendo en cuenta el peso molar, la fórmula estequiométrica y el ratio de conversión, para generar la cantidad de 160 kg de H₂, se necesitarían las siguientes cantidades de reactivos:

Cantidades de reactivos	
CH ₄	514,40 kg
O ₂	513,09 kg
H ₂ O	577,9 kg

Tabla 29. Cantidades de reactivos mínimas teóricas para la generación diaria de H₂. Fuente: El autor.

La cantidad de metano diaria disponible, calculada en la primera parte de este trabajo, es de 35,04 m³ de media. En la tabla 17 se verifica que con esta cantidad se dispone de



hasta 928,4 kmol para la reacción, siendo la cantidad más que suficiente para la generación de los 160 kg de H₂ necesarios diariamente.

Para el abastecimiento de agua, tomando la densidad de vapor a 250°C y 7 bar, 2,974 kg/m³, se necesitan 194,31 m³ diarios de agua para la generación de hidrógeno. Una parte de esta agua no se pierde, si no que se devuelve a los tanques como resultado del proceso de electrólisis en la pila PEMFC. Tal y como se explicó en el apartado 3.5.3. es conveniente la instalación de un generador de agua dulce de mayor capacidad, o redimensionar la planta de agua dulce de servicio en buques de nueva construcción.

El O₂ necesario es suministrado por el compresor de aire propuesto para el proceso de reformado. El O₂ se encuentra disociado en el aire, junto con N₂, en una mezcla volumétrica de 20,9% O₂ y 79% N₂, en términos generales, por lo que la cantidad a suministrar es mayor.

Cantidad de aire necesaria	
Peso molar O ₂	36 kg/kmol
% en Aire	20,9%
ρ (O ₂ , 1 bar, 20°C)	1,314 kg/m ³
Volumen O ₂	390,47 m ³
Cantidad diaria total (aire)	1868,32 m ³

Tabla 30. Cantidad de aire necesaria a suministrar. Fuente: El autor.

Para abastecer del O₂ suficiente al proceso de reformado es necesario suministrar diariamente 1868,32 m³ de aire, que serán movidos por el compresor. En la tabla 22 se muestran las características del compresor propuesto, que tiene una capacidad nominal de 606,3 m³/h, cumpliendo sobradamente con los requisitos de suministro de O₂.

4.1.4. Emisiones de CO₂.

El proceso de generación de hidrógeno a bordo permite elaborar un combustible limpio para la generación de energía, pero a costa de unas emisiones de gases de efecto

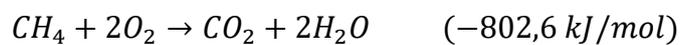


invernadero, como el CO₂. La cantidad de CO₂ emitida a la atmósfera diariamente, debido al proceso de reformado, es la siguiente:

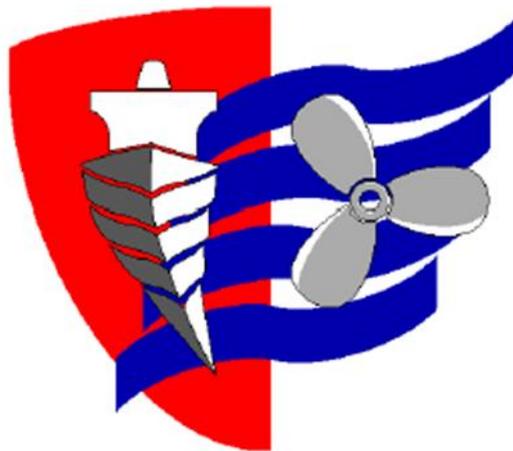
Emisiones de CO ₂	
Peso molar CO ₂	44,01 kg/kmol
Moles totales	32,07 kmol
ρ (CO ₂ , 1 bar, 20°C)	1,815 kg/m ³
Volumen CO ₂	777,63 m ³
Emisiones diarias	1411,4 kg

Tabla 31. Emisiones de CO₂ diarias. Fuente: El autor.

Para establecer una comparativa con las emisiones generadas por la GCU durante el quemado de los 514,40 kg de CH₄ diarios provenientes del boil off de los tanques, se calcula la cantidad de CO₂ generada en este proceso. La fórmula estequiométrica es la siguiente:



Por cada mol de CH₄ quemado se genera un mol de CO₂. La cantidad de CH₄ quemada es de 32,07 kmol, por lo que la cantidad de CO₂ generada es de 32,07 kmol, siendo la misma cantidad que la generada durante el proceso de reformado, 1411,4 kg diarios. Se debe destacar que mientras las emisiones de CO₂ por el quemado del metano no tienen ningún tipo de aprovechamiento efectivo, las emisiones generadas por el proceso de reformado son una consecuencia de la generación de H₂, mejorando la eficiencia global de la planta energética del buque.



5. Anexo. Planos.



GENERACIÓN DE H₂ A BORDO DE UN BUQUE LNG/C

