

Propulsión eléctrica a partir de celdas de hidrógeno: impacto en mitigación de huella de carbono

Electric propulsion powered by hydrogen cells: Impact on carbon footprint mitigation

Marcela Patricia Arrieta-García ^{1a}, Adriana Milena Castaño-Padilla ^{1b}, Alejandro Luis Olivera-Ruiz ^{1c}

¹ Gerencia de Diseño e Ingeniería, Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval Marítima y Fluvial - COTECMAR, Colombia. Orcid: [0000-0001-9503-6820](https://orcid.org/0000-0001-9503-6820) ^a, [0000-0003-3426-9115](https://orcid.org/0000-0003-3426-9115) ^b, [0000-0001-7465-6123](https://orcid.org/0000-0001-7465-6123) ^c. Correos electrónicos: mparrieta@cotecmar.com ^a, amcastano@cotecmar.com ^b, aolivera@cotecmar.com ^c

Recibido: 10 agosto, 2022. Aceptado: 27 diciembre, 2022. Versión final: 11 marzo, 2023.

Resumen

El aumento de la temperatura global, como consecuencia de las emisiones de gases de efecto invernadero, sigue siendo una de las principales preocupaciones que ha provocado un profundo interés en la implementación del hidrógeno como fuente de generación de energía eléctrica, por lo que en el mercado se han desarrollado y están disponibles tecnologías de celdas de combustible de hidrógeno para mitigar las emisiones de CO₂ generadas por el uso de combustibles fósiles. En este artículo, se describe la metodología empleada para el diseño de un sistema de propulsión eléctrica con suministro de energía a partir de una celda de combustible de hidrógeno en un Buque de Apoyo Logístico y de Cabotaje Liviano - BALC-L. El diseño actual del buque cuenta con una propulsión convencional con dos motores diésel de 224 kW cada uno y dos generadores diésel de 99 kW cada uno, como base para la propuesta de un análisis de un sistema de propulsión eléctrica energizado a través de un sistema de celdas de combustible de hidrógeno. Como resultado, se propone un cambio en el perfil operativo del buque y una reducción de las emisiones de CO₂ a lo largo de su ciclo de vida útil. La investigación descrita en este documento es un punto de partida para la implementación de estas tecnologías en la industria marítima y fluvial en Colombia.

Palabras clave: hidrógeno; celdas de combustible; propulsión eléctrica; gases de efecto invernadero; emisiones de CO₂; temperatura global; buque de apoyo logístico y de cabotaje; industria marítima; industria fluvial; fuente de generación de energía.

Abstract

The increase in global temperature, as a result of greenhouse gas emissions, continues to be a major concern that has led to a deep interest in the implementation of hydrogen as a source of electric power generation; therefore, hydrogen fuel cell technologies have been developed and are available on the market to mitigate CO₂ emissions generated by the use of fossil fuels. This document describes the methodology used for the design of an electric propulsion system with energy supply from a hydrogen fuel cell in a Light Cabotage and Logistic Support Vessel - BALC-L. The current design of the vessel has a conventional propulsion with two diesel engines of 224 kW each and two diesel generators

99 ekW each, as the basis for the proposed analysis of an electric propulsion system energized through a hydrogen fuel cell system. As a result, a change in the operational profile of the vessel and a reduction in the CO₂ emissions that it would generate throughout its useful life cycle are identified. The research described in this document is a starting point for the implementation of these technologies in the maritime and fluvial industry in Colombia.

Keywords: hydrogen; fuel cell; electric propulsion; greenhouse gases; CO₂ emissions; global temperature; logistic support vessel and cabotage; maritime industry; fluvial industry; power generation source.

1. Introducción

En la actualidad, una de las más grandes preocupaciones de los países a nivel mundial es el cambio climático, las altas emisiones de gases de efecto invernadero y el daño que estos producen para la salud del ser humano y el medio ambiente [1]. Considerando esto, las organizaciones internacionales están realizando un esfuerzo por reducir las cantidades de emisiones a niveles aceptables; entre ellas la Organización Marítima Internacional (OMI) está promulgando normas para el control en el área técnica y operativa con el objetivo de reducir la emisión de los gases de efecto invernadero y por consiguiente la temperatura global [2], [3].

En los datos más recientes publicados, se indica que el 2.6 % de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂) son generadas por la industria marítima [4], [5], por lo cual se han establecido limitaciones y penalidades que buscan reducir a como dé lugar el impacto medioambiental que se genera debido a estas emisiones [6], [7]. Por estos motivos, el gobierno de Colombia decidió promulgar medidas que se encuentran publicadas en la Contribución Determinada a nivel Nacional, en la cual establece su compromiso de mitigación de gases de efecto invernadero al 50 % para el año 2030 buscando de esta forma abrir un camino hacia la carbono-neutralidad [8]. Así mismo, en Colombia se inició un inventario de gases de efecto Invernadero - GEI, en este se puede evidenciar que el 5.7 % de las emisiones de GEI del sector transporte corresponden a la navegación marítima y fluvial nacional, esto representa 2.6 Mton al año [9].

Se considera que un alto porcentaje de las emisiones generadas por las embarcaciones proviene de los sistemas de propulsión y la planta de generación eléctrica, debido a que estos requieren el consumo de combustible fósiles para su funcionamiento [10]. Teniendo en cuenta, las regulaciones impuestas por los países para la disminución de los gases GEI, es necesario como industria marítima encaminar el diseño de las nuevas embarcaciones hacia un camino de sostenibilidad e innovación, por este motivo, han surgido alternativas que cada vez toman más fuerza, como los sistemas de propulsión eléctrica con generación a partir de celdas de hidrógeno y baterías [11].

La implementación de sistemas de propulsión eléctrica se considera una solución eficiente para el ahorro de combustibles fósiles y disminución de las emisiones de gases GEI [12]. Así mismo, estos sistemas son aplicables a diferentes tipos de embarcaciones; sin embargo, su integración implicaría un aumento notable en la capacidad de los generadores para la alimentación de los motores eléctricos.

Así mismo, la implementación de estos sistemas de propulsión eléctrica brinda oportunidad para la integración de sistemas de generación no convencionales como las celdas de combustible de hidrógeno, con el objetivo de suplir la potencia requerida de los motores eléctricos, de esta forma mitigar el impacto en el crecimiento elevado de los generadores. Estas celdas de combustible de hidrógeno cuentan con una alta eficiencia energética y un impacto positivo para el medio ambiente [3], debido a, una alta eficiencia en el uso del combustible, bajo ruido, buen rendimiento de la carga parcial y un bajo costo de mantenimiento [14], todo esto alineándose al enfoque del país hacia una descarbonización de los sectores económicos.

El presente artículo propone el dimensionamiento de un sistema de propulsión eléctrica con suministro de energía a partir de un sistema de celdas de combustible para un buque de apoyo logístico y cabotaje liviano BALC-L, con el propósito de realizar un análisis comparativo entre un sistema de propulsión convencional diésel y un sistema de propulsión eléctrico, alimentado a partir de celdas de hidrógeno y conocer su impacto en la mitigación de la emisión de gases de efecto invernadero. De esta forma, se encontrará en la sección 2 la descripción del caso de estudio, el diseño actual de la embarcación BALC-L con una configuración de propulsión diésel. En la sección 3, se definirá la propuesta de diseño para la embarcación con una configuración de propulsión eléctrica integrada a un sistema de celdas de hidrógeno para la generación de la potencia requerida. En la sección 4, se realizará un comparativo entre estos dos tipos de propulsión para el análisis de emisiones de CO₂, por último, en la sección 5 se encuentran las conclusiones y trabajo futuro.

2. Descripción de caso de estudio: Buque BALC-L

En el marco del plan de desarrollo naval de la armada de Colombia, se estableció un sistema denominado pentágono estratégico naval, el cual tiene un enfoque principalmente orientado a defensa y seguridad, enlazado a otras aristas que contribuyen al desarrollo en seguridad integral marítima y fluvial, defensa, seguridad nacional y seguridad ambiental con un enfoque para la protección de los mares, ríos y la prevención de la contaminación, así como el combate con el tráfico ilícito de especies [15].

Bajo este contexto, surge una propuesta de embarcación que brinde soporte a la ejecución de operaciones enfocadas al apoyo logístico, transporte de carga, ayuda humanitaria y transporte de personal [16]. Esta embarcación busca poder implementar fuentes de energía no convencionales para apoyar la reducción de los gases de efecto invernadero.

Por lo anterior, se propone en el marco de la etapa de diseño de la embarcación, el análisis de la integración de un sistema de propulsión eléctrica energizado a partir de un sistema de celdas de combustible de hidrógeno para un buque de apoyo logístico y cabotaje BALC-L. Ver figura 1.



DIMENSIONES PRINCIPALES	
• Eslora total 43,5m
• Manga máxima 8,00m
• Calado de diseño 1,20m
• Alcance 1000mn
• Velocidad de diseño 08 nudos
• Desplazamiento 313 ton
• N° de tripulación 10 personas

Figura 1. Dimensiones principales de Buque de apoyo logístico y cabotaje liviano BALC-L. Fuente: elaboración propia.

Este buque está encaminado a desempeñar operaciones en ríos primarios y secundarios en la zona pacífica colombiana, así como un tránsito costero eventual entre deltas de los ríos [16].

2.1. Configuración de propulsión diésel

El buque BALC-L está diseñado con un sistema de propulsión diésel, el cual se seleccionó a partir de la curva de predicción de potencia al freno del buque (ver figura 2). Contará con propulsores tipo *pump-jet*, los cuales funcionan bajo el principio de una bomba axial vertical; un impulsor succiona agua desde la parte baja del casco y luego a través de las aspas el agua se hace girar tangencial y radialmente hacia afuera en la cámara de la carcasa, el fluido gana velocidad y presión al pasar a través del impulsor y por último las boquillas de salida en la carcasa orientable aceleran el flujo y un chorro de agua produce un empuje horizontal debajo del casco de fondo plano.

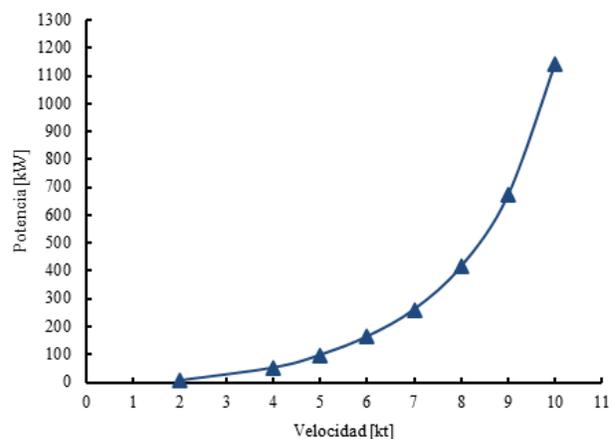


Figura 2. Curva de predicción de potencia al freno. Fuente: elaboración propia.

La planta de propulsión convencional estará conformada por dos líneas de propulsión idénticas compuestas por el siguiente conjunto: Motor diésel + reductor + eje tipo cardán + propulsor tipo *pump jet*, con las siguientes capacidades:

- Motor diésel: 224 kW @ 2600 rpm
- Reductor: 415 kW @ 3600 rpm
- Pump-Jet: 209 kW @ 1493 rpm
- Alcance: 1560 km @ 7 kn

En las figura 3 y figura 4 se puede observar el arreglo del sistema de propulsión diésel para el buque BALC-L.

La velocidad objetivo para la selección de la planta propulsora fue de 8 kn (velocidad máxima) y 7 kn (velocidad crucero). Conforme a esto y el dimensionamiento del sistema propulsor, se procede a establecer el perfil operacional de la embarcación, el cual se puede observar en la tabla 1.

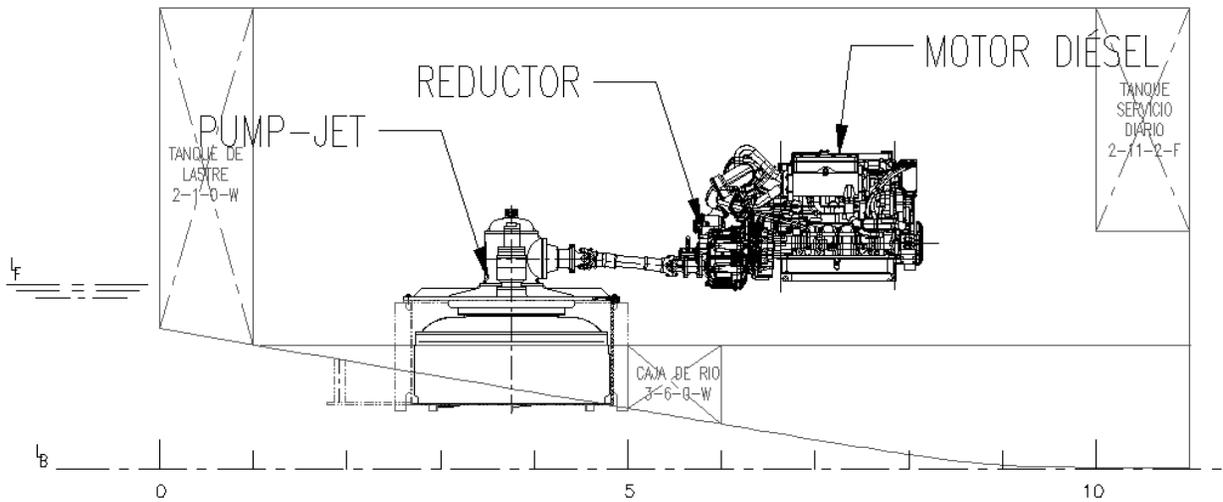


Figura 3. Arreglo de propulsión tipo diésel. Vista longitudinal. Fuente: elaboración propia.

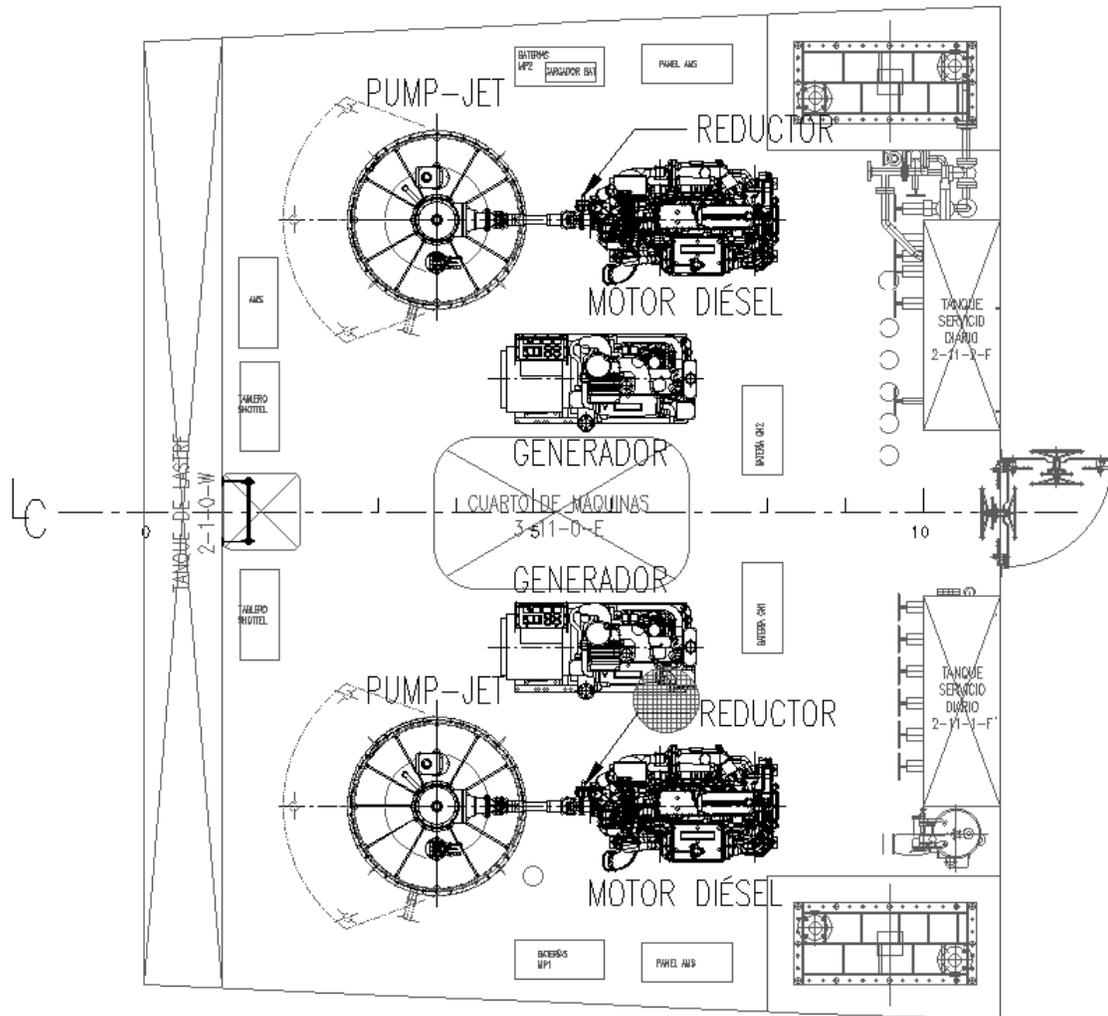


Figura 4. Arreglo de propulsión tipo diésel. Vista en planta. Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Perfil operacional del buque BALC-L con una propulsión diésel

Velocidad (kn)	Distribución (%)	Horas de operación anual (h)	Potencia (kW)
0 – 4	15	375	51,55
4 – 7	70	1750	262,89
8	15	375	417,53

Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, la estimación de la planta eléctrica se realizó mediante un análisis de balance de cargas, en el cual se incluye los consumidores y sus respectivos factores de carga en cada una de las condiciones de operación que tendrá el buque BALC-L, así mismo, se consideran las recomendaciones brindadas por el estándar IEEE Std 45 2002, el cual sugiere el uso de generadores principales para la alimentación de las cargas asociadas a los servicios del buque (carga hotel) y para las cargas asociadas al sistema de propulsión [17], las cuales en esta configuración del buque con propulsión convencional diésel, no representan una gran demanda. La planta eléctrica incluye dos generadores diésel de 99 kW cada uno para suplir la demanda eléctrica de los consumidores en general, y de los sistemas esenciales y auxiliares de la embarcación durante su operación.

Tanto los motores para la propulsión como los motores para la generación emplearán diésel marino como combustible, el cual será almacenado en dos tanques de servicio diario dimensionados para una operación de 8 horas a *maximum continuous rating* de la planta de propulsión y la planta de generación.

3. Diseño de un sistema de propulsión eléctrica energizado con celdas de combustible de hidrógeno

Con el objetivo de proponer alternativas para diseñar una versión de embarcación con una baja emisión de GEI a partir del buque BALC-L, se procede a diseñar un sistema de propulsión eléctrica que integra un sistema de celda de combustible de hidrógeno para el suministro de energía a los motores eléctricos, de esta forma no se incrementa en gran medida la potencia requerida de los generadores y en consecuencia, no aumenta considerablemente el consumo de combustible diésel, y las emisiones de los gases de efecto invernadero propios de la embarcación.

3.1. Configuración de propulsión diésel

La planta de propulsión eléctrica estará conformada por dos líneas de propulsión idénticas compuestas por el siguiente conjunto cada una: Motor eléctrico + eje tipo cardán + propulsor tipo *pump jet*, con las siguientes capacidades:

- Motor eléctrico: 151 kW @ 1600 rpm
- *Pump-Jet*: 209 kW @ 1493 rpm
- Alcance: 1852 km @ 6 kn

En las figuras 5 y figura 6, se puede observar el arreglo del sistema de propulsión eléctrica para el buque BALC-L.

La velocidad objetivo para la selección de la planta de propulsión fue de 7 kn (velocidad máxima) y 6 kn (velocidad crucero). Conforme a esto y el dimensionamiento del sistema propulsor, se procede a establecer el perfil operacional de la embarcación, el cual se puede observar en la tabla 2.

Tabla 2. Perfil operacional del buque BALC-L con una propulsión eléctrica

Velocidad (kn)	Distribución (%)	Horas de operación diaria (h)	Potencia (kW)
0 – 4	15	0,9	51,55
4 – 6	70	4,2	164,95
7	15	0,9	262,89

Fuente: elaboración propia.

Considerando los cambios en los motores del sistema de propulsión, se procedió a realizar la estimación de la planta eléctrica convencional (generadores diésel) mediante un análisis de balance de cargas, en el cual se incluye los consumidores y sus respectivos factores de carga en cada una de las condiciones de operación que tendrá el buque BALC-L, así mismo, se consideran las recomendaciones brindadas por el estándar IEEE Std 45 2002, que indica para embarcaciones con propulsión eléctrica, la cantidad de los grupos electrógenos y sus potencias combinadas deben ser capaz de soportar la carga máxima a alimentar, así mismo, en caso de fallo, uno (01) de los generadores deberá soportar las cargas esenciales de habitabilidad y la potencia requerida por el sistema de propulsión cuando este se encuentra por lo menos a la mitad de la velocidad de diseño [17], en el caso de BALC-L se seleccionó una velocidad 4 kn conforme lo muestra la tabla 2.

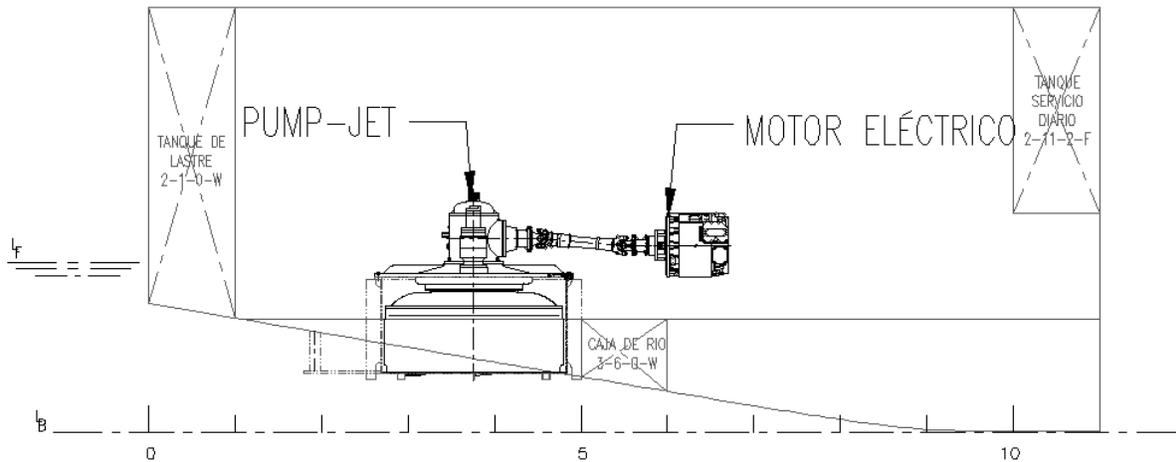


Figura 5. Arreglo de propulsión tipo eléctrica. Vista longitudinal. Fuente: elaboración propia.

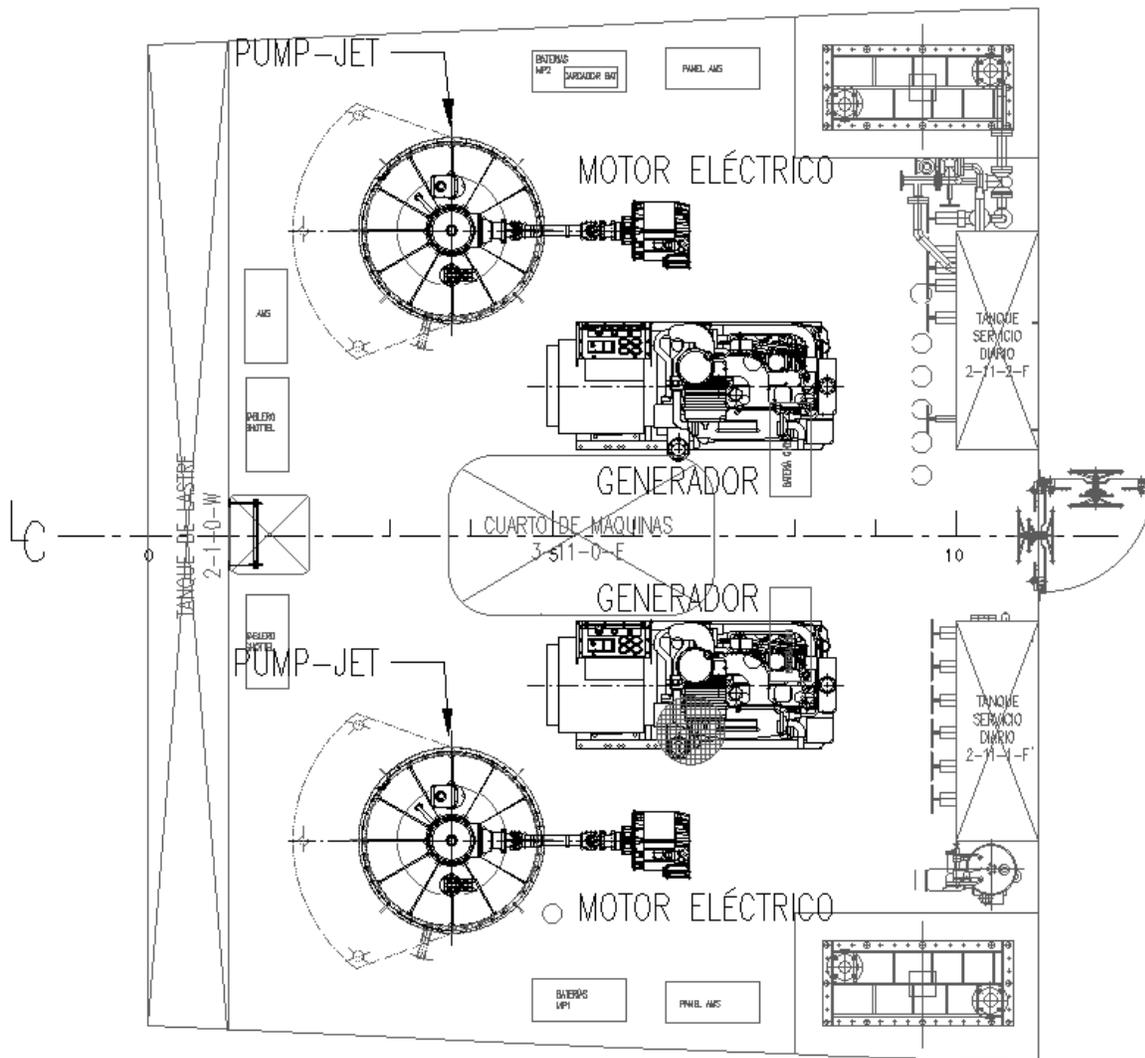


Figura 6. Arreglo de propulsión tipo eléctrico. Vista en planta. Fuente: elaboración propia.

Conforme a lo anterior, se estable el dimensionamiento de la planta eléctrica con dos generadores diésel de 150 ekW cada uno, para suplir la demanda eléctrica de los consumidores en general, los sistemas esenciales y auxiliares de la embarcación durante su operación y con la capacidad para en caso de falla del sistema de celda de combustible de hidrogeno asumir la potencia de 51.55 kW asociada al consumo del sistema de propulsión durante la navegación a una velocidad de 4 kn.

Con el propósito de no aumentar el tamaño de los generadores y aportar a la mitigación de emisiones GEI, se diseña un sistema de celda de combustible de hidrógeno para el suministro de energía al sistema de propulsión eléctrica operando a las diferentes velocidades durante el tiempo de navegación estimado en el perfil operacional, ver [tabla 2](#). La energía producida por las celdas se utilizará para alimentar directamente a los motores de propulsión eléctrica y para cargar el banco de baterías que podrá usarse durante la navegación acorde a la gestión energética que se determine y para soporte en el arranque de los motores.

A partir de la información recibida por parte de proveedores y acorde a las fichas técnicas de las celdas de combustible de hidrógeno comerciales, se dimensionó el sistema de celdas de hidrógeno, partiendo de la premisa, que, conforme a lo planteado en la ruta del hidrógeno, el país contará con la infraestructura necesaria para suministrar, transportar y almacenar hidrógeno líquido entre los años 2030 - 2050 [18].

3.2. Dimensionamiento del sistema de celda de hidrógeno

Los sistemas de celdas de hidrógeno están conformados por varios elementos como se muestra en la [figura 7](#) en primera instancia, se disponen los tanques de suministro los cuales contienen el hidrógeno líquido o gaseoso conforme a sus condiciones de almacenamiento [19]. En segunda instancia, se disponen las celdas de combustible, las cuales reciben el hidrógeno proveniente de los tanques y mediante una reacción electroquímica libera la energía química del hidrógeno y la convierte en energía eléctrica para la alimentación de las cargas [20], [21]. En tercera instancia, se disponen las baterías, las cuales se encuentran conectadas en paralelo a las celdas de combustible con el objetivo de aportar a la disminución de los picos de corriente que se tiene durante el arranque de los motores propulsores; así mismo, almacenan energía para suministrarla a las cargas en un periodo de tiempo en el cual no se tenga disponibilidad de hidrógeno.

Considerando los elementos que conforman el sistema de celda de combustible de hidrógeno, se procede a realizar el dimensionamiento del sistema de celda de hidrógeno, para esto, es necesario redefinir el perfil operacional de la embarcación, considerando que este permite determinar los requerimientos de potencia y energía, teniendo en cuenta que determina las horas al día que se encontrará navegando la embarcación y junto con él se define la potencia requerida acorde a la velocidad.

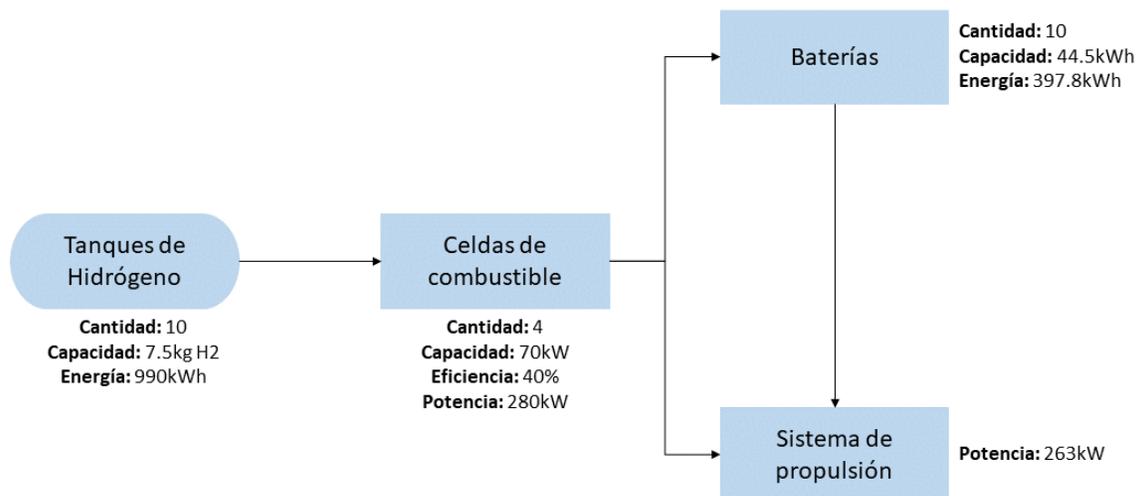


Figura 7. Sistema de celdas de combustible de hidrógeno. Fuente: elaboración propia.

Partiendo de los requerimientos de potencia por parte de los motores eléctricos, se redujo su tiempo de operación por día y su velocidad máxima de navegación se estableció en 7 kn, debido a que, al ser una propulsión de tipo eléctrica, se requiere una mayor capacidad de generación por parte de la planta eléctrica debido a que los consumidores establecidos por la planta propulsora aumentan considerablemente, por los cambios de motores diésel a motores eléctricos. En la [tabla 2](#), se puede observar el perfil operacional del buque BALC-L actualizado.

A partir del perfil operacional de la embarcación, se procede a definir los elementos que componen el sistema de celda de combustible de hidrógeno, las baterías, tanques de hidrógeno y las celdas de combustible.

En primer lugar, se calculó la cantidad de tanques de suministro de hidrógeno, para esto fue necesario considerar que el hidrógeno es un elemento que cuenta con una gran capacidad de almacenamiento de energía, así mismo, los estudios afirman que 1 kg de H₂ contiene 33 kWh de energía [22]. Partiendo de las características propias del hidrógeno y considerando que la eficiencia de una celda de combustible comercial es en promedio del 40%, se obtiene que 1 kgH₂ que procede de la celda de combustible produce 13,2 kWh de energía.

Una vez se tiene definido la cantidad de energía procedente de las celdas de combustible por cada kilogramo de hidrógeno, se estima la cantidad de hidrógeno (en kg) necesario para suplir 975.59 kWh, lo cual corresponde a la máxima energía requerida por la embarcación en un tiempo de operación de 6 horas, acuerdo al perfil operacional de la [tabla 2](#). Ver la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{Energía requerida}}{\text{Energía H}_2 * \text{Eficiencia Celda}} = \text{Cantidad de H}_2 \text{ [kg]} \quad (1)$$

$$\frac{975.59 \text{ kWh}}{33 \text{ kWh} * 0.40} = 73.91 \text{ kg}$$

Para suplir el requerimiento mínimo de energía que requiere el sistema de propulsión durante 6 horas, se necesita 73.91 kg de H₂. Así mismo, de acuerdo con las capacidades comerciales se define que 1 tanque de hidrógeno contiene 7.5 kg de H₂ a una presión de 350bar, por lo cual, se requieren mínimo 10 tanques de hidrógeno para suplir la necesidad mínima del sistema de propulsión. Es importante destacar que es recomendable contar con tanques de hidrógeno de reserva. Ver ecuación 2.

$$\frac{\text{Kg H}_2 \text{ requerido}}{\text{Kg H}_2 \text{ x tanque}} = \frac{73.91 \text{ kg}}{7.5 \text{ kg}} \approx 10 \text{ tanques H}_2 \quad (2)$$

Al tener definido la cantidad de hidrógeno necesaria, se procede a delimitar la cantidad de celdas de combustible de hidrógeno y de baterías para lograr obtener el dimensionamiento de todo el sistema.

Para definir la cantidad de celdas de combustible requeridas, se tiene como información de entrada su capacidad máxima de generación, la cual es de 70 kWp, esta celda de hidrógeno cuenta con la capacidad de realizar un arreglo con múltiples celdas, logrando generar una potencia de hasta 1 MWp. En el caso del buque BALC-L se requiere satisfacer una potencia máxima correspondiente a 262.89 kW. En la ecuación 3 se observa la cantidad necesaria de celdas para cumplir con los requerimientos de potencia.

$$\frac{P_{\text{máx-requerida}}}{P_{\text{máx-celda}}} = \frac{262.89 \text{ kW}}{70 \text{ kW}} = 4 \text{ celdas de H}_2 \quad (3)$$

Partiendo de la cantidad de celdas de combustible y la cantidad de tanques mínimos para suplir los requerimientos de energía, se procede a dimensionar la cantidad mínima de baterías requeridas para el sistema. Estas baterías están conectadas en paralelo al sistema de propulsión y entran en funcionamiento en el momento de arranque de los motores propulsores, con el propósito de asumir las corrientes pico que se generan, de esta forma evitan picos de consumo del hidrógeno en el arranque de los motores.

Como información de entrada para el dimensionamiento del sistema de almacenamiento de energía, se tiene la capacidad nominal de almacenamiento de 44.2 kWh por cada una; sin embargo, con el propósito de mantener un ciclo de vida estable en las baterías del sistema, se llevó a cabo el dimensionamiento considerando un aprovechamiento máximo del 65 % de su capacidad nominal, obteniendo de esta forma 96,000kWh en almacenamiento de energía, equivalentes a 10 años de duración bajo aplicaciones estándar. Aplicando esta consideración obtenemos que la capacidad usable por batería es de 28.7 kWh, ver ecuación 4.

$$\text{Cap. nominal bat} * \% \text{máx. de descarga} = \text{Cap. usable bat.} \quad (4)$$

$$44.2 \text{ kWh} * (0.65) = 28.7 \text{ kWh}$$

Considerando lo anterior, se define la cantidad de baterías necesarias para los requerimientos de energía, conforme con lo obtenido del perfil operacional, véase ecuación 5.

$$\frac{E_{m\acute{a}x}}{\text{Capacidad usable bat}} = \frac{262.89 \text{ kWh}}{28.73 \text{ kWh}} = 10 \text{ baterías} \quad (5)$$

A partir de la capacidad máxima de almacenamiento de las baterías, se establece unas horas de autonomía para alimentación del sistema de propulsión en caso de que solo se encuentre en operación el banco de baterías; las horas de autonomía varían de acuerdo con la velocidad de navegación en la que se encuentre operando la embarcación, ver tabla 3. Se puede observar que el tiempo de uso se refiere a una operación durante el 100 % a la velocidad indicada.

Tabla 1. Tiempo de autonomía del buque conforme a su velocidad de operación empleando solo banco de baterías para navegación

Velocidad (kn)	Potencia (kW)	Tiempo de uso (h)
4	51.55	5.57
6	164.95	1.74
7	262.89	1.09

Fuente: elaboración propia.

A partir del dimensionamiento realizado anteriormente, el sistema de generación por celdas de combustible de hidrógeno para el suministro de energía del sistema de propulsión eléctrica estará conformado por 4 celdas de combustible de 70 kWp cada una, 10 baterías de 44.2 kWh cada una y 10 tanques de hidrógeno de 7,5 kg cada uno. Este sistema estará integrado a la planta eléctrica del buque, debido a que, en caso de falla, la planta eléctrica será capaz de suministrar electricidad a los sistemas de propulsión a una velocidad de 4 kn (velocidad mínima), cumpliendo de esta forma con lo mencionado en el estándar IEEE std 45 y en la guía ABS “Fuel cell power system for marine and offshore applications”.

La integración de celdas de combustible de hidrógeno a la planta eléctrica de un buque trae muchas ventajas, entre las cuales se tiene:

- Su operación no genera contaminación, debido a que requieren hidrógeno verde para su funcionamiento y el resultado de esta operación es agua y vapor, por consecuencia, se considera

una fuente de energía verde por sus bajas emisiones [23].

- Debido a que las celdas de hidrógeno no realizan combustión, su eficiencia no está ligada a su máxima temperatura de operación (no hay pérdidas de energía por temperaturas), debido a esto, la eficiencia de la etapa de conversión de potencia puede ser significativamente alta comparado con combustibles convencionales [24], ver figura 8.
- El hidrógeno como elemento, contiene una alta densidad de energía comparado con una batería de litio. [21]
- Se puede implementar para suministrar energía a consumidores de alta demanda, como es el caso del sistema de propulsión eléctrica, así mismo, tiene la capacidad de ser una solución que se adapta a los requerimientos de los sistemas [25].

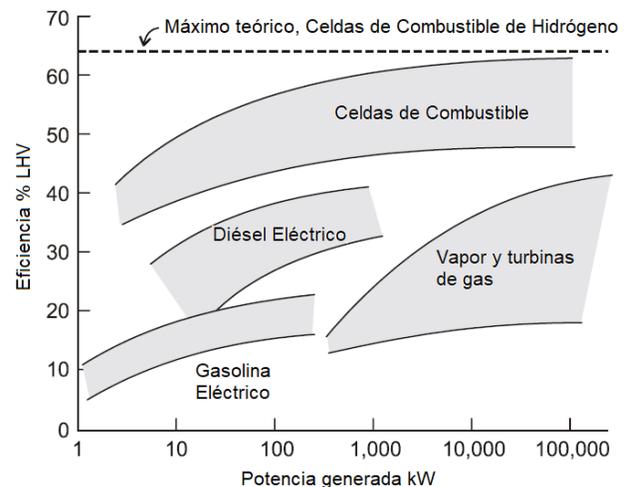


Figura 8. Comparación de eficiencia de fuentes de generación de potencia. Fuente: adaptación de libro Hydrogen Fuel Cell Engines.

3.3. Arreglo general de espacios para disposición del sistema

Para la implementación del sistema de propulsión con motores eléctricos y el sistema de generación con celdas de hidrógeno se hace necesario la revisión de los espacios en la disposición general del buque, de manera que los equipos y elementos puedan disponerse [26] acorde a las consideraciones y recomendaciones consignadas en las normativas aplicables.

Este tipo de sistemas requieren un sistema de detección de fuga, debido a que el hidrógeno es incoloro e inodoro,

por lo tanto, la presencia de fugas no puede ser detectado por los sentidos humanos y puede generar accidentes [24].

Para la disposición de los espacios de cada uno de los equipos que conforman el sistema de celda de combustible, se consideran las recomendaciones brindadas por la guía de ABS “Fuel cell power system for marine and offshore applications”, el cual establece las siguientes consideraciones [27]:

- El compartimento en el cual se disponga la celda de combustible se considerará un espacio de máquinas categoría A y conforme a SOLAS capítulo II-2 debe estar protegido contra incendios.
- El compartimento de la celda de combustible debe estar diseñado para mitigar los riesgos a niveles de peligros bajos en todas las condiciones de operación.
- El compartimento se considera área peligrosa zona 1, debido a la posibilidad de que se produzcan fugas de hidrógeno en la celda de combustible.

Considerando las dimensiones de los tanques de hidrógeno y las baterías, se obtiene que para la disposición de estos equipos que conforman el sistema, se requiere un volumen proporcional al de un contenedor de 20 ft, ver [figura 9](#) y [figura 10](#).

4. Resultados

Como se describió en los ítems 2.1 y 3.1 la capacidad requerida de los grupos electrógenos diésel para la versión del buque con propulsión eléctrica es mayor, pasando de generadores de 99 kW con la configuración de propulsión diésel a generadores de 150 kW con la configuración de propulsión eléctrica, este aumento mantiene el porcentaje de carga de los generadores entre el 40 % - 80 %, conforme con lo sugerido por los fabricantes en los manuales de operación; sin embargo, este excedente es para dar esporádicamente soporte de alimentación a los motores eléctricos durante la navegación a una velocidad de 4 kn en caso de falla del sistema de celda de combustible de hidrogeno que es la fuente principal de alimentación y soporte.

Por lo anterior, las ventajas de la implementación de cada uno de los sistemas propuestos para la configuración con propulsión eléctrica se evaluaron a través de análisis comparativo con la configuración de propulsión diésel de algunos criterios como el consumo y costo de combustible y cálculo de las emisiones de CO₂; criterios que determinan los beneficios de una u otra solución a lo largo del ciclo de vida de la embarcación.

Con la propuesta de diseño de propulsión eléctrica para el buque BALC-L, se logra disminuir el consumo de combustible fósil, produciendo un ahorro de 721,507 galones (2'731.201 litros) en 20 años de ciclo de vida debido a la implementación de celdas de combustible y el banco de baterías.

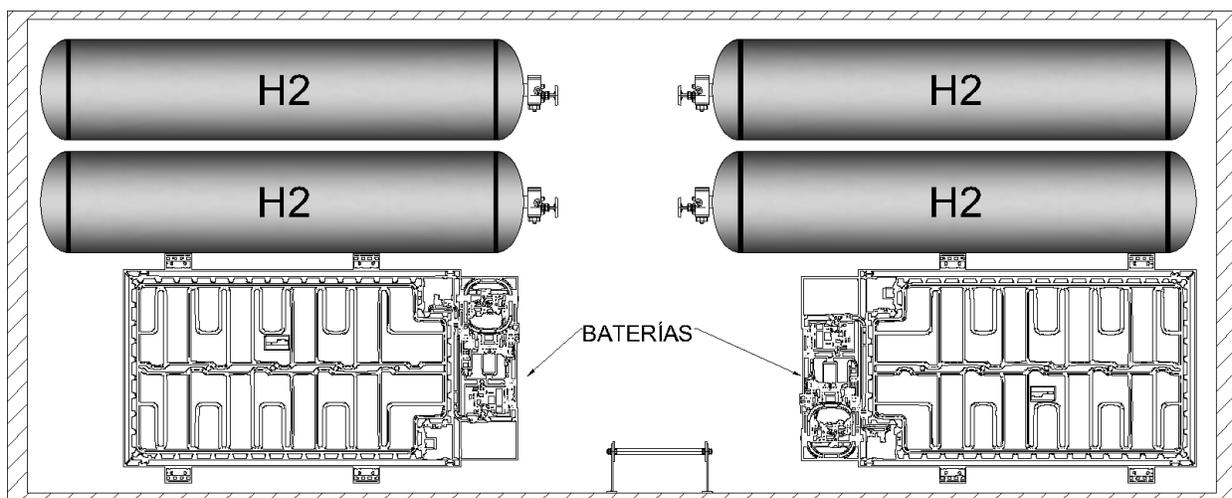


Figura 9. Arreglo de tanques de hidrogeno y baterías en un contenedor de 20ft. Vista en planta. Fuente: elaboración propia.

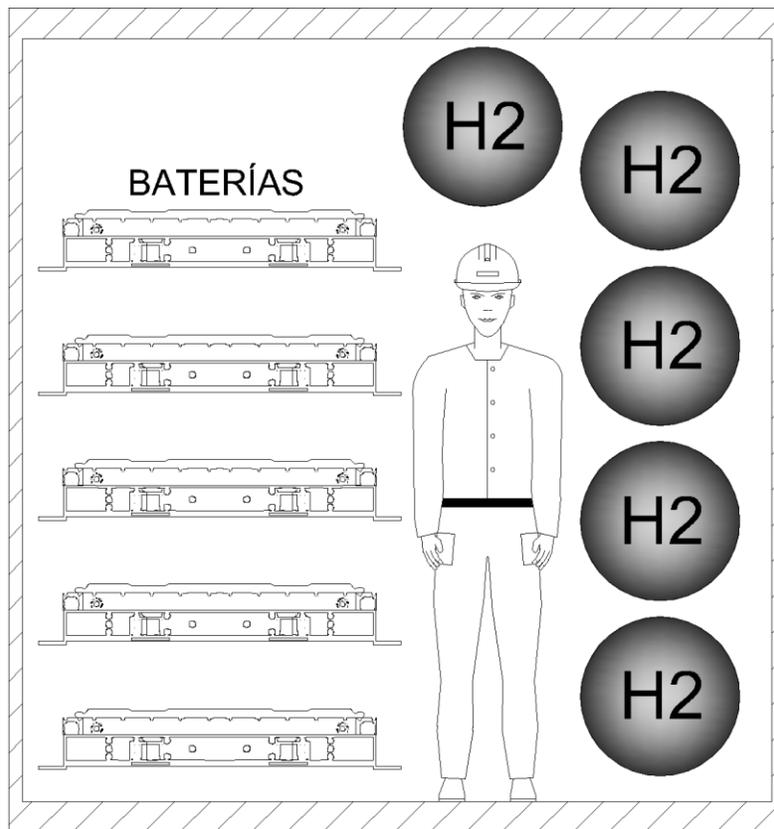


Figura 10. Arreglo de tanques de hidrogeno y baterías en un contenedor de 20ft. Vista transversal. Fuente: elaboración propia.

Esta reducción en el consumo de combustible genera un impacto en los costos asociados al combustible ocasionando un ahorro de aproximadamente 5,051 millones de pesos colombianos en el ciclo de vida del buque en valor presente neto.

Así mismo, con la implementación de la propulsión eléctrica, se disminuyen 6,394 toneladas de CO₂ durante su ciclo de vida; este cálculo se realizó mediante el uso de la herramienta para el cálculo de emisiones de la Unidad de Planeación Minero-Energética UPME.

Conforme a lo indicado por el calculador de equivalencias de gases de efecto invernadero de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos EPA, esta disminución en emisiones de CO₂ equivalen al CO₂ absorbido por 105,725 árboles durante 10 años o reemplazar 242,339 lámparas incandescentes por LED, tal y como se observa en la [figura 11](#).

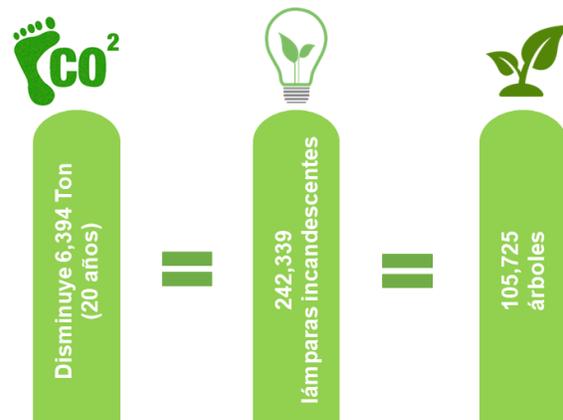


Figura 11. Equivalencia de gases de efecto invernadero ahorrados por mejoras en buque BALC-L. Fuente: elaboración propia.

5. Conclusiones y trabajo futuro

La implementación de sistemas de propulsión eléctrica debe contemplarse a partir de la definición del perfil operacional del buque, esto es, evaluar la velocidad crucero y la velocidad máxima que se puede obtener.

La distribución de espacios en el buque debe considerar desde el diseño conceptual la ubicación de los equipos asociados a los sistemas de propulsión eléctrica y de generación para la alimentación de los motores eléctricos; celdas de combustible, tanques de hidrógeno, bancos de baterías, convertidores, sistema de gestión de la energía, y generadores

El dimensionamiento de las fuentes de generación para la alimentación del sistema de propulsión eléctrica deberá contemplar la filosofía de operación de estas; es decir, celdas de combustible y generadores en paralelo, celdas de combustible con bancos de baterías en paralelo, la distribución del uso de las fuentes de generación de acuerdo con el perfil operacional y las velocidades objetivo, entre otras.

El diseño fue planteado bajo la premisa que las celdas de combustible alimentan el sistema de propulsión al 100 %; sin embargo, a futuro se podría plantear una forma de operación en la que se pueda optimizar el uso del hidrógeno mediante una distribución de la carga de propulsión entre los generadores u otras fuentes de energía.

Al implementar un sistema de propulsión eléctrica alimentado con celdas de combustible de H₂ (Utilizando Hidrógeno verde) en conjunto con bancos de baterías, se obtuvo un ahorro en emisiones de CO₂ de aproximadamente 6,394 toneladas a lo largo del ciclo de vida del buque BALC-L, encontrándose que este tipo de tecnologías tendría un impacto significativo para contribuir al alcance del compromiso de mitigación de gases de efecto invernadero al 50 % para el año 2030.

A futuro, se espera realizar el análisis para el diseño de un sistema que permita la obtención de hidrógeno verde a partir de la electrolisis a bordo e integrar otras fuentes de energía renovables como los sistemas fotovoltaicos para el suministro eléctrico del electrolizador, y evitar así el uso de la planta diésel en el ciclo de generación del hidrógeno verde.

Financiación

No aplica.

Autor Contributions

M. P. Arrieta-García: Conceptualización, Análisis formal, Escritura - Borrador original. A. M. Castaño-Padilla: Metodología, Investigación, Redacción, Revisión y Edición. A. L. Olivera-Ruiz: Investigación, Escritura - Borrador original.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

Declaración de consentimiento informado

No aplica.

Referencias

- [1] Ballard Power Systems, “Fuel Cell Applications for Marine Vessels: Why fuel cells make sense”, Ballard, 2019, [En línea]. Disponible en: https://www.ballard.com/docs/default-source/default-document-library/marine-informational-paper-final.pdf?sfvrsn=c1cec080_2
- [2] A. Bordianu, G. Samoilescu, “Electric and hybrid propulsion in the naval industry”, *2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, Bucharest, Romania, 2019, pp. 1-6, doi: <https://doi.org/10.1109/ATEE.2019.8725022>
- [3] M. G. Sürer, H. T. Arat, “Advancements and current technologies on hydrogen fuel cell applications for marine vehicles,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 45, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.251>
- [4] A. Elkafas, M. Shouman, “A Study of the Performance of Ship Diesel-Electric Propulsion Systems From an Environmental, Energy Efficiency, and Economic Perspective”, *Marine Technology Society Journal*, vol. 56, n° 1, pp. 52-58, 2022, doi: <https://doi.org/10.4031/MTSJ.56.1.3>

- [5] N. Ammar, I. S. Seddiek, “Evaluation of the environmental and economic impacts of electric propulsion systems onboard ships: case study passenger vessel”, *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, n° 28, pp. 1-16, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13271-4>
- [6] E. E. Agency, EMSA, “European Maritime Transport Environmental Report 2021”, EMSA, European Environment Agency, London, 2021.
- [7] A. Ait Allal, K. Mansouri, M. Youssfi, M. Qbadou, “Toward an evaluation of marine fuels for a clean and efficient autonomous ship propulsion energy”, *Materials Today: Proceedings*, vol. 13, pp. 486-495, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.04.005>
- [8] Gobierno de Colombia, “Actualización de la contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC)”, Ministerio del Medio Ambiente, 2020.
- [9] IDEAM, PNUD, MADS, DNP y FMAM, “Tercera Comunicación Nacional de cambio climático: Inventario Nacional de gases de efecto invernadero (GEI)”, 2016.
- [10] H. P. Nguyen, A. T. Hoanget al., “The electric propulsion system as a green solution for management strategy of CO2 emission in ocean shipping: A comprehensive review”, *International Transactions on electrical energy systems*, vol. 31, no. 11, 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12580>
- [11] N. Chalermkiat, L. Tie, X. Hongpu, “Design of Cost-Effective and Emission-Aware Power Plant System for Integrated Electric Propulsion Ship”, *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 9, pp. 1-32, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/jmse9070684>
- [12] R. Derollepot, E. Vinot, “Sizing of a combined series-parallel hybrid architecture for river ship application using genetic algorithm and optimal energy management”, *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 158, pp. 248-263, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2018.09.012>
- [13] C. Nuchturee, T. Li, H. Xia, “Energy efficiency of integrated electric propulsion for ships—A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 134, pp. 1-25, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110145>
- [14] V. Biert y et al, “A review of fuel cell systems for maritime applications”, *Journal of Power Sources*, vol. 327, pp. 345-364, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.07.007>
- [15] Armada de Colombia, “Plan de Desarrollo Naval 2042”, Colombia, 2020.
- [16] COTECMAR, “Concepto técnico, Resumen Diseño Contractual BALC-L”, Colombia, 2021.
- [17] Institute of Electrical and Electronics Engineers, “IEEE 45 Recommended Practice for Electric Installations on Shipboard» IEEE, New York, 2002.
- [18] MinEnergía, “Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia”, Colombia, 2021.
- [19] J. Andersson, S. Grönkvist, “Large-scale storage of hydrogen”, *International journal of hydrogen energy*, vol. 44, no. 23, pp. 11901-11919, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.063>
- [20] M. Carmo, D. Fritz, J. Mergel, “A comprehensive review on PEM water electrolysis”, *International journal of hydrogen energy*, vol. 38, n° 12, pp. 4901-4934, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.151>
- [21] N. Shakeri, M. Zadeh, J. Nielsen, “Hydrogen fuel cells for ship electric propulsion: Moving toward greener ships”, *IEEE Electrification Magazine*, vol. 8, n° 2, pp. 27-43, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/MELE.2020.2985484>
- [22] M. Becherif, et al, “Hydrogen energy storage: new techno-economic emergence solution analysis”, *Energy Procedia*, vol. 74, pp. 371-380, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.629>
- [23] M. Okundamiya, “Integration of photovoltaic and hydrogen fuel cell system for sustainable energy harvesting of a university ICT infrastructure with an irregular electric grid”, *Energy Conversion and Management*, vol. 250, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114928>
- [24] A. Lanz, J. Heffel, C. Messer, “Hydrogen fuel cell engines and related technologies”, United States Federal Transit Administration (FTA), 2001.

[25] L. V. Biert, M. Godjevac, K. Visser, P. V. Aravind, “A review of fuel cell systems for maritime applications”, *Journal of Power Sources*, vol. 327, pp. 345-364, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.07.007>

[26] S. M. J. M. Z. Katalenich, «Toward battery electric and hydrogen fuel cell military vehicles for land, air, and sea» *Energy*, vol. 254, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124355>

[27] American Bureau of Shipping, “Guide for fuel cell power systems for marine and offshore applications”, ABS, Texas, 2019, [En línea]. Disponible en: <https://img.fuelcellsworks.com/wp-content/uploads/2019/12/Fuel-Cell-Power-Systems-For-Marine-and-Offshore-Applications.pdf>