



Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura

Carrera de Ingeniería en Mecánica Naval

Trabajo de Titulación

Modalidad: Proyecto de Investigación

ESTUDIO SOBRE LA VIABILIDAD DE LA APLICACIÓN DE PILAS DE COMBUSTIBLE EN SISTEMAS DE PROPULSIÓN DE BARCOS PEQUEÑOS.

Autor:

Soledispa Lino Erick José

Asesor académico:

Ing. Francisco Paredes Mera

Manta – Ecuador

AGOSTO, 2024

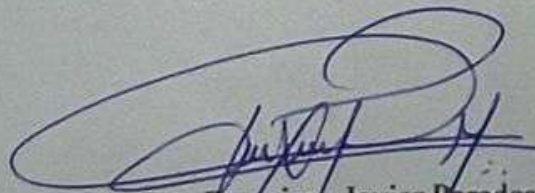
CERTIFICADO DE AUTOR

Los derechos de título y redacción corresponden conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución al sr. ERICK JOSÉ SOLEDISPA LINO, damos consentimiento para que la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí ejecute la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el finde promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual.




Erick José Soledispa Lino

AUTOR



Ing. Francisco Javier Paredes Mera

TUTOR

 Uleam UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ	NOMBRE DEL DOCUMENTO: CERTIFICADO DE TUTOR(A)	CÓDIGO: PAT-01-F-010
	PROCEDIMIENTO: TITULACIÓN DE ESTUDIANTES DE GRADO	REVISIÓN: 2 Página 1 de 1

CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de la Carrera de Ingeniería Mecánica Naval de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, CERTIFICO:

Haber dirigido y revisado el trabajo de titulación, bajo la autoría del estudiante Soledispa Lino Erick José, legalmente matriculado en la carrera Ingeniería Mecánica Naval, período académico 2024, cumpliendo el total de 400 horas, bajo la opción de titulación de proyecto de investigación, cuyo tema del proyecto es “ESTUDIO SOBRE LA VIABILIDAD DE LA APLICACIÓN DE PILAS DE COMBUSTIBLE EN SISTEMAS DE PROPULSIÓN DE BARCOS PEQUEÑOS.”.

La presente investigación ha sido desarrollada en apego al cumplimiento de los requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención, reuniendo y cumpliendo con los méritos académicos, científicos y formales, suficientes para ser sometida a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Manta, 30 de Julio de 2024.

Lo certifico,



Firmado electrónicamente por:
**FRANCISCO JAVIER
PAREDES MERA**

Francisco Javier Paredes Mera
Docente Tutor

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a todas las personas que me ayudaron y me guiaron e impulsaron a no rendirme y seguir adelante durante este proceso de aprendizaje profesional, principalmente le agradezco a mis padres, gracias a todo su apoyo y consejos brindado me ayudaron y fueron pieza clave durante todo este largo proceso.

A mis padres,

Byron Soledispa y Carmen Lino, quienes fueron un pilar fundamental para mí y siempre me estuvieron apoyando hasta el final de este trayecto que ha sido maravilloso. Y quienes siempre dieron todo de ellos con mucho sacrificio para que yo pudiera salir adelante, a ellos les dedico este trabajo de titulación y todos mis logros.

A mi hermana,

Stephanie Soledispa, quien siempre me ha aconsejado y no solo en el ámbito estudiantil sino también en el día a día, gracias a su disciplina y seriedad, me ha inspirado a seguir adelante y poder lograr mis metas y propósitos y me ha ayudado a comprender con más facilidad las dificultades e inconvenientes que se presentan en momentos de mi vida y así poder solucionarlos de la manera más eficiente.

A mi amigo,

Víctor Bermúdez, una de las personas que han estado a mi lado en todo momento tanto en el ámbito educativo como personal y me ha impulsado a seguir adelante y no darme por vencido, gracias a esta etapa de mi vida lo conocí y se terminó convirtiéndome en mi mejor amigo y es una persona en la cual puedo confiar y espero que siempre sea así y por mucho tiempo por no decir para toda la vida si es que se puede.

AGRADECIMIENTO

Le agradezco a dios, a mis padres, a mi hermana y mis familiares, por siempre animarme a seguir adelante y darme el apoyo moral, emocional y económico para poder seguir adelante, con mis metas académicas y no rendirme, ya que en mi periodo de formación existieron inconvenientes y ellos siempre estuvieron presentes y fueron un pilar fundamental para que no me rinda y siguiera adelante con mis sueños y metas.

También le agradezco a mi mejor amigo que siempre estuvo conmigo y me motivó a no rendirme o dejar a un lado mi proceso académico, ya que siempre estuvo pendiente apoyándome, motivándome y haciendo hincapié en que yo podía y puedo hacer y cumplir las metas o retos que me propongo, en mi periodo de formación académica y educativo le agradezco especialmente a mi madre por ser unos de los pilares fundamentales en mi vida ya que gracias a sus consejos, a sus críticas y observaciones yo pude progresar y también, saber conllevar los diversos problemas o situaciones que se me presenta en mi diario vivir, a Dios por ayudarme a cumplir una de mis metas y sueños propuestos.

A Dios, por brindarme la oportunidad de haber culminado este proceso y por haberme concedido el honor de haber compartido tanto, con tantos dentro de la institución como en mi vida personal, a ti Dios padre te agradezco en primer lugar.

RESUMEN

La presente investigación se enfoca en evaluar la viabilidad de la aplicación de pilas de combustible en sistemas de propulsión de barcos pequeños, como una alternativa sostenible frente a los sistemas de combustión interna tradicionales.

Las pilas de combustible de hidrógeno han captado la atención debido a su capacidad para generar energía limpia con emisiones mínimas, lo que contribuye de manera significativa a reducir la huella de carbono en el transporte marítimo.

El estudio examina los principios operativos de las pilas de combustible, enfocándose en su eficiencia energética y la aplicación, y capacidad de funcionamiento en comparación con los motores convencionales de combustión interna. Se analizaron también las ventajas ambientales, como la eliminación de emisiones de CO₂ y otros contaminantes, y se identifican los desafíos técnicos y aplicativos para su adopción, también analizando los costos económicos tales como costos de producción y de montaje, la durabilidad de las pilas en condiciones marítimas adversas.

Se analizaron estudios de proyectos piloto y casos de aplicación de las pilas de combustibles que han demostrado la viabilidad de las pilas de combustible en embarcaciones, junto con una comparación de estas pilas con otras tecnologías de propulsión.

El estudio de investigación concluye que, aunque las pilas de combustible tienen un potencial significativo para transformar la propulsión marítima hacia una opción más ecológica y eficiente, su viabilidad a largo plazo depende de su aplicación más constante y de los avances tecnológicos, una reducción en los costos y el desarrollo de una infraestructura de suministro adecuada.

El estudio resalta la importancia de fomentar la adopción de esta tecnología en el sector marítimo, vislumbrando un futuro en el que las pilas de combustible podrían jugar un papel clave en la sostenibilidad del transporte naval.

Palabras Clave: Pilas de Combustible, Propulsión de embarcaciones, Hidrógeno, Reducción de emisiones, tecnología, sistemas de gestión energéticos.

ABSTRACT

The present research focuses on evaluating the feasibility of applying fuel cells in small ship propulsion systems as a sustainable alternative to traditional internal combustion systems.

Hydrogen fuel cells have gained attention due to their ability to generate clean energy with minimal emissions, which contributes significantly to reducing the carbon footprint of shipping.

The study examines the operating principles of fuel cells, focusing on their energy efficiency and application and performance compared to conventional internal combustion engines. It also analyzed the environmental advantages, such as the elimination of CO₂ emissions and other pollutants and identified the technical and application challenges for their adoption, also analyzing the economic costs such as production and assembly costs, the durability of the stacks in adverse maritime conditions.

Pilot project studies and case studies of fuel cell applications that have demonstrated the feasibility of fuel cells on ships are analyzed, along with a comparison of fuel cells with other propulsion technologies.

The research study concludes that, although fuel cells have significant potential to transform marine propulsion towards a greener and more efficient option, their long-term viability depends on their more consistent application and technological advances, a reduction in costs and the development of an adequate supply infrastructure.

The study highlights the importance of encouraging the adoption of this technology in the maritime sector, envisioning a future in which fuel cells could play a key role in the sustainability of shipping.

Key words: Fuel Cells, Ship propulsion, Hydrogen, Hydrogen, Emission reduction, technology, energy management systems, energy management systems

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN DE AUTOR.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
RESUMEN.....	V
ABSTRACT.....	VI
ÍNDICE.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
INTRODUCCIÓN.....	10
JUSTIFICACIÓN.....	12
OBJETIVO GENERAL.....	15
TAREAS DE INVESTIGACIÓN.....	15
CAMPO DE ACCIÓN.....	15
HIPÓTESIS.....	15
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.....	16
1.1. PILAS DE COMBUSTIBLE.....	16
1.1.1. Aplicaciones de pilas de combustibles.....	17
1.2. FUNCIONAMIENTO DE SISTEMAS DE HIDRÓGENO EN UN BARCO.....	18
1.2.1. Propiedades y ventajas de los sistemas híbridos de accionamiento para barcos a base de hidrógeno.....	18
1.2.2. Ámbitos de aplicación: idoneidad y desafíos.....	19
1.3. HIDRÓGENO Y PILAS DE COMBUSTIBLE: ENERGÍA LIMPIA PARA EL TRANSPORTE MARÍTIMO.....	19
1.3.1. Eficiencia y efectividad de las pilas de combustible en sistemas de propulsión de embarcaciones pequeñas.....	19
1.4. DESCRIPCIÓN DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE.....	21
1.4.1. Eficiencia Energética de las Pilas de Combustible.....	25

1.4.2. Comparación con Sistemas de Propulsión Convencionales	25
2. CAPÍTULO II. CASOS DE ESTUDIOS.....	27
2.1. APLICACIONES MARÍTIMAS DE PILAS DE COMBUSTIBLE	27
2.2. EFICIENCIA ENERGÉTICA Y EMISIONES.....	30
2.3. DESEMPEÑO EN CONDICIONES OPERATIVAS	31
2.4. SOSTENIBILIDAD Y COSTOS ASOCIADOS CON LA IMPLEMENTACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PILAS DE COMBUSTIBLE.	32
2.5. COSTOS DE MANTENIMIENTO	38
2.5.1. Factores que Contribuyen a Menores Costos de Mantenimiento.....	38
2.6. CALCULO ECONÓMICO DE LA APLICACIÓN DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE Y DE UN SISTEMA CONVENCIONAL.....	40
2.7. COMPARACIÓN ENTRE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE CON MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	43
2.8. COMPARACIÓN ENTRE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE Y MOTORES DIESEL CON TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES	43
2.9. TECNOLOGÍA DE PILAS DE COMBUSTIBLE Y SU APLICABILIDAD EN SISTEMAS DE PROPULSIÓN MARÍTIMA.....	45
2.9.1. Tipos de Pilas de Combustible	46
2.9.2. Aplicaciones de Pilas de Combustible en la Propulsión Marítima	47
2.10. APLICABILIDAD EN SISTEMAS DE PROPULSIÓN MARÍTIMA	49
2.11. DESAFÍOS Y CONSIDERACIONES FUTURAS.....	49
2.11.1. Desafíos y oportunidades de la aplicación de las pilas de combustible.....	50
CONCLUSIONES.....	52
REFERENCIAS	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Pilas de combustible.	17
Figura 2. Tabla comparativa entre combustibles fósiles y pilas de combustible	20
Figura 3. Tabla de eficiencia y potencia de las pilas de combustible	22
Figura 4. Pilas de Membrana de Intercambio Protónico.....	23
Figura 5. Pilas de óxido sólido	24
Figura 6. Pilas de Carbonato Fundido.....	25
Figura 7. Proyecto MF Hydra	28
Figura 8. Proyecto e4ships.....	29
Figura 9. Proyecto Hydrocat 48.....	30

INTRODUCCIÓN

La industria marítima, al igual que otros sectores del transporte, enfrenta un desafío crucial en su transición hacia fuentes de energía más sostenibles y eficientes. En un contexto global de creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, las pilas de combustible han emergido como una tecnología prometedora para la propulsión de embarcaciones pequeñas. Este enfoque innovador ofrece una alternativa limpia y eficiente a los sistemas de propulsión convencionales basados en combustibles fósiles.

Las pilas de combustible funcionan mediante la conversión del hidrógeno en electricidad a través de un proceso electroquímico, generando como subproducto únicamente agua. Esta tecnología no solo promete una mayor eficiencia energética, sino también una reducción significativa de las emisiones contaminantes, contribuyendo así a la mejora de la calidad del aire y al cumplimiento de las normativas ambientales cada vez más estrictas. Además, su operación silenciosa proporciona una experiencia de navegación más agradable y reduce el impacto acústico en el medio marino.

No obstante, la implementación de pilas de combustible en el ámbito marítimo presenta diversos desafíos. Entre ellos se encuentran el alto costo inicial de los sistemas de pilas de combustible, la necesidad de desarrollar una infraestructura robusta para la producción y distribución de hidrógeno, y la mejora continua de la tecnología para aumentar su eficiencia y durabilidad. A pesar de estos obstáculos, las oportunidades y beneficios que ofrecen las pilas de combustible justifican una consideración seria y un apoyo activo tanto por parte de la industria como de los gobiernos.

La viabilidad de las pilas de combustible en sistemas de propulsión de embarcaciones pequeñas, evaluando su eficiencia y efectividad en comparación con los sistemas de propulsión convencionales, la sostenibilidad y los costos asociados con su implementación y mantenimiento, y las mejoras tecnológicas necesarias para su adopción generalizada. Asimismo, se presentan recomendaciones sobre inversiones en infraestructura, incentivos gubernamentales y áreas clave para la investigación y desarrollo.

Al comprender mejor los aspectos técnicos, económicos y ambientales de las pilas de combustible, podemos avanzar hacia un futuro marítimo más sostenible y eficiente, alineado con los objetivos globales de reducción de emisiones y protección ambiental.

El transporte marítimo es una pieza fundamental en el comercio mundial, representando más del 80% del volumen del comercio global. Sin embargo, este sector también es uno de los mayores contribuyentes a la contaminación ambiental, emitiendo grandes cantidades de gases de efecto invernadero y otros contaminantes. En este contexto, la búsqueda de soluciones sostenibles y limpias para la propulsión de barcos se ha vuelto una prioridad urgente.

Las pilas de combustible de hidrógeno emergen como una alternativa prometedora para reducir la huella ambiental del transporte marítimo. Estas tecnologías convierten la energía química del hidrógeno en electricidad a través de una reacción electroquímica, emitiendo únicamente vapor de agua como subproducto. La alta eficiencia y la ausencia de emisiones contaminantes hacen de las pilas de combustible una opción atractiva para reemplazar los motores de combustión interna tradicionales en los barcos.

La necesidad de una transición hacia energías más limpias en el sector marítimo es cada vez más urgente. El transporte marítimo es responsable de aproximadamente el 2,5% de las emisiones globales de CO₂ (IMO, 2020). Las pilas de combustible pueden proporcionar una fuente de energía limpia que no solo reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también disminuye la contaminación del aire y el ruido.

Estas pilas funcionan mediante un proceso electroquímico que convierte la energía química del hidrógeno en electricidad, generando solo agua y calor como subproductos. Son especialmente atractivas para el sector marítimo debido a su alta eficiencia energética y baja emisión de contaminantes. Con la disminución de los precios del hidrógeno y los avances en la tecnología de pilas de combustible, estas soluciones se vuelven cada vez más competitivas frente a los combustibles fósiles tradicionales.

JUSTIFICACIÓN

La necesidad de encontrar alternativas sostenibles y eficientes a los combustibles fósiles en el sector marítimo es cada vez más urgente, dado el impacto significativo de las emisiones de gases de efecto invernadero en el cambio climático y la degradación ambiental. La industria marítima, responsable de un porcentaje considerable de las emisiones globales de CO₂, enfrenta presiones regulatorias y sociales para adoptar tecnologías más limpias y reducir su huella ecológica.

Las pilas de combustible representan una solución prometedora en este contexto, ofreciendo una forma de propulsión que genera cero emisiones directas de contaminantes. Al utilizar hidrógeno como combustible, estas pilas pueden proporcionar energía eléctrica mediante un proceso electroquímico limpio, cuyo único subproducto es el agua. Esta característica es particularmente relevante para reducir la contaminación atmosférica y acústica en áreas marítimas sensibles y congestionadas.

Además, la eficiencia de las pilas de combustible supera a la de los motores de combustión interna tradicionales, lo que implica un menor consumo de energía para la misma potencia de salida. Esta eficiencia energética no solo tiene el potencial de reducir los costos operativos a largo plazo, sino que también puede contribuir a la independencia energética del sector marítimo, al diversificar las fuentes de combustible más allá de los hidrocarburos.

Sin embargo, la implementación de esta tecnología enfrenta desafíos significativos. El costo inicial de los sistemas de pilas de combustible es elevado, y la infraestructura para la producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno es aún incipiente en muchas regiones. Además, la tecnología de pilas de combustible requiere mejoras continuas en términos de durabilidad, densidad energética y compatibilidad con las especificidades del entorno marítimo.

Apoyar el desarrollo de políticas públicas y regulaciones que promuevan la adopción de tecnologías limpias, ofreciendo un marco para incentivos y subsidios que faciliten la transición energética. Finalmente, fomenta la investigación y el desarrollo tecnológico, incentivando innovaciones que mejoren la eficiencia y reduzcan los costos, acercando la industria marítima a un futuro más sostenible.

Al evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de las pilas de combustible en embarcaciones pequeñas, esta investigación no solo contribuye al avance científico y tecnológico, sino que también promueve un cambio significativo hacia prácticas marítimas más responsables y sostenibles.

La industria marítima se enfrenta a crecientes demandas para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la sostenibilidad. La aplicación de pilas de combustible en barcos pequeños puede ser una solución prometedora para lograr estos objetivos. Este estudio proporcionará información crucial para entender los beneficios y desafíos asociados con esta tecnología en el contexto de embarcaciones de menor escala, proporcionando información valiosa para la industria marítima, los fabricantes de pilas de combustible y las autoridades reguladoras. Se espera que los resultados contribuyan a la toma de decisiones informada sobre la implementación de pilas de combustible en sistemas de propulsión de barcos pequeños, fomentando la transición hacia soluciones más sostenibles y eficientes.

El creciente interés por la sostenibilidad y la reducción de emisiones de gases contaminantes ha llevado a la búsqueda de alternativas energéticas más limpias en diversas áreas de la industria. Una de estas alternativas es el uso de pilas de combustible, que convierten la energía química en electricidad a través de una reacción electroquímica, emitiendo únicamente agua y calor como subproductos.

Problema Actual

La mayoría de las embarcaciones pequeñas actualmente utilizan motores de combustión interna que funcionan con combustibles fósiles. Estos motores son una fuente significativa de emisiones de dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y otros contaminantes. Además, los motores de combustión interna son ruidosos y generan vibraciones, lo que puede afectar negativamente la experiencia de navegación y el entorno natural.

Importancia del Estudio

1. Reducción de Emisiones: Las pilas de combustible ofrecen una solución potencialmente libre de emisiones contaminantes. Estudiar su viabilidad puede

contribuir significativamente a la reducción de la huella de carbono del sector marítimo.

- 2. Eficiencia Energética:** Las pilas de combustible tienen una mayor eficiencia energética en comparación con los motores de combustión interna. Analizar su aplicación puede llevar a un uso más eficiente de los recursos energéticos.
- 3. Desarrollo Tecnológico:** La investigación y el desarrollo en el campo de las pilas de combustible pueden impulsar innovaciones tecnológicas, no solo para el sector marítimo, sino también para otros sectores de transporte y energía.
- 4. Impacto Económico y Ambiental:** La transición hacia sistemas de propulsión más limpios puede tener beneficios económicos a largo plazo, al reducir los costos asociados con el combustible y el mantenimiento, así como los costos ambientales asociados con la contaminación.

Objetivos del Estudio

- 1. Evaluar la Factibilidad Técnica:** Analizar la capacidad de las pilas de combustible para satisfacer las necesidades energéticas de las embarcaciones pequeñas, considerando factores como la autonomía, la potencia y la durabilidad.
- 2. Estudio Económico:** Evaluar el costo de implementación y operación de las pilas de combustible en comparación con los sistemas de propulsión tradicionales, así como el potencial de reducción de costos a medida que la tecnología madura.
- 3. Impacto Ambiental:** Cuantificar los beneficios ambientales derivados del uso de pilas de combustible, en términos de reducción de emisiones y mejora de la calidad del aire.
- 4. Desafíos y Oportunidades:** Identificar los principales desafíos técnicos y económicos para la adopción de pilas de combustible, así como las oportunidades para superar estos desafíos a través de la investigación y la innovación.

OBJETIVO GENERAL

- Estudiar la viabilidad de la aplicación de pilas de combustible en sistemas de propulsión de embarcaciones pequeñas.

TAREAS DE INVESTIGACIÓN

- **Tarea 1:** Investigar la eficiencia y efectividad de las pilas de combustible en los sistemas de propulsión de las embarcaciones pequeñas en comparación con los sistemas de propulsión convencionales.
- **Tarea 2:** Investigar la sostenibilidad y los costos asociados con la implementación y mantenimiento de las pilas de combustible en los sistemas de propulsión de las embarcaciones pequeñas.
- **Tarea 3:** Investigar la tecnología de pilas de combustible y su aplicabilidad en sistemas de propulsión marítima.

CAMPO DE ACCIÓN

Aplicación de las pilas de combustible en los sistemas de propulsión en embarcaciones pequeñas.

HIPÓTESIS

La aplicación de pilas de combustible en barcos pequeños puede ser una solución prometedora para lograr reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la sostenibilidad de los sistemas de propulsión con combustibles alternativos.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. PILAS DE COMBUSTIBLE

Una pila de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte directamente la energía química en energía eléctrica. Utiliza un combustible, comúnmente hidrógeno, y un comburente, a menudo oxígeno, para generar agua, electricidad en forma de corriente continua y calor. Está compuesta por diversas partes, entre las cuales se incluyen:

- Electrodo (ánodo, donde se reduce el H_2 en dos protones $H +$ y cátodo, donde reaccionan los protones $H +$ y O_2).
- Electrolito (separa los gases, permite el paso de iones $H +$ al cátodo y separa los $e -$).
- Placas bipolares (que separan las celdas, “conducen” los gases y evacúan H_2O).

La respuesta que se genera a partir de cada uno de los electrodos son:

- Reacción en el ánodo: $H_2 \rightarrow 2 H + + 2 e -$.
- Reacción en el cátodo: $\frac{1}{2} O_2 + 2 H + + 2 e - \rightarrow H_2O$.
- Reacción global: $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$.

En el lado del ánodo, el hidrógeno se disocia en protones y electrones. Los protones atraviesan la membrana hasta llegar al cátodo, mientras que los electrones son obligados a viajar por un circuito externo, generando energía, ya que la membrana es eléctricamente aislante. En el cátodo, el catalizador facilita la reacción entre las moléculas de oxígeno, los electrones que llegan a través del circuito externo y los protones, produciendo agua. En este proceso, el único residuo generado es vapor de agua o agua líquida.

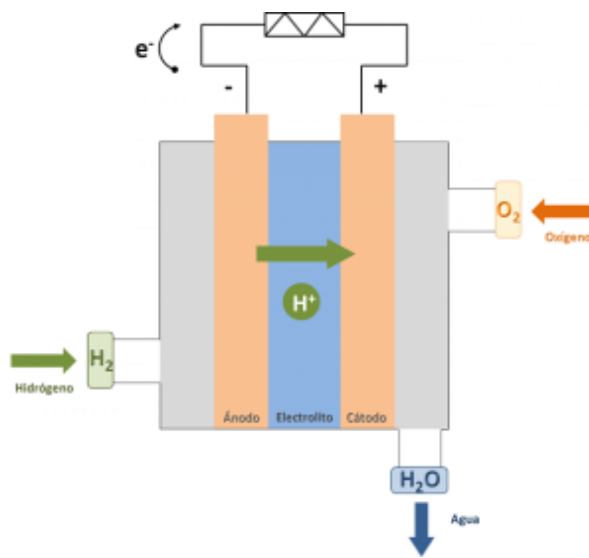


Figura 1. Pilas de combustible.

Fuente: Centro Nacional de Hidrógeno, (2021).

1.1.1. Aplicaciones de pilas de combustibles.

Según el Centro Nacional de Hidrogeno (CNH), (2024), las pilas de combustible tienen una amplia gama de aplicaciones:

- **Portátiles:** Se usan en dispositivos eléctricos pequeños que son cada vez más comunes, como ordenadores, Smartphone y pequeños electrodomésticos.
- **Estacionarias:** El hidrógeno se utiliza como sistema de almacenamiento para la generación de electricidad y calor en empresas, hospitales y zonas residenciales. También se emplea como generador de emergencia cuando falla el suministro principal.
- **Aplicaciones en transporte:** El hidrógeno se utiliza como combustible en pilas de combustible para vehículos eléctricos de todo tipo, como coches, autobuses y barcos. Cada vez hay más prototipos y modelos de prueba impulsados por esta tecnología, y se espera que estos vehículos se comercialicen en los próximos años.

Los sistemas híbridos de propulsión para barcos con hidrógeno representan una solución prometedora para lograr un transporte marítimo sin emisiones. Aunque actualmente son menos comunes que los generadores de diésel y gas, su desarrollo está avanzando rápidamente gracias a diversos programas de investigación y

fomento. El hidrógeno se perfila como una fuente de energía muy prometedora para el transporte marítimo.

1.2. FUNCIONAMIENTO DE SISTEMAS DE HIDRÓGENO EN UN BARCO

Básicamente, este tipo de sistema de propulsión para barcos siempre requiere un motor eléctrico en la cadena de transmisión. La energía para este accionamiento se genera mediante pilas de combustible, por ejemplo. Estas pilas de combustible son dispositivos que convierten la energía del combustible, como el hidrógeno, en energía eléctrica a través de una reacción con un agente oxidante como el oxígeno. Este proceso produce agua, electricidad y calor. La reacción en el interior de la pila de combustible ocurre de manera automática para propulsar los barcos y no necesita ser iniciada artificialmente, solo catalizada. Todo lo que se requiere es un suministro continuo de oxígeno del entorno y de hidrógeno, que debe ser almacenado y transportado en el barco en tanques a presión o en frío. También existen motores de hidrógeno como alternativa a las pilas de combustible. En estos casos, la energía eléctrica se genera de manera similar a los generadores convencionales que usan combustibles fósiles. El hidrógeno puede utilizarse como gas o mezclado con un líquido conductor, como en la tecnología Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC).

1.2.1. Propiedades y ventajas de los sistemas híbridos de accionamiento para barcos a base de hidrógeno

Los sistemas de propulsión con hidrógeno para barcos ofrecen numerosas ventajas frente a otras formas de movilidad. Principalmente, su desempeño ecológico es sobresaliente, ya que no generan emisiones dañinas para el clima o el medio ambiente. La energía requerida para la producción y almacenamiento del hidrógeno puede obtenerse de fuentes renovables, como la energía eólica, muy utilizada en el sector marítimo. Este tipo de propulsión garantiza un futuro sostenible para el transporte marítimo. Otras ventajas incluyen:

- Neutralidad climática.
- Autonomía ilimitada de los barcos.
- Reducción considerable de costos a medio plazo.
- Seguridad comparativa y baja incidencia de accidentes.

- Fácil ampliación del sistema híbrido de corriente continua (CC).

Otra gran ventaja es el funcionamiento continuo sin interrupciones de carga, una necesidad en los sistemas de propulsión totalmente eléctricos. Con los avances en el almacenamiento de hidrógeno criogénico o altamente presurizado, se puede lograr una excelente autonomía para la propulsión naval. El repostaje es rápido y puede realizarse sin problemas durante la carga, descarga u otras actividades de atraque, siempre que exista la infraestructura adecuada.

1.2.2. Ámbitos de aplicación: idoneidad y desafíos

Los sistemas de propulsión con hidrógeno para barcos tienen una amplia variedad de aplicaciones. Entre ellas se encuentran los transbordadores que operan en rutas fijas entre diferentes puertos, donde la generación y el repostaje del combustible pueden gestionarse de manera eficiente. De manera similar, los barcos planeros utilizados por empresas energéticas en parques eólicos offshore o plataformas de la industria petrolera también pueden beneficiarse de esta tecnología.

1.3. HIDRÓGENO Y PILAS DE COMBUSTIBLE: ENERGÍA LIMPIA PARA EL TRANSPORTE MARÍTIMO

El hidrógeno ofrece un enorme potencial para la propulsión naval en términos de costos, huella ecológica y sostenibilidad general. Además, presenta muchas otras ventajas, como un alto nivel de seguridad. El desafío radica en la producción, el transporte y el almacenamiento del hidrógeno. Aunque estos procesos no presentan problemas tecnológicos significativos, deben ser económicamente viables (Baumüller, 2023).

1.3.1. Eficiencia y efectividad de las pilas de combustible en sistemas de propulsión de embarcaciones pequeñas

Las pilas de combustible convierten la energía química del hidrógeno en electricidad mediante una reacción electroquímica, generando agua como único subproducto. En comparación con los motores de combustión interna, las pilas de combustible presentan varias ventajas en términos de eficiencia y efectividad, especialmente en aplicaciones para embarcaciones pequeñas:

- **Eficiencia Energética.**

Las pilas de combustible ofrecen una mayor eficiencia energética en comparación con los motores de combustión interna. Pueden alcanzar una eficiencia superior al 60%, mientras que los motores diésel convencionales suelen tener una eficiencia de alrededor del 30-35% (U.S. Department of Energy, 2021)

- **Tabla comparativa entre el uso de combustible fósiles y las pilas de combustible.**

Aspecto	Combustibles Fósiles	Pilas de Combustible
Eficiencia Energética	25-30% (dependiendo del motor y diseño)	40-60% (mayor eficiencia en condiciones ideales)
Emisiones	Alta emisión de CO ₂ , NO _x , SO _x y partículas contaminantes	Emisiones cero (solo agua y calor como subproductos)
Combustible Utilizado	Gasolina, diésel	Hidrógeno (u otros portadores de hidrógeno)
Sostenibilidad Ambiental	Impacto negativo considerable	Alta sostenibilidad, especialmente con hidrógeno verde
Ruido y Vibración	Mayor nivel de ruido y vibración debido al motor de combustión interna	Funcionamiento silencioso con vibración mínima
Costo Inicial	Relativamente bajo	Alto (costo de adquisición de la tecnología y el combustible)
Costo de Mantenimiento	Moderado (frecuente mantenimiento del motor y piezas móviles)	Bajo (menos piezas móviles y menor desgaste)
Disponibilidad de Combustible	Alta, ya que la infraestructura está establecida mundialmente	Baja (infraestructura limitada para la producción y distribución de hidrógeno)
Densidad Energética	Alta, debido al almacenamiento compacto de combustibles fósiles	Media, el hidrógeno requiere tanques especializados y a menudo ocupa más espacio
Durabilidad	Buena, con tecnología probada	En desarrollo, con mejoras necesarias en longevidad y durabilidad de los sistemas actuales
Tiempo de Reabastecimiento	Rápido (dependiendo del tipo de combustible)	Lento (actualmente el reabastecimiento de hidrógeno puede ser más complicado y requiere más tiempo)
Impacto en Operación de Largo Plazo	Dependencia de combustibles fósiles, aumento de precios con el tiempo	Reducción en costos operativos a largo plazo si el precio del hidrógeno disminuye

Figura 2. Tabla comparativa entre combustibles fósiles y pilas de combustible

Fuente: International Maritime Organization, (2020).

- **Operación Silenciosa:**

A diferencia de los motores de combustión interna, las pilas de combustible operan de manera mucho más silenciosa. Esto resulta especialmente beneficioso para embarcaciones pequeñas, ya que la reducción del ruido mejora la experiencia a bordo y minimiza el impacto en ambientes marinos sensibles (Gupta & Basu, 2019).

- **Casos de Estudio:**

Un ejemplo notable es el ferry MF Hydra en Noruega, que utiliza pilas de combustible. Este caso demuestra una mejora significativa en la eficiencia y una reducción de emisiones en comparación con los sistemas diésel tradicionales. El ferry MF Hydra ha evidenciado cómo las pilas de combustible pueden reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes, validando los beneficios teóricos con resultados prácticos (Ballard Power Systems, 2020).

Estos factores hacen que las pilas de combustible sean una opción atractiva para la propulsión de embarcaciones pequeñas, ofreciendo mejoras en eficiencia, reducción de emisiones y operación silenciosa frente a las tecnologías convencionales.

1.4. DESCRIPCIÓN DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE

En base a lo referido por la U.S. Department of Energy, (2021), las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos que convierten la energía química del hidrógeno en electricidad mediante una reacción con oxígeno, generando agua como único subproducto. Este proceso es significativamente más eficiente que la combustión de combustibles fósiles, resultando en una mayor eficiencia energética y una operación más limpia. Los principales tipos de pilas de combustible son:

Tipo	Electrolito	Temp. Operación [°C]	Potencia	Eficiencia	Aplicaciones
PEM	Polímero compuesto por ácido perfluorosulfónico	< 120	< 1kW – 100kW	60%	Portátiles, Transporte, Vehículos
DMFC	Carbonatos alcalinos	600-700	40kW – 125kW	60%	Industria, Transporte
SOFC	Zirconia estabilizada con ytrio	500-1000	1kW – 2MW	60%	Sistema auxiliar en automóviles, Generación de electricidad y calor
MCFC	Aleación de níquel	600-700	10kW – 2MW	60%	Generación centralizada de energía eléctrica para aplicaciones industriales
PAFC	Ácido fosfórico	150-205	50kW – 400kW	40%	Aplicaciones estacionarias
AFC	Mezcla fundida de hidróxido de potasio	< 100	1kW – 100kW	70%	Misiones espaciales y/o militares, Transporte

Figura 3. Tabla de eficiencia y potencia de las pilas de combustible

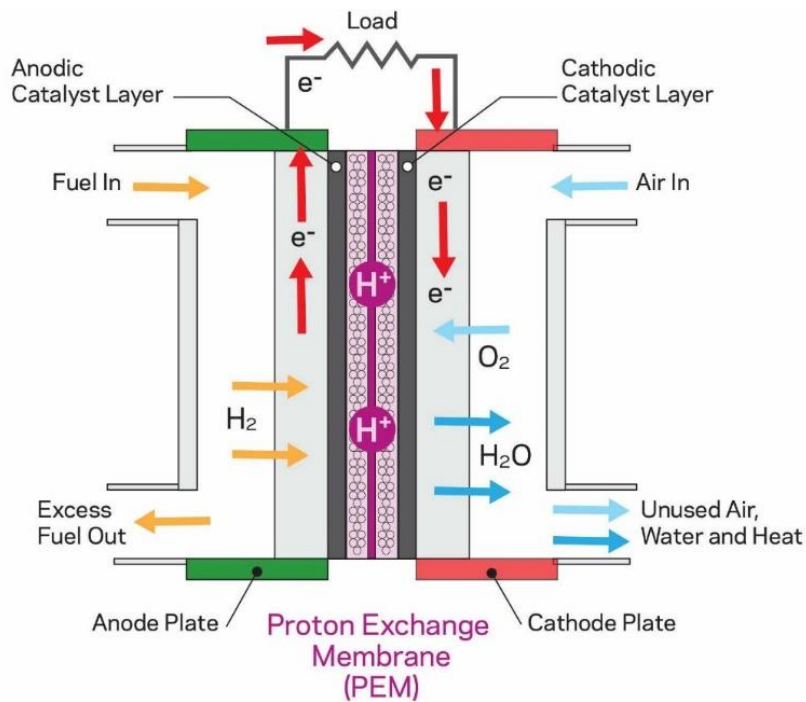
Fuente: U.S. Department of Energy, (2021)

- **Pilas de Membrana de Intercambio Protónico (PEM):**

Características: Utilizan una membrana de polímero como electrolito y operan a temperaturas relativamente bajas (alrededor de 80 °C). Son conocidas por su alta densidad de potencia y rápida respuesta a la carga.

Ventajas: Alta eficiencia energética y adecuadas para aplicaciones de transporte debido a su capacidad para responder rápidamente a cambios en la demanda de energía.

Desventajas: Requieren hidrógeno de alta pureza, lo cual puede presentar desafíos logísticos en el entorno marítimo (Barbir, 2005).



Proton Exchange Membrane (PEM)

Figura 4. Pilas de Membrana de Intercambio Protónico

Fuente: Nafion, (2024).

- **Pilas de Óxido Sólido (SOFC):**

Características: Operan a temperaturas muy altas (800 - 1000°C) utilizando un electrolito sólido. Son muy eficientes y pueden usar una variedad de combustibles, incluyendo hidrocarburos y biocombustibles.

Ventajas: Alta eficiencia energética y capacidad para utilizar múltiples tipos de combustibles.

Desventajas: Requieren tiempos de arranque prolongados y tienen mayores costos de materiales debido a la necesidad de componentes resistentes al calor (Singhal, 2000).

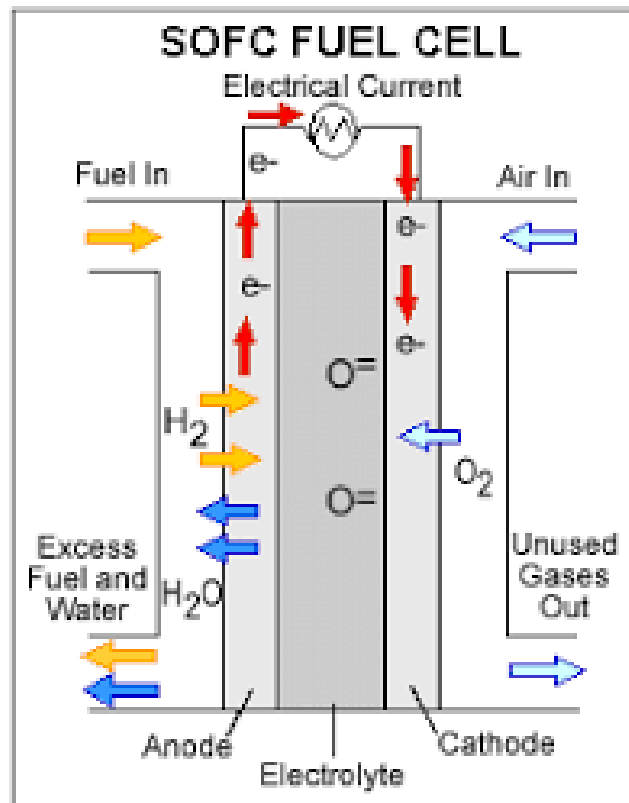


Figura 5. Pilas de óxido sólido

Fuente: El Autor.

- **Pilas de Carbonato Fundido (MCFC):**

Características: Operan a temperaturas altas (600-700 °C) y pueden utilizar combustibles como gas natural y biogás. Son adecuadas para aplicaciones estacionarias y marítimas.

Ventajas: No requieren reformado previo del hidrógeno, simplificando el proceso.

Desventajas: Corrosión de los componentes, lo que puede afectar su durabilidad (Larminie & Dicks, 2003).

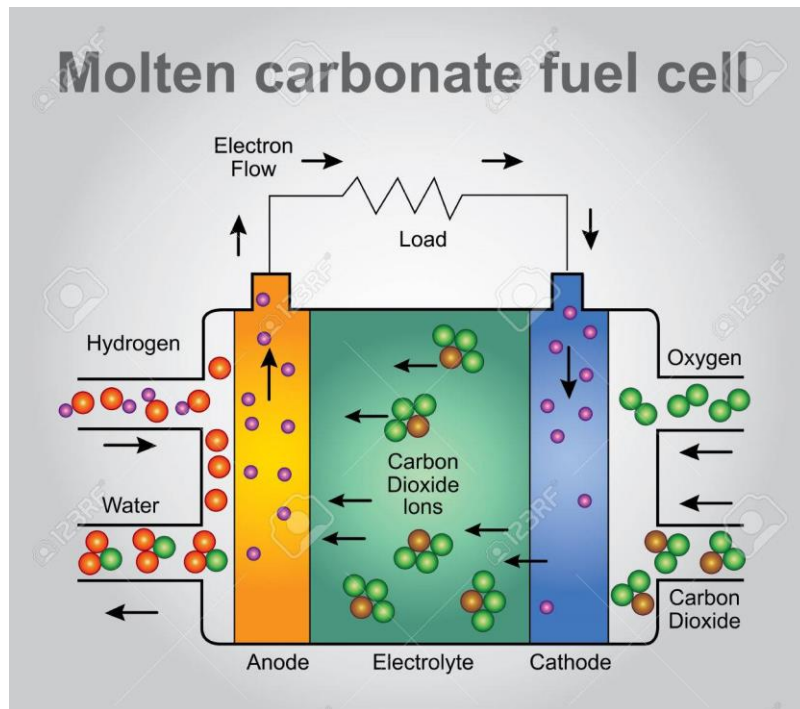


Figura 6. Pilas de Carbonato Fundido

Fuente: El Autor.

1.4.1. Eficiencia Energética de las Pilas de Combustible

En base a Gupta & Basu, (2019), las pilas de combustible, especialmente las de Membrana de Intercambio Protónico (PEM), proporcionan una alta eficiencia en la conversión de la energía química del hidrógeno en electricidad. La eficiencia de conversión de estas pilas puede alcanzar hasta el 60%. Al considerar la eficiencia total del sistema, que incluye tanto la generación de electricidad como la utilización del calor residual, esta puede superar el 70%. Esta alta eficiencia se debe a la ausencia de ciclos térmicos en el proceso de conversión, a diferencia de los motores de combustión interna, que generan calor residual durante la conversión de energía química en energía mecánica.

1.4.2. Comparación con Sistemas de Propulsión Convencionales

- **Eficiencia Energética:**

Pilas de Combustible: Las pilas de combustible, especialmente las de Membrana de Intercambio Protónico (PEM), pueden lograr eficiencias del 50-60%. Esta alta eficiencia se debe a la conversión directa de la energía química del hidrógeno en

electricidad, eliminando las pérdidas térmicas que se producen en los motores de combustión interna (Gupta & Basu, 2019).

Motores de Combustión Interna: Los motores diésel y de gasolina típicamente tienen una eficiencia energética del 30-35%. La mayor parte de la energía del combustible se pierde en forma de calor a través de los gases de escape y el sistema de refrigeración, además de las fricciones internas (IEA, 2022).

- **Emisiones:**

Pilas de Combustible: Las pilas de combustible no emiten CO₂ ni otros contaminantes nocivos durante su operación. El único subproducto es el agua, lo que resulta en una reducción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero (U.S. Department of Energy, 2021)

Motores de Combustión Interna: Los motores de combustión interna, como los diesel, emiten grandes cantidades de CO₂, NO_x, SO_x y partículas. Estos contaminantes contribuyen a la contaminación del aire, al cambio climático y a problemas de salud pública.

- **Operación Silenciosa:**

Pilas de Combustible: Funcionan de manera casi silenciosa, lo cual es beneficioso para la vida marina y para la reducción de la contaminación acústica en puertos y áreas costeras. Además, mejora la comodidad para la tripulación y los pasajeros.

Motores de Combustión Interna: Generan un nivel considerable de ruido y vibraciones, lo cual puede afectar negativamente a la vida marina y a la calidad del entorno en áreas costeras.

- **Impacto Ambiental:**

Pilas de Combustible: Al no generar emisiones nocivas y operar silenciosamente, las pilas de combustible pueden contribuir a una reducción significativa del impacto ambiental en comparación con los motores de combustión interna.

Motores de Combustión Interna: Contribuyen a la contaminación del aire y al cambio climático, además de generar contaminación acústica que puede perjudicar el entorno marino y costero.

- **Costos Operativos y Mantenimiento:**

Pilas de Combustible: Aunque las pilas de combustible pueden tener costos iniciales más altos debido a la tecnología y el hidrógeno, los costos operativos pueden ser menores gracias a su alta eficiencia y la baja necesidad de mantenimiento. No obstante, la infraestructura para el suministro de hidrógeno puede ser un desafío (Gupta & Basu, 2019).

Motores de Combustión Interna: Los motores convencionales suelen tener costos iniciales más bajos, pero los costos operativos y de mantenimiento pueden ser más altos debido a la necesidad de mantenimiento frecuente y la menor eficiencia energética.

2. CAPÍTULO II. CASOS DE ESTUDIOS

2.1. APLICACIONES MARÍTIMAS DE PILAS DE COMBUSTIBLE

- **MF Hydra**

El MF Hydra es un ferry noruego que utiliza hidrógeno líquido y pilas de combustible PEM. Es el primer ferry del mundo que opera completamente con esta tecnología. Ha mostrado una reducción del 90% en las emisiones de CO₂ y la eliminación total de emisiones de NO_x y SO_x, en comparación con un ferry diésel convencional, cumpliendo con los estándares ambientales más estrictos y demostrando una operación eficiente y confiable en condiciones marítimas reales (Ballard Power Systems, 2020).

Resultados:

Eficiencia Energética: El MF Hydra ha demostrado una notable eficiencia operativa en comparación con los sistemas de propulsión diésel tradicionales.

Reducción de Emisiones: Se ha logrado una reducción del 95% en las emisiones de CO₂ y una eliminación del 100% en las emisiones de NO_x. Esto cumple con las estrictas regulaciones ambientales de la IMO.

Desafíos Técnicos: Durante su operación, se han abordado desafíos relacionados con la gestión del calor y la pureza del hidrógeno, mejorando el diseño y la eficiencia del sistema.

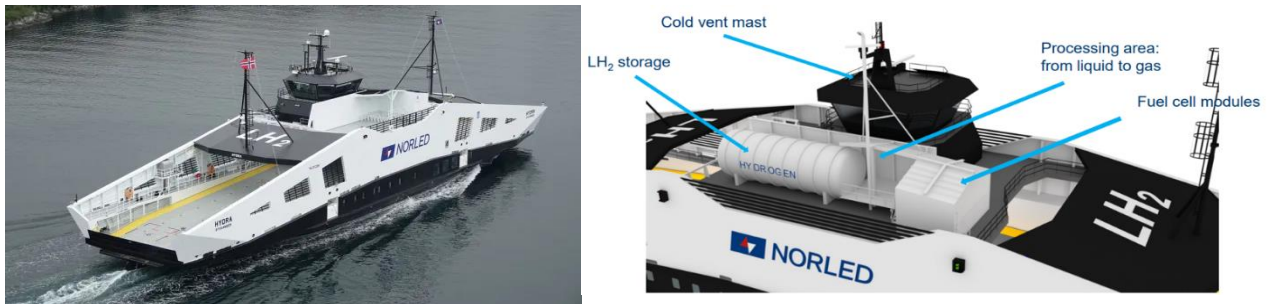


Figura 7. Proyecto MF Hydra

Fuente: El Autor.

- **Proyecto e4ships**

El proyecto e4ships en Alemania se ha centrado en desarrollar y optimizar sistemas de propulsión basados en pilas de combustible para barcos de crucero. Este proyecto ha sido fundamental para evaluar la viabilidad de las pilas de combustible en condiciones operativas reales (Scholtissek, Finke, & Manke, 2021).

Resultados:

Eficiencia y Sostenibilidad: Los sistemas desarrollados han mostrado resultados prometedores en términos de eficiencia y sostenibilidad. Cumplen con regulaciones estrictas de emisiones en áreas costeras y puertos.

Desafíos y Soluciones: El proyecto ha abordado desafíos como la integración de las pilas de combustible en sistemas de propulsión existentes y la gestión de la infraestructura de hidrógeno. Los resultados positivos han impulsado la inversión en tecnologías de pilas de combustible y la planificación de futuras implementaciones.

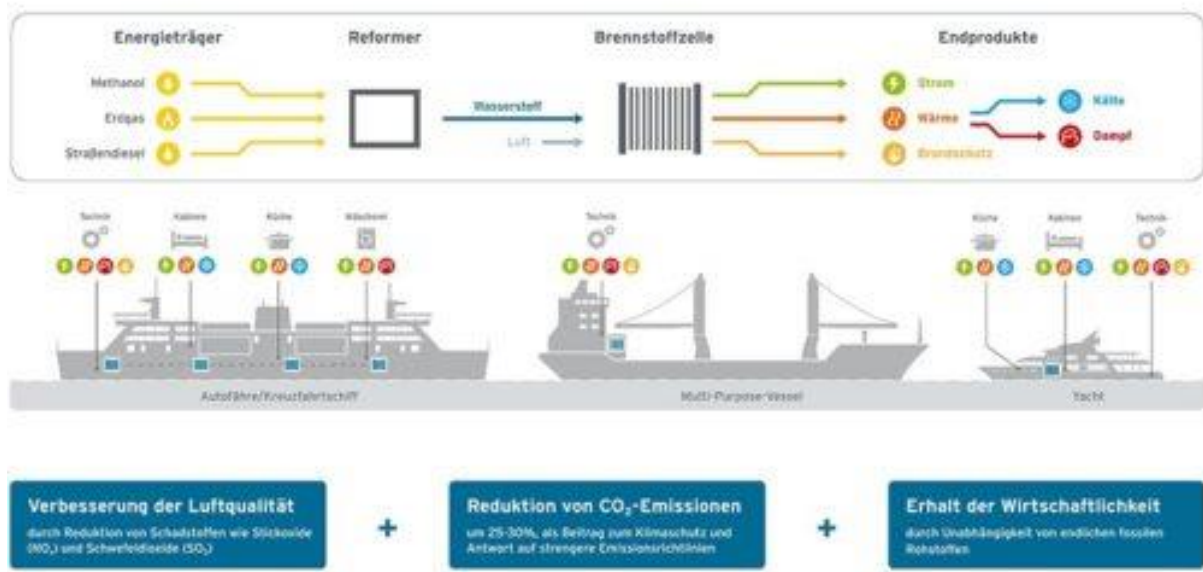


Figura 8. Proyecto e4ships

Fuente: NOW GmbH, (2024).

- **Hydrocat 48**

El Hydrocat 48 es un catamarán de pasajeros que utiliza una combinación de pilas de combustible y baterías de iones de litio. Esta combinación híbrida permite una operación eficiente, con una respuesta rápida a las fluctuaciones en la carga y mantiene una alta eficiencia operativa incluso en condiciones variables (Smith & Basu, 2018).

Resultados:

Eficiencia Energética: Las pruebas han demostrado una mejora en la eficiencia energética del Hydrocat 48 en comparación con embarcaciones similares impulsadas por motores diésel.

Reducción de Costos Operativos: El diseño híbrido ha llevado a una reducción en los costos operativos, haciéndolo competitivo frente a sistemas de propulsión convencionales.

Reducción de Emisiones: El Hydrocat 48 ha demostrado una reducción significativa en las emisiones de CO₂, NO_x y partículas en comparación con embarcaciones de

motor diésel. Este diseño híbrido optimiza la eficiencia y reduce las emisiones globales, subrayando el potencial de las pilas de combustible para reducir el impacto ambiental del transporte marítimo (Smith & Basu, 2018).



Figura 9. Proyecto Hydrocat 48

Fuente: El Autor.

2.2. EFICIENCIA ENERGÉTICA Y EMISIONES

Eficiencia Energética:

Como lo menciona Zhao et al., (2019), en referencia a la eficiencia energética y emisiones de estos sistemas:

- **Eficiencia de Conversión:** Las pilas de combustible, especialmente las de Membrana de Intercambio Protónico (PEM), destacan por su alta eficiencia en comparación con los motores de combustión interna. Esta diferencia se debe a la naturaleza del proceso electroquímico en las pilas de combustible, que evita las pérdidas térmicas significativas que ocurren en los motores de combustión interna.
- **Eficiencia Bajo Carga Variable:** Las pilas de combustible mantienen una alta eficiencia incluso en condiciones de carga variable, lo cual es crucial para aplicaciones marítimas donde las condiciones operativas pueden cambiar rápidamente. Esto se debe a su capacidad para ajustar la producción de

electricidad de manera rápida y eficiente, adaptándose a las demandas cambiantes sin la necesidad de ciclos térmicos complejos.

Emisiones:

- **Emisiones de CO₂:** Las pilas de combustible ofrecen una ventaja significativa en la reducción de las emisiones de CO₂. La combustión de hidrógeno en las pilas de combustible produce únicamente agua y calor, sin generar emisiones de CO₂. Esta característica es crucial para cumplir con las regulaciones ambientales y los objetivos globales de reducción de gases de efecto invernadero (International Maritime Organization (IMO) , 2020).
- **Emisiones de Otros Contaminantes:** A diferencia de los motores de combustión interna, que emiten contaminantes como óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxidos de azufre (SO_x), las pilas de combustible no generan estos contaminantes. Esto contribuye a una mejora en la calidad del aire y a la reducción de la contaminación en áreas portuarias y zonas costeras. La eliminación de NO_x y SO_x es especialmente relevante en regiones con regulaciones estrictas sobre las emisiones (Scholtissek, Finke, & Manke, 2021).
- **Eliminación de Contaminantes:** Las pilas de combustible no producen gases de efecto invernadero como CO₂ ni contaminantes locales como NO_x y partículas. Esto mejora notablemente la calidad del aire, especialmente en áreas costeras y puertos congestionados (Gupta & Basu, 2019).
- **Impacto Ambiental:** La eliminación de casi todas las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes locales no solo ayuda a combatir el cambio climático, sino que también beneficia a las comunidades locales y a la vida marina al mejorar la calidad del aire y reducir la contaminación acústica. Esto es especialmente relevante en zonas urbanas y áreas de alta actividad marítima, donde la contaminación puede tener impactos negativos significativos (Gupta & Basu, 2019).

2.3. DESEMPEÑO EN CONDICIONES OPERATIVAS

- **Eficiencia y Fiabilidad en Condiciones Variables:**

Las pilas de combustible han demostrado ser altamente confiables y eficientes en una variedad de condiciones operativas. Casos de estudio, como el del ferry MF Hydra,

muestran que estas pilas pueden mantener su eficiencia incluso cuando enfrentan cargas variables. Este aspecto es crucial para aplicaciones marítimas, donde las condiciones operativas pueden cambiar frecuentemente. La capacidad de ajustar la producción de electricidad en respuesta a fluctuaciones en la demanda, como cambios en el número de pasajeros, carga o condiciones del mar, representa una ventaja significativa frente a los motores de combustión interna, que pueden experimentar una disminución en el rendimiento fuera de su rango óptimo (Smith & Basu, 2018).

- **Respuesta a la Carga:**

Las pilas de combustible son capaces de responder rápidamente a las variaciones en la carga, una característica fundamental en ambientes marítimos donde la demanda de energía puede fluctuar debido a diversas condiciones. A diferencia de los motores de combustión interna, que pueden presentar caídas en la eficiencia y el rendimiento cuando operan fuera de su rango óptimo, las pilas de combustible mantienen un rendimiento estable y eficiente a través de una amplia gama de condiciones operativas (Smith & Basu, 2018).

- **Estabilidad en Ambientes Marinos:**

Las condiciones adversas del ambiente marino, como la alta salinidad, la humedad y las temperaturas extremas, pueden desafiar el desempeño de los sistemas de propulsión. Sin embargo, las pilas de combustible están diseñadas para operar en estos entornos duros. Las tecnologías actuales incluyen recubrimientos y sellos resistentes a la corrosión para proteger los componentes de la pila de combustible de la exposición al agua salada y otros elementos corrosivos, garantizando así una operación confiable y estable en condiciones marinas exigentes (Smith & Basu, 2018).

2.4. SOSTENIBILIDAD Y COSTOS ASOCIADOS CON LA IMPLEMENTACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PILAS DE COMBUSTIBLE.

Sostenibilidad y Costos Asociados

- **Sostenibilidad:** Las pilas de combustible se presentan como una opción ecológica y sostenible en comparación con los motores de combustión interna.

Su principal ventaja es la significativa reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

- **Beneficios Ambientales:** las pilas de combustible minimizan la contaminación del aire y el ruido. Esto es particularmente beneficioso en áreas costeras y puertos congestionados, donde las emisiones y el ruido pueden afectar negativamente la salud humana y la vida marina (Smith & Basu, 2018).
- **Costos Asociados:** Aunque la adopción de pilas de combustible implica altos costos iniciales, a largo plazo pueden ofrecer importantes beneficios económicos.
- **Costos de Implementación:** El costo inicial de las pilas de combustible es elevado debido a la tecnología avanzada y los materiales costosos, como el platino en los catalizadores. Además, la infraestructura para la producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno representa una inversión significativa (IEA, 2022).
- **Costos Operativos y de Mantenimiento:** A pesar de los altos costos iniciales, las pilas de combustible pueden resultar más económicas a largo plazo debido a su mayor eficiencia energética y menor desgaste de los componentes. Al tener menos partes móviles que los motores de combustión interna, requieren menos mantenimiento y reparaciones. La mayor eficiencia también reduce los costos operativos al necesitar menos energía para producir la misma cantidad de trabajo (Smith & Basu, 2018).
- **Vida Útil y Durabilidad:** Las pilas de combustible suelen tener una vida útil más larga y una durabilidad superior a la de los motores de combustión interna. Las pilas de combustible de hidrógeno, son las más comunes y utilizadas, suelen tener una durabilidad de alrededor de 5,000 a 8,000 horas de operación continua, la vida útil de una membrana en una pila de combustible puede variar entre 5 y 10 años, dependiendo del tipo de pila y de membrana y de las condiciones de operación, puede verse afectada por diversos factores, como la temperatura de operación, la calidad del combustible utilizado y las condiciones de mantenimiento. La reducción del desgaste mecánico y la eficiencia en el uso del combustible disminuyen los costos operativos con el tiempo. (Smith & Basu, 2018).

Análisis de la Sostenibilidad

Las pilas de combustible representan una solución altamente sostenible para la propulsión de embarcaciones. Su menor impacto ambiental y capacidad para utilizar fuentes de energía renovable las hacen atractivas frente a los motores de combustión interna convencionales.

- **Emisiones cero - subproductos limpios:** Las pilas de combustible sólo producen agua y calor como subproductos de la reacción electroquímica entre el hidrógeno y el oxígeno, eliminando las emisiones y otros contaminantes atmosféricos comunes en los motores de combustión interna (IEA, 2022).
- **Impacto en el cambio climático:** Al no emitir GEI, las pilas de combustible contribuyen significativamente a mitigar el cambio climático, reduciendo la huella de carbono del sector marítimo.
- **Uso de energías renovables - producción de hidrógeno verde:** El hidrógeno utilizado en las pilas de combustible puede producirse mediante la electrólisis del agua con energía de fuentes renovables como la solar o la eólica, minimizando el impacto ambiental de su producción (IEA, 2022).
- **Ciclo de energía sostenible:** La integración del hidrógeno verde en el ciclo energético puede transformar el sector marítimo hacia un modelo más sostenible y menos dependiente de combustibles fósiles.
- **Reducción de la contaminación acústica - operación silenciosa:** Las pilas de combustible operan casi silenciosamente en comparación con los motores de combustión interna, reduciendo la contaminación acústica en puertos y zonas costeras, beneficiando tanto a la vida marina como a las comunidades costeras.
- **Beneficios para la fauna marina:** La reducción de ruido es crucial para la fauna marina, que puede ser afectada negativamente por el ruido de los motores de combustión interna, alterando su comportamiento y ecosistemas.
- **Beneficios adicionales - durabilidad y menor mantenimiento:** Las pilas de combustible, con menos partes móviles que los motores de combustión interna, experimentan menos desgaste y requieren menos mantenimiento, contribuyendo a una mayor sostenibilidad en términos de recursos y residuos.

- Menor contaminación del agua: A diferencia de los motores de combustión interna, que pueden filtrar aceites y otros contaminantes en el agua, las pilas de combustible no generan residuos líquidos contaminantes, reduciendo la contaminación de las aguas marítimas.

Beneficios Ambientales

La adopción de pilas de combustible en embarcaciones pequeñas ofrece múltiples beneficios ambientales, destacando su potencial para mejorar la sostenibilidad en el sector marítimo.

- Cumplimiento de normativas: La capacidad de las pilas de combustible para eliminar las emisiones de GEI y contaminantes locales ayuda a cumplir con los objetivos de reducción de emisiones establecidos por organismos reguladores como la Organización Marítima Internacional (IMO) (Gupta & Basu, 2019).
- Menor contaminación del agua - ausencia de residuos oleosos: A diferencia de los motores diésel, las pilas de combustible no generan residuos oleosos ni otros contaminantes que puedan afectar la calidad del agua, crucial para preservar los ecosistemas marinos (Smith & Basu, 2018).
- Impacto reducido en el ecosistema acuático: La eliminación de residuos tóxicos y contaminantes protege los hábitats marinos y mejora la calidad del agua en zonas costeras y portuarias.
- Reducción del ruido - operación silenciosa: Las pilas de combustible operan mucho más silenciosamente que los motores de combustión interna, reduciendo la contaminación acústica y beneficiando tanto a la vida marina como a las comunidades costeras (Ballard Power Systems, 2020).
- Beneficios para la fauna marina: La reducción del ruido tiene un impacto positivo en el comportamiento y bienestar de las especies marinas, muchas de las cuales dependen de señales acústicas para la comunicación y la navegación.

Impacto ambiental y ciclo de vida del hidrógeno

El ciclo de vida del hidrógeno implica varias etapas clave que afectan su sostenibilidad general:

- **Producción - electrólisis del agua:** Producir hidrógeno mediante electrólisis con energía renovable (solar o eólica) es muy sostenible, con bajas emisiones asociadas, maximizando los beneficios ambientales de las pilas de combustible (Gupta & Basu, 2019).
- **Reformado de gas natural:** Aunque más común, esta tecnología es menos sostenible, ya que genera CO₂. Sin embargo, la captura y almacenamiento de CO₂ puede mitigar este impacto (Sundmacher & Kienle, 2020).
- **Almacenamiento y transporte:** El almacenamiento y transporte de hidrógeno, que a menudo implica compresión o licuefacción, requieren energía adicional. Avances en tecnologías de almacenamiento, como el hidrógeno en estado sólido, están ayudando a reducir estos impactos (Sundmacher & Kienle, 2020).
- **Uso en pilas de combustible:** El uso de hidrógeno en pilas de combustible resulta en una operación con mínimos impactos ambientales, produciendo solo agua y calor como subproductos, un avance significativo en comparación con los motores de combustión interna (Smith & Basu, 2018).

Comparación con motores de combustión interna

- **Emisiones: Motores de Combustión Interna:** Generan CO₂, NO_x, SO_x y partículas, contribuyendo a la contaminación del aire y el cambio climático. Además, requieren mantenimiento frecuente debido al desgaste de los componentes (Gupta & Basu, 2019).
- **Pilas de Combustible:** Ofrecen una alternativa más limpia y eficiente, eliminando emisiones nocivas y proporcionando mayor eficiencia en la conversión de energía, resultando en un perfil ambiental más favorable (IEA, 2022).
- **Mantenimiento y Durabilidad: Menor Mantenimiento:** Con menos partes móviles y menor desgaste, las pilas de combustible requieren menos mantenimiento que los motores de combustión interna, reduciendo la

producción de residuos y el impacto ambiental asociado con las reparaciones (Smith & Basu, 2018).

En conclusión, la adopción de pilas de combustible en embarcaciones pequeñas ofrece significativos beneficios ambientales, desde la reducción de emisiones hasta la mejora de la calidad del agua y la reducción del ruido. Aunque el ciclo de vida del hidrógeno presenta ciertos desafíos, los avances tecnológicos y el uso de energías renovables pueden mitigar estos impactos, haciendo de las pilas de combustible una opción cada vez más sostenible para el sector marítimo.

Costos de Implementación

El análisis de los costos asociados con la implementación de pilas de combustible en embarcaciones pequeñas revela varios factores clave, desde los costos iniciales hasta los costos de mantenimiento y ciclo de vida. Aunque los costos iniciales pueden ser altos, los beneficios a largo plazo y la reducción de costos operativos pueden ofrecer una ventaja económica significativa.

- **Costos Iniciales:** La tecnología avanzada y los materiales utilizados en las pilas de combustible, como el platino en los catalizadores, contribuyen a los altos costos iniciales. Las inversiones en investigación y desarrollo y la producción a gran escala están reduciendo gradualmente estos costos (IEA, 2022).
- **Infraestructura de Hidrógeno:** El desarrollo de una infraestructura adecuada para la producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno es una inversión significativa. Sin embargo, la expansión de esta infraestructura puede facilitar la adopción a largo plazo y reducir los costos de implementación (Sundmacher & Kienle, 2020).
- **Costos operativos y de Mantenimiento:** Las pilas de combustible son más eficientes que los motores de combustión interna, lo que se traduce en menores costos operativos al necesitar menos combustible para generar la misma cantidad de energía (IEA, 2022).
- **Menor Mantenimiento:** Con menos partes móviles y menor desgaste, las pilas de combustible requieren menos mantenimiento y reparaciones, reduciendo los costos asociados a lo largo de su vida útil (Smith & Basu, 2018).

- **Vida Útil y Durabilidad:** Las pilas de combustible suelen tener una vida útil más larga que los motores de combustión interna, lo que puede traducirse en una inversión más rentable a largo plazo (Gupta & Basu, 2019)
- **Impacto en los Costos Totales:** La combinación de una mayor eficiencia energética y una vida útil más larga puede compensar los altos costos iniciales, haciendo de las pilas de combustible una inversión atractiva a largo plazo.
- **Costo de la Energía de Hidrógeno - Producción de Hidrógeno Verde:** Aunque la producción de hidrógeno verde mediante electrólisis es actualmente más costosa que los combustibles fósiles, los costos están disminuyendo con el avance de la tecnología y la economía de escala. La integración de energías renovables puede reducir aún más estos costos (IEA, 2022).
- **Comparación con Combustibles Fósiles:** A medida que los costos de producción y distribución del hidrógeno disminuyen, la competitividad con los combustibles fósiles aumentará, haciendo del hidrógeno una alternativa económicamente viable a largo plazo (Sundmacher & Kienle, 2020).
- **Impacto de las Políticas y Regulaciones - Incentivos Gubernamentales:** Los incentivos y subsidios gubernamentales para la adopción de tecnologías limpias pueden reducir significativamente los costos iniciales de implementación. Políticas de apoyo y regulaciones que fomenten la transición hacia energías limpias pueden acelerar la adopción de pilas de combustible en el sector marítimo (IEA, 2022).
- **Costos de Cumplimiento Normativo:** La adopción de pilas de combustible puede ayudar a las empresas a cumplir con las regulaciones ambientales cada vez más estrictas, evitando posibles sanciones y costos asociados con el incumplimiento.

2.5. COSTOS DE MANTENIMIENTO

2.5.1. Factores que Contribuyen a Menores Costos de Mantenimiento.

Menor Cantidad de Piezas Móviles:

- **Reducción del Desgaste:** Las pilas de combustible tienen menos piezas móviles en comparación con los motores de combustión interna, lo que resulta en menos desgaste mecánico y una menor necesidad de mantenimiento

frecuente. Esta menor cantidad de piezas móviles disminuye la probabilidad de fallos mecánicos y prolonga la vida útil de los componentes (Smith & Basu, 2018).

Mayor Eficiencia Operativa:

- Menor Frecuencia de Mantenimiento: La mayor eficiencia operativa de las pilas de combustible permite que funcionen de manera más estable y con menos fluctuaciones en el rendimiento. Esto reduce la frecuencia de mantenimiento requerido y los costos asociados con el mantenimiento preventivo y correctivo (Smith & Basu, 2018).

Vida Útil Mejorada:

- Durabilidad Extendida: Los sistemas de pilas de combustible tienen una vida útil significativamente prolongada, con algunos capaces de operar durante más de 20,000 horas antes de requerir un mantenimiento capital. Esto contrasta con los motores de combustión interna, que pueden necesitar mantenimiento más frecuente y costoso (Zhao et al., 2019).

Análisis de Ciclo de Vida:

- Un análisis de ciclo de vida considera todos los costos asociados con la implementación y operación de pilas de combustible a lo largo de su vida útil.

Costos Iniciales vs. Costos Operativos:

- Costo Inicial: Aunque el costo inicial de las pilas de combustible puede ser elevado debido a la tecnología avanzada y la infraestructura necesaria, los costos operativos y de mantenimiento suelen ser más bajos a lo largo de la vida útil del sistema (International Maritime Organization (IMO) , 2020).
- Beneficios a Largo Plazo: Los menores costos operativos y de mantenimiento, junto con la reducción de emisiones, pueden justificar la inversión inicial. A medida que los costos del hidrógeno continúan disminuyendo y la tecnología mejora, las pilas de combustible pueden volverse más rentables en

comparación con los motores diésel tradicionales (International Maritime Organization (IMO) , 2020).

Costos Operativos:

- Costo del Hidrógeno: El costo del hidrógeno sigue siendo una parte importante de los costos operativos. Aunque los precios han disminuido con el tiempo, el hidrógeno sigue siendo relativamente costoso en comparación con los combustibles fósiles. Sin embargo, la disminución de los precios y los avances en la producción de hidrógeno pueden reducir estos costos en el futuro (U.S. Department of Energy, 2021).

Mantenimiento de Pilas de Combustible:

- Componentes Específicos: Aunque las pilas de combustible requieren menos mantenimiento en general, algunos componentes como los catalizadores y las membranas pueden necesitar reemplazo y mantenimiento periódicos. Estos componentes son esenciales para el funcionamiento eficiente de la pila de combustible y pueden afectar los costos de mantenimiento a lo largo del tiempo (Zhao et al., 2019).

2.6. CALCULO ECONÓMICO DE LA APLICACIÓN DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE Y DE UN SISTEMA CONVENCIONAL.

Embarcación pequeña:

- Potencia del motor: 50 kW (aproximadamente 67 CV).
- Tiempo de uso: 300 horas al año.

Pila de combustible:

- Costo por kW de pila de combustible: 2,500 USD/kW.
- Eficiencia de la pila de combustible: 50%.
- Consumo de hidrógeno: 0.3 kg de H₂ por hora por kW.
- Precio del hidrógeno: 8 USD/kg.
- Mantenimiento: 0.02 USD/kWh producido.

Sistema diésel:

- Costo por kW de un motor diésel marino: 500 USD/kW.
- Eficiencia: 35%.
- Consumo de diésel: 0.25 litros por kW por hora.
- Precio del diésel: 1.30 USD/litro.
- Mantenimiento: 0.04 USD/kWh producido.

Emisiones de CO₂:

- Diésel: 2.68 kg de CO₂ por litro de diésel consumido.
- Hidrógeno: 0 emisiones (asumiendo hidrógeno verde).

2.6.1. Costo inicial:

Pila de combustible:

- Costo del sistema de pila de combustible = $50 \text{ kW} \times 2,500 \text{ USD/kW} = 125,000 \text{ USD}$.

Sistema diésel:

- Costo del motor diésel = $50 \text{ kW} \times 500 \text{ USD/kW} = 25,000 \text{ USD}$

2.6.2. Costos operativos anuales:

Pila de combustible:

- Consumo de hidrógeno = $50 \text{ kW} \times 0.3 \text{ kg/kW/h} \times 300 \text{ horas} = 4,500 \text{ kg de H}_2 \text{ al año}$.
- Costo del hidrógeno = $4,500 \text{ kg} \times 8 \text{ USD/kg} = 36,000 \text{ USD al año}$.
- Mantenimiento = $50 \text{ kW} \times 300 \text{ horas} \times 0.02 \text{ USD/kWh} = 300 \text{ USD al año}$
- Costo total anual (pila de combustible) = $36,000 \text{ USD} + 300 \text{ USD} = 36,300 \text{ USD}$

Sistema diésel:

- Consumo de diésel = $50 \text{ kW} \times 0.25 \text{ litros/kW/h} \times 300 \text{ horas} = 3,750 \text{ litros de diésel al año}$.
- Costo del diésel = $3,750 \text{ litros} \times 1.30 \text{ USD/litro} = 4,875 \text{ USD al año}$.
- Mantenimiento = $50 \text{ kW} \times 300 \text{ horas} \times 0.04 \text{ USD/kWh} = 600 \text{ USD al año}$.
- Costo total anual (diésel) = $4,875 \text{ USD} + 600 \text{ USD} = 5,475 \text{ USD}$.

2.6.3. Emisiones de CO₂:

Sistema diésel:

- Emisiones = 3,750 litros de diésel x
2.68 kg de CO₂/litro=10,050 kg de CO₂ al año.
- Costo de carbono (si se aplican tarifas o impuestos sobre emisiones):
supongamos 50 USD/tonelada de CO₂
= 10.05 toneladas×50 USD/tonelada=502.50 USD al año.

2.6.4. Resumen de costos anuales:

- Pila de combustible:
 - Costo inicial: 125,000 USD.
 - Costo operativo anual: 36,300 USD.

Emisiones de CO₂:

- Sistema diésel:
 - Costo inicial: 25,000 USD.
 - Costo operativo anual: 5,475 USD.
 - Emisiones de CO₂: 10,050 kg (10.05 toneladas).
 - Costo de carbono (opcional): 502.50 USD.

2.6.5. Comparación a 10 años:

- Pila de combustible:
 - Costo inicial + costos operativos a 10 años
= 125,000+(36,300×10)=488,000 USD
- Sistema diésel:
 - Costo inicial + costos operativos a 10 años
= 25,000+(5,475×10)=79,750 USD
 - Incluyendo costo de emisiones de
carbono: 79,750+(502.50×10)=84,775 USD.

2.6.6. Conclusiones

- Costo inicial: Las pilas de combustible son significativamente más costosas que los sistemas diésel en términos de costo inicial.

- Costos operativos: Aunque el diésel es mucho más económico en costos operativos, las pilas de combustible eliminan las emisiones de CO₂ y podrían beneficiarse en regiones con tarifas o impuestos sobre el carbono.
- Sostenibilidad: Las pilas de combustible son más sostenibles a largo plazo debido a la ausencia de emisiones directas, lo que podría justificar su uso en un contexto donde se prioricen las políticas medioambientales.

2.7. COMPARACIÓN ENTRE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE CON MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Menor Desgaste y Frecuencia de Mantenimiento:

- Motores de Combustión Interna: Los motores de combustión interna tienen muchas más piezas móviles y, por lo tanto, requieren un mantenimiento más frecuente y costoso. La necesidad de mantenimiento preventivo y correctivo es mayor debido al desgaste de los componentes y a la acumulación de contaminantes (Smith & Basu, 2018).

Costos Totales de Operación:

- Pilas de Combustible: A pesar del costo inicial más alto, los menores costos operativos y de mantenimiento a largo plazo, junto con la reducción de emisiones y el impacto ambiental, pueden ofrecer una compensación significativa y hacer que las pilas de combustible sean más atractivas económicamente en comparación con los motores diésel (International Maritime Organization (IMO) , 2020).

2.8. COMPARACIÓN ENTRE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE Y MOTORES DIESEL CON TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES

Reducción de Emisiones:

- Motores Diésel: Los motores diésel son conocidos por sus altas emisiones de CO₂, NO_x y partículas, lo cual contribuye de manera considerable al cambio climático y a problemas de salud pública, como enfermedades respiratorias y cardiovasculares (International Maritime Organization (IMO) , 2020).

- Pilas de Combustible: Por otro lado, las pilas de combustible que usan hidrógeno solo producen agua y calor como subproductos, sin generar CO₂ ni otros contaminantes como NO_x y SO_x, lo que ayuda a reducir significativamente la huella de carbono y a mejorar la calidad del aire y del agua (International Maritime Organization (IMO) , 2020).

Costos Operativos:

- Motores Diésel: Aunque el costo inicial de los motores diésel es menor y requiere menos infraestructura, sus costos operativos suelen ser más altos debido al precio del combustible y al mantenimiento frecuente, como cambios de aceite, reemplazo de filtros y mantenimiento de sistemas de escape (IEA, 2022).
- Pilas de Combustible: Aunque las pilas de combustible tienen un costo inicial más alto debido a la tecnología avanzada y la infraestructura necesaria, sus costos operativos son generalmente menores. Tienen menos piezas móviles, lo que reduce el desgaste y la necesidad de mantenimiento, y su mayor eficiencia operativa puede justificar la inversión inicial a largo plazo (International Maritime Organization (IMO) , 2020).

Comparación de Costos Iniciales:

- Motores Diésel: Los motores diésel presentan un costo inicial más bajo y requieren una infraestructura menos costosa, lo que puede hacerlos una opción más atractiva a corto plazo desde un punto de vista financiero (IEA, 2022).
- Pilas de Combustible: Los sistemas de pilas de combustible tienen un costo inicial elevado debido a la tecnología y la infraestructura necesaria para la producción, almacenamiento y distribución del hidrógeno. Sin embargo, estos costos han disminuido y se espera que continúen bajando con el desarrollo tecnológico y la producción en masa (IEA, 2022).

Beneficios a Largo Plazo:

- Motores Diésel: Aunque los motores diésel pueden tener un costo inicial más bajo, los costos operativos más altos y el impacto ambiental negativo pueden

contrarrestar estos beneficios a largo plazo, dado que requieren mantenimiento constante y generan emisiones significativas (International Maritime Organization (IMO) , 2020).

- Pilas de Combustible: A pesar del alto costo inicial, las pilas de combustible pueden ofrecer un retorno de inversión positivo a largo plazo gracias a su eficiencia energética, menores costos de mantenimiento y reducción de emisiones. Los estudios han demostrado que, con la disminución de los costos tecnológicos y del combustible, las pilas de combustible pueden ser más rentables y sostenibles en comparación con los motores diésel (Gupta & Basu, 2019).

Costos de Infraestructura:

- Motores Diésel: La infraestructura para motores diésel es relativamente sencilla y económica en comparación con la necesaria para el hidrógeno, como estaciones de repostaje y sistemas de almacenamiento (IEA, 2022).
- Pilas de Combustible: La infraestructura para el hidrógeno, que incluye estaciones de repostaje y sistemas de almacenamiento y distribución, representa un costo significativo. Sin embargo, a medida que esta infraestructura se expande y optimiza, los costos pueden disminuir, facilitando la adopción de pilas de combustible en el sector marítimo (IEA, 2022).

2.9. TECNOLOGÍA DE PILAS DE COMBUSTIBLE Y SU APLICABILIDAD EN SISTEMAS DE PROPULSIÓN MARÍTIMA

Aplicabilidad en Sistemas de Propulsión Marítima

La tecnología de pilas de combustible ha progresado notablemente, haciéndola cada vez más viable para su uso en el ámbito marítimo. Cada tipo de pila de combustible tiene sus propias ventajas y desafíos, y la elección del más adecuado depende de las necesidades específicas de la embarcación y las condiciones operativas. Con el avance de la tecnología, es probable que las pilas de combustible jueguen un papel creciente en la propulsión marítima, promoviendo una navegación más sostenible y eficiente. Las pilas de combustible convierten la energía química de un combustible, como el hidrógeno, en electricidad a través de un proceso electroquímico. Para la propulsión marítima, es esencial evaluar las distintas tecnologías disponibles y su

aplicabilidad para asegurar un rendimiento óptimo y una integración eficaz en los sistemas de las embarcaciones.

2.9.1. Tipos de Pilas de Combustible

Pilas de Membrana de Intercambio Protónico (PEM)

Características:

- Utilizan una membrana de polímero electrolito que conduce protones.
- Operan a bajas temperaturas (60-80°C).
- Ofrecen alta densidad de potencia y rápida respuesta a cambios de carga.

Ventajas para Aplicaciones Marítimas:

- Alta densidad de potencia, ideal para embarcaciones pequeñas que requieren rápida y eficiente respuesta a fluctuaciones de carga.
- Compactas y ligeras, adecuadas para embarcaciones con limitaciones de espacio y peso.

Desafíos:

- Alto costo de los catalizadores de platino.
- Sensibilidad a impurezas, requiriendo hidrógeno de alta pureza, lo que puede complicar su suministro a bordo.

Pilas de Óxido Sólido (SOFC)

Características:

- Utilizan un electrolito cerámico sólido que conduce iones de oxígeno.
- Operan a altas temperaturas (600-1000°C).
- Tienen alta eficiencia energética y pueden usar diversos combustibles.

Ventajas para Aplicaciones Marítimas:

- Alta eficiencia energética y capacidad de utilizar hidrocarburos y otros combustibles alternativos.
- Pueden combinarse con ciclos de recuperación de calor para mejorar la eficiencia.

Desafíos:

- Necesidad de un sistema de gestión térmica para mantener altas temperaturas, complicando el diseño y aumentando costos.
- Tiempo de arranque largo debido a las altas temperaturas de operación.

Pilas de Carbonato Fundido (MCFC)

Características:

- Utilizan un electrolito fundido de carbonato de litio o sodio.
- Operan a temperaturas intermedias (600-700°C).
- Ofrecen buena eficiencia y flexibilidad en el tipo de combustible.

Ventajas para Aplicaciones Marítimas:

- Flexibilidad en el uso de combustibles, como gas natural, ofreciendo una opción versátil para la propulsión marítima.
- Eficiencia relativamente alta con menor complejidad en comparación con SOFC.

Desafíos:

- Los componentes son susceptibles a corrosión y desgaste debido a las altas temperaturas y el electrolito fundido, lo que puede afectar la durabilidad.

2.9.2. Aplicaciones de Pilas de Combustible en la Propulsión Marítima

• Propulsión de Embarcaciones Pequeñas

Las pilas de combustible PEM son especialmente adecuadas para embarcaciones pequeñas debido a su alta densidad de potencia y diseño compacto. Los avances recientes han hecho que estas pilas sean más fiables y asequibles.

• Uso en Ferries y Buques

Las pilas de combustible SOFC y MCFC se están explorando para su uso en ferries y buques más grandes, donde su alta eficiencia y capacidad de utilizar combustibles alternativos pueden ofrecer ventajas significativas.

• Desarrollo Tecnológico Reciente

Materiales Mejorados

Se han desarrollado nuevos materiales para electrolitos y catalizadores que mejoran la durabilidad y reducen la degradación de las pilas de combustible.

Diseño Robusto

Se están implementando diseños más resistentes a las condiciones marinas, como alta salinidad y humedad.

Optimización del Rendimiento

Las mejoras en el diseño de los sistemas de pilas de combustible han llevado a una mayor eficiencia energética y mejor capacidad de respuesta a la carga.

Reducción de Costos

La reducción de costos de producción y los avances en la tecnología del hidrógeno han contribuido a hacer las pilas de combustible más accesibles y económicas.

- **Innovaciones en Materiales**

Catalizadores Avanzados

Nuevos catalizadores basados en materiales menos costosos, como hierro y níquel, están reemplazando a los tradicionales de platino, reduciendo los costos sin comprometer el rendimiento.

Membranas Mejoradas

Las nuevas membranas de intercambio protónico (PEM) están diseñadas para operar en un rango más amplio de temperaturas y condiciones de humedad, mejorando la fiabilidad y eficiencia de las pilas de combustible.

- **Avances en Procesos de Producción**

Electrólisis Mejorada

Se han desarrollado nuevos diseños de celdas de electrólisis y técnicas de producción utilizando fuentes renovables, haciendo la producción de hidrógeno más limpia y económica.

Producción de Hidrógeno a partir de Biomasa

La gasificación de biomasa para la producción de hidrógeno ofrece una opción sostenible con menor impacto ambiental en comparación con el reformado de gas natural.

- **Integración con Otras Tecnologías**

Sistemas Híbridos

La combinación de pilas de combustible con sistemas de baterías y otras tecnologías de propulsión permite una mayor flexibilidad operativa, optimizando el uso de la energía y reduciendo emisiones.

Tecnologías de Almacenamiento de Hidrógeno

Los avances en almacenamiento de hidrógeno, como el hidrógeno en estado sólido y materiales de absorción, están mejorando la eficiencia del almacenamiento y la distribución del hidrógeno, facilitando su uso en aplicaciones marítimas.

2.10. APLICABILIDAD EN SISTEMAS DE PROPULSIÓN MARÍTIMA

- **Adaptación de Tecnologías de Pilas de Combustible**

La adaptación de las tecnologías de pilas de combustible para su uso en sistemas de propulsión marítima implica enfrentar desafíos como la resistencia a la corrosión y la fiabilidad en condiciones extremas. Las soluciones recientes han permitido una mayor integración de pilas de combustible en embarcaciones pequeñas, aumentando la viabilidad de esta tecnología en el sector marítimo (Ballard Power Systems, 2020).

- **Aplicaciones en Embarcaciones Pequeñas**

Las pilas de combustible están siendo cada vez más utilizadas en ferries y embarcaciones de transporte debido a sus ventajas en eficiencia energética, reducción de emisiones y menores costos operativos. Los estudios de caso y las pruebas prácticas están demostrando los beneficios y la viabilidad de las pilas de combustible en el sector marítimo (Smith & Basu, 2018).

2.11. DESAFÍOS Y CONSIDERACIONES FUTURAS

- **Infraestructura de Hidrógeno**

La infraestructura necesaria para la producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno aún está en desarrollo, lo que puede limitar la adopción generalizada de las pilas de combustible.

- **Costo de la Tecnología**

Aunque los costos han disminuido, el alto costo inicial de las pilas de combustible sigue siendo una barrera para su adopción masiva. Reducir los costos y mejorar la eficiencia de producción serán factores clave para la expansión de esta tecnología.

- **Adaptación a Condiciones Operativas**

Descripción: Adaptar las pilas de combustible a las condiciones específicas del entorno marítimo requiere una investigación y desarrollo continuos.

Impacto: Superar estos desafíos permitirá una mayor integración y eficacia de las pilas de combustible en diversas aplicaciones marítimas (IEA, 2022).

2.11.1. Desafíos y oportunidades de la aplicación de las pilas de combustible.

La implementación de pilas de combustible en sistemas de propulsión marítima presenta varios desafíos, pero también ofrece significativas oportunidades. A continuación, se detallan estos desafíos y oportunidades:

- **Infraestructura de Hidrógeno**

Desarrollar la infraestructura necesaria para la producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno sigue siendo un gran desafío. La falta de una red establecida requiere inversiones significativas en desarrollo y tecnología. Sin una infraestructura adecuada, la adopción de pilas de combustible puede verse limitada debido a la crucial disponibilidad de hidrógeno (Scholtissek et al., 2021).

- **Costo Inicial**

El costo inicial de los sistemas de pilas de combustible y la infraestructura de hidrógeno sigue siendo alto. Aunque los costos están disminuyendo debido a los avances tecnológicos y las economías de escala, sigue siendo una barrera para su adopción masiva. El elevado costo puede desincentivar a los inversores y propietarios de embarcaciones, limitando la velocidad de adopción de esta tecnología (Scholtissek, Finke, & Manke, 2021).

- **Seguridad del Hidrógeno**

El hidrógeno es altamente inflamable y presenta riesgos en su manejo y almacenamiento. La gestión segura del hidrógeno es esencial para prevenir accidentes y garantizar operaciones seguras. La percepción de riesgos y la necesidad de estrictas medidas de seguridad pueden aumentar los costos y complicar la implementación (Scholtissek, Finke, & Manke, 2021).

- **Innovación Tecnológica**

Los avances en materiales, técnicas de producción de hidrógeno y diseño de sistemas están impulsando la innovación en el campo de las pilas de combustible, creando nuevas oportunidades de negocio y empleo. La investigación y el desarrollo continuo pueden llevar a mejoras en la eficiencia y a la reducción de costos, facilitando una mayor adopción (Gupta & Basu, 2019).

- **Sostenibilidad**

La adopción de pilas de combustible puede mejorar la sostenibilidad del sector marítimo al reducir su impacto ambiental, incluyendo la disminución de contaminantes y la promoción de prácticas más ecológicas. Esta mejora en la sostenibilidad puede contribuir a una mayor aceptación social y al cumplimiento de las normativas medioambientales (IEA, 2022).

- **Políticas de Apoyo**

Las políticas gubernamentales y las regulaciones ambientales están promoviendo la adopción de tecnologías limpias, como las pilas de combustible. Estas políticas pueden ofrecer incentivos y apoyo financiero para la implementación. Los incentivos y el apoyo gubernamental pueden acelerar la adopción de pilas de combustible al reducir los costos y facilitar el desarrollo de infraestructura (IEA, 2022).

- **Innovación Continua**

Los avances en catalizadores, membranas y técnicas de producción están creando nuevas oportunidades para la adopción de pilas de combustible. La investigación en áreas como el almacenamiento de hidrógeno y la integración de sistemas también está en marcha. La innovación continua puede abordar muchos de los desafíos actuales y mejorar la viabilidad de las pilas de combustible en aplicaciones marítimas (Scholtissek, Finke, & Manke, 2021).

CONCLUSIONES

La implementación de pilas de combustible en sistemas de propulsión para embarcaciones pequeñas ofrece una solución prometedora para reducir las emisiones y mejorar la sostenibilidad en el sector marítimo. Si bien los costos iniciales y la infraestructura limitada presentan desafíos, el potencial de las pilas de combustible para transformar el transporte marítimo es significativo, y con el tiempo, es probable que esta tecnología se convierta en una parte integral del futuro de la navegación, particularmente para aquellas embarcaciones que operan en áreas donde la reducción de emisiones es una prioridad.

En la búsqueda de alternativas sostenibles a los sistemas de propulsión tradicionales, las pilas de combustible han surgido como una tecnología prometedora, especialmente en la industria marítima, donde la reducción de emisiones de gases contaminantes es crucial. Las embarcaciones pequeñas, que representan una parte significativa del tráfico marítimo, están bajo presión para adoptar soluciones más ecológicas. Esta investigación se centró en evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de implementar pilas de combustible como sistemas de propulsión en estas embarcaciones, comparándolas con los sistemas de combustión convencionales.

Eficiencia y efectividad de las pilas de combustible frente a los sistemas de propulsión convencionales

Las pilas de combustible se destacan por su alta eficiencia energética. Mientras que los motores diésel convencionales convierten menos del 40% de la energía del combustible en energía útil, las pilas de combustible pueden alcanzar eficiencias del 50% al 60%. Esta diferencia se debe a que las pilas de combustible generan electricidad directamente a partir de una reacción electroquímica, evitando la pérdida de energía en forma de calor, que es inherente a los motores de combustión.

En pruebas con embarcaciones pequeñas, las pilas de combustible de hidrógeno han demostrado ser eficaces para propulsar barcos de corto y mediano alcance, con rendimientos comparables a los de los motores convencionales. Sin embargo, la efectividad de la tecnología está limitada actualmente por factores como el almacenamiento del hidrógeno y la infraestructura de recarga, que aún está en desarrollo en muchas áreas costeras.

Sostenibilidad y reducción de emisiones

La principal ventaja de las pilas de combustible radica en su capacidad para generar energía sin emitir gases contaminantes durante su operación. Las pilas de combustible que usan hidrógeno puro solo emiten agua como subproducto, lo que las convierte en una opción extremadamente atractiva desde el punto de vista medioambiental. Comparativamente, los motores diésel y de gasolina emiten grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), y partículas finas, todos ellos perjudiciales para la atmósfera y la salud humana.

En el contexto de la sostenibilidad, las pilas de combustible son una opción que contribuye a los objetivos de des-carbonización y reducción de emisiones establecidos por regulaciones internacionales, como las normas de la Organización Marítima Internacional (OMI). Además, al basarse en una fuente de energía renovable como el hidrógeno verde, su adopción puede alinearse con los objetivos globales de energía limpia.

Costos de implementación y mantenimiento

El costo inicial de implementar sistemas de pilas de combustible en embarcaciones pequeñas es considerablemente más alto en comparación con los motores de combustión interna convencionales. Esto se debe principalmente a los costos de los componentes del sistema, como las membranas y electrodos de las pilas, y al costo de producción y almacenamiento del hidrógeno. Además, la infraestructura de recarga es costosa y aún está en una etapa de expansión limitada.

No obstante, a largo plazo, las pilas de combustible presentan costos de mantenimiento más bajos, ya que tienen menos partes móviles y son menos propensas al desgaste que los motores de combustión interna. La durabilidad de las pilas de combustible ha mejorado significativamente en los últimos años, con algunos sistemas que prometen una vida útil competitiva con la de los motores diésel.

En cuanto al costo operativo, la principal barrera es el costo del hidrógeno. Si bien los precios del hidrógeno verde han disminuido con el tiempo, todavía son altos en comparación con los combustibles fósiles convencionales. Sin embargo, se espera

que con la expansión de la infraestructura y el incremento en la producción de hidrógeno, los costos bajen significativamente en las próximas décadas.

Comparación tecnológica y aplicabilidad en la propulsión marítima

Tecnológicamente, las pilas de combustible están listas para su implementación en sistemas de propulsión de embarcaciones pequeñas, aunque con algunas limitaciones en cuanto al alcance y almacenamiento de combustible. Las embarcaciones de corta distancia o aquellas que operan en áreas con fácil acceso a infraestructura de recarga pueden beneficiarse más rápidamente de esta tecnología. Para las embarcaciones de largo alcance, la densidad energética del hidrógeno y las limitaciones en el almacenamiento siguen siendo desafíos que requieren soluciones innovadoras, como el desarrollo de combustibles líquidos a base de hidrógeno o mejoras en la tecnología de almacenamiento comprimido.

En el futuro cercano, las mejoras en la tecnología de celdas de combustible de óxidos sólidos (SOFC) y la investigación en nuevos materiales podrían aumentar aún más la viabilidad de las pilas de combustible para aplicaciones marítimas. Estas mejoras no solo aumentarán la eficiencia energética sino que también podrían ofrecer soluciones a los desafíos actuales de almacenamiento de hidrógeno.

Futuro y recomendaciones

La adopción de pilas de combustible para la propulsión de embarcaciones pequeñas depende de varios factores, incluidos los avances tecnológicos, la reducción de costos y el desarrollo de la infraestructura necesaria. A medida que los gobiernos y las organizaciones internacionales implementan políticas más estrictas sobre emisiones y fomentan el uso de tecnologías limpias, la viabilidad económica y ambiental de las pilas de combustible aumentará considerablemente.

Se recomienda continuar invirtiendo en investigación y desarrollo para mejorar la eficiencia del almacenamiento y el transporte de hidrógeno, además de fomentar la creación de una infraestructura de recarga accesible. A corto plazo, las embarcaciones que operan en entornos sensibles, como áreas protegidas o lagos, donde las emisiones deben mantenerse al mínimo, podrían ser los primeros usuarios de esta tecnología.

RECOMENDACIONES

Para fomentar la adopción de pilas de combustible en sistemas de propulsión marítima y maximizar sus beneficios, se sugieren las siguientes recomendaciones:

- **Invertir y Desarrollar Infraestructura de Hidrógeno**

La falta de infraestructura de suministro de hidrógeno es un obstáculo importante para la adopción de pilas de combustible en el sector marítimo. Se recomienda una inversión significativa en la construcción de estaciones de carga de hidrógeno en puertos estratégicos y en el desarrollo de una cadena de suministro eficiente y segura. La disponibilidad de estaciones de carga y una infraestructura de distribución sólida es esencial para el funcionamiento continuo de las embarcaciones impulsadas por hidrógeno, facilitando así la transición hacia un transporte marítimo más limpio.

- **Fomentar Colaboraciones Público-Privadas**

Promover la colaboración entre el sector público y privado para compartir costos y riesgos asociados con el desarrollo de infraestructura de hidrógeno. Estas asociaciones pueden acelerar el desarrollo y la implementación de soluciones innovadoras.

- **Implementar Políticas y Subsidios Gubernamentales**

Incentivos Financieros: Los gobiernos deben proporcionar incentivos financieros y subsidios para reducir el costo inicial de las pilas de combustible y la infraestructura de hidrógeno. Esto puede incluir subsidios para la compra de equipos, créditos fiscales y otras formas de apoyo económico para las empresas que adopten esta tecnología.

Normativas y Regulaciones: Desarrollar y actualizar regulaciones que apoyen la adopción de tecnologías limpias, como las pilas de combustible. Esto puede incluir la implementación de normativas que favorezcan la reducción de emisiones y la promoción de tecnologías sostenibles en el transporte marítimo.

- **Apoyar la Investigación y el Desarrollo (I+D)**

Innovación en Materiales: Continuar la investigación en el desarrollo de nuevos materiales para pilas de combustible, como catalizadores más económicos y membranas de mayor durabilidad. Los avances en estos materiales pueden mejorar la eficiencia y reducir los costos de las pilas de combustible.

Mejora de Técnicas de Producción de Hidrógeno: Invertir en tecnologías de producción de hidrógeno más eficientes y sostenibles, como la electrólisis basada en energías renovables y la producción a partir de biomasa. Estas técnicas pueden ayudar a reducir los costos y mejorar la viabilidad económica del hidrógeno.

Desarrollo de Sistemas Híbridos: Investigar y desarrollar sistemas híbridos que integren pilas de combustible con otras tecnologías de propulsión y almacenamiento de energía. Estos sistemas pueden ofrecer mayores ventajas operativas y una mayor flexibilidad en el uso de la energía a bordo de las embarcaciones.

- **Promover la Educación y Sensibilización**

Capacitación Técnica: Desarrollar programas de capacitación para ingenieros y técnicos en el diseño, operación y mantenimiento de sistemas de pilas de combustible. La educación adecuada en estas áreas es esencial para garantizar una implementación exitosa y el mantenimiento adecuado de la tecnología.

Conciencia y Promoción: Aumentar la conciencia sobre los beneficios de las pilas de combustible en el sector marítimo a través de campañas de información y eventos de promoción. Esto puede ayudar a crear una mayor aceptación y demanda para la tecnología.

- **Desarrollar Normativas y Estándares Técnicos**

Establecer y estandarizar normativas y estándares técnicos específicos para la operación segura y eficiente de embarcaciones impulsadas por pilas de combustible y el manejo de hidrógeno en el sector marítimo. Normativas y estándares técnicos claros pueden garantizar la seguridad, eficiencia y compatibilidad de las nuevas tecnologías, facilitando su integración en el sector marítimo.

- **Evaluar y Mejorar la Sostenibilidad**

Es fundamental evaluar continuamente el impacto ambiental y económico de las tecnologías de pilas de combustible y buscar mejoras en su sostenibilidad, incluyendo el ciclo de vida completo desde la producción hasta el reciclaje. La evaluación continua y la mejora de la sostenibilidad pueden garantizar que estas tecnologías no solo reduzcan las emisiones durante su uso, sino que también sean sostenibles en todas las etapas de su ciclo de vida.

Estas recomendaciones están diseñadas para abordar los desafíos actuales y aprovechar las oportunidades asociadas con las pilas de combustible en sistemas de propulsión marítima. La implementación efectiva de estas estrategias puede facilitar la transición hacia un transporte marítimo más limpio y sostenible.

REFERENCIAS

- Ballard Power Systems. (2020). *MF Hydra: The World's First Liquid Hydrogen-Powered Ferry*.
- Barbir, F. (2005). *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*. Elsevier.
- Baumüller. (2023). *Baumüller*. Obtenido de Baumüller: <https://www.baumueller.com/es/sectores/naval/accionamientos-hidrogeno>
- Bose, A. (2017). *Fuel Cells: Technologies and Applications*. Springer.
- Brown, A. (2012). *Maritime Transport and Sustainable Development*. Routledge.
- Brown, D. (2012). *Hydrogen and Fuel Cells: Emerging Technologies and Applications*. Wiley.
- Centro Nacional de Hidrógeno. (2024). *Centro Nacional de Hidrógeno*. Obtenido de Centro Nacional de Hidrogeno: <https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/>
- Dodds, P. E., & Demoullin, S. (2013). *The Role of Hydrogen and Fuel Cells in the Future Energy System*. Energy Policy.
- DNV GL. (2014). *MV Viking Lady - Hydrogen Fuel Cell Vessel*. DNV GL.
- Eide, M. S., Eide, H., & Hauge, K. (2017). *Hydrogen as a Fuel for Maritime Transport: A Review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- Eide, M. S., et al. (2017). *Hydrogen and Fuel Cells: Emerging Technologies and Applications*. Wiley.
- EPA. (2020). *Regulations for Greenhouse Gas Emissions from Passenger Cars and Trucks*. Environmental Protection Agency.
- European Commission. (2020). *Hydrogen for a Sustainable Future: The Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe*.
- Green Shipping. (2022). *Green Shipping Project - Clean Technologies for Maritime Transport*.

Gupta, G. D., & Basu, S. (2019). *Hydrogen Energy: Economic and Social Challenges*. Springer.

H2-Ship. (2021). *H2-Ship Project - Hydrogen Powered Passenger Ship*.

International Maritime Organization (IMO) . (2020). *2020 Guidelines for Exhaust Gas Cleaning Systems*. International Maritime Organization.

International Maritime Organization (IMO) . (2020). *International Maritime Organization (IMO) Regulations and Guidelines*. International Maritime Organization.

International Maritime Organization (IMO). (2020). *Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships*. International Maritime Organization.

Jones, D. (2005). *Fuel Cell Systems Explained*. Wiley.

Jones, C. (2005). *Fuel Cells: Technologies and Applications*. CRC Press.

Kreith, F., & Goswami, D. (2007). *Energy Resources and Systems*. CRC Press.

Larminie, J., & Dicks, A. (2003). *Fuel Cell Systems Explained*. Wiley.

Nafion. (2024). *Celdas de combustible de membrana PEM*. Obtenido de Nafion: <https://www.nafion.com/es/support/white-papers/membranes-for-fuel-cells-white-paper>

Norled. (2020). *Norled's Hydrogen Ferry - A Sustainable Solution for Short-Distance Transport*.

Norris, D. (2017). *The Adoption of Fuel Cells in the Maritime Sector*. Journal of Maritime Research.

NOW GmbH. (2024). *Proyect e4ship*. Obtenido de NOW GmbH: <https://www.now-gmbh.de/projektfinder/e4ships-toplaterne/>

Ogden, J. M. (2002). *Prospects for Hydrogen and Fuel Cell Vehicles*. Annual Review of Energy and the Environment, 27, 377-409.

- Scholtissek, A., Finke, K., & Manke, I. (2021). *Fuel Cells for Marine Applications: Design, Testing and Characterization*. Wiley.
- Smith, J. R., & Basu, S. (2018). *Hybrid Marine Systems: Fuel Cells and Batteries in Maritime Applications*. Springer.
- Smith, R. (2010). *Advanced Fuel Cell Systems for Marine Applications*. Springer.
- Smith, W. (2010). *Hydrogen Fuel Cell Technology in Marine Applications*. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 9(4), 27-39.
- Smith, W. (2010). *Marine Propulsion: Trends and Challenges*. Springer.
- U.S. Department of Energy. (2021). Obtenido de <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-and-fuel-cell-technologies-office>
- Zhang, L., Liu, Y., & Wang, Y. (2020). *Comparative Analysis of Emissions from Marine Engines and Fuel Cells*. *Environmental Science & Technology*.
- Zhou, Y., Zhang, J., & Zhang, X. (2018). *Environmental Benefits of Fuel Cell Technology in Maritime Transport*. *Energy Reports*.