



Universidad de Oviedo  
**Escuela Superior de la Marina Civil de  
Gijón**

*Trabajo Fin de Máster*

Identificación de puntos de baja eficiencia en  
un buque real y adaptación a los criterios  
MEPC 76

Para acceder al Título de Máster Universitario  
en

**Tecnologías Marinas y Mantenimiento**

Autor: Centeno Idiáñez, Yoel

Tutor: Díaz Secades, Luis Alfonso

Julio – 2023

## **Agradecimientos**

Este trabajo de fin de máster no hubiera sido posible sin las siguientes personas a las que agradezco su apoyo durante todo este proceso.

En primer lugar, a mi tutor, Alfonso Díaz-Secades, por enseñarme, orientarme y corregirme con infinita paciencia todas las veces que ha sido necesario. Por todo el tiempo invertido en reuniones, hilos de correo y videollamadas en las que me ha ido siguiendo el progreso paso a paso.

También he de agradecer a toda mi familia, por oírme hablar todo el día de los cálculos exergéticos, normativas y comités. Pero, sobre todo, por haberme animado a seguir cada vez que se me ha ocurrido el pensamiento de presentar el año que viene. Y finalmente a Susana, por estar a mi lado todo este tiempo, ayudarme con la edición y las ilustraciones.

Gracias a todos por haberme mantenido cuerdo estos meses.

<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
PALABRAS CLAVE.....	1
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>2</b>
<b>KEYWORDS</b> .....	<b>2</b>
<b>LISTA DE ACRÓNIMOS</b> .....	<b>3</b>
<b>NOMENCLATURA</b> .....	<b>4</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 LA AGENDA 2030 PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE</b> .....	<b>2</b>
1.1.1 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE.....	3
<b>1.2 CAMBIO CLIMÁTICO EN LA INDUSTRIA MARÍTIMA</b> .....	<b>4</b>
1.2.1 LA ORGANIZACIÓN MARÍTIMA INTERNACIONAL .....	5
1.2.2 CONVENIO INTERNACIONAL PARA PREVENIR LA CONTAMINACIÓN POR LOS BUQUES .....	6
1.2.3 PLAN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL BUQUE .....	7
1.2.4 ÍNDICE DE EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA BUQUES EN SERVICIO .....	7
1.2.5 INDICADOR DE INTENSIDAD DE CARBONO .....	8
1.2.6 MEPC 79 Y LAS PERSPECTIVAS FUTURAS .....	10
<b>1.3 EMISIONES DEL COMERCIO MARÍTIMO EN LA UNIÓN EUROPEA</b> .....	<b>13</b>
1.3.1 RÉGIMEN DE COMERCIO DE DERECHOS DE EMISIÓN DE LA UNIÓN EUROPEA ..	13
1.3.2 <i>FUEL UE MARITIME</i> .....	14
<b>1.4 MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>15</b>
<b>1.5 RECUPERACIÓN DE CALOR RESIDUAL</b> .....	<b>15</b>
1.5.1 ENERGÍA FRÍA .....	17
<b>1.6 ANÁLISIS TERMODINÁMICO</b> .....	<b>19</b>
<b>1.7 OBJETIVOS DEL PROYECTO</b> .....	<b>21</b>
<b>2. METODOLOGÍA</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1 DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO Y EJEMPLO DE RUTA</b> .....	<b>22</b>
2.1.1 MAQUINARIA .....	24
<b>2.2 ANÁLISIS ENERGÉTICO DEL MOTOR</b> .....	<b>29</b>
<b>2.3 ANÁLISIS EXERGÉTICO</b> .....	<b>32</b>
<b>2.4 PROPUESTA DE SISTEMA PARA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA FRÍA</b> .....	<b>33</b>
<b>3. RESULTADOS</b> .....	<b>36</b>
<b>3.1 BALANCE ENERGÉTICO</b> .....	<b>36</b>
<b>3.2 BALANCE EXERGÉTICO</b> .....	<b>42</b>
<b>3.3 SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA FRÍA</b> .....	<b>45</b>
<b>3.4 EEXI Y CII</b> .....	<b>48</b>
<b>4. CONCLUSIONES</b> .....	<b>52</b>
<b>4.1 LISTADO DE POSIBLES LÍNEAS FUTURAS</b> .....	<b>53</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>54</b>
<b>ANEXO I: UNIDADES DE MEDIDA UTILIZADAS Y EQUIVALENTE “SYSTÈME INTERNATIONAL D’UNITÉS”</b>	<b>54</b>
LISTADO DE PREFIJOS SI UTILIZADOS .....	54
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>55</b>



## RESUMEN

La concienciación y la preocupación por el cambio climático aumentan cada día. Gobiernos y organismos internacionales colaboran para adoptar medidas de eficiencia que reduzcan el carbono negro, los gases de efecto invernadero, la contaminación por partículas y otras emisiones nocivas.

Teniendo en cuenta las evidencias sobre el cambio climático aportadas por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), la asamblea de las Naciones Unidas (ONU) estableció una directiva para combatir el cambio climático denominada Agenda 2030, que incluye un total de diecisiete objetivos con sus correspondientes metas. La Organización Marítima Internacional se adhirió a ella y creó una normativa sobre eficiencia energética y gases de efecto invernadero (GEI). Las emisiones de GEI del sector del transporte marítimo han crecido en los últimos años, sumando finalmente el 2,89% del total de las emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub> en 2018. La evaluación del cumplimiento de la nueva normativa por parte de cada buque es obligatoria, tanto para los buques nuevos como en servicio; algunos de los cuales se enfrentarán al reto de implantar soluciones novedosas para mejorar su eficiencia.

Una de las medidas de eficiencia energética más olvidadas es el uso de sistemas de recuperación de energía fría, cuyos primeros beneficiarios podrían ser los buques de transporte de gas natural licuado.

Los análisis exergéticos y exergoeconómicos son herramientas sencillas pero potentes, capaces de complementar los análisis termodinámicos y termoeconómicos más tradicionales.

Este proyecto retrata la situación actual de la industria marítima en materia de legislación mundial y europea sobre contaminación. A continuación, se introducen los análisis energéticos y exergéticos. Se evalúa el sistema de generación energética de un buque de transporte de gas natural licuado y se desarrolla un sistema de recuperación de energía fría. Se realizan el análisis energético y exergético del sistema de recuperación de energía fría, se comprueba el cumplimiento del buque en materia legislativa sobre eficiencia energética y se evalúa la mejora de todo el buque

## PALABRAS CLAVE

Ingeniería marina, eficiencia energética, exergía, energía fría.

## **ABSTRACT**

Awareness and concern on climate change is increasing every day. Governments and international agencies are working together to implement efficiency measures to reduce black carbon, greenhouse gases, particles, and other such emissions.

Considering climate change evidence provided by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), the United Nations (UN) assembly established a directive to combat climate change called the 2030 Agenda, which includes a total of seventeen objectives with its corresponding targets. The International Maritime Organization adhered to it and created regulations on energy efficiency and greenhouse gases (GHG). The shipping industry's GHG emissions have grown over the recent years, finally amounting to 2.89% of total anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions in 2018. Evaluation of each vessel's compliance with the new regulations are mandatory for both new and existing ships, some of which will face the challenge of implementing novel solutions.

One of the most overlooked efficiency measures is the use of cold energy recovery systems, for which liquefied natural gas carriers could be the first beneficiaries.

Exergy and exergoeconomic analyses are simple but powerful tools capable of complementing more traditional thermodynamic and thermoeconomic analyses.

This project portrays the present maritime industry's situation on global and European pollution legislation. Then, energy and exergy analyses are explained and discussed. A case study liquefied natural gas carrier's generation system is evaluated and a cold energy recovery system is developed. Energy and exergy analyses are conducted on the cold energy recovery system, vessel's compliance with energy efficiency legislation is investigated and the whole vessel's improvement is evaluated.

## **KEYWORDS**

Marine engineering, energy efficiency, exergy, cold energy.

**LISTA DE ACRÓNIMOS**

AC	Aire acondicionado
BDN	Nota de entrega de combustible
BIMCO	Consejo Marítimo Internacional y del Báltico
BOG	Gas evaporado
C.A.	Aire de carga
SREF	Sistema de recuperación de energía fría
CII	Indicador de intensidad de carbono
DCS	Sistema de recolección de datos
SCM	Sala de control de Máquinas
EEDI	Índice de diseño de eficiencia energética
EEOI	Indicador operativo de eficiencia energética
EEXI	Índice de eficiencia energética de buques existentes
ETS	Régimen de comercio de derechos de emisión
UE	Unión Europea
GEI	Gases de efecto invernadero
GT	Arqueo bruto
AT	Alta temperatura
OMI	Organización Marítima Internacional
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
SI	Estrategia inicial
ITCC	Conferencia Internacional sobre Remolcadores de Buques Tanque
LD	Compresor de bajo servicio
GNL	Gas natural licuado
BT	Baja temperatura
MARPOL	Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques
MEPC	Comité de Protección del Medio Marino
DO	Gasóleo marítimo
MRV	Sistema de seguimiento, notificación y verificación
NBO	Gas evaporado de manera natural
PLC	Controlador lógico programable
SECA	Área de control de emisiones de azufre
SEEMP	Plan de gestión de la eficiencia energética de los buques
ODS	Objetivos de desarrollo sostenible
SOLAS	Convenio sobre la seguridad de la vida humana en el mar
SPECO	Cálculo del coste energético específico
UN	Naciones Unidas
UNCTAD	Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo
UNFCCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

## NOMENCLATURA

---

CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
C <sub>p</sub>	Calor específico a presión constante
C <sub>v</sub>	Calor específico a volumen constante
E	Energía
spec	específica
Ex	Exergía
ε	Rendimiento energético
h	Entalpía
Ln	Logaritmo neperiano
ṁ	Flujo másico
n	Moles
P	Presión
Q	Calor
R	Constante de los gases ideales
vap	Vapor
W	Trabajo
S	Entropía
T	Temperatura
U	Energía interna
unburnt	Inquemados
V	Volumen

---

### Subíndices

---

0	Estado inicial
ph	Físico
exh	Escape
c.a.	Aire de carga
heat	Calor

---



## 1 INTRODUCCIÓN

El cambio climático es una de las mayores amenazas a las que se enfrenta la humanidad en la actualidad, esta amenaza y sus consecuencias asociadas son el resultado de las actividades humanas y su interferencia en el sistema climático. Uno de los efectos más conocidos del cambio climático es el calentamiento global, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) ha establecido que el calentamiento inducido antropogénicamente es responsable de un aumento estimado de 1,07 °C [1].

La mayor contribución al aumento de la temperatura procede de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), mientras que los aerosoles emitidos a la atmósfera han enmascarado parte de este calentamiento debido a sus propiedades reflectantes; con la excepción del carbono negro, que absorbe la radiación [2]–[4].

Los efectos adversos van desde la subida del nivel del mar hasta olas de calor y sequías recurrentes. Los fenómenos meteorológicos extremos suponen inseguridad alimentaria e hídrica, así como daños al ecosistema. Los efectos negativos de los aerosoles se manifiestan en forma de problemas de salud. Todos estos efectos combinados están causando la propagación de enfermedades físicas y mentales, pérdidas económicas, pérdidas culturales y una plétora de otras consecuencias perjudiciales [1].

Naciones, empresas y ciudadanos han unido sus esfuerzos para combatir el cambio climático y sus efectos indeseados [5]–[8]. Uno de los mayores éxitos es el Protocolo de Montreal de 1987, centrado en la regulación de las sustancias que agotan la capa de ozono y, desde la Enmienda de Kigali en 2016, también incluye la eliminación progresiva de las sustancias que no agotan la capa de ozono, pero poseen un alto potencial de calentamiento global (PCG). Se considera un gran éxito porque logró la ratificación mundial y las Partes del tratado han eliminado el 98% de las sustancias que agotan la capa de ozono, en comparación con los niveles de 1990 [9]. El siguiente gran paso fue la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), que entró en vigor en marzo de 1994 con el objetivo de evitar interferencias humanas peligrosas en el sistema climático. El Protocolo de Kioto materializó las directrices de la CMNUCC en un documento a finales de 1997 [10], [11]. Por último, el Acuerdo de París de 2015 es una continuación de estos esfuerzos, es el primer tratado internacional jurídicamente vinculante sobre el cambio climático [12]. Utilizando como herramientas la transformación económica, la transformación social y los ciclos quinquenales, su principal objetivo es limitar el aumento de la temperatura global a 1,5 °C por encima de los niveles preindustriales [12].

## 1.1 LA AGENDA 2030 PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

La Agenda 2030 es un acuerdo internacional, redactado por las Naciones Unidas e incluido en el Acuerdo de París, cuyo objetivo es trabajar por la mejora de la sociedad, la protección del medio ambiente y el crecimiento económico, en un periodo de tiempo definido.



Ilustración 1: Objetivos de Desarrollo Sostenible [13]

Se basa en un marco internacional anterior, parcialmente exitoso, denominado "Objetivos de Desarrollo del Milenio", que pretendía mejorar el bienestar humano y el desarrollo de la sociedad. Muestra que la concienciación sobre el problema del cambio climático va en aumento [8], [14]–[16].

La Agenda, publicada en 2015, incluye un preámbulo, una declaración con nueve apartados y su parte más famosa: los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) [17].

### 1.1.1 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Estos objetivos son los cimientos de todas las demás partes de la Agenda 2030. Cada uno de ellos establece una intención y un llamamiento a la acción, así como metas definidas para medir los avances y definir con mayor precisión los pasos necesarios [13]. Como se muestra a continuación, hay diecisiete Objetivos, cada uno con un número variable de metas.



Figure 2.1: ODS 7



Figure 2.2: ODS 9



Figure 2.3: ODS 13



Figure 2.4: ODS 14

*Ilustración 2: Objetivos de Desarrollo Sostenible tratados en este documento [13]*

El presente documento está vinculado a los objetivos 7, 9, 13 y 14.

- Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante.

El objetivo es garantizar el acceso de todas las personas a fuentes de energía sostenibles y fiables. Garantizar que la energía sea sostenible es un elemento clave, ya que el uso de combustibles tradicionales es la principal causa del calentamiento global. Alrededor de 789 millones de personas, la mayoría en el África subsahariana, no tienen acceso a electricidad. Las consecuencias negativas de esta falta de electricidad recaen desproporcionadamente sobre las mujeres y los niños. Este proyecto se ajusta específicamente a la meta 7.3, cuyo objetivo es duplicar la tasa mundial de eficiencia energética [18].

- Objetivo 9: Industria, innovación e infraestructura

El objetivo es construir edificios adaptables, fomentar la industrialización sostenible e impulsar soluciones innovadoras.

El crecimiento económico, la mejora del nivel de vida y la lucha contra el cambio climático dependen de la mejora de uno de los pilares de la civilización: la infraestructura. Este proyecto se ajusta específicamente a la meta 9.4, cuyo objetivo es modernizar y readaptar las industrias para aumentar su eficiencia en el uso de recursos [19].

- Objetivo número 13: Acción por el clima

Como se ha mencionado previamente, el cambio climático está afectando al mundo y el objetivo es detener su empeoramiento y revertir los efectos negativos. El objetivo trece engloba todas las acciones emprendidas en esa dirección. Este proyecto está específicamente alineado con el objetivo 13.3, siendo uno de sus fines la concienciación sobre la mitigación del impacto del cambio climático [20]

- Objetivo 14: Vida submarina

El objetivo final es el uso sostenible de los recursos marinos. Los océanos son clave en la regulación del clima y constituyen una importante fuente de alimento. Su ecosistema es otra fuente de beneficios, con algunos que ya ayudan a la sociedad y otros aún por descubrir. Este proyecto se ajusta específicamente a la meta 14.1, cuyo objetivo es prevenir y reducir todo tipo de contaminación marina [21].

En un informe de 2019, las Naciones Unidas advirtieron de que los objetivos no se estaban cumpliendo a un ritmo suficiente y lanzó las Acciones de Aceleración de los ODS, una lista de acciones que pueden adoptarse voluntariamente para mejorar las posibilidades de éxito de la Agenda 2030 [22]. A pesar de los triunfos registrados, la reciente pandemia mundial de Covid-19 ha hecho retroceder muchos de los esfuerzos ya realizados. Las Naciones Unidas han subrayado la gravedad de la situación mundial y han pedido medidas urgentes para rescatar los Objetivos de Desarrollo Sostenible [23], [24].

## **1.2 CAMBIO CLIMÁTICO EN LA INDUSTRIA MARÍTIMA**

El transporte marítimo mundial es responsable del 2,89% de las emisiones de gases de efecto invernadero. A pesar de que este porcentaje parece pequeño, el sector marítimo es el sexto mayor contribuyente a esta problemática. [25], [26]. Las emisiones de gases de efecto invernadero están aumentando en el sector del transporte marítimo, como demuestran los estudios de la OMI sobre GEI [27]. Al fin y al cabo, las rutas comerciales marítimas representan más del 90% del comercio mundial. [28]. Sin embargo, el transporte marítimo sigue siendo el medio de transporte comercial más seguro, más rentable, más eficiente energéticamente y menos perjudicial [26].

La actividad naviera tiene beneficios sociales, concretamente el trabajo de transporte realizado, y costes sociales, como las emisiones de GEI.

Captar los costes externalizados es complejo, pero forma parte esencial de algunos nuevos sistemas de incentivos que estudian la Organización Marítima Internacional (OMI) y algunos gobiernos. [29], [30]. Se prevé que el transporte marítimo seguirá siendo el medio de transporte preferido, sea cual sea la evolución de la sociedad mundial en el futuro. Las emisiones relacionadas con el transporte marítimo de mercancías dependerán de la proporción del comercio marítimo entre todos los modos de transporte [27].

#### 1.2.1 LA ORGANIZACIÓN MARÍTIMA INTERNACIONAL

La Organización Marítima Internacional (OMI) es el organismo especializado de las Naciones Unidas para la prevención de la contaminación marina y atmosférica por los buques y responsable de la protección y seguridad del transporte marítimo. En 1948, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) la fundó en Ginebra y actualmente cuenta con 175 Estados miembros [31].

Teniendo en cuenta las pruebas aportadas por el IPCC sobre la relación de los GEI con el cambio climático, la OMI adoptó su primera resolución para abordar el problema de los GEI en 1997, cuando pidió a uno de sus comités especializados que elaborara medidas para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> [32]. Desde 2011, la OMI aborda el cambio climático y la reducción de las emisiones de los buques. Con una arquitectura similar a la de la Agenda 2030, la Estrategia Inicial de la OMI sobre GEI se centró en la reducción de las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) del transporte marítimo internacional en fases temporales predeterminadas, en apoyo del Objetivo de Desarrollo Sostenible 13 (Acción por el clima). La Estrategia Inicial para reducir los GEI tiene como objetivo reducir la clasificación CII de todos los buques en un 40% en 2030, en comparación con las emisiones de 2008 [33]–[35].

En la actualidad, la OMI ha emitido medidas obligatorias globales y desarrolla programas de cooperación técnica en apoyo de los esfuerzos estatales para mejorar la eficiencia energética en el sector del transporte marítimo. Se espera que el MEPC 80 (3-7 de julio de 2023) adopte la Estrategia revisada de la OMI para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero de los buques [36].

### 1.2.2 CONVENIO INTERNACIONAL PARA PREVENIR LA CONTAMINACIÓN POR LOS BUQUES

El Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques (MARPOL) es otro acuerdo internacional creado por el Comité de Protección del Medio Marino (CPMM) de la Organización Marítima Internacional (OMI), una división especializada de la OMI cuya función es abordar las cuestiones medioambientales y reducir la contaminación accidental y operativa de los buques en el medio marino [27], [37].

El convenio MARPOL entró en vigor en 1973 y el MEPC lo ha modificado en numerosas ocasiones desde entonces. El MEPC no incluyó la contaminación atmosférica en el ámbito de la primera edición de MARPOL, pero decidió estudiar la contaminación atmosférica de los buques en 1988. Se contabilizaron las emisiones de azufre, nitrógeno y clorofluorocarbono de los buques y se comprobó que constituían un problema mundial y especialmente preocupante en determinadas zonas geográficas, como el Canal de la Mancha. En 1991 se inició la redacción de un nuevo anexo relativo a la contaminación atmosférica procedente de los buques, cuya versión final se adoptó en 1997. Se denominó Anexo VI y entró en vigor en 2005. Limita la cantidad de emisiones admisibles de óxidos de azufre y de óxidos de nitrógeno de los buques y prohíbe la emisión de sustancias que agotan la capa de ozono y la incineración de determinados materiales a bordo [38]. Las últimas enmiendas entraron en vigor a finales de 2022 y establecen la necesidad de mejorar la eficiencia energética en el comercio marítimo y reducir las emisiones de carbono de los buques, en consonancia con la Estrategia Inicial de la OMI para la Reducción de las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de los Buques de 2018 [38].

Para medir y aplicar las medidas adecuadas, la OMI introdujo un par de nuevos parámetros denominados "Índice de Diseño de Eficiencia Energética" (EEDI) e "Indicador de Intensidad de Carbono" (CII). La revisión del transporte marítimo realizada en 2022 por la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD) reveló que la edad media de servicio de la flota mercante es de 21,9 años, y que muchos de estos buques necesitan mejoras para cumplir las nuevas normativas medioambientales [39]. Esto significaba que se necesitaba un nuevo índice y por eso la OMI creó el "Índice de Eficiencia Energética de los Buques Existentes" (EEXI). Tanto el EEDI como el EEXI son requisitos técnicos y no evalúan el funcionamiento del buque, razón principal por la que se creó el "Indicador del Índice de Carbono" (CII) como indicador operativo. Estos índices están en constante desarrollo, utilizando los últimos avances científicos y las aportaciones de las partes interesadas. El MEPC80 abordará algunas mejoras en los índices y el primer lote de datos reales se recibirá a principios de 2024.

A partir de enero de 2023, será obligatoria una evaluación de ambos para todos los buques de más de 400 toneladas de arqueo bruto (GT). Las compañías deberán actuar sobre aquellos buques que rindan por debajo de una curva de rendimiento establecida que endurece los requisitos cada año que pasa [40].

### 1.2.3 PLAN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL BUQUE

Introducido en 2013, todos los buques deben llevar a bordo un Plan de Gestión de la Eficiencia Energética del Buque (SEEMP, por sus siglas en inglés), un plan específico del buque para la eficiencia energética operativa y la mejora que consta de tres partes. Originalmente, el SEEMP constaba de dos partes, una para las prácticas de gestión y otra para el registro del consumo de fuelóleo. La tercera parte se añadió en enero de 2023, y es el plan de intensidad de carbono operativo del buque, que incluye un sistema de clasificación de la eficiencia energética del buque [41], [42]. Si un buque obtiene un resultado excepcionalmente bajo cualquier año o un mal resultado durante tres años consecutivos, deberá actualizar su SEEMP y elaborar un plan de medidas correctoras para alcanzar la intensidad de carbono requerida. Una Organización Reconocida debe verificar el SEEMP cada 3 años [43].

Si una empresa desea ser aún más eficiente desde el punto de vista energético, el SEEMP puede complementarse voluntariamente con la implantación de la norma ISO 50001:2002 de Gestión de la Energía. Aunque el SEEMP es un documento específico para cada buque, la certificación de la norma ISO exige que toda empresa cumpla los requisitos. La norma exige que se implante y revise un sistema de gestión de la energía para introducir mejoras [44].

### 1.2.4 ÍNDICE DE EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA BUQUES EN SERVICIO

La OMI definió este índice como una "medida a corto plazo", término que engloba las medidas que deben ultimarse y acordarse antes de 2023. El EEXI es el requisito técnico para reducir la intensidad de carbono, en contraste con el requisito operativo para hacer lo mismo. El requisito operativo se denomina Indicador de Intensidad de Carbono (CII) y se explica en la siguiente sección [45]. Ambos requisitos son enmiendas MARPOL al Anexo VI, por lo que requieren un mínimo de 22 meses entre el calado y la entrada en vigor.

Se trata de una medida de la eficiencia energética de un buque, y los operadores deben comparar el EEXI del buque con una tabla de referencia establecida y actualizada por el MEPC cada año que pasa.

Existe una variación de este índice, denominada EEDI, para los edificios nuevos. Emplea el mismo principio de funcionamiento, pero los buques nuevos ya deben cumplir los criterios preestablecidos [40], [46]. Se trata de una medida obligatoria a partir de enero de 2023.

Cabe mencionar que han surgido algunas voces que cuestionan el verdadero impacto de las directrices de cálculo del EEXI. Una de ellas es BIMCO, el Consejo Marítimo Internacional y del Báltico, una gran asociación de armadores de todo el mundo [47]. BIMCO argumenta que EEXI y CII son potencialmente engañosos y podrían dar lugar a mayores emisiones con el fin de mejorar la clasificación de un buque individual [48], [49]. También preocupan las implicaciones jurídicas y comerciales de esta normativa, especialmente los derechos de los fletadores a gestionar el buque y las limitaciones a la velocidad del tráfico. [50]. Otros también han manifestado sus propias discrepancias con la nueva normativa [51].

El cálculo del EEXI se realiza de acuerdo con las directrices del sector publicadas por la OMI [52]–[54]. Las directrices actualizadas se adoptarán en la próxima reunión del MEPC; se ha publicado un borrador de las directrices revisadas en IMODOCS [55], [56].

#### 1.2.5 INDICADOR DE INTENSIDAD DE CARBONO

También obligatorio a partir de enero de 2023, el Indicador de Intensidad de Carbono (CII) es otra medida a corto plazo de la Estrategia Inicial de la OMI para reducir las emisiones de GEI que cuantifica la eficiencia energética en términos de gramos de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) emitidos por milla náutica navegada y carga transportada (tonelaje bruto o peso muerto según el tipo de buque). La CII es el requisito operativo para reducir las emisiones de carbono; aborda cómo se opera el buque en lugar de como se adapta o equipa el buque [45], [46].

A partir de 2019, los buques de arqueo bruto igual o superior a cinco mil toneladas deberán informar al Sistema de Recopilación de Datos (DCS) de la OMI, que registra la distancia recorrida, el consumo de combustible y las horas de navegación. Antes de 2019, el DCS de la OMI no estaba implantado y eso significaba utilizar datos de los Sistemas de Identificación Automática (AIS); que pueden adolecer de algunos problemas de posicionamiento, y es fácil de manipular [57]. El DCS de la OMI se basa en la estructura del anterior MRV de la UE, con la diferencia principal de que el MRV de la UE exige la notificación de la carga real transportada, mientras que el DCS de la OMI utiliza el peso muerto como aproximación. [58], [59]. Basándose en este sistema de notificación, los armadores que cumplan el requisito de las cinco mil GT deberán calcular la CII de su buque y notificar los resultados al DCS. Las primeras clasificaciones CII verán la luz en 2024.



El CII determina el factor de reducción anual necesario para cumplir con el requisito de reducción de carbono y a los buques se les asignará una puntuación de la A a la E; la primera es la mejor nota que puede alcanzar un buque y la segunda, la peor. Los umbrales de esta calificación medioambiental serán más estrictos cada año hasta 2030, impulsando a la industria naviera hacia un futuro neutro en carbono [60], [61]. Como ya se ha mencionado, cualquier buque clasificado como E en un año, o como D durante tres años consecutivos, deberá actualizar su Plan de Gestión de la Eficiencia Energética y elaborar un plan de medidas correctoras.

El indicador de intensidad de carbono se calcula utilizando las directrices publicadas por la OMI [62]–[64]. El CII es el resultado de la masa total de CO<sub>2</sub> emitida dividida por el trabajo de transporte realizado. El trabajo de transporte se calcula de dos formas diferenciadas, según se utilicen datos reales o aproximados.

$$CII = \frac{\text{Mass of CO}_2 \text{ emitted}}{\text{Transport Work}} \tag{1.}$$

La masa total de CO<sub>2</sub> emitida es el resultado de multiplicar el consumo anual de combustible por un factor de conversión específico para cada combustible. Se utiliza una suma de productos cuando hay varios combustibles en servicio.

$$CO_2 \text{ emitted} = \text{yearly consumption} \cdot CO_2 \text{ conversion factor} \tag{2.}$$

La siguiente tabla muestra el contenido de carbono y los factores de conversión de los combustibles utilizados en el estudio de caso. El factor de conversión se expresa en toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de combustible.

*Tabla 1: Contenido de carbono y factor de conversión de cuatro combustibles [64]*

<b>Combustible</b>	<b>Contenido en carbono</b>	<b>Factor de conversión</b>
Fuelóleo Pesado (Grados RMD hasta RMK)	0.85	3.114
Fuelóleo Ligero (Grados RMA hasta RMD)	0.86	3.151
Diesel (Grados DMX hasta DMC)	0.875	3.206
GNL	0.75	2.750

El trabajo de transporte es el producto de la capacidad y la distancia recorrida. Cuando se utiliza como capacidad la carga real o estimada transportada, el indicador pasa a denominarse "CII basado en la demanda". Si se utiliza el peso muerto como capacidad, el indicador pasa a denominarse "CII basado en la oferta". El peso muerto es la diferencia en toneladas entre el calado máximo de verano y la condición ligera. Debe tenerse en cuenta que así es como se calcula el CII para un buque de transporte de GNL; se aplican variaciones para otros buques, como los buques para el transporte de carga rodada.

$$\text{Transport work} = \text{Capacity} \cdot \text{Distance travelled} \quad (3.)$$

El combustible consumido anualmente se expresa en gramos, al igual que la masa de CO<sub>2</sub> emitida. La distancia recorrida se indica en millas náuticas. La intensidad de carbono son entonces toneladas de CO<sub>2</sub> sobre toneladas por milla náutica (toneladas CO<sub>2</sub>/toneladas\*nm).

Una variación del CII es el Indicador de Rendimiento de la Eficiencia Energética (IREE), que consiste en utilizar la distancia navegada con carga en lugar de toda la distancia navegada.

Parece que el cálculo del CII basado en la demanda, también llamado Indicador Operativo de Eficiencia Energética (IEEE), al realizar viajes en lastre dará lugar a errores, pero, dado que el CII se calcula para un período de un año, no debería haber problemas de división entre cero. Además, el EEOI es una medida voluntaria y no puede utilizarse para la calificación del CII.

#### 1.2.6 MEPC 79 Y LAS PERSPECTIVAS FUTURAS

Celebrada en diciembre de 2022, la 79ª reunión del Comité de Protección del Medio Marino es la última sesión registrada hasta la fecha.

Entre las principales novedades, el Comité de Protección del Medio Marino espera adoptar la Estrategia revisada; una actualización de la Estrategia inicial de la OMI para reducir las emisiones de carbono de los buques, durante su 80ª reunión del 3 al 7 de julio de 2023 [40]. En 2024 entrará en vigor una Zona de Control de Emisiones de Azufre (SECA) en el Mediterráneo. Además, las notas de entrega de combustible (BDN) deberán incluir el punto de inflamación de los combustibles vendidos y se aceptarán en formato digital si cumplen los requisitos de MARPOL [65]. El Libro de Registro de Basura es ahora obligatorio para los buques más pequeños y el Libro de Registro de Aguas de Lastre (BWRB) utilizará un código alfabético para registrar los eventos, también los tanques de lastre pueden ser utilizados como almacenamiento temporal de aguas residuales tratadas y aguas grises.

El MEPC también ha modificado el Anexo VI de MARPOL en su Apéndice IX para incluir los datos CII y EEXI como información obligatoria que debe enviarse a la Base de Datos de Consumo de Combustible de Buques (DCS) de la OMI a más tardar el 30 de junio [66], [67].

Las directrices para el cálculo del EEDI se han actualizado para incluir un factor de conversión de CO<sub>2</sub>, una referencia a las directrices actualizadas de la Conferencia Internacional de Tanques de Remolque (ITCC) y una aclaración sobre los buques con certificaciones de líneas de carga múltiples. Se evaluará una posible cuarta fase del EEDI, así como su desarrollo para incluir o eliminar factores de cálculo. Las próximas reuniones del MEPC decidirán sobre estos asuntos [68].

El MEPC 79 publicó cuatro Interpretaciones Unificadas aprobadas, una sobre la notificación por el DCS de los gases de ebullición (BOG), otra sobre las emisiones de NO<sub>x</sub> al utilizar biocombustibles, otra sobre el SEEMP y una última sobre los planes de acción correctiva de los buques que no cumplen la ICCI [7].

Los documentos del MEPC 80 están disponibles de manera anticipada para consulta pública, los puntos más destacados del orden del día de la reunión se muestran en los siguientes párrafos [[69]:

*Tabla 2: Puntos destacados del MEPC80 [69]*

<b>Documentos relevantes</b>	<b>MEPC 80 destacados</b>
MEPC 80/1/1	Nuevo comité de evaluación para el tratamiento del agua de lastre
MEPC 80/INF.4	Evaluación del límite mundial del 0,5% de azufre
MEPC 80/5	
MEPC 80/5/2	Cuestiones sobre el uso de biocombustibles
MEPC 80/7/9	
MEPC 80/INF.19	Evaluación de una nueva zona especial del Mediterráneo

Tabla 3: Continuación de los puntos destacados del MEPC80 [69]

<b>Documentos relevantes</b>	<b>MEPC 80 destacados</b>
MEPC 80/INF.5	
MEPC 80/6/1	Examen de las cuestiones relacionadas con el EEDI
MEPC 80/6/2	
MEPC 80/6/10	
MEPC 80/1/1	Adopción de la estrategia 2023 para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero
MEPC 80/INF.14	
MEPC 80/INF.32	Debate sobre la captura de carbono a bordo
MEPC 80/7	
MEPC 80/7/7	
MEPC 80/7/1	Finalización de las directrices sobre la intensidad de carbono del ciclo de vida del combustible
MEPC 80/7/4	
MEPC 80/INF.39	Examen de las propuestas de medidas a medio plazo sobre eficiencia energética
MEPC 80/INF.39/Add.1	
MEPC 80/6/9	Revisión del sistema de recogida de datos (DCS)
MEPC 80/6/12	
MEPC 80/INF.28	
MEPC 80/6/5	Aplicación de medidas de eficiencia energética a corto plazo
MEPC 80/6/7	

Se creará un comité de evaluación relacionado con el tratamiento del agua de lastre, se evaluará el límite global de azufre del 0,5%, se examinarán cuestiones sobre biocombustibles y se estudiará la implantación de una nueva zona especial para proteger a los cetáceos en el mar Mediterráneo.

En relación con la eficiencia energética, se revisará el sistema de recogida de datos (DCS), se aplicarán medidas a corto plazo y se estudiarán cuestiones relacionadas con el EEDI.

En cuanto a las emisiones de GEI de los buques, se adoptará la estrategia 2023 para la reducción de las emisiones de GEI, se debatirá sobre la captura de carbono a bordo, se terminarán las directrices sobre la intensidad de carbono del ciclo de vida del combustible y se estudiarán propuestas de medidas a medio plazo.

### **1.3 EMISIONES DEL COMERCIO MARÍTIMO EN LA UNIÓN EUROPEA**

#### **1.3.1 RÉGIMEN DE COMERCIO DE DERECHOS DE EMISIÓN DE LA UNIÓN EUROPEA**

La Unión Europea estableció sus propios objetivos de acción por el clima y los declaró en el llamado "Pacto Verde Europeo". La UE aspira a convertirse en el primer continente del planeta neutro desde el punto de vista climático para 2050, con una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero del 55% en 2030 respecto a los niveles de 1990, medidas como los regímenes de comercio de derechos de emisión y la normativa sobre intensidad de carbono de los combustibles [70], [71].

El Régimen de Comercio de Derechos de Emisión de la Unión Europea (RCCDE) es una medida concebida para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero; se basa en la adquisición, entrega y comercio de derechos de emisión denominados "derechos de emisión". La directiva de la UE se publicó en octubre de 2003 y entró en vigor en 2005 [72], [73].

El RCCDE ha pasado por cuatro fases: la primera se concibió como un campo de entrenamiento para las fases siguientes; la segunda fue la primera prueba realista; la tercera fue la continuación y mejora del sistema; y la cuarta y última es la fase en curso [74]. Durante la primera y la segunda fase, los países que integraban la Unión Europea tenían que fijar sus propios límites nacionales de emisión, y la mayoría de los derechos se entregaban gratuitamente [75]. En la tercera fase, el límite de emisiones se fijó a nivel europeo y las subastas se convirtieron en la principal fuente de derechos de emisión.

El régimen de comercio ha sufrido un exceso de derechos debido a la crisis de 2008 y al brote de Covid-19, que redujo inesperadamente las emisiones de carbono, y la asignación gratuita generalizada de derechos aumentó aún más esta problemática. Medidas como espaciar el tiempo entre subastas y una reserva de derechos han dado estabilidad y reequilibrado el mercado europeo de derechos de emisión [76].

La cuarta fase se prolongará hasta 2030 y se espera que aumente las ambiciones con medidas como la ampliación del régimen de emisiones a la industria marítima. Este régimen de comercio ampliado se basará en el actual sistema de seguimiento, notificación y verificación (MRV) de la UE. Será obligatorio para los buques de más de 5 000 GT que hagan escala en aguas europeas. Deberán pagarse todas las emisiones entre puertos europeos, así como la mitad de las emisiones de los viajes que comiencen o terminen en la Unión Europea. También será obligatoria la entrega del número adecuado de derechos de emisión para cubrir las emisiones de la estancia en puerto en Europa. A partir de 2024, las compañías no tendrán que entregar todos los derechos de emisión requeridos, sino sólo una fracción. El ritmo de aplicación será tal que el pago completo no comenzará hasta el tercer año. La Unión Europea considera que las actuales iniciativas de la OMI para reducir las emisiones de carbono no bastan para lograr la reducción de emisiones acordada en el sector marítimo, razón principal para ampliar el régimen de comercio al sector naviero [77]–[80].

BIMCO ha advertido de que un régimen de comercio regional podría provocar la desorganización de la comunidad mundial respecto a una medida global basada en el mercado, como un régimen de comercio mundial. Afirma que las medidas regionales generan incertidumbre entre los armadores y que otras estrategias similares, como el régimen de comercio de derechos de emisión de la aviación, no han dado lugar a una reducción de las emisiones de carbono, sino más bien a un aumento de los costes para los consumidores [81]. La evasión política y la fuga de carbono son otras preocupaciones que también se han planteado y analizado [82]. Se denomina fuga de carbono al fenómeno de aumento de las emisiones globales de GEI como consecuencia del traslado de las operaciones de una región con determinadas legislaciones a otra en la que esas leyes no se aplican.

El RCCDE tiene mecanismos legales incorporados para integrarse con otros regímenes regionales de comercio de derechos de emisión, también tiene un precedente de dicha fusión en 2017 con el RCCDE suizo [83].

### 1.3.2 *FUEL UE MARITIME*

La propuesta de reglamento denominada "*Fuel UE*" se presentó en julio de 2021 como medida para incentivar el uso de energías bajas en carbono en los buques que hagan escala en puertos europeos. Regulará la intensidad de carbono permitida de los combustibles utilizados a bordo de los buques que lleguen, salgan o permanezcan en puertos europeos. Esta normativa tendrá en cuenta las emisiones del ciclo de vida de los combustibles e incluirá el metano y los óxidos nitrosos. El límite permitido se irá reduciendo con el tiempo.

Esta normativa está prevista para 2025. Seguirá el mismo principio que el RCCDE a la hora de considerar cuánta energía está cubierta por la ley, lo que significa que toda la energía estará sujeta a regulación entre los puertos de la UE, pero sólo la mitad cuando sólo entre o salga de un Estado miembro de la UE.

Además, a partir de 2030 será obligatorio el uso de electricidad en tierra para los buques de contenedores y de pasajeros [29].

#### **1.4 MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN**

A la luz de la nueva normativa, la eficiencia energética es un bien muy buscado. Uno de los medios para mejorar la eficiencia energética es la recuperación del calor residual, una solución muy utilizada en el sector naval, siendo los generadores de agua dulce y las calderas de gases de escape algunos de los mejores ejemplos. Se llevará a cabo una revisión del estado del arte de estas tecnologías, basada en una exhaustiva búsqueda y análisis de las publicaciones relevantes para cada tema. El método aplicado para la selección de la bibliografía se basa en los siguientes requisitos:

- La información debe tener la máxima fidelidad disponible, siendo el productor del documento original la mejor fuente posible.
- La información debe estar respaldada por la máxima autoridad posible, siendo los gobiernos y las organizaciones intergubernamentales ejemplos de las mejores opciones bibliográficas. Los artículos revisados por expertos y publicados en revistas especializadas son la segunda fuente de elección.
- Exceptuando la información histórica y ciertos temas de evolución lenta, la mayor parte de la información debe tener menos de tres años. Los datos sobre acontecimientos actuales y tendencias futuras deben ser los más recientes disponibles.

Con el fin de utilizar las herramientas de análisis más novedosas y precisas, los cálculos se basarán en los documentos previamente elegidos.

#### **1.5 RECUPERACIÓN DE CALOR RESIDUAL**

La reducción del cambio climático y de las emisiones contaminantes está directamente ligada a la eficiencia energética, ya que un menor consumo de energía se traduce en menos emisiones globales. Las medidas de eficiencia van desde el rediseño de los componentes internos del motor hasta la recuperación del calor residual, siendo esta última una medida muy rentable [84].

Las tecnologías de recuperación del calor residual pueden clasificarse en tres categorías: intercambiadores de calor, ciclo Rankine y generadores termoeléctricos de efecto Seebeck [85].

Los intercambiadores de calor, como su nombre indica, intercambian calor entre fuentes y disipadores de calor. Pueden clasificarse según su estructura, flujo y contacto entre fluidos de proceso. La selección del tipo de intercambiador de calor más adecuado es fundamental para la eficiencia; se pueden encontrar muchos estudios sobre el tema del intercambio de calor para aplicaciones específicas. Un caso especial de intercambiador de calor son los enfriadores de absorción, estos dispositivos capitalizan los flujos de calor asociados a los cambios en el estado de la materia. Funcionan en un ciclo de evaporación-absorción-regeneración [86].

El ciclo Rankine es un ciclo termodinámico en el que un fluido de proceso se bombea a una fuente de calor, donde recibe el calor y se dirige hacia una turbina para convertir la energía en trabajo mecánico de un eje y, finalmente, a un condensador donde se enfría para comenzar de nuevo el ciclo. El ciclo Rankine es una opción flexible para la recuperación de calor residual, debido a la posibilidad de elegir cualquier fluido de trabajo y adaptarlo a la fuente de calor. En este sentido, se han estudiado compuestos orgánicos y mezclas zeotrópicas de los mismos y se han relacionado con diferentes temperaturas de fuentes de calor, según sus puntos de ebullición. Una mezcla zeotrópica de líquidos es tal que los componentes líquidos tienen diferentes puntos de ebullición, este tipo de mezcla se utiliza en una variación del ciclo Rankine llamada "ciclo Kalina" [87].

Los generadores termoeléctricos se basan en el uso de semiconductores de baja resistencia eléctrica y alta resistencia térmica para generar directamente electricidad a partir del calor, aprovechando un efecto llamado "efecto Seebeck". Este efecto es una manifestación del movimiento desigual de los electrones dentro de los niveles de energía que crea una diferencia de potencial y, por tanto, una corriente eléctrica [88].

La recuperación del calor residual se ha aplicado ampliamente en el ámbito marítimo; la recuperación del calor de los gases de escape puede ser la más conocida de estas tecnologías. Consiste en una caldera situada sobre la chimenea de gases de escape donde se puede recuperar calor hasta el punto de rocío ácido, cuando la condensación de los compuestos ácidos degradaría los materiales. Otro ejemplo es el generador de agua dulce, un aparato que utiliza el agua caliente procedente del sistema de refrigeración del motor para hervir agua de mar al vacío y producir agua destilada. Esta agua puede almacenarse y acondicionarse para el consumo humano.



Bouman et al. identificaron y clasificaron el potencial de reducción de la contaminación en cinco grandes grupos de medidas: diseño del casco, potencia y propulsión, combustibles alternativos, fuentes de energía alternativas y operaciones. [89]. Como ya se ha mencionado, las tecnologías de recuperación de calor residual prometen ser un buen candidato para la inversión y para satisfacer las demandas de descarbonización para 2050 es necesario trabajar tanto en los diseños de nuevas construcciones como en la modernización de los buques existentes. Existe una posibilidad infraexplotada para RECUPERACIÓN DE CALOR RESIDUAL en el escenario marítimo actual, se trata del uso de la energía fría del GNL. Se trata de una oportunidad creciente, ya que cada vez más armadores están equipando sus buques con capacidades de propulsión de GNL y ya existe una flota de transportistas que utilizan este combustible.

#### 1.5.1 ENERGÍA FRÍA

Las tecnologías de recuperación del calor residual se basan en el principio de la diferencia de temperatura, por lo que cualquier gradiente de temperatura puede ser objeto de aprovechamiento energético. El gas natural licuado (GNL) tiene una cantidad considerable de energía térmica fría almacenada en su temperatura que puede recuperarse aplicando las técnicas de ingeniería adecuadas [90], [91].

El consumo de gas natural licuado no ha dejado de aumentar en las últimas décadas y seguirá haciéndolo hasta 2030, impulsado por las economías emergentes de la región asiática. A partir de entonces, las perspectivas son inciertas; el futuro comercio de GNL dependerá de la velocidad de la transición energética [92].

La exportación tradicional de GNL podría resumirse en los siguientes pasos:

- 1.Extracción del gas natural en los yacimientos.
- 2.Transporte por tuberías hasta una estación de licuefacción.
- 3.Carga del GNL en un buque y travesía.
- 4.Descarga en una estación de relicuefacción, almacenamiento y relicuefacción.
- 5.Distribución por tuberías a los consumidores finales.



Ilustración 3: Cadena de suministro tradicional para GNL. Adaptado de [91].

Al observar el cuarto paso, durante el proceso de regasificación, el GNL extrae calor de un medio de calentamiento como el agua de mar; el calor extraído se denomina "energía fría". Esta energía fría del GNL puede utilizarse para fines como la generación de electricidad, la separación del aire, la desalinización y el procesado de alimentos. La capacidad global de regasificación de GNL alcanzó los 901,9 millones de toneladas anuales (MTPA) en abril de 2022, considerando una pérdida de energía de 830 kJ/kg durante la regasificación si no se aprovecha la energía fría, podemos estimar una pérdida global de energía de  $7,485 \times 10^{14}$  kJ (23735 MW) [90], [91], [93].

Las estaciones de relicuefacción no son el único lugar donde se puede utilizar la energía del frío en un proceso de cogeneración. El GNL a bordo de los buques está sometido a una serie de fenómenos que aumentan su temperatura y provocan la evaporación de una fracción de este en el interior de los tanques de almacenamiento; es lo que se denomina gas de ebullición natural (en inglés "*Natural Boil-Off*", NBO). A bordo de la mayoría de los gaseros reales y puestos en servicio, este gas natural evaporado se utiliza como combustible [93], [94].

Para ello, el NBO debe acondicionarse a una temperatura más alta; y esto suele hacerse en intercambiadores de calor donde se pierde la energía fría. Se puede diseñar una aplicación, como la que se explica más adelante, para volver a capturar y explotar esta energía que, de otro modo, se perdería.

Zhen et al. diseñaron un ciclo Rankine orgánico en el que los gases de escape y el agua de la camisa de un motor marino se utilizan como fuentes de calor y el GNL como sumidero de calor, mientras que Tiancheng et al. también estudiaron las posibilidades de un ciclo Rankine orgánico y el uso de la energía fría para el tratamiento de aguas residuales en un artículo independiente [95]–[97].

Otro ejemplo sería el de Junkeon et al, que propusieron utilizar la energía fría residual del GNL en un sistema de refrigeración para contenedores en buques frigoríficos [98]

### 1.6 ANÁLISIS TERMODINÁMICO

La Primera Ley de la Termodinámica establece que la energía no puede destruirse ni crearse [99].

$$|\Delta E| = Q - W \quad (4.)$$

La ecuación anterior muestra que cualquier variación de energía ( $\Delta E$ ) debe responder a una variación de calor ( $Q$ ) o de trabajo ( $W$ ).

La entropía es una propiedad termodinámica relacionada con la distribución de energía dentro de los niveles de energía microscópicos disponibles de un sistema. Cuanto más difusa sea la distribución de los estados energéticos de las partículas, mayor será la entropía.

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad (5.)$$

Cada combinación de temperatura, presión y composición de una sustancia se denomina "estado". La entropía es una función de estado, lo que significa que tiene un valor único para cada estado que no depende de cómo se ha llegado a dicho estado. El trabajo y el calor no son funciones de estado porque dependen de la historia de transformación de la sustancia [100].

La Segunda Ley de la Termodinámica está relacionada con la entropía y puede enunciarse de varias maneras; la más adecuada para este artículo sería que "los procesos que ocurren espontáneamente en una dirección no ocurren espontáneamente en la dirección opuesta" [101].

La reversibilidad es un concepto teórico relacionado con las transformaciones termodinámicas ideales. Los procesos reales no siguen una serie de estados de equilibrio, sufren fricciones y otras irreversibilidades.

La irreversibilidad, en el ámbito termodinámico, no implica imposibilidad sino, más bien, que un cambio en sentido contrario requiere más energía que el cambio original.

La exergía es un concepto relacionado con la Segunda Ley de la Termodinámica; es la cantidad máxima de trabajo utilizable que puede obtenerse de una sustancia en un estado específico cuando se compara con el estado atmosférico [102].

Es crucial elegir un estado de referencia adecuado para los cálculos exergéticos. La exergía puede destruirse y es una función de estado.

La exergía se divide en exergía física y exergía química.

Exergía					
Física				Química	
Mecánica		Termo-Mecánica			
Cinética	Potencial	Temperatura	Presión	Mezcla y separación	Reacción química

*Ilustración 4: Clasificación de la exergía. Adaptado de [103].*

La exergía es una herramienta útil que completa las lagunas que deja el análisis clásico de la Primera Ley. Proporciona información sobre las ineficiencias del sistema al tiempo que tiene en cuenta los límites de explotación de la energía asociada [104]–[106]. También proporciona medios para combinar energía y materiales en un único flujo cuantitativo [107]. Esta última propiedad abre la posibilidad de realizar un análisis exergoeconómico, por ejemplo, utilizando el cálculo del coste específico de la exergía (SPECO) [108].

El cálculo de la exergía depende del proceso específico que se analice; se han desarrollado fórmulas para cada caso. La exergía está relacionada con la calidad de la energía; las distintas manifestaciones energéticas tienen calidades diferentes. Sólo el trabajo mecánico y la electricidad se clasifican como útiles al cien por cien, por lo que son exergía pura [109].

La exergía es una combinación de energía interna, calor y trabajo. Cada concepto puede ampliarse aún más, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Ex = (U - U_0) - T_0(S - S_0) + P(V - V_0) \quad (6.)$$

Donde "U" se utiliza para representar la energía interna, "T" para la temperatura, "S" para la entropía, "P" representa la presión y "V" se utiliza para el volumen. Esta convención se utiliza a lo largo de todo el documento.

La exergía física es una función de la diferencia de entalpía y entropía entre el estado inicial y el final [102].

$$Ex_{,physical} = [h - h_0] - T_0 [S - S_0] \quad 7.) \quad 7.$$

También puede desglosarse en ecuaciones más prácticas si se tiene en cuenta la naturaleza de la sustancia estudiada. En función de las propiedades de compresibilidad de la sustancia, su exergía física puede calcularse del siguiente modo.

Para fluidos incompresibles:

$$Ex_{ph} = C_p(T - T_0) - T_0 C_p \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + V(P - P_0) \quad (8.) \quad 8.$$

Para fluidos compresibles:

$$Ex_{ph} = C_p(T - T_0) - T_0 C_p \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + RT_0 \ln\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (9.) \quad 9.$$

Cuando no se consideran ni la composición química de una sustancia, ni su energía cinética, ni su energía potencial, la exergía termomecánica relacionada únicamente con la presión y la temperatura que queda es igual a la energía libre de Gibbs. La energía libre de Gibbs es una función energética habitual para los cálculos de equilibrio químico y físico [103].

La exergía térmica depende de la temperatura del estado final, que es la temperatura ambiente.

$$Ex_{heat} = Q \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) \quad (10.)$$

Donde:

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (11.)$$

Por último, la eficiencia energética se calcula como la relación entre la exergía útil del proceso y la exergía total presente.

### 1.7 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El principal objetivo de este proyecto es contribuir a colmar la laguna de conocimientos en torno a la nueva legislación sobre contaminación y las posibilidades de la energía fría, al tiempo que se sensibiliza sobre la situación del cambio climático. Los objetivos específicos que cumplir son los siguientes:

- Establecer una relación entre la investigación sobre eficiencia energética y los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

- Aumentar el conocimiento de los análisis de exergía y su papel en la industria naval.
- Mejorar la concienciación sobre las posibilidades de la energía del frío.
- Proponer una medida para mejorar la eficiencia energética en un caso práctico de transporte de gas licuado.
- Evaluar la medida de eficiencia energética propuesta y sus costes de aplicación.

## **2. METODOLOGÍA**

Tras la crisis energética iniciada por la guerra de Ucrania, con el aumento del consumo de gas en el mercado asiático y la ampliación de la flota de GNL en todo el mundo, se opta por un tipo de buque de transporte de gas natural licuado. Los buques de GNL más antiguos, que presentan índices de evaporación más elevados que los nuevos debido a los cambios en las tendencias de ingeniería, corren el riesgo de incumplir la nueva normativa sobre el CII [110]–[112]. Esta particularidad hace de estos viejos buques metaneros una zona de pruebas propicia para tecnologías innovadoras que mejoren la eficiencia energética y los índices relacionados.

### **2.1 DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO Y EJEMPLO DE RUTA**

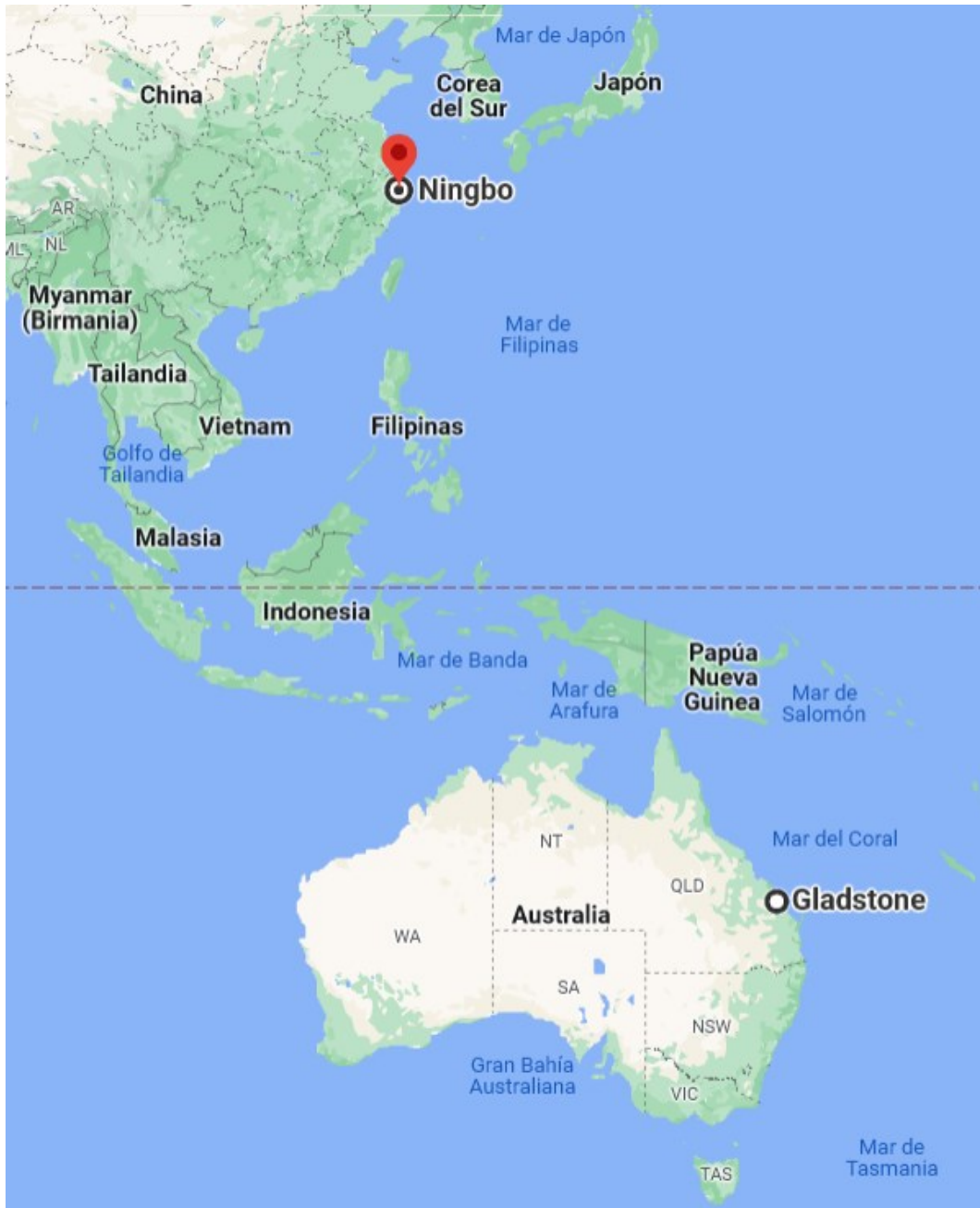
Examinando la flota real de transporte marítimo de gas natural, se ha elaborado un caso de estudio a modo de ejemplo. Todas las fórmulas y cálculos pueden aplicarse a cualquier otro buque teniendo en cuenta las particularidades de cada uno.

El buque tiene 290 metros de eslora total, 45,8 metros de manga de trazado y un calado de verano de 12,921 metros. Su quilla se colocó a finales de 2009, tiene un arqueado bruto de 110 920 y puede transportar 173 400 metros cúbicos de gas natural licuado en cuatro tanques de tipo membrana. Es de propulsión diésel-eléctrica, con dos motores eléctricos de propulsión capaces de entregar un total de 26 480 kW, y cuatro motores de combustión tri-fuel para la generación de energía. El buque puede navegar a una velocidad máxima de 19,5 nudos. No dispone de planta de relicuefacción.



*Ilustración 5: Buque estudiado. Adaptado de [113].*

Como se ha mencionado previamente, el asiático es un mercado en expansión, por lo que se ha seleccionado una ruta comercial de ejemplo en esa zona en la que el buque carga en la ciudad australiana de Gladstone, una popular terminal de GNL en la zona del Pacífico, y descarga en la República Popular China, en Ningbo. La siguiente figura muestra la ruta comercial del buque.



*Ilustración 6: Mapa que muestra las ubicaciones de Ningbo y Gladstone.*

### 2.1.1 MAQUINARIA

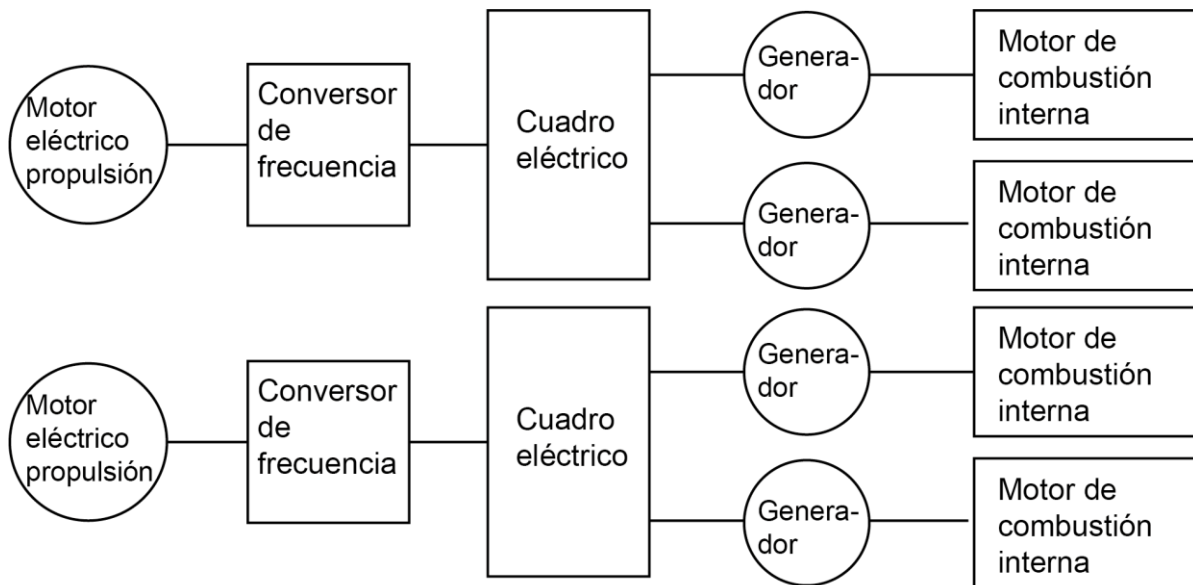
El buque está equipado con propulsión diésel-eléctrica, que mueve las hélices mediante dos motores de propulsión eléctrica Converteam, alimentados por cuatro generadores diésel tri-fuel Wärtsilä.

Los generadores son tres Wärtsilä 12V50DF y un Wärtsilä 9L50DF, motores turboalimentados, con enfriador intermedio, de cuatro tiempos e inyección directa de combustible líquido. Tienen una potencia de 11400 kW y 8 550 kW. Estos motores pueden funcionar en dos modos distintos, en función del combustible utilizado.



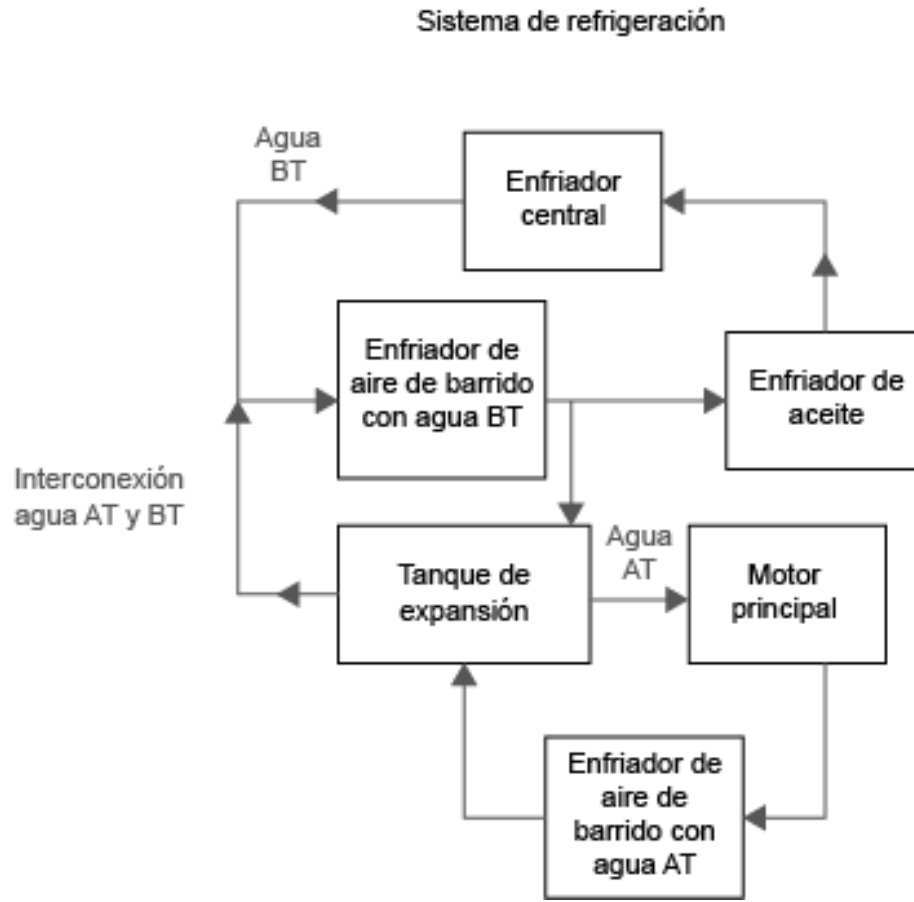
El modo gas admite GNL a baja presión en la cámara de combustión, lo comprime e inyecta una pequeña fracción de gasóleo, denominada combustible piloto, que se autoenciende al final de esta etapa para conseguir un ciclo termodinámico de combustión pobre. En cambio, en el modo diésel (DO), también funciona en un ciclo termodinámico de mezcla pobre, pero el gasóleo se inyecta al final de la etapa de compresión y se autoenciende sin que intervenga ningún otro combustible. En el modo DO, el motor sigue suministrando parte del gasóleo como combustible piloto, pero sólo para evitar que se obstruyan los orificios de los inyectores. Para empezar, se realiza un análisis termodinámico de uno de los motores 12V50DF, pero el método y las ecuaciones son válidos para cualquier otro motor. Posteriormente, se evalúa el EEXI y el CII de todo el buque.

La imagen inferior muestra una versión esquemática del sistema de transmisión de energía.



*Ilustración 7: Esquema típico de una propulsión diésel-eléctrica.*

El motor se refrigera mediante un sistema de agua dulce de circuito cerrado, dividido en un circuito de alta temperatura (AT) y un circuito de baja temperatura (BT). El sistema de alta temperatura se alimenta a través de una válvula de control de temperatura en cada motor desde el sistema de baja temperatura. El agua de refrigeración se enfría en un refrigerador central independiente. La siguiente figura contiene una versión simplificada del sistema de refrigeración por agua.



*Ilustración 8: Esquema simplificado del sistema de refrigeración por agua dulce del generador.*

El buque está equipado con dos calderas de gases de escape, ambas trabajan a una presión de 7 bares y generan 2 000 kilogramos de vapor cada hora.

La tabla a continuación contiene los datos obtenidos de los informes de pruebas iniciales del generador.

Tabla 4: Datos del informe de pruebas iniciales del generador.

<b>Parámetro</b>	<b>Modo GAS</b>	<b>Modo diésel</b>
Carga del motor	75%	75%
Potencia en el eje registrada con carga estudiada (kW)	8 487	8 491
Consumo de combustible GNL (Nm <sup>3</sup> /h)	1 776	0
Consumo de combustible DO (kg/h)	0	1651,3
Consumo de combustible piloto (DO) (kg/h)	5,99	5,37
Temperatura del DO antes del motor (°C)	40	37
Temperatura del aire de entrada (°C)	29,5	31,3
Presión barométrica (mbar)	1 015	1 011
Humedad relativa (%)	37	26
Temperatura del aire de carga (°C)	44	49
Presión del aire de carga (bar)	1,7	2,2
Temperatura de los gases de escape antes del turbocompresor (°C)	556	487
Temperatura de los gases de escape después del turbocompresor (°C)	426	343
Temperatura del agua a alta temperatura (AT) después del refrigerador del aire de sobrealimentación (°C)	84	89
Temperatura AT antes del motor (°C)	78	80
Temperatura baja (BT) del agua antes del refrigerador del aire de sobrealimentación (°C)	37	38
Temperatura baja (BT) del agua después del refrigerador del aire de sobrealimentación (°C)	42	43
Temperatura del aceite antes del motor (°C)	61	61
Temperatura media de las superficies no blindadas (°C) <sup>a</sup>	85	85

<sup>a</sup> Estimación

La tabla a continuación muestra los datos que podrían figurar en el manual del operador:

*Tabla 5: Datos del manual del generador.*

<b>Parámetro</b>	<b>Modo gas</b>	<b>Modo diésel</b>
Temperatura del gas antes del motor (°C)	36	N/A
Caudal másico del aire de admisión (kg/s)	13,6	18,2
Caudal másico de gases de escape (kg/s)	14,2	18,8
Calor disipado por el agua de la camisa (kW)	1 410	1 660
Calor disipado por el circuito AT del aire de sobrealimentación (kW)	1 380	2 480
Capacidad AT de la bomba accionada por el motor (m <sup>3</sup> /h)	270	270
Calor disipado por el circuito BT del aire de sobrealimentación (kW)	970	1 330
Capacidad BT de la bomba accionada por el motor (m <sup>3</sup> /h)	270	270
Calor disipado por el aceite lubricante (kW)	1 020	1 310
Aumento de la temperatura del aceite (°C)	10-15	10-15
Temperatura del aceite después del motor (°C)	78	78
Caudal de aceite (m <sup>3</sup> /h)	170	170
Calor disipado por radiación e irreversibilidades (kW)	410	460

## 2.2 ANÁLISIS ENERGÉTICO DEL MOTOR

Díaz-Secades et al. propusieron una metodología completa para evaluar el balance energético, exergético, económico y medioambiental de los grandes motores marinos [84]. Dicha metodología sirve de base para el presente estudio, inspirándose en sus fuentes y mejorando publicaciones anteriores. En este trabajo, sólo se necesita un conjunto de datos reducido, y se toman disposiciones para adaptar y simplificar la metodología. Esta versión adaptada puede utilizarse como evaluación preliminar, menos intensiva en recursos, de los grandes motores marinos.

Para empezar, debe evaluarse la entrada de energía. Hay varios flujos de energía que entran en el motor, como el aire de sobrealimentación, el combustible, el aceite lubricante y el agua de refrigeración. El análisis se centra en el aire de sobrealimentación y el combustible. La energía del flujo de combustible puede evaluarse utilizando la propiedad de entalpía, que es útil para seguir los cambios tanto de las funciones de estado como de las manifestaciones de transferencia de energía, como el trabajo y el calor [100].

$$\Delta H = \Delta U + P \cdot \Delta V \quad (12.)$$

La energía del combustible consiste principalmente en la energía química almacenada en los enlaces de las moléculas y en la atracción intermolecular; la energía asociada a la temperatura del combustible no se calcula porque no habría transferencia de calor al no haber diferencia de temperatura. La energía asociada a la presión del combustible sólo representa una pequeña fracción en comparación con la energía química y tampoco se evalúa [84]. Como ya se ha explicado, este motor tiene dos combustibles que entran en la cámara de combustión cuando está en modo gas: GNL a temperatura ambiente y gasóleo como combustible piloto. Se contabilizan ambos combustibles, se multiplica el flujo másico de cada uno por su poder calorífico inferior y se añade a la energía total del combustible. Por último, se extrae la energía de los inquemados, ya que no aporta energía al sistema. Esta energía no quemada se transporta a lo largo de la chimenea como deslizamiento de metano durante el funcionamiento en modo gas y se devuelve al depósito como combustible calentado en modo gasóleo.

$$Q_{fuel} = \dot{m} \cdot LHV - \dot{m}_{unburnt} \cdot LHV \quad (13.)$$

El valor calorífico inferior del combustible (VCI) es de 48 000 kJ/kg para el GNL y de 42 700 kJ/kg para el DO [114]–[116]. Sólo se estudian los hidrocarburos (HC) y el monóxido de carbono (CO) restantes presentes en los gases de escape como material no quemado, el valor calorífico para HC es de 42 900 kJ/kg y 10 100 kJ/kg para el CO [84].

El deslizamiento de metano sería la fracción no quemada en el modo de funcionamiento con gas, pero no se dispone de cifras exactas al respecto, por lo que no se tendrán en cuenta en este estudio [117].

El aire de carga tiene una entalpía superior a la del aire ambiente debido a su mayor presión y temperatura. Siguiendo el mismo enfoque teórico aplicado habitualmente a los ciclos de potencia de los motores, el aire de carga se estudia como una combinación de dos procesos: una compresión adiabática y una adición isobárica de calor. Durante la compresión, el volumen se reduce proporcionalmente a medida que aumenta la presión debido a la ley de Boyle, mientras que la temperatura permanece constante. El producto de la presión por el volumen permanece constante en este proceso. Debido a la ley de Charles, la reducción del volumen del gas debe ir acompañada de un aumento de la temperatura a presión constante. Sólo permanece el calor como producto del caudal másico, la variación de temperatura y la capacidad calorífica específica a presión constante de los gases de escape como gas ideal ( $C_p$  no varía a lo largo del proceso).

$$\Delta H = (\dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T) + \Delta(P \cdot V) \quad (14.)$$

$$\Delta H = (\dot{m}_{c.a.} \cdot C_{p_{c.a.}} \cdot \Delta T_{c.a.}) \quad (15.)$$

El motor se considera una caja negra y no se estudian procesos internos como la combustión, la fricción interna y la mezcla.

En las pruebas se registra el trabajo mecánico que sale del eje. La eficiencia energética se calcula como la relación entre el trabajo del eje y la energía procedente del combustible.

$$\eta = \frac{W_{shaft}}{Q_{fuel}} \quad (16.)$$

Los caudales de agua de refrigeración y aceite lubricante pueden contabilizarse utilizando dos fuentes distintas: los datos ya recogidos para las pruebas o calculados mediante la ecuación correspondiente. Debido a la gran capacidad de los depósitos de agua de refrigeración y a la cantidad relativamente pequeña de aditivos químicos añadidos, ambas opciones proporcionan resultados comparables, a pesar de que el calor específico del agua es ligeramente inferior a 4,184 J/kgK debido a la variación de las propiedades coligativas a causa de los productos químicos de tratamiento del agua añadidos periódicamente al sistema [100], [118]. El aceite utilizado en el motor es AGIP Cladium 400S SAE40 que, según el

fabricante, tiene una densidad de  $918 \text{ kg/m}^3$  a  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  [119]. El coeficiente de calor específico del aceite  $C_p$  se aproxima como  $2,11 \text{ kJ/kg}$  en estudios científicos previos.

Se supone que el calor irradiado por el turbocompresor y otros elementos similares se transfiere en su totalidad al agua de refrigeración, el receptor real de este calor se considera irrelevante, ya que comparte la condición de no ser una fuente realista de cogeneración; ya sea debido al convenio SOLAS (Safety of Life At Sea) en su cuarta regla que prohíbe que cualquier superficie por encima de  $220 \text{ }^\circ\text{C}$  esté expuesta donde puedan producirse derrames accidentales de combustible o que la exergía sea demasiado baja. “2.2.6.1 *Toda superficie que esté a una temperatura superior a  $220 \text{ }^\circ\text{C}$  y sobre la que pueda proyectarse combustible debido a un fallo del sistema de combustible se hallará debidamente aislada*” [84].

La energía contenida en los gases de escape se evalúa en tres etapas diferentes: cuando acaba de salir del cilindro y está a punto de expandirse en el turbocompresor, cuando sale del turbocompresor antes de llegar a la caldera del economizador y después de haber sido utilizada en el economizador antes de su liberación a la atmósfera.

Antes de entrar en el turbocompresor, la energía de los gases de escape puede evaluarse mediante la ecuación (13) y añadiendo la energía del combustible no quemado.

Después del turbocompresor, los gases de escape han transferido calor al agua de refrigeración y trabajo mecánico al eje. El trabajo mecánico procede de una expansión volumétrica, por lo que no se puede utilizar el calor específico a presión constante, sino el calor específico a volumen constante y la asimilación de los gases de escape como un gas perfecto. Asumiendo la transformación en trabajo mecánico como un proceso perfectamente reversible, esta fracción debe ser igual a la energía absorbida por el aire de carga. El calor transferido al agua de refrigeración se anota explícitamente en el informe del ensayo. La energía final de los gases de escape antes de pasar por el economizador se muestra en la ecuación (17).

$$\Delta H = (m_{exh} \cdot C_v \cdot \Delta T) - (m_{c.a.} \cdot C_{p_{c.a.}} \cdot \Delta T_{c.a.}) \quad (17.)$$

La cantidad máxima de energía recogida en el sistema de recuperación del calor residual de los gases de escape puede estimarse como la suma de la energía necesaria para elevar la temperatura del agua dentro de la caldera desde la temperatura ambiente hasta la temperatura del vapor saturado y el calor absorbido durante la evaporación [100]. En la ecuación (18.), la primera mitad representa la energía necesaria para llevar el agua a temperatura ambiente a vapor a temperatura de saturación, y la segunda mitad representa la energía necesaria para la transición a fase gaseosa de toda la masa de agua.

El calor de vaporización se denomina "vapheat", la masa se caracteriza por "m", la variación de entalpía es la habitual " $\Delta h$ " y el calor se representa como "q".

$$q = m \cdot \Delta h + m \cdot vap_{heat} \quad (18.)$$

La temperatura final de los gases de escape antes de ser liberados a la atmósfera se calcula mediante la ecuación (13).

La energía contenida en los gases de escape cuando se liberan es la suma de su energía interna y química. El concepto "sin quemar" sigue representando tanto los hidrocarburos sin quemar como el monóxido de carbono en el modo de funcionamiento diésel, mientras que sería el deslizamiento de metano en el modo de gas si se contabilizara.

$$E = U + unburnt \quad (19.)$$

La energía interna sólo corresponde a la energía asociada a su temperatura, ya que extraer trabajo mecánico de los gases de escape podría dar lugar a problemas relacionados con la alta contrapresión de escape [120]. También se aporta un cálculo más realista; la energía contenida en los gases de escape hasta el punto de rocío ácido (según el autor; 140 grados Celsius en el presente estudio).

El calor disipado en el bloque motor se estima como la diferencia entre la energía consumida y cualquier otra transferencia de energía. También lo estima el fabricante del motor.

### 2.3 ANÁLISIS EXERGÉTICO

La exergía que entra en el sistema estudiado está relacionada con el aire de sobrealimentación y el combustible. Como el aire de carga está a temperatura ambiente y en equilibrio químico, no contiene exergía. La exergía contenida en el combustible es principalmente exergía química y puede obtenerse de tablas de referencia en la literatura o bases de datos especializadas en línea [121], [122]. También puede calcularse utilizando la energía química conocida del combustible y multiplicándola por una relación tabulada, a menudo denominada " $\varphi$ ". Stepanov determinó un valor de 1,039 para el GNL y 1,069 para el gasóleo [123].

$$Ex_{fuel} = \varphi \cdot Q_{fuel} \quad (20.)$$

La exergía que sale del sistema está contenida en la potencia del eje, los gases de escape, el agua de refrigeración y el calor disipado por el bloque.



La potencia en el eje es una forma de exergía mecánica y no se tendrán en cuenta las pequeñas pérdidas de exergía, como la fricción contra los cojinetes. Al ser una cadena cinemática diésel-eléctrica, no tiene caja de cambios y la energía fluye como corriente eléctrica, que es una forma de exergía pura. Con estos conocimientos, la potencia en el eje puede considerarse exergía al cien por cien [109].

La exergía presente en los gases de escape como energía química del combustible no quemado se calcula utilizando las tablas de referencia mencionadas anteriormente.

El resto de la exergía que sale del sistema lo hace en forma de transferencia de calor y su exergía puede calcularse como:

$$Ex = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot Q \quad (21.)$$

Donde  $T_0$  es la temperatura ambiente,  $T$  representa la temperatura de la fuente de calor y  $Q$  es el calor calculado previamente. La referencia ambiente habitual se fija en una temperatura de 298,15 grados Kelvin y una presión de 101 325 kPa [124].

El rendimiento exergético es la relación entre el trabajo mecánico del eje y la exergía del combustible.

$$\varepsilon = \frac{W_{shaft}}{Ex_{fuel}} \quad (22.)$$

#### 2.4 PROPUESTA DE SISTEMA PARA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA FRÍA

Siguiendo las directrices para mejorar la imperfección termodinámica proporcionadas por Szargut [122], el flujo de GNL refrigerado será calentado por un flujo de proceso subambiental que necesita ser enfriado. Esto puede lograrse reequipando la maquinaria de Aire Acondicionado (AC) de la Sala de Control de Motores (SCM).

En su configuración original, el gas de ebullición que sale del tanque de contención es conducido a uno de los compresores de baja potencia (LD), donde se eleva su temperatura, y el gas es conducido hacia el postenfriador/calentador. El postenfriador/calentador es un intercambiador de calor de tipo tubo y coraza cuyo objetivo es modular la temperatura del gas natural a 36 °C antes de que llegue al motor.

Para aprovechar la energía del GNL, el flujo debe estar a una temperatura adecuada. La temperatura más baja del agua dulce que sale del postenfriador/calentador durante las operaciones regulares del buque es de 29,02 °C, demasiado alta para cualquier recuperación de energía en frío.

La temperatura del GNL al salir del tanque es de unos  $-159\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo que requeriría una aplicación criogénica. El lugar más adecuado para extraer esta energía fría es entre la salida del compresor de baja potencia y la entrada del postenfriador/calentador, donde la temperatura del GNL se sitúa entre  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

El principal componente del gas natural es el metano, que a temperatura ambiente es asfixiante y extremadamente inflamable. [125]. Por ello, deben adoptarse medidas de seguridad para gestionarlo de forma segura. Dirigir el gas natural alrededor del buque aumentará los riesgos asociados a la manipulación del gas metano y obligaría a reevaluar las zonas seguras del buque. Para evitar este resultado, la energía fría se dirigirá a un fluido de transferencia de calor en un intercambiador de calor.

Este Sistema de Recuperación de Energía Fría (SREF) se integrará con el Aire Acondicionado (AC) ya existente en la Sala de Control de Máquinas (SCM), lo que aporta seguridad redundante y permite realizar el mantenimiento en línea de los componentes. La unidad de aire acondicionado de la SCM es del tipo ventilconvector, donde ya existe una unidad condensadora que funciona con un fluido de transferencia de calor. La SCM alberga numerosos dispositivos electrónicos, cuya vida útil depende en gran medida de la temperatura; basándose en la ecuación de Arrhenius, cada 10 grados adicionales por encima de la temperatura de trabajo diseñada reduce aproximadamente a la mitad la vida útil del componente electrónico [126]. La SCM también sirve para aliviar la temperatura de los trabajadores que pasan mucho tiempo dentro de la sala de máquinas.

El SREF utilizará el mismo fluido y no alterará los parámetros de funcionamiento del sistema de aire acondicionado ni del postenfriador/calentador. Esto se consigue mediante un lazo de control compuesto por una válvula de derivación, un controlador lógico programable (PLC) y los sensores necesarios para gestionar el flujo másico de GNL a través del SREF. La temperatura más baja permitida para este sistema está fijada por el punto de rocío para una humedad relativa del aire de la sala de máquinas del 60%, ya que una temperatura más baja significaría que se produciría condensación sobre los componentes electrónicos de la sala de control del motor, lo que puede ser tan perjudicial como un calor excesivo. El diseño esquemático del SREF propuesto se muestra en la siguiente ilustración.

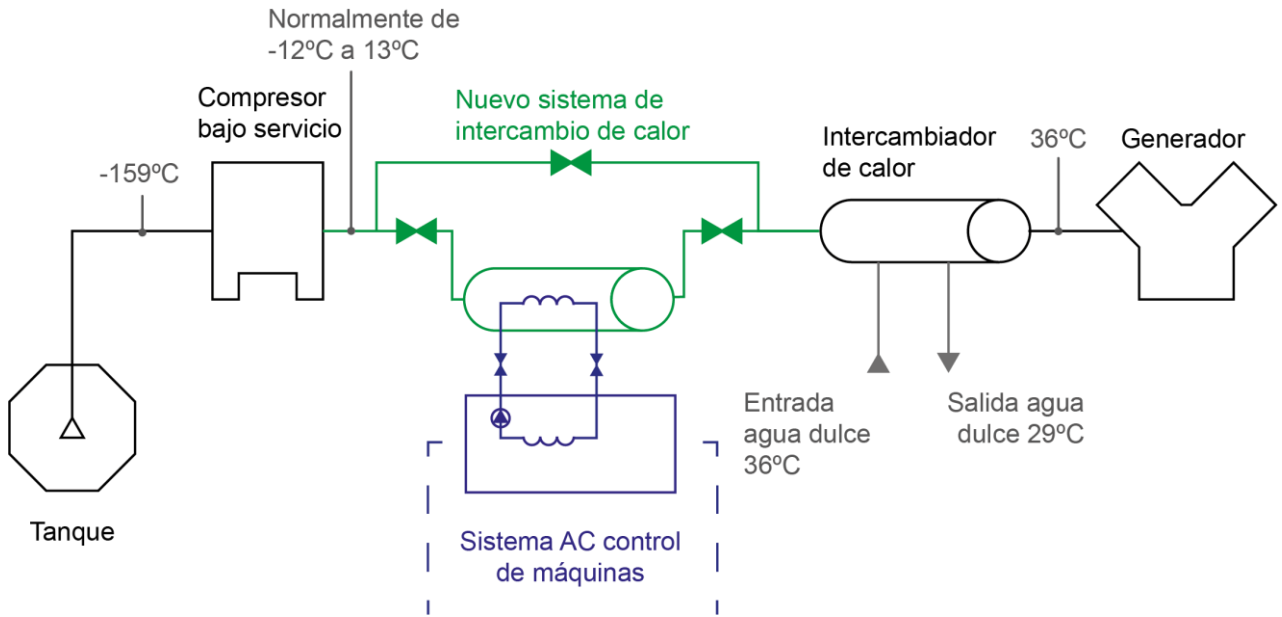


Ilustración 9: Propuesta de Sistema para Recuperación de Energía Fría (SREF)

La sala de control de máquinas tiene las siguientes dimensiones: 20x9x3 metros, tiene forma rectangular y dos puertas que dan directamente a la sala de máquinas. Tiene un total de 540 metros cúbicos y 534 metros cuadrados de superficie. Los actuales sistemas de aire acondicionado utilizan refrigerante R404a y los siguientes parámetros definen el condensador donde el agua enfriada por GNL enfriará el refrigerante.

Tabla 6: Unidad de aire acondicionado de la sala de control de máquinas

<b>Condensador</b>	
Tipo	Carcasa y tubo
Caudal de agua	90,5 m <sup>3</sup> /h
Temperatura de entrada	36 °C
Temperatura de salida	40,7 °C

Este sistema de recuperación no puede clasificarse según las orientaciones del MEPC sobre tecnologías innovadoras de eficiencia energética [127], [128]. Como no genera electricidad, su valor es reducir la potencia auxiliar básica necesaria para la carga normal en el mar utilizando una bomba más pequeña con menos consumo de energía que la original. Esto es posible porque el agua que refrigera el sistema de aire acondicionado está más fría y requiere menos caudal másico para lograr el mismo intercambio de calor.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 BALANCE ENERGÉTICO

Para empezar, se examina el funcionamiento del motor en modo diésel. El flujo másico de monóxido de carbono en los gases de escape es igual a 2,23 kg/s y los hidrocarburos no quemados representan 3,44 kg/s en este motor y modo de funcionamiento.

$$Q_{fuel} = 70\,569\,489\text{ kJ} \rightarrow 19\,602,63\text{ kW}$$

La variación de energía del aire de admisión al aire de sobrealimentación (c.a.) se evalúa del siguiente modo.

$$\Delta H = 326\text{ kW}$$

La densidad del agua es de 971,6 kg/m<sup>3</sup> a 80 °C y de 993 kg/m<sup>3</sup> a 38 °C, ambas temperaturas de entrada al motor para el agua de refrigeración AT y BT. Empezando por el agua de refrigeración AT, acepta la transferencia de calor calculada a continuación.

$$\Delta H = 9\,878\,373,79\text{ kJ} \rightarrow 2\,743,99\text{ kW}$$

Siguiendo con el agua de refrigeración BT, los resultados son los siguientes.

$$\Delta H = 5\,608\,861,2\text{ kJ} \rightarrow 1\,558,01\text{ kW}$$

El calor disipado en el aceite lubricante y que se supone completamente transferido al agua de refrigeración se calcula como:

$$\Delta H = 5\,597\,872,2\text{ kJ} \rightarrow 1\,554,96\text{ kW}$$

La variación de energía de los gases de escape que atraviesan el turbocompresor es:

$$\Delta H = 2954,03\text{ kW}$$

La fracción no quemada se transporta a partir de este punto.

A continuación, se muestra la energía recuperada en la caldera de gases de escape. La entalpía para la temperatura inicial y final puede obtenerse de una tabla de propiedades termodinámicas del agua, lo mismo ocurre con el calor de vaporización [129]. La caldera funciona a una presión de 7 bares, lo que corresponde a una temperatura del vapor de 165 °C. La temperatura de entrada se utiliza como temperatura ambiente.

$$q = 5\,250\,160 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \rightarrow 1\,461,5\text{ kW}$$

La temperatura final de los gases de escape, antes de ser liberados a la atmósfera, puede verse a continuación. La variación de entalpía es la variación dentro de la caldera de gases de escape, la temperatura inicial y el caudal másico son los de los gases de escape de después del turbocompresor.

$$x = 550,56 \text{ K}$$

La energía restante hasta el punto de rocío ácido es la suma de la energía térmica restante hasta 140 °C y la energía química no quemada.

$$E = 173\,381,22 \text{ kJ} \rightarrow 48 \text{ kW}$$

La mayor parte de esta energía restante está contenida en la energía no aprovechada dentro de los enlaces químicos del combustible no quemado.

La diferencia entre la energía que entra en el sistema en forma de energía química procedente del combustible y la suma de las variaciones de energía que se producen después, debe ser la radiación.

$$\text{Radiación} = 465,52 \text{ kW}$$

La eficiencia energética, de acuerdo con la ecuación expuesta en el apartado correspondiente.

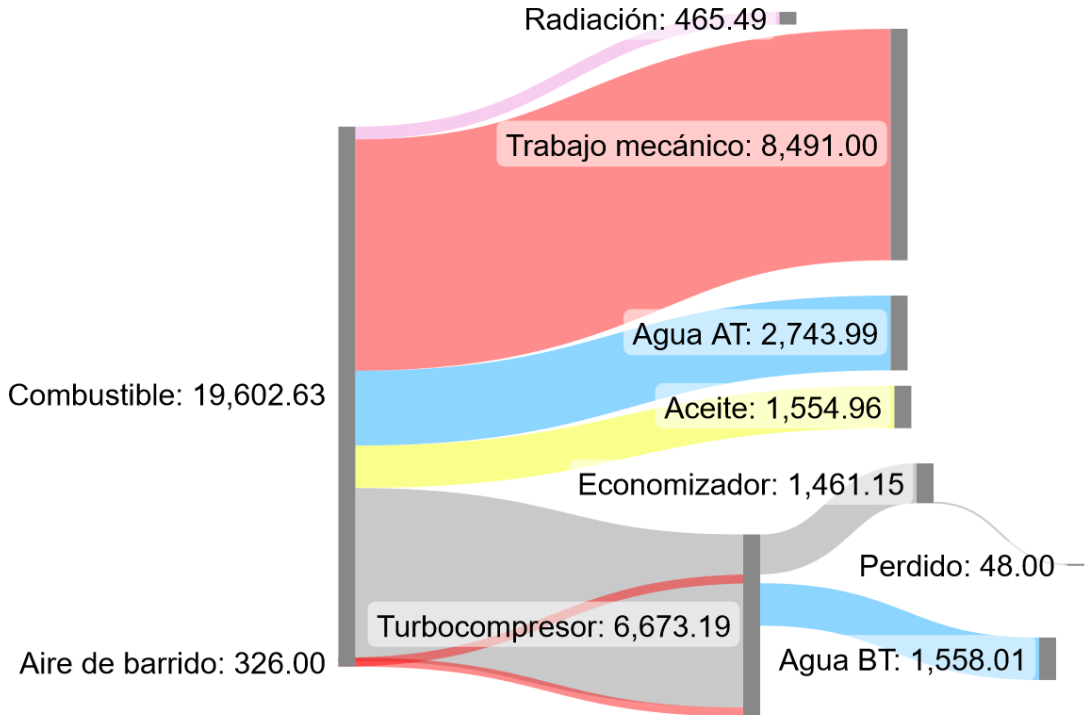
$$\eta = 0.43$$

En el siguiente cuadro se resumen todas las cifras.

*Tabla 7: Resultados del análisis energético*

<b>Objeto de análisis</b>	<b>Resultado del cálculo (kW)</b>	<b>Resultado esperado (kW)</b>
Energía del combustible	19 602,63	N/A
Trabajo del eje	8 491	8 550
Energía obtenida por el aire de sobrealimentación	326	N/A
Calor disipado por el agua AT	2 743,99	2 480
Calor disipado por el agua BT	1 558,01	1 330
Calor disipado por LO	1 554,96	1 310
Variación en el turbocompresor	2 954,03	N/A
Energía aprovechada en RECPUERACIÓN DE CALOR RESIDUAL	1 461,15	N/A
Energía perdida en la chimenea	48	N/A
Radiación	465,49	460

A continuación, se muestra un diagrama de Sankey para el modo diésel.



Made with SankeyMATIC

Ilustración 10: Diagrama de Sankey para los flujos energéticos en modo diésel

Siguiendo con el análisis energético del motor, los cálculos del balance térmico para su funcionamiento en modo gas son, esencialmente, los mismos que en modo diésel, pero teniendo en cuenta el combustible gaseoso.

La fracción no quemada debería ser el deslizamiento de metano en este modo de funcionamiento, pero aún no hay mucha información al respecto y, por tanto, se desprecia el combustible no quemado en este modo de funcionamiento [117]. La energía que entra en el sistema debe convertirse primero de metros cúbicos estándar a kilogramos utilizando un factor de conversión [130].

$$Q_{fuel} = 65\,044\,253\text{ kJ} \rightarrow 18\,067,84\text{ kW}$$

La variación de energía del aire de admisión al aire de sobrealimentación (c.a.) se evalúa del siguiente modo.

$$\Delta H = 199,56 \text{ kW}$$

La densidad del agua es de  $972,85 \text{ kg/m}^3$  a  $78 \text{ }^\circ\text{C}$  y de  $993,37 \text{ kg/m}^3$  a  $37 \text{ }^\circ\text{C}$ , ambas temperaturas de entrada al motor para el agua de refrigeración AT y BT. Empezando por el agua de refrigeración AT, acepta la transferencia de calor calculada a continuación.

$$\Delta H = 6\,594\,055.12 \text{ kJ} \rightarrow 1\,831,68 \text{ kW}$$

Continuando con el agua BT, los resultados son los siguientes.

$$\Delta H = 5\,612\,29.158 \text{ kJ} \rightarrow 1\,558,97 \text{ kW}$$

El calor disipado en el aceite lubricante y que se supone completamente transferido al agua de refrigeración se calcula como:

$$\Delta H = 5\,597\,872.2 \text{ kJ} \rightarrow 1\,554,96 \text{ kW}$$

La variación en la energía de los gases de escape que atraviesan el turbocompresor es la siguiente.

$$\Delta H = 1\,987,94 \text{ kW}$$

A continuación, se muestra la energía recuperada en la caldera de gases de escape. La entalpía para la temperatura inicial y final se puede obtener a partir de una tabla de propiedades termodinámicas del agua, lo mismo ocurre con el calor de vaporización [129]. La caldera funciona a una presión de 7 bares, lo que corresponde a una temperatura del vapor de  $165 \text{ }^\circ\text{C}$ . La temperatura de entrada se utiliza como temperatura ambiente.

$$q = 5\,250\,160 \text{ kJ/h} \rightarrow 1\,461,15 \text{ kW}$$

La temperatura final de los gases de escape, antes de ser liberados a la atmósfera, puede verse a continuación. La variación de entalpía es la variación dentro de la caldera de gases de escape, la temperatura inicial y el caudal másico son los de los gases de escape de después del turbocompresor.

$$x = 612,31 \text{ K}$$

La energía restante hasta el punto de rocío ácido es la suma de la energía térmica restante hasta  $140 \text{ }^\circ\text{C}$  y la energía química no quemada. Como se ha mencionado anteriormente, aún no se dispone de mucha información sobre el deslizamiento del metano, por lo que se ignora en este reducido estudio.

$$E = 3\,351,26 \text{ kJ} \rightarrow 0,93 \text{ kW}$$



La mayor parte de esta energía restante está contenida en la energía no aprovechada dentro de los enlaces químicos del combustible no quemado.

La energía que no ha pasado a formar parte de los flujos energéticos anteriores, debe ser radiación.

$$\text{Radiación} = 985,21 \text{ kW}$$

Y la eficiencia energética acorde a la ecuación correspondiente.

$$\eta = 0,47$$

En la siguiente tabla se muestra un listado con los resultados obtenidos.

*Tabla 8: Resumen de los resultados obtenidos durante el análisis energético en modo gas*

<b>Objeto de análisis</b>	<b>Resultado obtenido (kW)</b>	<b>Resultado esperado (kW)</b>
Energía del combustible	18 067,84	N/A
Trabajo del eje	8 487	8 550
Energía obtenida por el aire de sobrealimentación	199,56	N/A
Calor disipado por el agua AT	1 832,12	2 790
Calor disipado por el agua BT	1 558,97	970
Calor disipado por LO	1 554,96	1 020
Variación en el turbocompresor	1 987,94	N/A
Energía aprovechada en RECUERACIÓN DE CALOR RESIDUAL	1 461,15	N/A
Energía perdida en la chimenea	0,93	N/A
Radiación	985,64	410

Los resultados de ambos modos de funcionamiento pueden visualizarse en el siguiente gráfico de barras.

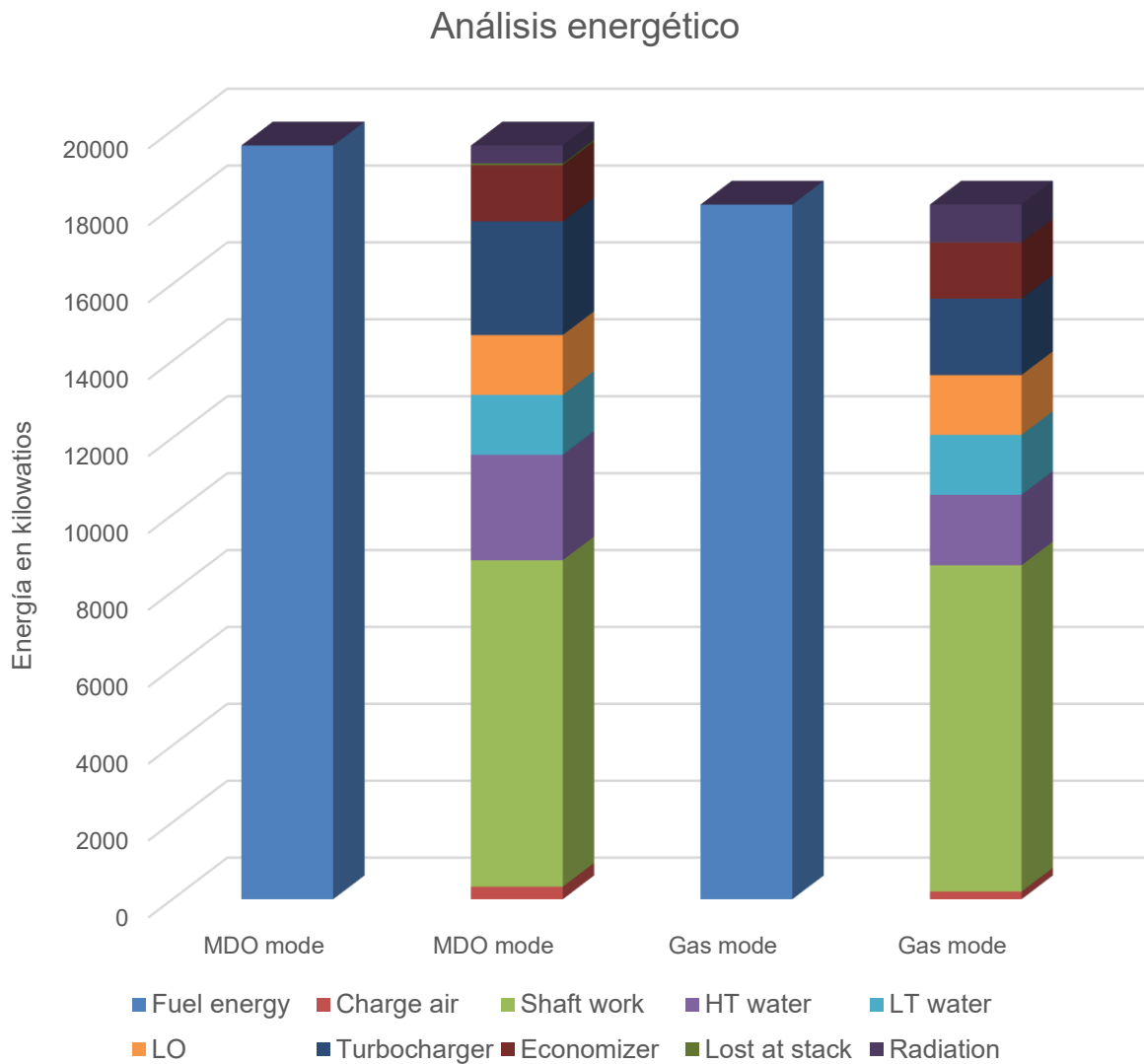


Ilustración 11: Gráfico de barras con los resultados del análisis energético en ambos modos

### 3.2 BALANCE EXERGÉTICO

La exergía del combustible se calcula utilizando los coeficientes experimentales de Stepanov.

$$Ex_{fuel} = \varphi \cdot Q_{fuel}$$

En el modo diésel todo el combustible es gasóleo, y la suma de su caudal másico se multiplica por el poder calorífico inferior del combustible y, a continuación, por la razón de proporcionalidad correspondiente.

$$Ex_{fuel}^{MDO} = 21\ 005,79\ kW$$

En el modo gas, hay que hacer el mismo cálculo para cada combustible y combinar el resultado.

$$Ex_{fuelLNG} = 17\,440,12 \text{ kW}$$

La exergía en cada transferencia de calor se calcula mediante la ecuación (x).

$$Ex = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot Q$$

La tabla a continuación muestra la exergía presente durante las transferencias de calor en modo gas.

*Tabla 9: Transferencias de exergía en modo diésel*

<b>Transferencia de calor en modo diésel</b>	<b>Exergía (kW)</b>
Exergía en la transferencia de calor del agua AT	46,11
Exergía en la transferencia de calor del agua BT	24,73
Exergía en la transferencia de calor del aceite	75,28
Exergía en el intercambio de calor del turbocompresor	463,23
Exergía perdida en la chimenea	310,29
Exergía de la radiación	23,9
Exergía en la transferencia de calor del agua AT	71,67

La siguiente tabla muestra la exergía presente en cada una de las transferencias de calor.

*Tabla 10: Transferencias de exergía en modo gas*

<b>Transferencia de calor en modo gas</b>	<b>Exergía (kW)</b>
Exergía en la transferencia de calor del agua AT	45,54
Exergía en la transferencia de calor del agua BT	24,66
Exergía en la transferencia de calor del aceite	75,28
Exergía en el intercambio de calor del turbocompresor	376,66
Exergía perdida en la chimenea	0,30
Exergía de la radiación	147,68

Es importante recordar que el trabajo del eje es 100% exergía, y se puede presentar una tabla con todos los datos.

*Tabla 11: Resumen de los flujos de exergía en ambos modos de funcionamiento*

<b>Objeto de análisis</b>	<b>Exergía en modo diésel (kW)</b>	<b>Exergía en modo gas (kW)</b>
Exergía del combustible	21 005,79	17 440,12
Exergía del trabajo del eje	8 491	8 487
Exergía en el aire de carga	0	0
Exergía en la transferencia de calor del agua AT	46,11	45,54
Exergía en la transferencia de calor del agua BT	24,73	24,66
Exergía en la transferencia de calor LO	75,28	75,28
Exergía en el intercambio de calor del turbocompresor	463,23	376,66
Exergía perdida en la chimenea	23,9	0,30
Exergía de la radiación	71,67	147,68

Se ofrece una comparativa visual de las magnitudes exergeticas.

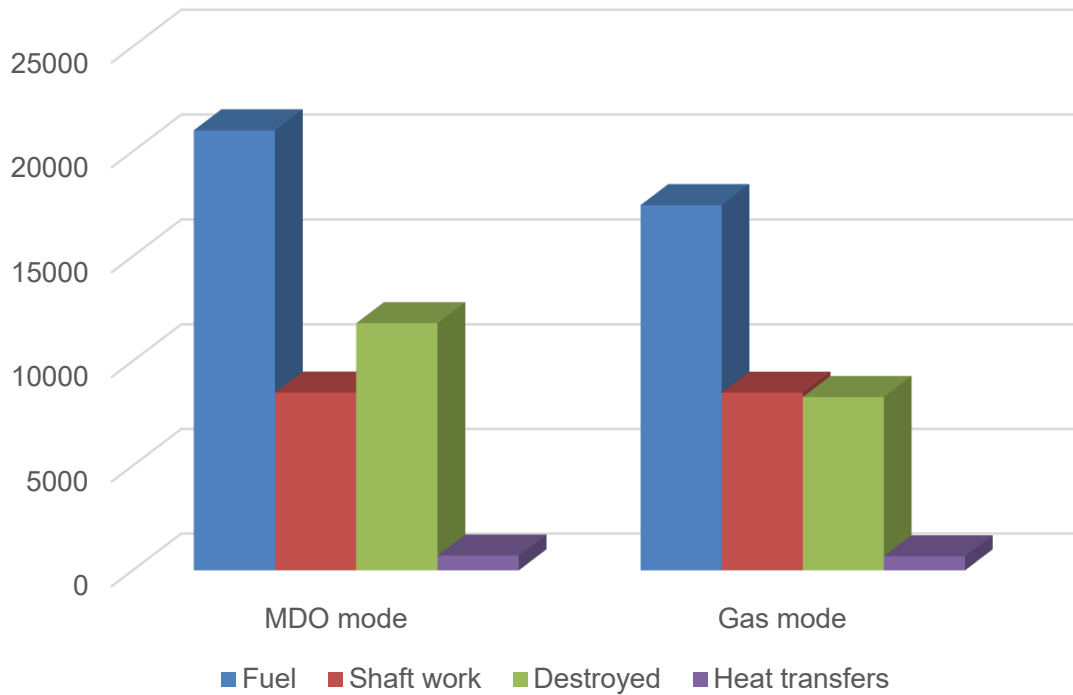


Ilustración 12: Comparativa de la exergetica en ambos modos de operación

Finalmente, se muestra el rendimiento exergetico del generador.

$$\epsilon_{DO\ mode} = 0.40$$

$$\epsilon_{gas\ mode} = 0.48$$

### 3.3 SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA FRÍA

La temperatura mínima admisible es la del punto de rocío para un aire de 35 °C con una humedad relativa del 60%, que representa el aire presente en el interior de los espacios de la sala de máquinas y es igual a 26 °C. Enfriar el aire tomado de la sala de máquinas en el interior de la sala de control de máquinas por debajo de este punto provoca la condensación de agua sobre las superficies más frías primero y sobre las superficies calientes de los equipos después. El punto de consigna para la temperatura del control de máquinas será entonces de 28 °C.

La carga térmica procede del calor generado por los equipos eléctricos existentes en el interior de la sala de control de máquinas. La sala de control de máquinas tiene aproximadamente 360 kW de consumo eléctrico, si el 5% de éste se convierte en calor, la carga térmica de la SCM es igual a 18 kW.

Las pérdidas pueden producirse a través de las superficies y de las aberturas de las puertas.

Las pérdidas superficiales se calculan de la siguiente manera, donde "k" es el coeficiente de transferencia de calor, y la diferencia de temperatura se calcula entre la temperatura de la sala de control y la temperatura de los espacios de máquinas. El coeficiente de transferencia de calor del poliuretano, que aísla la sala de control, es igual a 0,045 kW/m<sup>2</sup>.

$$Q_{surfaces} = Area \cdot k \cdot \Delta T \quad (23.)$$

$$Q_{infil} = 168,21 \text{ kW}$$

Las pérdidas por las aberturas de las puertas requieren conocer el volumen de la sala de control, la densidad del aire a la temperatura de la SCM y la diferencia de entalpía entre el aire del interior de la SCM y el aire del interior de la ER. Estos datos se utilizan en la siguiente fórmula.

$$Q_{doors} = Volume \cdot \frac{50}{\sqrt{volume}} \cdot \delta_{air} \cdot \Delta h \quad (24.)$$

$$Q_{doors} = 9\,369,89 \text{ kJ} \rightarrow 2,60 \text{ kW}$$

La potencia total de refrigeración necesaria para mantener la sala de control del motor a una temperatura de 28 °C es de 188,81 kW.

Dado que el nuevo sistema se integra con el ya existente, resulta útil evaluar el rendimiento máximo de que dispone. La energía extraída del GNL está limitada por el condensador existente, la evaluación es posible utilizando la ecuación 11.

$$Q = \dot{m} \cdot Cp \cdot \Delta T$$

$$Q = 1\,768\,928,587 \text{ kJ} \rightarrow 491,37 \text{ kW}$$

El condensador existente tiene potencia de refrigeración más que suficiente y puede confiar en su propio sistema de control para extraer la cantidad exacta necesaria para el SCM. La alimentación del compresor consume 108 kW.

Por último, se calcula la mejora del rendimiento del motor al aplicar el SREF.

$$\eta_{engine} = \frac{W_{shaft} + (Q_{condenser} - P_{compressor})}{Q_{fuel}} \cdot 100 \quad (25.)$$

Donde  $Q_{condensador}$  es la energía extraída del GNL en el condensador y  $P_{compresor}$  es la potencia necesaria del compresor. Otros términos ya se han explicado anteriormente.

$$\eta_{engine} = 45,27\% \text{ en modo diésel y } 49,1\% \text{ en modo gas}$$

La mejora del rendimiento térmico se muestra en ambos modos de funcionamiento cuando se utiliza la máxima energía recuperable; ésta sería una cifra real si el SREF estuviera integrado con más sistemas de refrigeración. Cuando sólo se utiliza el compresor para refrigerar la SCM, a expensas del mismo consumo de energía, pero sólo se recupera del GNL la carga de refrigeración de la SCM, el nuevo rendimiento térmico del motor puede verse a continuación.

$$\eta_{\text{engine}} = 43,72\% \text{ en modo diésel y } 47,42\% \text{ en modo gas}$$

El rendimiento térmico sigue mejorando, pero la recuperación de toda la energía posible tiene un efecto más notable. Puede ser una solución económica para la eficiencia del combustible, ya que el ahorro de combustible por la conducción de GNL a través del condensador ya existente podría superar con creces los costes de material e instalación.

La siguiente tabla sirve de resumen de los datos obtenidos.

*Tabla 12: Datos del SREF*

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
Pérdidas superficiales	168,21 kW
Infiltraciones en las puertas	2,60 kW
Potencia frigorífica necesaria	188,81 kW
Energía máxima recuperada en el condensador	491,37 kW
Consumo de potencia del compresor	108 kW
Rendimiento térmico original del motor	43,31% modo diésel 46,97% modo gas
Nuevo rendimiento térmico máximo del motor	45,27% modo diésel 49,1% modo gas
Rendimiento térmico del motor con sólo el CER	43,72% modo diésel 47,42% modo gas

### 3.4 EEXI y CII

Estos parámetros pueden calcularse siguiendo las pautas mencionadas en apartados anteriores, la siguiente tabla contiene todos los datos necesarios para este apartado. La Tasa Continua Máxima del motor se abrevia como MCR.

*Tabla 13: Especificaciones del buque metanero estudiado*

<b>Especificaciones</b>	<b>Valor</b>
MCR de los motores principales	11 400 kW x3 + 8 550 kW x1
Potencia del motor de propulsión	26 480 (kW)
Consumo específico de combustible, 75% modo gas	162 g/kWh para generadores de 11 400 kW 162.6 g/kWh generadores de 8 550 kW
Consumo específico de combustible del piloto	6 g/kWh generadores 11 400 kW 6.1 g/kWh generadores 8 550 kW
Peso muerto (DWT)	97 793.2 toneladas
Velocidad de referencia	18,4 nudos
Distancia navegada	4 035 millas náuticas
Combustible consumido	4.70 toneladas DO + 126.65 toneladas GNL
Eficiencia eléctrica	0,913
Factor "a"	144779x10 <sup>10</sup>
Factor "c"	2,673
Factor de reducción "Z" para 2023	5%
Factor de tamaño "X" para 2023	20

Empezando por el Índice de Intensidad de Carbono requerido, la fórmula se presenta a continuación, donde "Z" es el factor de reducción dependiente del año, y los factores "b" y "d" son publicados por la OMI para cada tipo de buque. El factor de reducción para 2023 es del 5% [69], [131].



$$CII_{ref} = a \cdot DWT^{-c} \quad (26.)$$

$$CII_{ref} = 6,63 \text{ gCO}_2/\text{ton nm}$$

En el caso de un buque con varios motores diferentes, en los cálculos posteriores se utilizará el consumo específico medio.

$$Average_{consumption} = \frac{Engine_{power} \cdot Number_{engines} \cdot Specific_{consumption}}{Engine_{power} \cdot Number_{engines}} \quad (27.)$$

$$Average_{consumption}gas = 162,12 \text{ g/kWh}$$

$$Average_{consumption}piloto = 6,02 \text{ g/kWh}$$

La velocidad de referencia ("Speed<sub>service</sub>") en el estudio de caso es igual a la velocidad de servicio del buque al 83% de la potencia del motor de propulsión, en este caso, 18,4 nudos. El consumo de combustible se estima utilizando las ecuaciones básicas de potencia y los datos de la travesía para el cálculo de la distancia navegada se incluyen al principio de Metodología [28].

$$Fuel_{consumption} = Engine_{power} \cdot Specific_{consumption} \cdot \frac{2 \cdot Distance_{sailed}}{24 \cdot Speed_{service}} \quad (28.)$$

$$Fuel_{consumption}gas = 126,65 \text{ toneladas gas } 75\%MCR$$

$$Fuel_{consumption}piloto = 4,70 \text{ toneladas combustible piloto}$$

A continuación, se calcula el CII requerido mediante la ecuación siguiente.

$$CII_{requerido} = CII_{ref} \cdot \left(1 - \frac{Z}{100}\right) \quad (29.)$$

$$CII_{requerido} = 6,3 \text{ gCO}_2/\text{ton} \cdot \text{nm}$$

Para conocer el CII obtenido, se aplica la fórmula mostrada a continuación.

$$CII_{obtenido} = \frac{\text{consumo} \cdot \text{factor}_{conversion}}{DWT \cdot \text{distancia}} \quad (30.)$$

$$CII_{obtenido} = 6,84$$

Finalmente, la calificación CII se obtiene dividiendo el CII obtenido entre el CII requerido.

$$CII_{rating} = \frac{CII_{attained}}{CII_{requerido}} \quad (31.)$$

$$CII_{rating} = 1,085$$

Lo que corresponde a una categoría C.

Siguiendo con el Índice de Eficiencia Energética de Buques Existentes, el EEXI requerido se calcula utilizando los factores "a" y "c" que publica la OMI para cada tipo de buque, mientras que el factor "X" depende del tamaño del buque.

$$EEXI_{requerido} = a \cdot DWT^{-c} \cdot (1 - 0,01 \cdot X) \quad (32.)$$

$$EEXI_{requerido} = 5,30$$

Se presenta una versión simplificada de la fórmula general del EEXI.

$$EEXI_{attained} = \frac{(Main\ eng.\ consumption) + (Aux.\ eng.\ consumption) + etc.}{70\%DWT \cdot Speed_{service}} \quad (33.)$$

$$EEXI_{attained} = 5,70$$

En el caso de los buques GNL diésel-eléctricos, la potencia del motor principal se sustituye como se explica en la ecuación (X).

$$P_{ME} = 0,83 \cdot \frac{Propulsion_{motor}}{Electrical_{efficiency}} \quad (34.)$$

La eficiencia eléctrica del caso de estudio se fija en 0,913, de conformidad con el apartado 2.2.5.1 de las "Directrices de 2022 sobre el método de cálculo del índice de diseño de la eficiencia energética (EEDI) alcanzado para los buques nuevos". [69].

$$P_{ME} = 24\ 072.72\ kW$$

El uso de un SREF responde al requisito técnico de reducir las emisiones de carbono (EEXI), al tiempo que afecta a la clasificación CII. La energía recuperada del GNL puede añadirse a la potencia del motor principal, con lo que se reduce el consumo específico de combustible y mejoran tanto las cifras del CII como las del EEXI. A continuación, se cuantifican los cambios en los valores de estos índices.

*Tabla 14: Comparativa de los índices antes y después del sistema de recuperación de energía fría*

<b>Parámetros</b>	<b>Resultado</b>
Nueva potencia del motor	24 564,09 kW
Nuevo consumo medio específico de combustible	158,877 g/kWh gas 5,899 g/kWh pilot fuel
Valor original del CII	6,84 gCO <sub>2</sub> /ton nm
Nuevo valor CII	6.71 gCO <sub>2</sub> /ton nm
Valor EEXI original	5,70
Nuevo valor EEXI	5,59

Mediante el uso del sistema de recuperación de energía fría propuesto, el EEXI puede reducirse desde el valor original de 5,70 hasta un valor menor de 5,59. Esto supone una reducción del 2% en dicho índice. Gracias a este sistema, los buques en servicio pueden rebajar sus emisiones contaminantes, mejoran su eficiencia y pueden aumentar su vida útil. Esta mejora también es apreciable en el CII.

#### 4. CONCLUSIONES

Se ha estudiado y compilado en el presente documento la información actual en materia de regulación de la eficiencia energética en los buques, tanto en el ámbito global como el europeo.

Se ha realizado el balance energético de la planta propulsora de un buque tanque para transporte de gas natural licuado, obteniendo que, de la energía presente en el combustible, el motor utiliza alrededor de un 43%; siendo el resto de la energía disipada en forma de calor. En el análisis exergético se observa la destrucción de exergía asociada a intercambios de calor.

El buque es capaz de propulsarse mediante el uso del gas natural evaporado durante su transporte, para ello se requiere acondicionar su temperatura. En el proceso de calentamiento del gas natural se desaprovecha una gran cantidad de energía fría que podría utilizarse para satisfacer las necesidades de frío del buque, para ello se ha diseñado un sistema de recuperación de energía mediante el cual, dicha energía es captada y utilizada para la refrigeración del control de máquinas.

La recuperación del calor residual no supone una idea novedosa, y numerosas tecnologías como el ciclo Rankine y sus variantes han sido ampliamente estudiadas. Por este motivo, el sistema de recuperación de energía seleccionado ha sido uno de los menos habituales en la literatura científica.

Tras analizar el sistema de recuperación de energía fría propuesto, se desprende la conclusión de que este se presta mejor como una mejora para futuras construcciones en lugar de como una opción de retroadaptación. Este sistema podría ser instalado durante la construcción en todos los buques de transporte de gas natural licuado que utilicen gas natural evaporado como combustible; al igual que cualquier otra innovación generalizada como la proa de bulbo.

El uso de la energía fría satisface tanto los objetivos operacionales del buque como la necesidad de mejora continua de su eficiencia energética, evaluada en los índices EEXI y CII. Dichos índices han sido calculados para el buque estudiado y ha sido constatada una mejora en estos cuando se ha implementado el sistema de recuperación de energía fría.

Además, el LNG se presta como un combustible de transición y como mejora en materia de contaminación respecto a los combustibles tradicionales; lo que ha ampliado la flota de buques que lo utilizan. Estos buques también pueden beneficiarse de las ventajas de aprovechar no sólo la energía química del gas natural.

#### 4.1 LISTADO DE POSIBLES LÍNEAS FUTURAS

1. Compilación y consolidación de la legislación en materia de eficiencia energética aplicable a buques que operen en la Unión Europea, incluyendo las enmiendas que existan en el momento de la publicación.
2. Estudio de otros sistemas de recuperación de energía fría aplicables a buques cuyo combustible sea gas natural licuado.
3. Mejora e ingeniería de detalle de la propuesta de recuperación de energía fría presentada en este proyecto.
4. Creación de un manual en materia de energía fría que incluya los proyectos existentes, las bases teóricas de cálculo y las líneas de investigación actuales.
5. Estudio del impacto ecológico de la reducción en contaminación térmica del ecosistema, asociada a sistemas de recuperación de calor.

**ANEXOS****ANEXO I: UNIDADES DE MEDIDA UTILIZADAS Y EQUIVALENTE “*SYSTÈME INTERNATIONAL D’UNITÉS*”**

<b>Unidad utilizada</b>	<b>Equivalente SI</b>
Milla náutica (nm)	1 nm = 1852 metros
Nudo (kn)	1 kn = 1 nm/hora = 1 852 m/h = 30,86 m/segundo
Grado Celsius (°C)	0 °C = 273,15 Kelvin (K)
Bar (bar)	1 bar = 100 000 Pascal (Pa)
Toneladas métricas (ton)	1 ton = 1 000 000 gramos (g)

**LISTADO DE PREFIJOS SI UTILIZADOS**

<b>Prefijo</b>	<b>Significado en notación científica</b>
Mega	$10^6$
Kilo	$10^3$

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Core Writing Team, H. Lee, and J. Romero, 'CLIMATE CHANGE 2023 Synthesis Report', 2023. Accessed: Jun. 20, 2023. [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- [2] 'Just 5 questions: Aerosols – Climate Change: Vital Signs of the Planet'. <https://climate.nasa.gov/news/215/just-5-questions-aerosols/> (accessed Jun. 20, 2023).
- [3] 'DOE Explains...Clouds and Aerosols | Department of Energy'. <https://www.energy.gov/science/doe-explainsclouds-and-aerosols> (accessed Jun. 20, 2023).
- [4] C.-O. Lead, A. A. P. M. B. Lead, E. Ahlonsou, Y. Ding, and D. Schimel, 'The Climate System: an Overview'.
- [5] 'Index of MEPC Resolutions and Guidelines related to MARPOL Annex VI'. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Index-of-MEPC-Resolutions-and-Guidelines-related-to-MARPOL-Annex-VI.aspx> (accessed May 08, 2023).
- [6] 'EU ETS: Preliminary agreement to include shipping in the EU's Emission Trading System from 2024'. <https://www.dnv.com/news/eu-ets-preliminary-agreement-to-include-shipping-in-the-eu-s-emission-trading-system-from-2024-238068> (accessed Apr. 28, 2023).
- [7] 'Marine Environment Protection Committee (MEPC) – 79th session, 12-16 December 2022'. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MEPC-79th-session.aspx> (accessed May 15, 2023).
- [8] 'Discover our history, our ecosystem, our missions and the activities we are carrying out | Climate Chance'. <https://www.climate-chance.org/en/about-us/association/> (accessed May 22, 2023).
- [9] 'About Montreal Protocol'. <https://www.unep.org/ozonaction/who-we-are/about-montreal-protocol> (accessed Jun. 26, 2023).
- [10] 'What is the United Nations Framework Convention on Climate Change? | UNFCCC'. <https://unfccc.int/process-and-meetings/what-is-the-united-nations-framework-convention-on-climate-change> (accessed May 22, 2023).
- [11] 'What is the Kyoto Protocol? | UNFCCC'. [https://unfccc.int/kyoto\\_protocol](https://unfccc.int/kyoto_protocol) (accessed May 22, 2023).
- [12] 'The Paris Agreement | UNFCCC'. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement> (accessed Jun. 26, 2023).
- [13] 'THE 17 GOALS | Sustainable Development'. <https://sdgs.un.org/es/goals> (accessed Apr. 11, 2023).
- [14] 'Raising awareness on climate change and health'. <https://www.who.int/europe/activities/raising-awareness-on-climate-change-and-health> (accessed May 22, 2023).
- [15] 'European Climate and Health Observatory'. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/observatory> (accessed May 22, 2023).
- [16] 'UNESCO Designated Sites: A Climate Change Observatory | UNESCO'. <https://www.unesco.org/en/climate-change/unesco-sites-climate-change-observatory> (accessed May 22, 2023).
- [17] 'Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development | Department of Economic and Social Affairs'. <https://sdgs.un.org/2030agenda> (accessed Apr. 11, 2023).
- [18] 'Energy - United Nations Sustainable Development'. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/energy/> (accessed Jun. 19, 2023).
- [19] 'Infrastructure and Industrialization - United Nations Sustainable Development'. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/infrastructure-industrialization/> (accessed Jun. 19, 2023).
- [20] 'Climate Change - United Nations Sustainable Development'. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/climate-change/> (accessed Jun. 19, 2023).

- [21] 'Oceans - United Nations Sustainable Development'. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/oceans/> (accessed Jun. 19, 2023).
- [22] 'About the SDG Accelerations | Department of Economic and Social Affairs'. <https://sdgs.un.org/partnerships/action-networks/acceleration-actions/about> (accessed May 17, 2023).
- [23] United Nations, 'The Sustainable Development Goals Report 2022', Jul. 2022. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/> (accessed May 17, 2023).
- [24] United Nations General Assembly Economic and Social Council, 'SDG Progress Report Special Edition 2023 ADVANCE UNEDITED VERSION', 2023, Accessed: Jun. 16, 2023. [Online]. Available: [https://sdgs.un.org/sites/default/files/2023-04/SDG\\_Progress\\_Report\\_Special\\_Edition\\_2023\\_ADVANCE\\_UNEDITED\\_VERSION.pdf](https://sdgs.un.org/sites/default/files/2023-04/SDG_Progress_Report_Special_Edition_2023_ADVANCE_UNEDITED_VERSION.pdf)
- [25] MAN Energy Solutions, '#AHOY2050 Exploring scenarios for the maritime industry's pathway to a greener future'. Accessed: Jan. 03, 2021. [Online]. Available: <https://www.man-es.com/ahoy2050>
- [26] L. F. Chuah *et al.*, 'Implementation of the energy efficiency existing ship index and carbon intensity indicator on domestic ship for marine environmental protection', *Environ Res*, vol. 222, p. 115348, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.envres.2023.115348.
- [27] 'Fourth Greenhouse Gas Study 2020'. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx> (accessed Apr. 17, 2023).
- [28] A. G. Elkafas, M. Rivarolo, and A. F. Massardo, 'Environmental economic analysis of speed reduction measure onboard container ships', *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 30, no. 21, pp. 59645–59659, Apr. 2023, doi: 10.1007/s11356-023-26745-4.
- [29] 'FUEL EU - zero 2050'. <https://cero2050.es/en/fuel-eu/> (accessed Jun. 16, 2023).
- [30] 'Externalities: Prices Do Not Capture All Costs'. <https://www.imf.org/en/Publications/fandd/issues/Series/Back-to-Basics/Externalities> (accessed Jun. 15, 2023).
- [31] 'Brief History of IMO'. <https://www.imo.org/en/About/HistoryOfIMO/Pages/Default.aspx> (accessed May 08, 2023).
- [32] I. Maritime Organization, 'MP/CONF.3/35 Resolution 8'.
- [33] 'IMO's work to cut GHG emissions from ships'. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Cutting-GHG-emissions.aspx> (accessed Apr. 11, 2023).
- [34] 'Initial IMO GHG Strategy'. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx> (accessed Apr. 17, 2023).
- [35] 'UN body adopts climate change strategy for shipping'. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/06GHGinitialstrategy.aspx> (accessed Apr. 18, 2023).
- [36] 'IMO progress on revised GHG strategy, Mediterranean ECA adopted'. [https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/MEPC-79.aspx#:~:text=MEPC%2080%20\(3%2D7%20July,of%20GHG%20Emissions%20from%20Ships.&text=The%20MEPC%20adopted%20revised%20resolutions,\(74\)%20and%20resolution%20MEPC](https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/MEPC-79.aspx#:~:text=MEPC%2080%20(3%2D7%20July,of%20GHG%20Emissions%20from%20Ships.&text=The%20MEPC%20adopted%20revised%20resolutions,(74)%20and%20resolution%20MEPC) (accessed Jun. 26, 2023).
- [37] 'Marine Environment Protection Committee (MEPC)'. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MEPC-default.aspx> (accessed Apr. 18, 2023).
- [38] 'International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)'. [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx) (accessed Apr. 18, 2023).



- [39] 'Review of Maritime Transport 2022 | UNCTAD'. <https://unctad.org/rmt2022> (accessed Jun. 20, 2023).
- [40] 'EEXI and CII - ship carbon intensity and rating system'. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/EEXI-CII-FAQ.aspx> (accessed Apr. 11, 2023).
- [41] 'Medidas de eficiencia energética'. <https://www.imo.org/es/OurWork/Environment/Pages/Technical-and-Operational-Measures.aspx> (accessed Jun. 16, 2023).
- [42] 'Decarbonize shipping - DNV'. <https://www.dnv.com/maritime/hub/decarbonize-shipping/key-drivers/regulations/imo-regulations/seemp.html> (accessed Jun. 26, 2023).
- [43] 'SEEMP Part III - DNV'. <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/seemp-part-iii/index.html> (accessed Apr. 28, 2023).
- [44] 'ISO - ISO 50001 — Energy management'. <https://www.iso.org/iso-50001-energy-management.html> (accessed Jun. 21, 2023).
- [45] 'IMO Environment Committee approves amendments to cut ship emissions'. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/42-MEPC-short-term-measure.aspx> (accessed Apr. 11, 2023).
- [46] 'Rules on ship carbon intensity and rating system enter into force'. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/CII-and-EEXI-entry-into-force.aspx> (accessed Jun. 12, 2023).
- [47] 'BIMCO Home'. <https://www.bimco.org/> (accessed Jun. 14, 2023).
- [48] 'BIMCO position statement on greenhouse gas (GHG) emissions'. <https://www.bimco.org/about-us-and-our-members/bimco-statements/04-greenhouse-gases-ghg-emissions> (accessed Jun. 15, 2023).
- [49] 'IMO carbon cut plans could boost emissions, BIMCO warns :: Lloyd's List'. <https://lloydslist.maritimeintelligence.informa.com/LL1136979/IMO-carbon-cut-plans-could-boost-emissions-BIMCO-warns> (accessed Apr. 17, 2023).
- [50] 'HFW | Reducing international shipping's carbon intensity ...'. <https://www.hfw.com/Reducing-international-shippings-carbon-intensity-through-the-IMOs-EEXI-and-CII-charterparty-implications-and-challenges> (accessed Jun. 15, 2023).
- [51] 'Love them or hate them, the IMO's new global carbon regulations start this weekend | TradeWinds'. <https://www.tradewindsnews.com/gas/love-them-or-hate-them-the-imo-s-new-global-carbon-regulations-start-this-weekend/2-1-1381822> (accessed Jun. 15, 2023).
- [52] Mepc, 'Resolution Mepc.350(78) (Adopted On 10 June 2022) 2022 Guidelines On The Method Of Calculation Of The Attained Energy Efficiency Existing Ship Index (Eexi)', Jun. 2022. Accessed: Jun. 15, 2023. [Online]. Available: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.350\(78\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.350(78).pdf)
- [53] Imo, '2022 Guidelines On The Method Of Calculation Of The Attained Energy Efficiency Design Index (Eedi) For New Ships', 2022. Accessed: Jun. 17, 2023. [Online]. Available: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364\(79\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364(79).pdf)
- [54] 'Resolution Mepc.350(78) (Adopted On 10 June 2022) 2022 Guidelines On The Method Of Calculation Of The Attained Energy Efficiency Existing Ship Index (Eexi)'. Accessed: Jun. 17, 2023. [Online]. Available: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.350\(78\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.350(78).pdf)
- [55] 'Login Page | IMO Web Account'. <https://docs.imo.org/index.html?iframe=https%3A%2F%2Fdocs.imo.org%2FDefault.aspx> (accessed Jun. 15, 2023).

- [56] IACS, 'MEPC 80/INF.5 - 2022 industry guidelines for calculation and verification of Energy Efficiency Design Index (EEDI)', Mar. 2023. Accessed: Jun. 15, 2023. [Online]. Available: <https://docs.imo.org/Shared/Download.aspx?did=141539>
- [57] 'IMO Data Collection System (DCS)'. <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/data-collection-system.aspx> (accessed Jul. 02, 2023).
- [58] 'EU MRV and IMO DCS Regulations - Reporting requirements - MaritimeCyprus'. <https://maritimecyprus.com/2019/12/30/eu-mrv-and-imo-dcs-regulations-reporting-requirements/> (accessed Jul. 02, 2023).
- [59] 'EUR-Lex - 32015R0757 - EN - EUR-Lex'. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32015R0757> (accessed Jul. 02, 2023).
- [60] M. G. C. D. ClassNK, 'CII (Carbon Intensity Indicator) ', Oct. 2021, Accessed: Apr. 17, 2023. [Online]. Available: [https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/activities/statutory/seemp/CII\\_en.pdf](https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/activities/statutory/seemp/CII_en.pdf)
- [61] 'IMO DCS - DNV'. <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/DCS/index.html> (accessed Apr. 28, 2023).
- [62] Mepc, 'Resolution Mepc.352(78) (Adopted On 10 June 2022) 2022 Guidelines On Operational Carbon Intensity Indicators And The Calculation Methods (Cii Guidelines, G1)', Jun. 2022, Accessed: Jun. 15, 2023. [Online]. Available: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.352\(78\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.352(78).pdf)
- [63] 'MEPC.1/Circular.684 – Guidelines for Voluntary Use of the Ship Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI) – (17 August 2009)', Accessed: Jun. 17, 2023. [Online]. Available: [https://www.imorules.com/MEPCCIRC\\_684\\_ANN\\_ANN.html](https://www.imorules.com/MEPCCIRC_684_ANN_ANN.html)
- [64] 'Appendix – Calculation of Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI) Based on Operational Data', Accessed: Jun. 17, 2023. [Online]. Available: <https://www.imorules.com/GUID-EF0096C9-A807-4C9C-A5EF-1B0DDE4C01A3.html>
- [65] 'IMO sub-committee accepts use of electronic BDNs after long discussion – IBIA'. <https://ibia.net/imo-sub-committee-accepts-use-of-electronic-bdns-after-long-discussion/> (accessed Jun. 27, 2023).
- [66] 'IMO Data Collection System (DCS)'. <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/data-collection-system.aspx> (accessed May 15, 2023).
- [67] 'IMO | Global Integrated Shipping Information System (GISIS)'. <https://gisis.imo.org/Public/> (accessed May 15, 2023).
- [68] 'ITTC'. <https://itc.info/> (accessed May 15, 2023).
- [69] MEPC, 'MEPC 80-1-1 - Anotaciones al orden del día provisional y calendario provisional (Secretaría)', 2023, Accessed: Jun. 21, 2023. [Online]. Available: <https://docs.imo.org/Shared/Download.aspx?did=143209>
- [70] 'Un Pacto Verde Europeo'. [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_es](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es) (accessed Jun. 16, 2023).
- [71] 'Fit for 55 - The EU's plan for a green transition - Consilium'. <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/> (accessed Jun. 16, 2023).
- [72] 'EUR-Lex - 32003L0087 - EN - EUR-Lex'. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32003L0087> (accessed Jun. 15, 2023).
- [73] 'EUR-Lex - 02003L0087-20230301 - EN - EUR-Lex'. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02003L0087-20230301#M13-1> (accessed Jun. 15, 2023).
- [74] 'Fase 1 y 2 (2005-2012)'. [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/development-eu-ets-2005-2020\\_es#evolution-of-the-european-carbon-market](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/development-eu-ets-2005-2020_es#evolution-of-the-european-carbon-market) (accessed Jun. 15, 2023).

- [75] 'National allocation plans'. [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/development-eu-ets-2005-2020/national-allocation-plans\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/development-eu-ets-2005-2020/national-allocation-plans_en) (accessed Jun. 15, 2023).
- [76] 'Reforma estructural del RCDE UE'. [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/market-stability-reserve\\_es](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/market-stability-reserve_es) (accessed Jun. 15, 2023).
- [77] 'THETIS-MRV'. <https://mrv.emsa.europa.eu/#public/eumrv> (accessed Jun. 15, 2023).
- [78] 'Reducing emissions from the shipping sector'. [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-emissions/reducing-emissions-shipping-sector\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-emissions/reducing-emissions-shipping-sector_en) (accessed Jun. 15, 2023).
- [79] 'Increasing the ambition of EU emissions trading'. [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-green-deal/delivering-european-green-deal/increasing-ambition-eu-emissions-trading\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-green-deal/delivering-european-green-deal/increasing-ambition-eu-emissions-trading_en) (accessed Jun. 15, 2023).
- [80] 'Revisión de la fase 4 (2021-2030)'. [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/revision-phase-4-2021-2030\\_es](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/revision-phase-4-2021-2030_es) (accessed Jun. 15, 2023).
- [81] 'EU Emission Trading System will inhibit global CO2 reductions'. <https://www.bimco.org/news/priority-news/20201001-eu-emission-trading-scheme-will-inhibit-global-co2-reductions> (accessed Jun. 15, 2023).
- [82] S. Lagouvardou and H. N. Psaraftis, 'Implications of the EU Emissions Trading System (ETS) on European container routes: A carbon leakage case study', *Maritime Transport Research*, vol. 3, p. 100059, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MARTRA.2022.100059.
- [83] 'Mercado internacional del carbono'. [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/international-carbon-market\\_es](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/international-carbon-market_es) (accessed Jun. 15, 2023).
- [84] L. A. Díaz-Secades, R. González, and N. Rivera, 'Waste heat recovery from marine main medium speed engine block. Energy, exergy, economic and environmental (4E) assessment – Case study', *Ocean Engineering*, vol. 264, p. 112493, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.112493.
- [85] O. Farhat, J. Faraj, F. Hachem, C. Castelain, and M. Khaled, 'A recent review on waste heat recovery methodologies and applications: Comprehensive review, critical analysis and potential recommendations', *Clean Eng Technol*, vol. 6, p. 100387, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.CLET.2021.100387.
- [86] S. C. Sousa Alcântara *et al.*, 'Development of a method for predicting the transient behavior of an absorption chiller using artificial intelligence methods', *Appl Therm Eng*, vol. 231, p. 120978, Aug. 2023, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2023.120978.
- [87] N. B. Kojur, M. Namdar, M. J. Nasero, S. Aminian, N. Koosha, and K. Zarei, 'Energy, exergy, economic, and exergoeconomic analyses and optimization of a solar Kalina cycle using particle swarm optimization algorithm', *Energy Conversion and Management: X*, vol. 18, p. 100372, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.ECMX.2023.100372.
- [88] P. A. Tipler and G. Mosca, *Física para la ciencia y la tecnología, Vol. 2A: Electricidad y magnetismo*, vol. Sexta edición, no. Volumen 2A, Electricidad y magnetismo. in *Física para la ciencia y la tecnología*, vol. Sexta edición. Barcelona: Reverte, 2020. [Online]. Available: <https://uniovi.idm.oclc.org/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=ip,uid&db=edsebk&AN=2934035&lang=es&site=eds-live&scope=site>
- [89] E. A. Bouman, E. Lindstad, A. I. Riialand, and A. H. Strømman, 'State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review', *Transp Res D Transp Environ*, vol. 52, pp. 408–421, May 2017, doi: 10.1016/j.trd.2017.03.022.
- [90] B. B. Kanbur, L. Xiang, S. Dubey, F. H. Choo, and F. Duan, 'Cold utilization systems of LNG: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79, pp. 1171–1188, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.161.
- [91] T. He, Z. R. Chong, J. Zheng, Y. Ju, and P. Linga, 'LNG cold energy utilization: Prospects and challenges', *Energy*, vol. 170, pp. 557–568, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.12.170.
- [92] 'Energy Outlook | Energy economics'. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html> (accessed Apr. 11, 2023).

- [93] 'Handbook of Liquefied Natural Gas - Saeid Mokhatab, John Y. Mak, Jaleel V. Valappil, David Wood - Google Libros'.  
[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=nQswAAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=gQnjbNKhXg&sig=ulEWpc1KH1mjYLRmxTqmcJxrUGw&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=nQswAAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=gQnjbNKhXg&sig=ulEWpc1KH1mjYLRmxTqmcJxrUGw&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)  
(accessed May 12, 2023).
- [94] Witherby Publishing Group, 'LNG Shipping Knowledge 3rd Edition - Witherbys', Jul. 2020.  
<https://shop.witherbys.com/lng-shipping-knowledge-3rd-edition/> (accessed May 14, 2023).
- [95] Z. Tian, W. Zeng, B. Gu, Y. Zhang, and X. Yuan, 'Energy, exergy, and economic (3E) analysis of an organic Rankine cycle using zeotropic mixtures based on marine engine waste heat and LNG cold energy', *Energy Convers Manag*, vol. 228, p. 113657, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2020.113657.
- [96] T. Ouyang, J. Tan, S. Xie, W. Wu, and Z. Su, 'A new scheme for large marine vessels LNG cold energy utilization from thermodynamic and thermoeconomic viewpoints', *Energy Convers Manag*, vol. 229, p. 113770, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2020.113770.
- [97] T. Ouyang, Z. Su, F. Wang, B. Jing, H. Huang, and Q. Wei, 'Efficient and sustainable design for demand-supply and deployment of waste heat and cold energy recovery in marine natural gas engines', *J Clean Prod*, vol. 274, p. 123004, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.123004.
- [98] J. Ahn, S. H. Park, J. Jeong, S. Lee, J. Ryu, and J. Park, 'Eco-efficient marine power system with cooled air ventilation by waste LNG cold energy for reefer holds in an ultra-large container ship', *J Clean Prod*, vol. 322, p. 129037, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.129037.
- [99] P. A. Tipler and G. Mosca, *Física para la ciencia y la tecnología, Vol. 1C: Termodinámica*, vol. Sexta edición, no. Volumen 1C, Termodinámica. in *Física para la ciencia y la tecnología*, vol. Sexta edición. Barcelona: Reverte, 2021. [Online]. Available: <https://uniovi.idm.oclc.org/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=ip,uid&db=edsebk&AN=2934047&lang=es&site=eds-live&scope=site>
- [100] R. H. Petrucci, *Química general: principios y aplicaciones modernas / Ralph H. Petrucci ... [et al.]; traducción, Concepción Pando García-Pumarino, Nerea Iza Cabo; revisión técnica, Juan A. Rodríguez Renuncio*. 2017. [Online]. Available: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat07109a&AN=tbuo.02082206&site=eds-live>
- [101] N. de Nevers, *Physical and Chemical Equilibrium for Chemical Engineers*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012. doi: 10.1002/9781118135341.
- [102] T. D. Gray and J. Schlup, 'An introduction to exergy and its evaluation using Aspen Plus', 2019, Accessed: May 16, 2023. [Online]. Available: <https://krex.k-state.edu/handle/2097/40025>
- [103] T. Gundersen, 'An introduction to the concept of exergy and energy quality', Accessed: May 16, 2023. [Online]. Available: <http://www.ivt.ntnu.no/ept/fag/tep4115/innhold/Exergy%20Light%20Version%204.pdf>
- [104] C. RAKOPOULOS and E. GIAKOURIS, 'Second-law analyses applied to internal combustion engines operation', *Prog Energy Combust Sci*, vol. 32, no. 1, pp. 2–47, Jan. 2006, doi: 10.1016/j.pecs.2005.10.001.
- [105] J. Ma, X. Song, B. Zhang, N. Mao, and T. He, 'Optimal design of dual-stage combined cycles to recover LNG cold energy and low-temperature waste thermal energy for sustainable power generation', *Energy Convers Manag*, vol. 269, p. 116141, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.116141.
- [106] J. Sheng, M. Voldsund, and I. S. Ertesvåg, 'Advanced exergy analysis of the oil and gas processing plant on an offshore platform: A thermodynamic cycle approach', *Energy Reports*, vol. 9, pp. 820–832, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.egy.2022.12.021.
- [107] C. Michalakakis, J. Fouillou, R. C. Lupton, A. Gonzalez Hernandez, and J. M. Cullen, 'Calculating the chemical exergy of materials', *J Ind Ecol*, vol. 25, no. 2, pp. 274–287, Apr. 2021, doi: 10.1111/jiec.13120.

- [108] A. Lazzaretto and G. Tsatsaronis, 'SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems', *Energy*, vol. 31, no. 8–9, pp. 1257–1289, Jul. 2006, doi: 10.1016/J.ENERGY.2005.03.011.
- [109] M. J. Morán, H. N. Shapiro, and J. A. Turégano, *Fundamentos de termodinámica técnica / Michael J. Morán, Howard N. Shapiro ; [versión española por José A. Turégano y Carmen Velasco]*. 2018. [Online]. Available: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat07109a&AN=tbuo.02087985&site=eds-live>
- [110] 'Executive summary – Energy Efficiency 2022 – Analysis - IEA'. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2022/executive-summary> (accessed Apr. 11, 2023).
- [111] 'LNG fleet seriously exposed to CII impact'. <https://www.lr.org/en/insights/articles/lng-fleet-seriously-exposed-to-cii-impact/> (accessed Jun. 19, 2023).
- [112] 'Impact of Russia's invasion of Ukraine on the markets: EU response - Consilium'. <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/eu-response-ukraine-invasion/impact-of-russia-s-invasion-of-ukraine-on-the-markets-eu-response/> (accessed Jul. 04, 2023).
- [113] 'Valencia Knutsen - Knutsen'. <https://knutsenoas.com/ship/valencia-knutsen/> (accessed May 05, 2023).
- [114] 'ISO 15550:2002 - Internal combustion engines — Determination and method for the measurement of engine power — General requirements'. <https://www.iso.org/standard/28185.html> (accessed Jun. 18, 2023).
- [115] 'ISO 3046-1:2002 - Reciprocating internal combustion engines — Performance — Part 1: Declarations of power, fuel and lubricating oil consumptions, and test methods — Additional requirements for engines for general use'. <https://www.iso.org/standard/28330.html> (accessed Jun. 18, 2023).
- [116] International Maritime Organization, '2022 Guidelines On The Method Of Calculation Of The Attained Energy Efficiency Design Index (Eedi) For New Ships', 2022.
- [117] Wärtsilä, 'Wärtsilä Methane Slip Reduction Solutions', 2023. <https://www.wartsila.com/marine/services/lifecycle-upgrades/methane-slip-reduction-solutions> (accessed Jun. 28, 2023).
- [118] 'Cooling Water Treatment | Drew Marine'. <https://www.drew-marine.com/our-businesses/marine/treated-water-solutions/cooling-water-treatment> (accessed Jun. 16, 2023).
- [119] Eni SpA Refining&Marketing, 'Eni CLADIUM 400 S SAE 40', Rome, Nov. 2018. Accessed: Jun. 23, 2023. [Online]. Available: [https://luboil.ee/wp-content/uploads/2019/09/7899\\_ENU.pdf](https://luboil.ee/wp-content/uploads/2019/09/7899_ENU.pdf)
- [120] Z. Ma, Y. Gu, S. Zhu, M. Yang, and K. Deng, 'Analysis on capability of power recovery of marine diesel engine at high backpressure conditions', *Appl Therm Eng*, vol. 204, p. 117933, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117933.
- [121] 'Chemical Exergy Calculator — The Exergoecology Portal'. [https://www.exergoecology.com/excalc/new\\_calc\\_exergy](https://www.exergoecology.com/excalc/new_calc_exergy) (accessed May 24, 2023).
- [122] 'Exergy Method: Technical and Ecological Applications'. <https://www.witpress.com/books/978-1-85312-753-3> (accessed May 24, 2023).
- [123] V. Stepanov, 'Chemical energies and exergies of fuels', *Energy*, vol. 20, no. 3, pp. 235–242, Mar. 1995, doi: 10.1016/0360-5442(94)00067-D.
- [124] W. A. Jaimes M., S. Rocha, J. N. Vesga, and V. Kafarov, 'Análisis termodinámico del proceso real de extracción de aceite de palma africana', *Prospectiva*, ISSN-e 2216-1368, ISSN 1692-8261, Vol. 10, Nº. 1 (enero - junio), 2012, págs. 61-70, vol. 10, no. 1, pp. 61–70, 2012, Accessed: Jun. 18, 2023. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4212089&info=resumen&idioma=ENG>

- [125] Shell Energy Deutschland GmbH, 'Natural gas Safety Data Sheet', Hamburg, 2019. Accessed: Jun. 09, 2023. [Online]. Available: <https://www.shell.de/content/dam/shell/assets/en/business-functions/business-customer/documents/safety-data-sheet-natural-gas-2019-en.pdf>
- [126] V. Lakshminarayanan and N. Sriraam, 'The effect of temperature on the reliability of electronic components', in *2014 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*, 2014, pp. 1–6. doi: 10.1109/CONECCT.2014.6740182.
- [127] '2013 Guidance On Treatment Of Innovative Energy Efficiency Technologies For Calculation And Verification Of The Attained Eedi', 2013. Accessed: Jun. 18, 2023. [Online]. Available: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Circ-815.pdf>
- [128] Mepc, 'Mepc.1-Circ.896 - 2021 Guidance On Treatment Of Innovative Energy Efficiency Technologies For Calculation And Verification Of The Attained Eedi And Eexi', Dec. 2021, Accessed: Jun. 19, 2023. [Online]. Available: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.1-Circ.896.pdf>
- [129] 'Steam Table Calculator | Saturated Water Line | Spirax Sarco'. <https://www.spiraxsarco.com/resources-and-design-tools/steam-tables/saturated-water-line#article-top> (accessed Jun. 25, 2023).
- [130] GOV.UK, 'HCOGAS400350 - Technical Guidance: Gas measurement', 2023. <https://www.gov.uk/hmrc-internal-manuals/gas-for-road-fuel-use/hcogas400350> (accessed Jun. 28, 2023).
- [131] 'Annex - 2022 Guidelines on the Reference Lines for Use with Operational Carbon Intensity Indicators (CII Reference Lines Guidelines, G2)'.