



**FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS Y EMPRESARIALES**

GRADO EN ADMINISTRACIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS

DEPARTAMENTO DE ANÁLISIS ECONÓMICO Y ECONOMÍA POLÍTICA

CURSO 2021 – 2022

## **TRABAJO FIN DE GRADO**

*LA ECONOMÍA DEL METANOL VERDE COMO COMBUSTIBLE.*

*DESARROLLO ACTUAL E IMPACTO MEDIOAMBIENTAL*

Autor: D. KEVIN ENRÍQUEZ ÁLVAREZ

Tutor: Prof. Dr. D. JOSÉ MANUEL CANSINO

Sevilla, 29 de mayo de 2022

Firmado por:

KEVIN ENRÍQUEZ ÁLVAREZ



**Título:**

La economía del metanol verde como combustible. Desarrollo actual e impacto medioambiental.

**Title:**

The economics of e-methanol as a fuel. Real development and environmental impact.

**Resumen:**

Este Trabajo Fin de Grado (TFG) desarrolla una investigación cualitativa y cuantitativa relacionada con la energía de origen fósil usada actualmente como combustible y la energía renovable, más concretamente, el metanol verde. Se explica cuál es la situación actual en la que nos encontramos respecto a los combustibles fósiles y renovables, poniendo de manifiesto las políticas llevada a cabo para realizar esta transición energética. Para finalizar, profundizamos en el metanol verde, explicando su viabilidad en costes de como combustible, además de su capacidad de producción en el planeta.

**Abstract**

This Thesis Degree (TFG in Spanish acronym) develops a qualitative and quantitative research related to the energy of fossil origin currently used as fuel and renewable energy, more specifically, green methanol. The current situation in which we find ourselves about fossil and renewable fuels is explained, highlighting the policies carried out to make this energy transition. To finish, we delve into green methanol, explaining its viability in terms of fuel costs, in addition to its production capacity on the planet.

**Palabras clave:**

Metanol verde, e-metanol, combustible, gases de efecto invernadero, descarbonización, hidrógeno verde, transición energética, sostenible, energía renovable.

**Keywords**

Green methanol, e-methanol, fuel, greenhouse gases, decarbonization, green hydrogen, energy transition, sustainable, renewable energy.



## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	5
2. COMBUSTIBLES UTILIZADOS EN LA NAVEGACIÓN MARÍTIMA Y EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI) .....	7
3. SITUACIÓN ACTUAL RESPECTO AL COMBUSTIBLE USADO EN LOS BARCOS .....	10
3.1 Organización Marítima Internacional (OMI).....	14
3.2 Unión Europea (UE) .....	15
3.3 España.....	17
4. EL METANOL VERDE .....	18
4.1 Definición .....	18
4.2 Proceso de obtención .....	20
4.3 Capacidad de producción en España.....	23
4.3.1 Proyecto Triskelion .....	25
5. VIABILIDAD DEL METANOL VERDE COMO COMBUSTIBLE .....	26
6. CONCLUSIONES .....	35
7. ÍNDICE DE TABLAS Y GRÁFICOS.....	39
8. BIBLIOGRAFÍA.....	40



# 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Este Trabajo Fin de Grado (TFG) desarrolla una investigación sobre la situación actual de la industria energética, los combustibles que se emplean y la contaminación generada debida a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) derivada de la combustión de los mismos. Para facilitar la lectura al lector no familiarizado se realiza una breve introducción de los principales tópicos.

Nos centramos en el transporte marítimo y en los combustibles usados para realizar este. Internacionalmente, la mayor parte del transporte de mercancías, el 90%, se realiza de forma marítima, es decir, a través de barcos y buques que navegan por mares y océanos, debido a su gran capacidad de carga y su menor coste económico. Sin embargo, el coste energético y medioambiental que tiene es muy elevado (Merino, 2021).

Actualmente, los grandes buques cargueros usan fuelóleos como combustible principal. Dichos fuelóleos son combustibles derivados del petróleo, que emiten grandes cantidades de GEI, principales responsables del calentamiento global y del cambio climático.

Ante esto, se ha empezado a cuestionar el uso de estos combustibles. La idea más extendida es que los barcos y el resto de medios de transporte empiecen a usar combustibles de origen renovables, verdes o bajos en emisiones de dióxido de carbono equivalente CO<sub>2eq</sub>. Uno de estos combustibles alternativos es el metanol verde. Será el tipo de combustible en el que este TFG pondrá foco de interés. Explicaremos en qué consiste y cómo se obtiene, además de su viabilidad como combustible.

Los objetivos del TFG son los siguientes:

- Conocer la situación actual en la que se encuentra el metanol verde respecto a su uso como combustible y como materia prima.
- Conocer cómo ha sido el desarrollo del metanol verde hasta el momento, cómo es el desarrollo actual y cómo podría serlo en el futuro, además de conocer el impacto que tiene su uso sobre el medio ambiente.
- Analizar la viabilidad del metanol verde como combustible, tanto a niveles de producción como de competitividad, además de su viabilidad en costes.



La metodología usada para este TFG consiste en realizar un análisis de datos, tanto de forma cualitativa como cuantitativa, recopilados de distintas fuentes, a la vez que se realizan mediciones y comparaciones entre distintos elementos para comprender de forma correcta los objetivos que pretendemos alcanzar. Se trata de un enfoque deductivo, es decir, que va de lo general a lo particular.

La estructura es, en primer lugar, explicar aspectos generales del transporte marítimo y sus emisiones de gases efecto invernadero, con el fin de contextualizar al lector o lectora. A continuación, se analiza específicamente el metanol verde: qué es, de qué manera se puede obtener, cuáles son sus posibles usos, etc. Seguidamente, hablaremos sobre los ya nombrados gases contaminantes derivados del petróleo usados en los barcos y de qué manera y en qué cantidades se encuentran presentes actualmente en nuestro país y en el Puerto Bahía de Algeciras. En la parte final del TFG, veremos de qué forma se pueden cambiar y sustituir los combustibles contaminantes actuales por metanol verde, además de las infraestructuras e inversiones necesarias para ello. Por último se expondrán las conclusiones. Todo ello irá seguido de un último apartado de bibliografía.

## 2. COMBUSTIBLES UTILIZADOS EN LA NAVEGACIÓN MARÍTIMA Y EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI)

Los barcos son el segundo medio de transporte más contaminante, por detrás del transporte aéreo, mayormente el avión.

Tabla 1: Comparación de las emisiones de CO<sub>2eq</sub> anuales por medio de transporte en 2020.

	Millones de toneladas anuales emitidas de CO <sub>2eq</sub>
<b>Aviación</b>	8
<b>Transporte marítimo</b>	7,1
<b>Camiones medianos y pesados</b>	6,3
<b>Coches y autobuses</b>	3,3

Fuente: (Cerezo, 2021).

En la tabla 1 podemos observar que el transporte marítimo ocupa el segundo puesto en cuanto a emisiones anuales de CO<sub>2eq</sub>. No obstante, esto depende del tipo de combustible que use cada medio de transporte. En el caso de los barcos, depende también mucho del tipo de barco y su tamaño. Los barcos que son pequeños y realizan distancias cortas apenas contaminan. Sin embargo, los grandes barcos y buques comerciantes sí que tienen más impacto en el aire, en los mares y en los océanos (Iglesias, 2021).

Centrándonos en los barcos y en su contaminación, hay que distinguir según los tipos que existen. En este ámbito marítimo, la flota de buques portacontenedores es la responsable del mayor volumen de emisiones de GEI, seguida de los graneleros (barcos y buques que se dedican al transporte marítimo de carga a granel, como cereales o minerales) y de los petroleros. Sin embargo, son los cruceros, los portacontenedores y los metaneros los más perjudiciales para el medio ambiente, océanos y mares, si tenemos en cuenta la emisión de CO<sub>2eq</sub> media por barco.

La mayor parte del comercio de mercancías a nivel mundial se realiza de forma marítima a través de grandes barcos y buques cargueros. Junto al resto de medios de transporte que usan combustibles fósiles, todos ellos contribuyen a las emisiones de GEI

y a la acidificación de los océanos. Estos combustibles fósiles son aquellos que producen energía a partir de la quema de hidrocarburos, ya sea de la oxidación o combustión del carbón.

El principal combustible que se usa hoy en día en estos buques es el fueloil pesado, que tiene su origen en el petróleo crudo. La atmósfera se contamina debido a la liberación de azufre que contiene el petróleo crudo, a la hora de la combustión en el motor de los barcos, provocando graves problemas respiratorios para los humanos y graves problemas medioambientales, como lluvia ácida y daños en cultivos, entre otros muchos. Por ello, es imprescindible limitar estas emisiones de azufre y de GEI (Organización Marítima Internacional, 2020).

Los GEI son aquellos gases que se van acumulando dentro la atmósfera terrestre y que absorben la radiación infrarroja del Sol, haciendo aumentar la temperatura dentro la atmósfera. Esta es la causa por la que hablamos de cambio climático o calentamiento global: el calor se acumula, haciendo aumentar la temperatura media del planeta. Este es el llamado efecto invernadero, llamado así debido a la similitud que tiene con los propios invernaderos

Estos GEI son esenciales para que haya vida en nuestro planeta, ya que mantienen una temperatura ideal para que nosotros podamos vivir. Con estos GEI presentes en la Tierra, la temperatura media global ronda los 15°C. Si no existieran dichos gases, la temperatura media global rondaría los -18°C. Las distintas capas de la Tierra absorben dos terceras partes de toda la radiación solar que llega a nuestro planeta, siendo el resto reflejada en el espacio (Departamento de Medio Ambiente de Bester, 2017).

A su vez, existen muchos distintos tipos de GEI: dióxido de carbono ( $\text{CO}_{2\text{eq}}$ ), hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ), metano ( $\text{CH}_4$ )... Sin embargo, los dos primeros nombrados son los más importantes: el  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  es el principal gas responsable del efecto invernadero en el planeta si hablamos de gases provocados por la actividad humana y el  $\text{SF}_6$  es el gas con mayor potencial de calentamiento.

Por tanto, hasta ahora hemos visto que estos GEI son buenos y necesarios para que exista vida humana. El problema llega cuando crece la concentración de estos GEI en la Tierra, como ha ocurrido en estas últimas décadas. Al crecer esta concentración de GEI, la temperatura media global aumenta. Las consecuencias de esto en el clima se han

empezado a notar ya en el planeta: sequías, deshielo de los polos, aumento de la temperatura media, etc. (Departamento de Medio Ambiente de Bester, 2017)

En 2015 se celebró en París la Cumbre sobre el cambio climático (COP 21), en la cual se reunieron 195 países para intentar ponerse de acuerdo y llegar a una solución global para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el planeta. Se conoce comúnmente como el Acuerdo de París. Este acuerdo fue uno de los más importantes de los últimos años, ya que se establecieron objetivos sin precedentes relacionados con el cambio climático. Entre los principales acuerdos, de forma resumida, encontramos:

- Evitar que el incremento de la temperatura media global del planeta supere los 2°C en comparación a los niveles preindustriales y, si es posible, que no supere los 1,5°C.
- Reducir al máximo, y todo lo posible, las emisiones de gases de efecto invernadero, consiguiendo la neutralidad, es decir, un equilibrio entre las emisiones y las absorciones de GEI.

Relacionando estos GEI con la industria naval, el transporte marítimo mundial de mercancías representa el 3% del total de las emisiones de GEI globales. El problema se acentúa si se considera que esta cifra podría pasar del 3 al 17% en 2050 si continuamos sin establecer medidas ni regulaciones sobre este tipo de transporte. Lo más lógico, viendo los datos que se nos arrojan, sería pensar en establecer barreras o regulaciones, con el fin de reducir todo lo posible estas emisiones para dejar de contribuir al cambio climático y a la huella de carbono. La huella de carbono es un indicador ambiental que nos permite ver la totalidad de GEI emitidos por efecto directo o indirecto por un solo individuo, organización o producto.

Sin embargo, estos datos sobre la industria naval no fueron incluidos en los acuerdos climáticos de la Organización de las Naciones Unidas ni en los Acuerdos de París de 2015. Surge así una gran paradoja, los enormes grandes barcos portacontenedores, usando combustibles fósiles muy contaminantes, se encargan de transportar materiales y suministros verdes y mucho menos contaminantes, como pueden ser baterías para coches eléctricos (Merino, 2021). Respecto a los esfuerzos para reducir la contaminación atmosférica, el sector del transporte marítimo se encuentra bastante más atrasado que muchos otros sectores (Bravo et al., 2019).



Para resolver esto en la industria naval, se requiere de un cambio tecnológico para los barcos para minimizar el coste medioambiental. Por ello, se deben buscar soluciones para esta industria. Entre ellas, se encuentra el cambio de uso de combustibles fósiles. Nuevas fuentes de energía están surgiendo y están ayudando a frenar este crecimiento de la contaminación. El objetivo ahora es intentar no reducir el nivel de transporte naval por causa del cambio del combustible usado por los barcos, ya que, además, existe una creciente necesidad de movilidad por mar. Pero esto no se puede realizar de forma radical, es decir, debe existir un proceso de transición de los combustibles que se usan hoy en día a los combustibles que serían ideales usar, además de estudiar las necesidades de adaptación de los barcos y puertos (PierNext, 2020).

### **3. SITUACIÓN ACTUAL RESPECTO AL COMBUSTIBLE USADO EN LOS BARCOS**

La Organización Marítima Internacional (OMI) ha asegurado que la gran mayoría de los combustibles usados y consumidos por la flota mercante mundial es de origen fósil. En este informe, la OMI también ha incluido al gas natural licuado (GNL) (Organización Marítima Internacional, 2020b).

El GNL es un tipo de combustible fósil que se considera que está a caballo entre los combustibles fósiles más contaminantes y las energía renovables. Es cierto que el GNL se lleva usando desde hace más de 50 años y que se considera una “energía limpia”, aunque no deja de ser un combustible fósil y, por tanto, emisor de GEI. El motivo de que se considere “energía limpia” es debido a su menor producción de emisiones durante su combustión (reduce las emisiones de dióxido de carbono en un 20-30% respecto al resto de combustibles fósiles). El GNL se considera un puente que va desde los combustibles fósiles más contaminantes usados en la actualidad hacia fuentes renovables, como pueden ser el metanol verde, el hidrógeno o el amoníaco, obtenidos de forma renovable (PierNext, 2020).

Desde la Asociación de Navieros Españoles<sup>1</sup> (ANAVE) ya se llevan haciendo estas investigaciones desde hace años, además de todos los incentivos y estímulos que han llevado a cabo para la propulsión de las energía renovables. Su directora general, Elena Seco, explica la ausencia, actualmente, de energía, tecnología y combustibles renovables ‘cero emisiones’, lo cual explica el uso de los combustibles fósiles todavía en los barcos y buques internacionales.

A la navegación marítima se le permite emitir 3.500 veces más que al transporte terrestre. Esta era la realidad, permitida por la Organización Marítima Internacional en el año 2019. Esto muestra la importancia que ha tenido el transporte por agua respecto a las emisiones de GEI. Sin embargo, a partir de 2020, la OMI impuso un límite máximo de 5.000 partículas por millón (ppm) de azufre en los combustibles para barcos, frente a los 35.000 ppm anteriores para este mismo de combustible o frente a los 10 ppm permitidos para el transporte terrestre, impuesto este último por la Unión Europea.

En relación a los efectos de estas emisiones de los barcos sobre la salud de los seres humanos, varios estudios han determinado que, al año, estas emisiones de las que hablamos causan, en la Unión Europea, alrededor de 50.000 muertes prematuras y unos 60.000 millones de euros en costes sanitarios.

El uso marítimo de combustibles fósiles está exento de impuestos, mientras que el uso de la electricidad en tierra sí está sujeta a impuestos. Esto es una forma de desincentivar el uso de electricidad para sustituir a los combustibles fósiles. Actualmente y con un poco de coherencia, esto debería ser al revés: deberían ser los combustibles fósiles los que estuvieran gravados y la electricidad exenta de impuestos (Bravo et al., 2019).

Compañías, empresas, sectores e instituciones están luchando para buscar fuentes de energía renovables, sostenibles y alternativas que puedan sustituir a los combustibles fósiles en la industria marítima. Algunos ejemplos son el hidrógeno, amoníaco o metanol. Sin embargo, los costes de producción de estos tipos de combustibles verdes todavía son muy altos y se encuentran muy alejados de poder competir con los combustibles fósiles (Naciones Unidas, 2021).

---

<sup>1</sup> Es una organización empresarial de ámbito nacional, constituida para la coordinación, representación, gestión, fomento y defensa de los intereses de las empresas navieras españolas.

Un ejemplo de aplicación con éxito de estos combustibles alternativos renovables ha sido el de Stena Germánica en el año 2015, un crucero que consiguió reducir en un 99% las emisiones de óxido de azufre y en un 25% las de dióxido de carbono, usando metanol como combustible principal y fuel gas como secundario. Junto a este ejemplo, también se han dado algunos más relacionados con otros combustibles, como hidrógeno o amoníaco, demostrando así la eficacia y eficiencia de estos tipos de combustibles, a pesar del tiempo que requiere su cambio y adaptación (PierNext, 2020).

Methanex, el principal productor y distribuidos de metanol del mundo, también cuenta con una flota de camiones cisterna que cuentan con motores de combustible dual, es decir, que pueden usar combustible diésel o metanol. Además, tienen en marcha distintos proyectos para la propulsión de barcos en los que el metanol es el componente esencial (Agencia Internacional de Energías Renovables, 2021).

Otro ejemplo, que ha sido referente respecto al uso de metanol verde, es el de Maersk, la mayor empresa de transporte de contenedores del mundo, con sede en Dinamarca. El proyecto de esta empresa consiste en el diseño de buques portacontenedores que usarán metanol verde como combustible, entre otros, para de reducir las emisiones de GEI en un 60%. Se estima que habrá un ahorro anual de 8 millones de emisiones en su flota. Tal es el compromiso de Maersk que ha decidido adelantar en una década su objetivo principal, de 2050 a 2040. (Nolasco, 2022). El sistema de propulsión de los buques será doble, tendrá metanol verde y combustible convencional bajo en azufre. La idea es que los buques puedan realizar viajes de ida y vuelta solamente con metanol verde, para contaminar lo menos posible. Maersk estima que su primer buque con metanol verde esté en navegando a inicios de 2024. Es un proyecto a largo plazo, que requiere de años y esfuerzo y que puede servir de ejemplo y guía para el resto de compañías e instituciones navieras.

El mayor obstáculo que encontramos respecto a este metanol verde es el suficiente suministro del mismo para que los buques puedan realizar todas sus operaciones. Actualmente, la industria de metanol verde en el mundo es pequeña y los productores comerciales son escasos, haciendo que su precio sea mucho más elevado que otros tipos de combustibles que se encuentran en mayor cantidad en el mercado (Tabla 2).

Tabla 2: Comparación de precios de distintos combustibles marinos.

<b>PRECIOS DE MERCADO</b>	<b>Dólares EEUU/tonelada</b>	<b>Dólares EEUU/MJ (1)</b>
<b>Metanol verde</b>	643	0,032
<b>Metanol gris no renovable</b>	417	0,021
<b>Gasóleo marino</b>	600	0,014

Fuente: (Noya, 2021).

(1) MJ; megajulio, unidad de medida de energía, trabajo y calor.

El coste del metanol verde, tanto en dólares/tonelada como en dólares/MJ, es mayor que el resto de tipos de combustibles, por los motivos ya comentados, desincentivando así su uso. Más concretamente, el metanol verde es un 54,2% más caro en dólares/tonelada que el metanol gris no renovable y un 7% más caro que el gasóleo marino. Es por ello necesaria la inversión en producción en grandes cantidades y de forma suficiente de este combustible (Noya, 2021).

Otro ejemplo es el contrato firmado por Maersk e Hyundai Mipo Dockyards para construir un buque portacontenedores alimentado con metanol verde para utilizarlo en la ruta báltica. Se prevé su entrega para mediados de 2023. También llevará tecnología de doble motor para poder navegar con metanol y con combustible tradicional bajo en azufre.

En Alemania también se han dado ejemplos compromisos respecto al uso del metanol verde como combustible. Uno de los acuerdos que la empresa MAN Energy Solutions ha firmado con la empresa holandesa OCI y la naviera de Singapur Eastern Pacific Shipping (EPS), ha sido el compromiso de adaptar tanto buques nuevos como los ya existentes para que puedan usar el metanol y el amoníaco como combustible. Este acuerdo va en consonancia con los objetivos marcados por la OMI para 2030 y 2050. La empresa considera que esto son los primeros pasos de la costosa descarbonización de todo el sector marítimo.

Si entramos en datos concretos sobre metanol verde, la necesidad anual del mismo para toda la flota mundial de larga distancia (es decir, que toda esta flota usara metanol verde a lo largo de un año) estaría entre 650 y 720 millones de toneladas (Mt) para el año

2050, lo cual supone aumentar entre 6 y 7 veces la producción actual anual de metanol verde (Asociación Navieros Españoles, 2021).

Por otro lado, en Dinamarca se ha decidido construir la primera instalación comercial de metanol verde a gran escala en el mundo, de manos de la operadora European Energy, en colaboración con Siemens Energy. La fecha prevista para el inicio de la producción de metanol verde es la segunda mitad del año 2023. El motivo de que se instale en Dinamarca y cerca de la frontera alemana es la cercanía a las plantas de producción de energía limpia a bajo coste. Los usuarios finales del metanol verde producido en esta planta serán la empresa mayorista Maersk y la empresa minorista Circle K, entre otros. El vicepresidente sénior del negocio de nueva energía de Siemens Energy, Stefano Innocenzi asegura que los combustibles verdes están predestinados a ser usados en el transporte marítimo, terrestre y aéreo, mientras que Knud Erik Andersen, CEO de European Energy, realza su confianza en la empresa Siemens Energy en estos momentos tan cruciales para la transición ecológica (López de Benito, 2022).

### **3.1 Organización Marítima Internacional (OMI)**

El Cuarto Estudio de GEI de la OMI fue publicado en 2021. Uno de los objetivos principales de este estudio y de este informe es la reducción de las emisiones de GEI de los buques. Los países miembros de la OMI se comprometen a reducir estas emisiones y a eliminarlas de forma gradual en los próximos años. Gracias a este tipo de iniciativas, parece que la conciencia sobre la reducción de emisiones de GEI se está expandiendo y se está empezando a tener en cuenta. Desde la UE y desde la OMI se están estableciendo cada vez más medidas para frenar dichas emisiones, como las que vamos a comentar a continuación (Organización Marítima Internacional, 2021).

Desde la OMI, además de los objetivos ya comentados, también ha establecido de forma resumida, los siguientes:

- Reducir las emisiones de GEI en un 50% por debajo de los niveles de 2008 para 2050.
- Reducir la intensidad de carbono en las emisiones un 40% para 2030 y un 70% para 2050 en comparación con los niveles de 2008.

Esta es la que se conoce como Estrategia Inicial y será revisada en 2023, año en que se adoptará la Estrategia revisada.

También se han realizado algunos avances tecnológicos: se ha desarrollado un índice de Eficiencia Energética (EEDI) para nuevos buques y un Plan de Gestión de Eficiencia Energética de Buques (SEEMP) para los buques existentes, con el fin de establecer medidas específicas que cada barco debe tomar para mejorar dicha eficiencia energética y aumentar la protección marina. Ambos avances entraron en vigor en 2013. Para apoyar la eficiencia energética de los Estados Miembros, y sobre todo, la de los países en desarrollo, la OMI está impulsando también proyectos mundiales de cooperación técnica (Organización Marítima Internacional, 2021b).

Cada cierto periodo, la OMI celebra reuniones de grupos con el fin de facilitar y avanzar en la aplicación de la Estrategia Inicial sobre la reducción de emisiones de GEI. Esta incluye barreras y medidas de apoyo relacionadas con la cooperación e investigación. Además, lo que se pretende con esta Estrategia Inicial es seguir la línea de los objetivos establecidos en el Acuerdo de París sobre la temperatura del planeta y, por otro lado, apoyar a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), impulsados por las Naciones Unidas, y más concretamente, al Objetivo 13: adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos (Organización Marítima Internacional, 2021b).

### **3.2 Unión Europea (UE)**

Desde la UE también se han adoptado medidas para frenar el cambio climático y reducir las emisiones de GEI. Para reducir de forma significativa las emisiones ha establecido objetivos vinculados a ciertos sectores claves de la economía. Está llevando a cabo una legislación ambiciosa sobre el cambio climático.

La UE estableció reducir las emisiones en 2020 por debajo de las emisiones que existían en 1990. Esto se consiguió. Es más, en 2017, las emisiones ya se habían reducido en casi un 22% respecto a los niveles de 1990. La ambición climática de la UE no se quedó ahí. A finales de 2020 y en consonancia con el Acuerdo de París, la UE estableció el siguiente objetivo: reducción neta de las emisiones de GEI al menos un 55% para 2030 respecto a los niveles de 1990. Tratamos de ambiciosa esta medida porque, en un principio, el objetivo iba a ser una reducción del 40%, pero finalmente se aumentó al 55% que comentamos.



Más a largo plazo, la UE también estableció el siguiente objetivo: alcanzar en 2050 una UE climáticamente neutra, reduciendo drásticamente las emisiones de GEI y buscando soluciones a las emisiones imposibles de eliminar. Al fin y al cabo, esto se resume en equilibrio de cero emisiones netas (Consejo de la UE & Consejo Europeo, 2022).

Otra de las acciones llevadas a cabo por la UE es el Pacto Verde Europeo, cuyo objetivo principal es la transformación de la economía y eficiencia en los recursos, a través de la reducción de emisiones de GEI, crecimiento económico y sin dejar a ninguna persona ni territorio atrás (Comisión Europea, 2021). Entre las propuestas llevadas a cabo, encontramos una relacionada con el uso de la energía: el objetivo ambicioso es producir el 40 % de nuestra energía a partir de fuentes renovables de aquí a 2030. Por otro lado, también encontramos una relacionada con los combustibles marítimos: los buques tendrán acceso a suministro de electricidad limpia en los principales puertos, según el Reglamento relativo a la infraestructura de los combustibles alternativos. Lo que pretende este es garantizar el suministro y las necesidades de electricidad en tierra para poder abarcar a todos los barcos que necesiten dicha energía mientras estén atracados en los puertos europeos. Es fundamental conocer cuáles son las necesidades de combustible y electricidad de cada tipo de barco (Comisión Europea, 2021b).

Este Reglamento es complementario a la iniciativa marítima Fuel EU, cuyo principal objetivo es aumentar el uso de combustibles alternativos tanto en el mar como en los puertos. El 11% del total de emisiones de CO<sub>2eq</sub> debidas al transporte y entre el 3 y 4% del total de emisiones de CO<sub>2eq</sub> en la UE se debe al tráfico de buques hacia o desde los puertos europeos. Los retos a superar son, actualmente, las dificultades y obstáculos del mercado y la incertidumbre sobre las opciones técnicas de dicho mercado (Comisión Europea, 2020).

También se están desarrollando iniciativas sobre los combustibles del transporte marítimo, para estimular el uso de combustibles sostenibles y tecnologías de cero emisiones, a través de regulaciones sobre el límite máximo de gases de efecto invernadero en la energía usada por cada barco que hagan escala en los puertos europeos (Comisión Europea, 2021a).



### 3.3 España

Casi el 85% de las importaciones y el 65% de las exportaciones de España se realizan a través del transporte marítimo, poniendo así en evidencia la elevada importancia de este tipo de transporte en nuestro país. Las 28 Autoridades Portuarias españolas se encargan de gestionar las operaciones, logística y transporte de todos los 46 puertos españoles de interés general. Los puertos españoles se encuentran en la cumbre de los puertos mundiales, siendo muy competitivos con otros puertos a nivel mundial. Gracias a su buena posición geoestratégica, España cuenta con puertos como el de Bahía de Algeciras, Valencia o Barcelona que se encuentran entre los 10 mejores puertos europeos con una destacada presencia de grandes empresas navieras internacionales (Partida Logistics, n.d.).

En nuestro país también se han realizado regulaciones respecto al combustible. En 2006, se aprobó el Real Decreto 61/2006, de 31 de enero, en el cual se establecían, por primera vez en España, medidas y especificaciones relativas al uso de combustibles y al contenido de azufre en los combustibles de uso marítimo. En este Real Decreto se establecen valores límites para componentes de determinados combustibles y valor límites máximos de contenido de azufre en los combustibles de uso marítimo, tanto para buques en aguas territoriales como para buques atracados en los puertos españoles:

- En las aguas territoriales, se limita a 0,10% el contenido de azufre máximo en los combustibles marítimos dentro de las zonas de control de emisiones de dicho azufre, siendo el límite 0,50% si se encuentra fuera de las zonas de control.
- En los puertos españoles, el límite máximo de contenido de azufre en combustibles para uso marítimo es del 0,10% también, concediendo el tiempo oportuno para las operaciones necesarias para realizar el cambio de combustible. Esto no será de aplicación si el buque permanece atracado menos de dos horas en el puerto o si se conecta a la electricidad en tierra.

Este Real Decreto incluye también las correspondientes sanciones por incumplimiento y ciertas excepciones respecto al contenido de azufre, no haciendo del todo eficaz la regulación (Real Decreto 61/2006, de 31 de Enero, Por El Que Se Determinan Las Especificaciones de Gasolinas, Gasóleos, Fuelóleos y Gases Licuados Del Petróleo y Se Regula El Uso de Determinados Biocarburantes, 2006).

Años después, en 2015, se aprobó el Real Decreto 290/2015, de 17 de abril, en el que se modificaba el Real Decreto 61/2006, de 31 de enero. El límite máximo de 0,10% de contenido de azufre en combustibles para barcos en aguas territoriales y de 0,50% para buques en zonas fuera de control se aplicará ahora a cualquier buque de cualquier pabellón, aunque el inicio de la travesía sea fuera de la UE. Se establece también que la Dirección General de la Marina Mercante podrá realizar los controles correspondientes para comprobar el cumplimiento de lo establecido en este Real Decreto (Real Decreto 290/2015, de 17 de Abril, Por El Que Se Modifica El Real Decreto 61/2006, de 31 de Enero, Por El Que Se Fijan Las Especificaciones de Gasolinas, Gasóleos, Fuelóleos y Gases Licuados Del Petróleo, Se Regula El Uso de Determinados Biocarburantes y El Contenido de Azufre de Los Combustibles Para Uso Marítimo).

## **4. EL METANOL VERDE**

### **4.1 Definición**

El metanol, básicamente, es un componente químico que cuenta con grandes y adecuadas propiedades para la transmisión de energía, además de muchas otras buenas características (Cryospain, 2021). Tiene muchas aplicaciones en nuestra vida diaria: anticongelantes, resina, pintura, etc. La Agencia Internacional de la Energía Renovable y el Methanol Institute han determinado que el metanol renovable podría usarse para la descarbonización en Europa (Pérez-Barco, 2021).

Es por ello por lo que este metanol se está intentando introducir como combustible para buques y barcos. Hasta el momento, el metanol se produce principalmente a partir de combustibles fósiles. En 2019, el consumo mundial fue de unas 98 Mt a lo largo de un año, las cuales produjeron unas emisiones de CO<sub>2eq</sub> de 0,3 gigatoneladas (Gt). En los últimos años, su producción se ha duplicado, debido, en gran parte, al gran crecimiento de China. De esta cantidad de metanol producido, en torno al 31% se dedica al uso como combustible. Además se espera que esta demanda de metanol siga aumentando, llegando a alcanzar las 120 Mt en 2025 y las 500 Mt en 2050 anualmente, según el escenario de la Agencia Internacional de Energías Renovables. De estas 500 Mt estimadas para 2050, se estima también que 250 Mt serán de e-metanol y 135 de biometanol (Agencia Internacional de Energías Renovables, 2021).

El coste de producir metanol procedente de combustibles fósiles se encuentra en el rango de precios de entre 100 y 250 dólares estadounidenses por cada tonelada (96 y 240 €) (Agencia Internacional de Energías Renovables, 2021).

China ha sido el país que más proactivo se ha mostrado respecto al uso y promoción del metanol como combustible para los transporte con la intención de reducir su dependencia del combustible importado. De las 98 Mt consumidas en 2019, más de la mitad (en torno a 55 Mt) se consumieron en China, dejando así evidencia de su compromiso con el metanol (Agencia Internacional de Energías Renovables, 2021).

Sus apropiadas características hacen que sea sencillo y fácil de manejar, además de ser compatible con la mayor parte de los motores (al contrario del GNL, el cual necesita de adaptaciones especiales en los tanques para mantener su estado líquido), convirtiéndose así en el precursor y en el modelo a seguir en la transición de la descarbonización en la industria marítima (Redacción Naucher, 2021). El metanol es líquido a temperatura y a presión ambiente, por lo que no necesita muchas adaptaciones especiales, haciendo la transición relativamente más sencilla. Comparte con el GNL la característica de bajo punto de inflamación.

El metanol está siendo decisivo a la hora de hacer frente y poner soluciones a los desafíos que se enfrenta en la actualidad la industria marítima respecto a los combustibles usados en los buques. A pesar de ello, es importante decir y explicar que no todos los combustibles alternativos son respetuosos y sostenibles con el medio ambiente. Las empresas deben garantizar y certificar que el metanol ha sido obtenido por medios no dañinos ni perjudiciales para el medio ambiente, teniendo un control de las emisiones.

Para la determinación de la condición de “verde”, se debe evaluar y tener en cuenta tanto las emisiones emitidas en el proceso de producción del combustible como en su proceso de combustión. En el caso del metanol, El International Council on Clean Transportation (ICCT) se ha encargado de medir y calcular las emisiones WtWa emitidas por el metanol a través de cuatro vías de producción distintas, usando el método GREET 2020. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3:

Tabla 3: Comparación de los cuatro tipos principales de metanol en función de las emisiones de GEI emitidas, usando el método GREET 2020.

<b>TIPOS DE METANOL</b>	<b>Derivado de</b>	<b>Emisiones GEI (gCO<sub>2eq</sub>/MJ)</b>	<b>¿Se considera “verde”?</b>
<b>Metanol gris</b>	Gas natural	92	No
<b>Metanol azul</b>	Gas natural combinado con la captura y el almacenamiento de carbono (CCS)	81	No
<b>Biometanol</b>	Materias primas de biomasa	8	Sí
<b>E-metanol</b>	Electricidad renovable y el CO <sub>2eq</sub> capturado	1	Sí

Fuente: (Martin, 2021)

El significado de gCO<sub>2eq</sub>/MJ es gramos de dióxido de carbono equivalente por megajulio de energía (GCO<sub>2e</sub>/MJ Definition | Law Insider, n.d.). Se usa para medir las emisiones de GEI producidas en los procesos de producción y combustión de los distintos tipos de metanol.

El estudio fue realizado respecto a las emisiones medias del gasóleo marino (MGO), las cuales se sitúan en 89 gCO<sub>2eq</sub>/MJ. Como podemos ver en la tabla, las emisiones de metanol gris se encuentran ligeramente por encima de las de MGO, mientras que las emisiones de metanol azul se encuentran ligeramente por debajo. El biometanol y el e-metanol son los tipos de metanol que se pueden considerar metanol verde debido a sus bajas emisiones de GEI en su producción y combustión, siendo el e-metanol el que menos emisiones tiene de todos (Martin, 2021).

Actualmente, se producen menos de 0,2 Mt de metanol verde a lo largo de año, lo cual, comparado con las casi 100 Mt producidas de metanol procedente de combustibles fósiles, es una cifra muy baja.

## 4.2 Proceso de obtención

El metanol verde se puede obtener a través de la captura de CO<sub>2eq</sub> del aire y su combinación con hidrógeno verde. Una corriente eléctrica rompe una molécula de H<sub>2</sub>O y

separa el oxígeno del hidrógeno, consiguiéndose así este hidrógeno verde mencionado. Este proceso se conoce como electrólisis del agua. Si esta electricidad que se necesita para separar el oxígeno y el hidrógeno en la partícula de H<sub>2</sub>O proviene de fuentes renovables, como podría ser la eólica o la solar, esta forma de obtención de metanol verde es totalmente sostenible, no contaminante y respetuosa con el medio ambiente, además de ser neutro también en su combustión. El resultado obtenido de la mezcla de CO<sub>2eq</sub> e hidrógeno verde es biometanol verde.

Existe otra forma de obtención de metanol verde, pero en este caso, bajo en carbono. El procedimiento es el mismo que el anterior explicado, con la única diferencia que el CO<sub>2eq</sub> capturado del aire es de origen fósil. Al mezclarse con el hidrógeno verde, el balance de CO<sub>2eq</sub> del metanol se vuelve neutro, por lo que se considera bajo en carbono (Pérez-Barco, 2021). Las necesidades para producir una tonelada de e-metanol se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Necesidades de materias primas para producir una tonelada de e-metanol.

CO <sub>2eq</sub>	Hidrógeno renovable	Electricidad renovable
1,38 t	0,19 t	10/11 MWh (2)

Fuente: (Agencia Internacional de Energías Renovables, 2021).

(2) MWh; megavatio por hora, unidad de potencia, es decir, la energía producida en un periodo de tiempo, en este caso, horas (Casadelrey, 2021).

La mayor parte de la electricidad se usa para el proceso de la electrólisis del agua. Sin embargo, las plantas electrolizadoras no están muy desarrolladas, por lo que la capacidad que tiene de producir hidrógeno verde se ve limitada. La inversión en estas plantas es esencial para el desarrollo del e-metanol (Agencia Internacional de Energías Renovables, 2021).

Como caso real de este proceso, en 2019, el consorcio europeo MefCO<sub>2</sub> fue liderado por el grupo español everis, el cual se encargaba de coordinar y difundir la información del proyecto y cuyo principal objetivo era demostrar que era posible producir metanol a partir de la captura de CO<sub>2eq</sub>. Este proyecto ha sido financiado por la Comisión Europea dentro del marco del programa H<sub>2</sub>020 y se ha llevado a cabo en una planta instalada en Alemania. Este consorcio está formado por nueve socios, procedentes de distintos países europeos. Cada uno aporta un proyecto determinado al consorcio, de

forma útil para todos los demás socios. Este proyecto ha conseguido producir una tonelada de e-metanol en un día (Freire, 2022). Además, los resultados de las pruebas simuladoras en condiciones reales de este proyecto están siendo más que satisfactorias y eficaces: las estimaciones arrojan una eficacia superior al 90%, además de un funcionamiento estable. Pretenden ir más allá, según cuenta el fundador de i-deals: quieren desarrollar una estrategia más eficiente de conversión del  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ , teniendo como base el uso de fuentes de energía renovables. El impacto que puede tener el metanol verde a la hora de reducir las emisiones de carbono puede ser muy significativo, al igual que para la economía global, dice James Hayward, del Instituto de Catálisis de Cardiff, uno de los socios de este proyecto (Mosquera, 2019).

En Suecia se ha instalado una planta similar a la de Alemania. Este proyecto se denomina FReSME y consiste en obtener metanol bajo en carbono a partir de los gases generados en una central de altos hornos que se encarga de producir acero. Las grandes cantidades de  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  e hidrógeno liberadas durante la producción del acero son usadas para la producción de metanol verde, siendo mezcladas con más hidrógeno verde. Es una forma de reciclar el  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  y aprovechar al máximo los recursos, explica David Cuesta. Además, se ha demostrado la eficacia del metanol obtenido, ya que se usó en el buque Stena Germanica, desde Gotemburgo a Kiel (Pérez-Barco, 2021).

El exceso de  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  que no se usa para la producción de metanol verde se usa para transporte y almacenamiento. Todos estos procesos contribuyen de forma positiva a la descarbonización de la industria y el transporte marítimo (Comisión Europea, 2021 a).

Otro ejemplo es el proyecto piloto de la empresa Técnicas Reunidas. En Ámsterdam, esta empresa ha diseñado una planta de biometanol para la empresa Global Industrial Dynamics (GID). En este caso, el proceso consiste en gasificar residuos orgánicos no reciclables, como basuras de nuestras casas, cartones, etc. El gas resultante es un gas sintético al que se le aplican varios procesos industriales para así obtener biometanol. Posteriormente, este biometanol se mezcla con gasolina. Los objetivos que persigue Joaquín Pérez de Ayala, director de Desarrollo Corporativo de Técnicas Reunidas, son que este biometanol pueda competir con el metanol convencional, que esta materia prima esté asegurada a largo plazo y la instalación de plantas similares en otros países europeos (Pérez-Barco, 2021).

Existe, también, un grupo de empresas o consorcio liderado por Liquid Wind, que han llegado a un acuerdo para la construcción de seis instalaciones para producir metanol verde o sintético, con su posterior uso como combustible marino. El proceso de producción de e-metanol será el ya explicado anteriormente. La construcción de estas instalaciones está prevista para 2030, estando la primera de ellas operativa en 2023, para después expandirse de forma internacional. Liquid Wind buscaba firmar pronto los primeros acuerdos de compra de este combustible (Asociación de Navieros Españoles, 2020).

Por otro lado, la empresa automovilística Geely ha realizado un acuerdo con Circle K en Dinamarca cuyo principal objetivo es demostrar la viabilidad del metanol verde como combustible en los medios de transporte, para, de esta forma, promocionar el metanol verde y contribuir a la movilidad verde en Europa. Este acuerdo cuenta con el apoyo de universidades danesas y del gobierno danés. Dinamarca se encuentra a la cabeza entre los países más comprometidos con la reducción de las emisiones de GEI. Además, Geely es la empresa más desarrollada y productora de vehículos de metanol del mundo. Sus coches, alimentados con metanol verde, emiten alrededor de 46 gramos de CO<sub>2eq</sub> por kilómetro recorrido, lo cual supone emisiones más bajas que los propios coche eléctricos en la mayoría de países. Además, desde 2012, Geely creó una empresa que se encarga de reciclar al máximo las emisiones de CO<sub>2eq</sub> y usarlas para otros productos útiles, como es el caso del metanol verde, el cual lo producen a escala industrial (Reciclaje Internacional de Carbono, 2022). Geely representa un firme apoyo hacia el uso de metanol verde como combustible en los medios de transporte (de Aragón, 2022).

De forma resumida y básica, la fórmula para la obtención de e-metanol sería la siguiente:



### **4.3 Capacidad de producción en España**

Con todo lo explicado hasta el momento podemos entender la gran importancia que tendrá el metanol verde en el proceso de transición de los combustibles marinos. El problema que surge ahora es la capacidad de producción de dicho metanol verde que tiene el planeta, incluida España. Esta capacidad, hasta el momento, no está muy desarrollada

y existen muy pocas empresas comerciantes de este combustible debido a la dependencia de energías renovables, cuya disponibilidad es baja, haciendo que su precio sea más elevado en el mercado que cualquier otro tipo de combustible fósil, ya que estos sí se encuentran en abundancia. Con estos altos costes de producción del metanol verde, su uso se desincentiva. Sin embargo, desde instituciones y gobiernos se están concediendo cada vez más incentivos y estímulos para el uso y comercialización de todo tipo de combustibles renovables y sostenibles, incluido el metanol verde (PierNext, 2020). El mayor obstáculo al que se enfrenta ahora la industria marítima es conseguir el suministro suficiente de metanol verde para poder realizar todas las operaciones necesarias (Noya, 2021)

Actualmente, a nivel mundial, se producen 100 millones de toneladas de metanol. Pero no todo este metanol es verde ni sintético, como ya hemos comentado anteriormente. Más concretamente, menos del 1% de esos 100 millones de toneladas producidas de metanol es de origen renovable.

Desde nuestro país, la empresa gallega Foresa, productora de formaldehído y adhesivos, junto a Iberdrola, han llegado a un acuerdo para la construcción de una planta de producción de metanol de origen renovable, con CO<sub>2eq</sub> procedente de la combustión de biomasa e hidrógeno obtenido también a partir de energías renovables. Para la obtención de hidrógeno verde, dentro de este proyecto se incluye la construcción de una planta de producción del mismo a través de electrólisis, para la cual se usarán fuentes renovables de energía. El paso final será la mezcla de dicho CO<sub>2eq</sub> y dicho hidrógeno en una planta de síntesis de metanol, dando como resultado el metanol verde.

La previsión de producción de esta planta es de 10.000 toneladas al año en una primera fase, la cual se podría ampliar hasta 100.000 toneladas al año. Esta producción local de metanol verde en España permitirá el desarrollo y el crecimiento de la industria gallega y la creación de empleo, además del apoyo a la sostenibilidad (Foresa, n.d.).

Esta iniciativa representa una gran oportunidad, tanto para nuestro país como para la región gallega, reforzando su posición como referente tecnológico respecto a la sostenibilidad. En España apenas existen plantas de producción de metanol a pesar del crecimiento de su demanda en los últimos años. Por parte de Iberdrola, el compromiso respecto a la transición energética es evidente: pretende realizar inversiones cada vez mayores para aumentar la capacidad renovable. Iberdrola es la empresa líder en el sector

renovable en España, con una capacidad instalada de 16.700 megavatios y que se pretende ampliar hasta los 25.000 megavatios en 2025. El objetivo final es ser una compañía neutra en carbono en el año 2030 (Iberdrola, 2021).

#### **4.3.1 Proyecto Triskelion**

Más relacionado con la industria naval, encontramos otro ejemplo de otra empresa gallega denominada Forestal del Atlántico. Esta empresa también ha querido sumarse al proceso de transición ecológica para eliminar las emisiones de gases a la atmósfera: suministrará hidrógeno verde a la primera planta de metanol renovable en España, en Ría de Ferrol (Galicia). Forestal del Atlántico se dedica a múltiples aplicaciones, entre las que se encuentra el almacenamiento de hidrocarburos y gestión de residuos del servicio de los buques. Este proyecto recibe el nombre de Triskelion y supone una inversión de casi unos 100 millones de euros. Incluye distintas unidades técnicas como electrólisis, captación de CO<sub>2eq</sub>, síntesis del metanol, etc. Forestal del Atlántico se encuentra dentro de las 15 empresas que recibirán asesoramiento por parte del Banco Europeo de Inversiones, además de optar a los fondos europeos Next Generation. Ha sido elegida en base a criterios como el potencial de escalabilidad (capacidad de multiplicar los ingresos sin aumentar los costes (Eolivier, 2018)) o la propia rentabilidad de los proyectos. Además del proyecto de Forestal del Atlántico, en España han sido elegidos otros dos proyectos.

El objetivo principal de Forestal del Atlántico es producir metanol verde para que este, al mismo tiempo, pueda venderse tanto como materia prima para fabricar biocombustibles o para el sector químico como combustible en sí mismo. La hoja de ruta que sigue Forestal del Atlántico y su proyecto abarca los próximos cinco años. Por otro lado, la creación de empleo en estas nuevas instalaciones está asegurada (León, 2022).

Las previsiones de producción de metanol verde con este proyecto se encuentran entre las 30.000 y las 40.000 toneladas al año, haciendo más competitivo el territorio. Desde el gobierno gallego, se ha insistido en la necesidad de crear, ampliar y mejorar la legislación en materia de sostenibilidad, de forma que España se acerque al cumplimiento de los objetivos europeos (De La Barrera, 2022).

## **5. VIABILIDAD DEL METANOL VERDE COMO COMBUSTIBLE**

Desde el punto de vista de la infraestructura, como ya hemos comentado con anterioridad, el metanol cuenta con apropiadas características para su uso y transporte en la industria marina. La mayoría de las infraestructuras de almacenamiento y abastecimiento de los combustibles usados hasta la actualidad pueden ser aprovechadas para el metanol, con ciertas modificaciones, debido a características de este como su estado de liquidez a temperatura y presión ambiente. Por ello, la transición energética con metanol se hace más fácil, cómoda y menos costosa que con otros combustibles (Martin, 2021).

Además, se trata de un combustible que cuenta con mayor seguridad que otros y puede almacenarse en tanques ordinarios sin necesidad de refrigeración ni altas presiones, además de contar con un menor coste de conversión que la mayoría del resto de combustibles alternativos. Gracias a todas estas características comentadas, el metanol se convierte en claro candidato a ser uno de los principales combustibles alternativos que servirán de guía y ejemplo en la transición energética. De hecho, la consultora Drewry ya ha afirmado que el metanol, posiblemente, tendrá un papel muy importante a la hora de cumplir los objetivos de reducir las emisiones de GEI (Redacción Naucher, 2021).

El profesor y presidente de Inerco, Vicente J. Cortés, ha confirmado todas las características comentadas con anterioridad y ha afirmado que la demanda de metanol verde como combustible crecerá a medida que se incrementen los usos del mismo. Lo que se necesita para aumentar el uso del metanol renovable es una reducción del precio de la electricidad y una mayor eficiencia de los electrolizadores (encargados de obtener el hidrógeno verde mediante la electrólisis). El metanol verde podría ser competitivo en el mercado si se dan estas premisas, afirma Cortés. Por otro lado, Jorge Dahl, gerente de desarrollo de negocios de la empresa DNV, ha denominado al metanol verde como magnífico candidato para el proceso de descarbonización marina, debido a la versatilidad en sus usos (Pérez-Barco, 2021).

Por otro lado, la producción y abastecimiento de metanol verde se encuentra entre los grandes obstáculos actuales en el proceso de descarbonización. Las necesidades de CO<sub>2</sub> capturado del aire y de hidrógeno verde que proviene de fuentes de energía

renovables son muy grandes y cada vez se manifiestan más. Actualmente, pocos son los productores comerciales de metanol verde en todo el mundo (Martin, 2021).

El Proyecto MefCO<sub>2</sub> cuenta con una planta piloto en Alemania, una de las mayores plantas de síntesis de metanol. La capacidad de producción que tiene esta planta es la que muestra la Tabla 5:

Tabla 5: Capacidad de producción de la planta piloto del Proyecto MefCO<sub>2</sub>.

	<b>Capacidad de producción</b>
<b>Captura de CO<sub>2eq</sub></b>	1,5 toneladas al día
<b>Hidrógeno verde</b>	100 m <sup>3</sup> cada hora
<b>Metanol verde</b>	1 tonelada al día

Fuente: (Mosquera, 2019).

La capacidad que tiene esta planta es de 1 tonelada al día de metanol verde. Para contextualizar estas cantidades, se requerirían alrededor de unas 700 Mt al año de metanol verde si toda la flota mundial de larga distancia usara este como combustible. El hecho de que una sola planta, como es esta, pueda producir una tonelada al día de metanol verde es un importante avance en la descarbonización y transición energética marina (Asociación Navieros Españoles, 2021).

La naviera Maersk ha afirmado que necesitará entre 35.000 y 40.000 toneladas anuales de metanol verde por cada uno de sus buques (Martín, 2021).

La principal barrera actualmente que tiene el metanol verde es su elevado coste de obtención en comparación con el resto de alternativas de combustible.

La Agencia Internacional de la Energía Renovable (Irena en sus siglas en inglés) ha afirmado en un informe sobre la situación actual y futura del metanol verde su elevado coste de producción, además de bajos volúmenes de producción, haciendo que este combustible sea, actualmente y con esos costes, muy poco competitivo en el mercado frente al resto. En este informe, Irena proporciona una serie de pautas y recomendaciones claves para conseguir la neutralidad de carbono, entre las que se encuentran el reconocimiento del metanol renovable como combustible alternativo verde o el apoyo e incentivo a su uso desde instituciones públicas, siempre con cooperación y colaboración entre organismos y empresas. La producción actualmente de metanol verde en todo el

mundo es muy baja, lo cual implica que se disponen de poco y limitados datos respecto a los costes reales de producción del mismo. Por ello, se realizan estimaciones de estos costes, el cual va a depender de la materia prima usada, del coste de la electricidad y de la eficiencia en el proceso, entre otros muchos factores (Agencia Internacional de Energías Renovables, 2021).

En el caso del biometanol, el rango de costes de producción abarca desde los 320 hasta los 770 dólares estadounidenses por tonelada, el cual podría disminuir un 40% en el caso de que se introdujeran ciertas mejoras en el proceso de obtención de dicho biometanol. Esto sería equivalente a un rango entre 307 y 739 euros por tonelada (Agencia Internacional de Energías Renovables, 2021).

En el caso del e-metanol, el rango de costes de producción se encuentre entre 800 y 1600 dólares estadounidenses por tonelada, teniendo en cuenta que el CO<sub>2eq</sub> tiene un coste de captura de entre 10 y 15 dólares estadounidenses si se captura mediante bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (BECCS). En euros, el coste, en este caso, se encuentra en un rango entre 768 y 1535 por tonelada, estando el del captura de CO<sub>2eq</sub> entre 9,60 y 14,40 (Agencia Internacional de Energías Renovables, 2021).

Sin embargo, también encontramos otros datos esperanzadores sobre el coste de producción del e-metanol. Gracias a las disminuciones que se quieren incluir en los precios de la energía renovable, el coste del e-metanol podría bajar hasta los 250-630 dólares estadounidenses por tonelada para el año 2050 (unos 240-605 € por tonelada) (Agencia Internacional de Energías Renovables, 2021).

Tabla 6: Comparación de los rangos de costes de producción por tonelada de metanol fósil, biometanol y e-metanol en USD y en euros.

	<b>DÓLARES ESTAODUNIDENSES (USD)</b>	<b>EUROS</b>
<b>METANOL FÓSIL</b>	100 – 250	96 – 240
<b>BIOMETANOL</b>	320 – 770	307 – 739
<b>E-METANOL</b>	800 – 1600	768 – 1535

Fuente: (Agencia Internacional de Energías Renovables, 2021).

El biometanol, en los casos óptimos, estaría cerca de poder competir en costes con el metanol procedente de combustibles fósiles, también conocido como metanol fósil. Sin embargo, es muy poco frecuente y difícil, ya que no se espera una reducción de los costes de las materias primas necesarias para el biometanol. Uno de los principales inconvenientes del biometanol es su gran dependencia de la disponibilidad de la materia prima biomasa a la hora de su producción. En torno al 50% del coste total de producción de biometanol depende del coste de la biomasa, lo cual condiciona en gran medida la disponibilidad del biometanol en el mercado. Además de todo esto, normalmente la biomasa, la cual debe ser sostenible, requiere de extensas cadenas de suministro (Agencia Internacional de Energías Renovables, 2021).

Por otro lado, la producción a gran escala del e-metanol depende del hidrógeno renovable y del  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ , además del coste de las plantas industriales necesarias para la obtención mediante la electrólisis del hidrógeno verde. El coste de este hidrógeno renovable se encuentra muy relacionado con el coste de la energía eléctrica. Actualmente, el e-metanol es muy costoso de producir, tal y como hemos comprobado en los datos proporcionados anteriormente. Sin embargo, no dentro de muchos años, se espera que el coste de la electricidad renovable, como puede ser la eólica o la solar, disminuya, pudiéndose reducir así el coste de producción del e-metanol y llegando a ser competitivo con el resto de combustibles.

Se están planificando nuevos proyectos en todo el planeta (Suecia, Australia, Canadá...) respecto al e-metanol, con el objetivo de aumentar su producción y poder hacerlo a gran escala. Si todos estos proyectos salen adelante y cumplen con la producción planificada, tendríamos una capacidad de producción de unas 700.000 toneladas de e-metanol al año (Agencia Internacional de Energías Renovables, 2021).

Por otro lado, si desglosamos los costes de producción que tienen las plantas productoras de biometanol en costes de capital, costes de materia prima y costes operativos a lo largo de un año, los principales datos se pueden resumir en la Tabla 7.

Tabla 7: Desglose de los costes de producción de biometanol obtenido a partir de biomasa en un año.

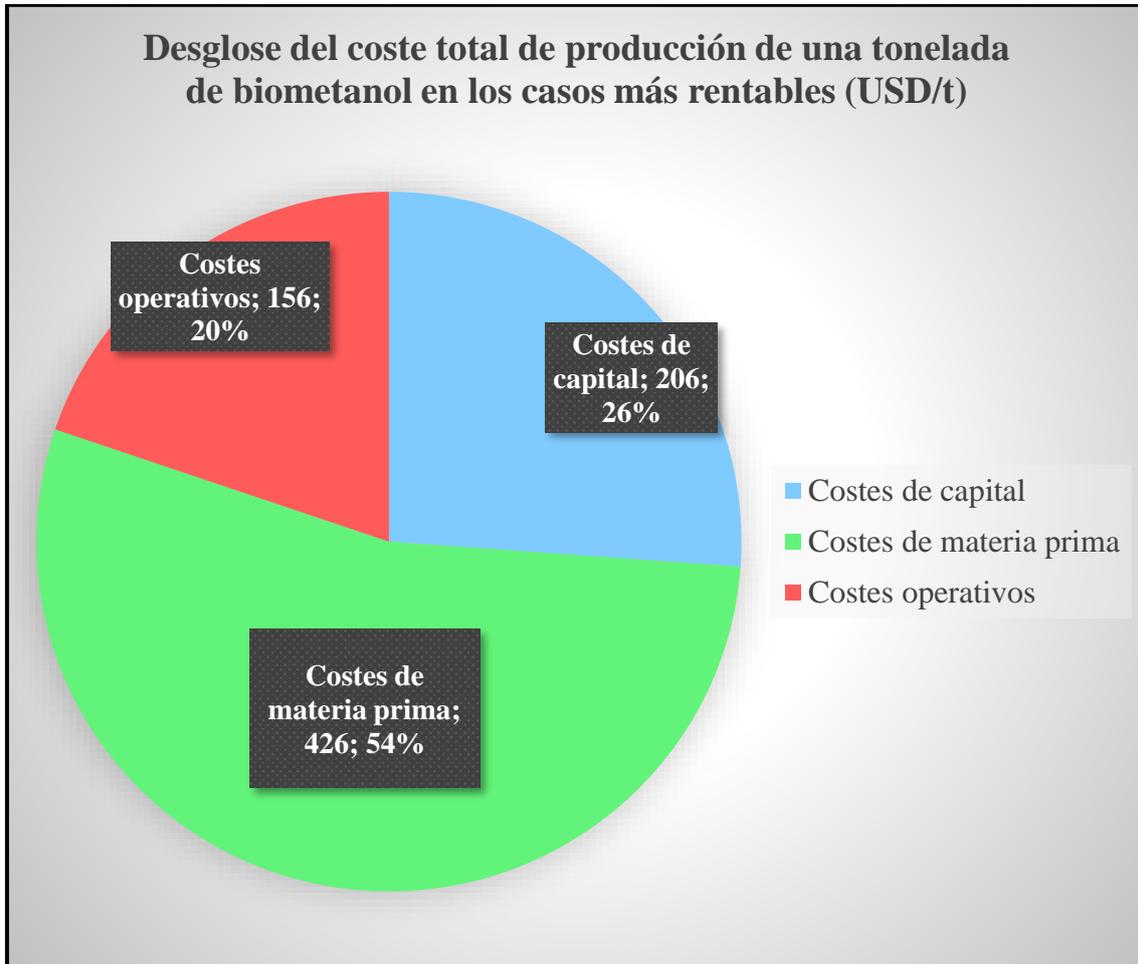
	<b>COSTES DE CAPITAL</b>	<b>COSTES DE MATERIA PRIMA</b>	<b>COSTES OPERATIVOS</b>	<b>COSTES TOTALES DE PRODUCCIÓN</b>
<b>CASOS MÁS RENTABLES</b>	206 USD/t	426 USD/t	156 USD/t	788 USD/t
<b>CASOS MÁS COSTOSOS</b>	293 USD/t	426 USD/t	222 USD/t	941 USD/t

Fuente: (Agencia Internacional de Energías Renovables, 2021).

Para el cálculo de estos datos, se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- La producción de biometanol es a partir de biomasa como materia prima.
- En los costes operativos están incluidos costes como servicios públicos, catalizadores, mantenimiento, etc. y son distintos de la materia prima.
- Para el coste de la materia prima, se ha tenido en consideración una eficiencia de conversión global del 70%. Esto se refiere a las transformaciones que requiere la materia prima hasta que se encuentra en el estado óptimo para poder producir biometanol.
- Para el coste de la materia prima, se ha tenido en consideración el mayor coste posible de la misma, el cual es 15 US\$/GJ de biomasa. Si este coste se encuentra por debajo de estos 15 US\$/GJ, el coste total también disminuirá.
- Para los costes operativos, se ha tenido en consideración que estos representan en torno al 10% del coste total de inversión necesaria para producir biometanol.
- Los costes totales de metanol calculados en la tabla se encuentran dentro de los rangos de costes proporcionados por IRENA en su informe, los cuales son: 455 – 860 US\$/t para los casos más rentables y 575 – 1013 US\$/t para los casos más costosos. El coste total de metanol variará si varía algunas de estas consideraciones explicadas, pero siempre se encontrará dentro de estos rangos de costes (Agencia Internacional de Energías Renovables, 2021).

Gráfico 1: Desglose del coste total de producción de una tonelada de biometanol en los casos más rentables (USD/t).



Fuente: (Agencia Internacional de Energías Renovables, 2021).

Actualmente, los costes de materia prima son los costes predominantes en la producción de biometanol. En los próximos años, según estimaciones a largo plazo de entre 15 y 20 años, se espera una reducción de todos los tipos de costes que hemos visto, especialmente del coste de capital, haciendo disminuir el coste total y haciendo más competitivo al biometanol en el mercado.

Por otro lado, si desglosamos los costes de producción que tienen las plantas productoras de e-metanol, los cuales son hidrógeno verde y  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ , encontramos lo siguiente:

- El coste actual de un kilogramo (kg) de hidrógeno verde, calculado a partir del histórico entre 2015 y 2018, se encuentra en un rango entre 4 y 8 US\$/kg. Con proyección de futuro, se espera que este coste esté entre 2,5 y 5 US\$/kg en el año

2030 y entre 1,6 y 3,3 US\$/kg en el año 2050. Sin embargo, estos números estimados deberían ser menores si queremos que el e-metanol se produzca y consuma a gran escala. Lo ideal sería que, para el año 2030, el coste estuviera entre 1,8 y 3,2 US\$/kg y para el año 2050, entre 0,9 y 2 US\$/kg, es decir, en torno a un 40% menos de lo previsto para 2030 y en torno a un 70% menos de lo previsto para 2050 (Agencia Internacional de Energías Renovables, 2021).

- El coste actual estimado del CO<sub>2eq</sub>, obtenido a partir de BECCS, se encuentra en el rango de 20 y 400 US\$/t. Para el año 2050, se espera una reducción de esta fuente, pudiendo llegar a alcanzar el rango de entre 20 y 100 US\$/t. Por otro lado, el coste actual estimado del CO<sub>2eq</sub>, obtenido a partir de la captura directa del aire (DAC) se encuentra en el rango entre 300 y 600 US\$/t, mientras que para el año 2050 se espera que disminuya hasta el rango entre 50 y 150 US\$/t (Agencia Internacional de Energías Renovables, 2021).
- Además de estas dos materias primas esenciales para la producción de e-metanol, también se debe tener en cuenta el coste de producir el metanol en una planta de síntesis a gran escala, el cual se estima que se encuentra entre los 50 US\$/t (Agencia Internacional de Energías Renovables, 2021).
- El coste total de producción de una tonelada de e-metanol se calcularía de la siguiente forma:

Tabla 8: Cálculo desglosado del coste total de producción de una tonelada de e-metanol.

<b>HIDRÓGENO VERDE (H<sub>2</sub>)</b>	1 t de e-metanol necesita 0,19 t de H <sub>2</sub> 1 kg de H <sub>2</sub> cuesta entre 4 y 8 US\$ Elegimos un coste de 6 US\$/kg Coste H <sub>2</sub> = (6 US\$*1000)*0,19 = 1140 US\$/t (3)
<b>CO<sub>2eq</sub> (BECCS)</b>	1 t de e-metanol necesita 1,38 t de CO <sub>2eq</sub> 1 t de CO <sub>2eq</sub> cuesta entre 20 y 400 US\$ Elegimos un coste de 210 US\$/t Coste CO <sub>2eq</sub> = 210 US\$*1,38 = 290 US\$/t
<b>COSTES DE PLANTAS DE SÍNTESIS</b>	Coste de plantas de síntesis = 50 US\$/t
<b>COSTE TOTAL</b>	Coste total = 1140 + 290 + 50 = 1480 US\$/T

Fuente: (Agencia Internacional de Energías Renovables, 2021).

(3) El motivo de multiplicar el coste de un kg de H<sub>2</sub> por 1000 es para operar en la misma unidad de medida, en este caso, la tonelada, la cual equivale a 1000 kg.

A la hora de elegir el coste de una tonelada de H<sub>2</sub> y de CO<sub>2eq</sub>, al encontrarse dentro de un rango, he elegido la mediana de dicho rango, es decir, el valor que ocupa la posición central de dicho rango.

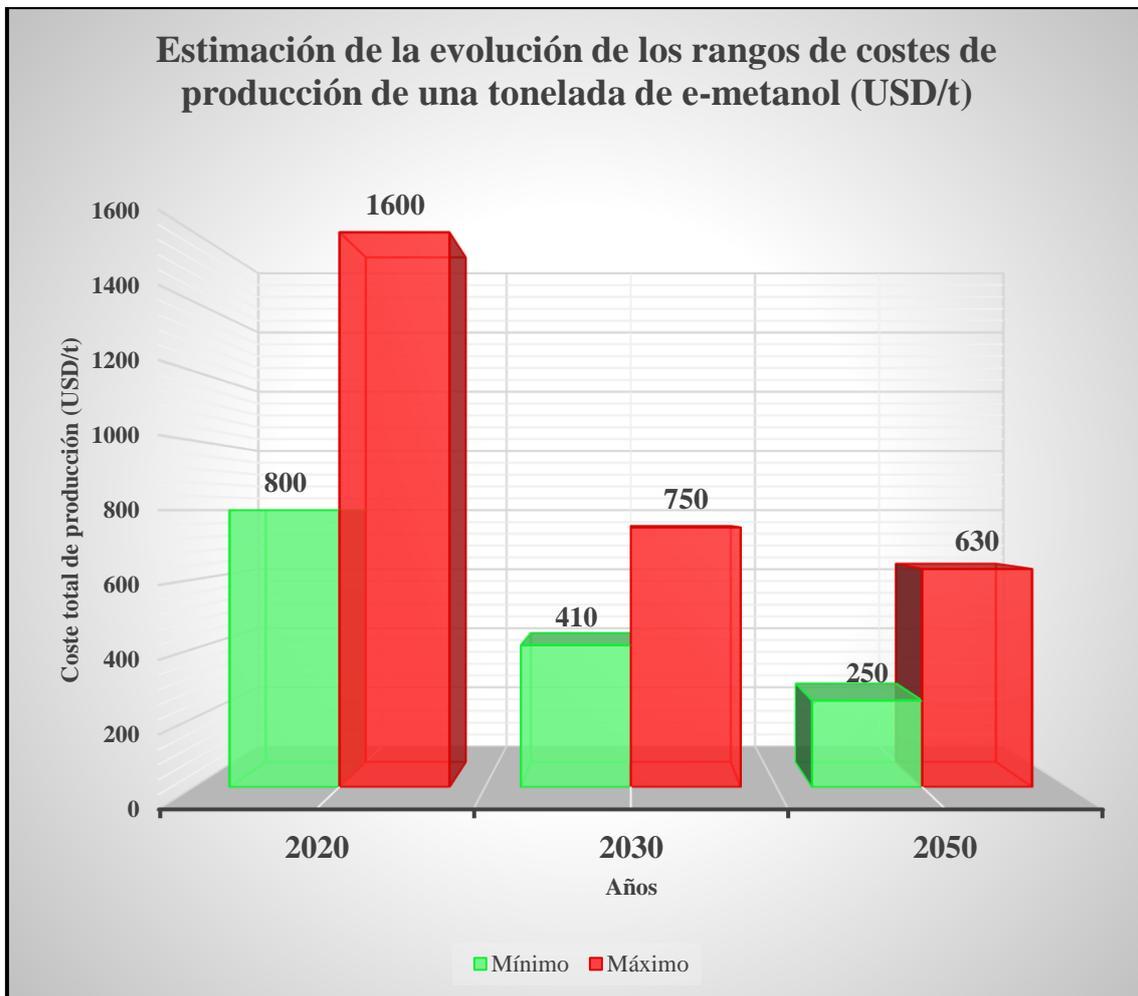
El resultado que obtenemos con estos cálculos es que el coste total de producción de una tonelada de e-metanol es de 1480 US\$/t, el cual se encuentra dentro del rango de costes que ya mencionamos con anterioridad, el cual es 800 – 1600 US\$/t. Estos datos pueden variar en función de si varía el coste de cualquier materia prima. Como podemos observar, la mayor parte del coste de producir una tonelada de e-metanol se la lleva la producción de H<sub>2</sub>, el cual supone en torno a un 75% del total del coste.

Para finalizar, el informe de IRENA estima que los rangos de costes en los próximos años serán de:

- Para el año 2030 se estima un rango de costes de entre 410 y 750 US\$/t de e-metanol.
- Para el año 2050 se estima un rango de costes de entre 250 y 630 US\$/t de e-metanol.

Los costes operativos son los que representan la mayor parte del coste total de producción de e-metanol, por delante de los de capital, debido al coste de la electricidad.

Gráfico 2: Estimación de la evolución de los rangos de costes de producción de una tonelada de e-metanol (USD/t).



Fuente: (Agencia Internacional de Energías Renovables, 2021).

No cabe duda de que, con estos datos proporcionados, el metanol verde, en su uso como combustible, está destinado a ser esencial no dentro de muchos años. Nos encontramos actualmente en una fase de transición en la que organismos, empresas e instituciones trabajan ya sin descanso en la búsqueda y producción, ya no solo de metanol verde, si no de energías verdes, renovables, sostenibles y respetuosas con el medio ambiente.

El metanol verde se está acercando cada vez más a los costes de los combustibles fósiles. Pero esto implica afrontar nuevos retos, sin dar un paso atrás. Con la ayuda de intervenciones públicas, regulaciones y mecanismos de apoyo, el metanol verde puede ser un combustible único en el futuro.



## 6. CONCLUSIONES

Después de todos los datos y explicaciones dadas hasta el momento, la primera conclusión que sacamos es que, mediante la síntesis del metanol, la huella de carbono en el planeta va a disminuir, lo cual puede tener impactos muy positivos, tanto en la economía de los países como en la propia economía de carbono (Rico, 2021).

Por otro lado, no cabe duda de que todavía queda mucho por avanzar respecto al uso, producción, demanda, etc. de las energías renovables, incluida la del metanol verde. Como ya sabemos, la mayor parte de los combustibles usados actualmente son de origen fósil. La dependencia sobre estos es muy grande, la cual se debe ir reduciendo poco a poco, tanto a nivel empresarial e institucional como social.

Nos encontramos en una fase de transición combustibles renovables. Este proceso de transición es necesario y obligatorio, como es lógico, debido a que es imposible cambiar los tipos de combustibles que se usan actualmente de un día para otro. Por ello, se están llevando a cabo estrategias cuyos objetivos principales son la introducción de forma gradual de las energías renovables (en este caso, del metanol renovable) para que, en el futuro, y esperemos que no dentro de muchos años, estas energías renovables se puedan producir y consumir a gran escala con costes similares o más bajos que los actuales. Lo que tenemos claro es que los combustibles fósiles serán cada vez menos abundantes, dejando paso a los combustibles renovables y reduciéndose así las emisiones de GEI.

La situación actual de las energías renovables 100% puras no se encuentra muy desarrollada, a pesar de la importancia que tiene. Los mecanismos de apoyo son escasos y ya no solo nos referimos al metanol verde, sino a todo tipo de combustibles verdes y sostenibles. Cualquier apoyo e inversión a combustibles de este tipo serán beneficiosas y estas se deben expandir mundialmente.

Como ya hemos visto, la mayor parte del metanol que se produce a lo largo de un año es de origen fósil (metanol fósil). Sin embargo, creo que a esto se le puede sacar el lado positivo. Este metanol fósil se ha empezado a usar ya como combustible en algunas aplicaciones, siendo ya competitivo en costes con la mayoría de combustibles derivados del petróleo, como la gasolina o el diésel. A pesar de las emisiones que pueda tener, esto se puede considerar como un primer paso en la transición del uso de combustibles fósiles

a combustibles renovables, siempre de forma gradual. Otra gran ventaja de esto es que apenas habría que invertir en nuevas infraestructuras de almacenamiento ni transporte, ya que una planta de producción de metanol fósil funciona igual que una planta de producción de metanol renovable. El único cambio es la materia prima que se usa y su coste.

Por otro lado, otro aspecto a mejorar respecto a la producción de e-metanol sería ampliar la capacidad de captura de  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  que tienen las plantas productoras de este combustible, teniendo en cuenta que, mientras mayor sea la captura de este  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  procedente de fuentes renovables, como pueden ser biogás o biomasa, mucho más favorable será el proceso para el medio ambiente. Una posible mejora relacionada con la captura de  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  sería que el  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  procedente de fuentes de combustibles fósiles también sea capturado para producir metanol, en este caso, fósil, en lugar de liberarlo a la atmósfera. De esta forma, se obtendría un doble beneficio:

- Se produciría metanol fósil, el cual sirve de puente entre los combustibles fósiles actuales y los combustibles renovables, como ya hemos comentado anteriormente.
- Se podrían reducir las emisiones de GEI a la atmósfera incluso hasta la mitad (Agencia Internacional de Energías Renovables, 2021).

Otro aspecto que podemos sacar en claro de este TFG es la identificación de las deficiencias a la hora de la producción del metanol verde. Por un lado, para el caso del e-metanol, los electrificadores encargados de obtener el hidrógeno verde se encuentran aún en sus primeras fases, debido a la poca cantidad que son capaces de producir en comparación con el resto de combustibles fósiles. Estos electrificadores se deben mejorar innovando sobre ellos, haciéndolos más eficientes y eficaces. De hecho, estas mejoras están ya en marcha. La importancia de la inversión en estos electrificadores es especialmente alta debido a que representan una buena parte del coste total de producción del e-metanol. Además, con esta innovación en los electrificadores y con nueva tecnología se podrían conseguir reducciones en el coste total de producción del e-metanol en un futuro próximo, haciéndolo así más competitivo en el mercado. Al ser más competitivo, la demanda de este va a aumentar, consiguiendo así las empresas productoras mayores beneficios, los cuales se pueden invertir en producir más e-metanol, entrando así en un bucle que tiene como objetivo producir y consumir este e-metanol a gran escala. En mi opinión, creo que esto permitiría conseguir entrar en economías de escala en las que,

cuanto mayores sean los volúmenes de producción de e-metanol, menores serán los costes unitarios. También creo que estas economías de escala no deben ir solas, es decir, deben ir acompañadas y respaldadas en todo momento por ayudas a la inversión en forma de subvenciones o subsidios directos hacia las empresas productoras, incentivando y estimulando así aún más la producción de metanol renovable.

No solo los electrificadores se pueden mejorar. Actualmente, existen plantas de producción de biometanol por un lado y de e-metanol por otro. Sin embargo, no existen plantas que combinen ambos tipos de metanol verde. Creo que la combinación de estos dos tipos en una sola instalación o planta de producción de mayor tamaño podría ser más que favorable, ya que podrían aprovechar recursos mutuamente y el resultado podría ser muy beneficioso.

Otras medidas posibles para reducir costes podrían ser la creación de curvas de aprendizaje para mejorar los procesos en las plantas productoras; las mejoras de estas propias plantas, haciéndolas más rentables y buscando la manera óptima respecto a su configuración, estructura y tamaño (Agencia Internacional de Energías Renovables, 2021).

En este TFG hemos enfocado el metanol verde en su uso como combustible, pero, sin embargo, este puede tener muchas más aplicaciones, según explica IRENA. Además de combustible, el metanol verde podría ser un claro sustituto de ciertos hidrocarburos y productos fabricados a base de petróleo, dando lugar así a mayores reducciones de GEI en el planeta. Por tanto, el metanol verde puede ser usado como materia prima y como combustible, además de muchas otras aplicaciones (Agencia Internacional de Energías Renovables, 2021).

Otra posible mejora que propone IRENA, con el fin de reducir el coste de producción de e-metanol, sería la venta del oxígeno ( $O_2$ ) producido junto al hidrógeno verde durante la electrólisis del agua, siempre y cuando esta se realice con electricidad renovable. Por cada tonelada de e-metanol producida, se producen durante la electrólisis en torno a un 50% más de oxígeno, es decir, en torno a 1,5 toneladas de  $O_2$ . Sería una medida de compensación de costes de los costes de producción a corto plazo (Agencia Internacional de Energías Renovables, 2021).

Como hemos comentado en todo este TFG, la transición energética no se puede realizar sin el apoyo de las instituciones públicas ni de los gobiernos naciones. Estos

deben ser los primeros en dar ejemplo, en contribuir en dicha transición. Deben proporcionar apoyo a las inversiones y llevar a cabo políticas públicas que estimulen el uso de las energías renovables. En este TFG hemos explicado varios ejemplos de ello, desde la OMI, la UE o desde el gobierno de España. Sin embargo, creo que estas deben ir más allá y ser más ambiciosos. Las barreras que impiden acceder a materias primas renovables deben ser superadas lo antes posible. Las asociaciones entre organizaciones y gobiernos comprometidos con esta transición energética también son necesaria, pudiendo llegar a crear sinergias entre ellos, además de proyectos piloto ejemplares que sirvan de guía en todo el planeta. Las regulaciones, las leyes y los mandatos, además de la creación de estándares de combustible, también son necesarios en estos momentos como forma de estimular la demanda de las energía renovable. Y, por supuesto, el apoyo fiscal favorable para estos combustibles sostenibles: un trato fiscal equitativo para estos combustibles, además de desgravaciones y exenciones de impuestos para empresas comprometidas con el uso de energía renovable. Es una forma también de garantizar bajos precios al metanol verde y al resto de combustibles. En mi opinión, las políticas fiscales son las principales herramientas con las que cuentan los gobiernos para estimular el uso de combustibles alternativos.

Como conclusión final de este TFG, no existe duda de que las soluciones sostenibles y duraderas basadas en recursos renovables son más que necesarias en nuestro planeta. El objetivo final de todas estas necesidades actuales es la creación de una economía circular sostenible y verde, en la que el metanol renovable ocupa una posición única como materia prima química y para ser unos de los combustibles del cambio y del futuro, encabezando esta transición energética.



## 7. ÍNDICE DE TABLAS Y GRÁFICOS

### TABLAS

Tabla 1: Comparación de las emisiones de CO <sub>2</sub> eq anuales por medio de transporte en 2020. ....	7
Tabla 2: Comparación de precios de distintos combustibles marinos. ....	13
Tabla 3: Comparación de los cuatro tipos principales de metanol en función de las emisiones de GEI emitidas, usando el método GREET 2020. ....	20
Tabla 4: Necesidades de materias primas para producir una tonelada de e-metanol. ....	21
Tabla 5: Capacidad de producción de la planta piloto del Proyecto MefCO <sub>2</sub> . ....	27
Tabla 6: Comparación de los rangos de costes de producción por tonelada de metanol fósil, biometanol y e-metanol en USD y en euros. ....	28
Tabla 7: Desglose de los costes de producción de biometanol obtenido a partir de biomasa en un año. ....	30
Tabla 8: Cálculo desglosado del coste total de producción de una tonelada de e-metanol. ....	32

### GRÁFICOS

Gráfico 1: Desglose del coste total de producción de una tonelada de biometanol en los casos más rentables (USD/t). ....	31
Gráfico 2: Estimación de la evolución de los rangos de costes de producción de una tonelada de e-metanol (USD/t). ....	34

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Internacional de Energías Renovables. (2021). *INNOVATION OUTLOOK. RENEWABLE METHANOL*. Disponible en [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jan/IRENA\\_Innovation\\_Renewable\\_Methanol\\_2021.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jan/IRENA_Innovation_Renewable_Methanol_2021.pdf) (Última consulta 23/04/2022).
- Asociación de Navieros Españoles. (2020). *Axpo participa en un consorcio industrial que producirá metanol sintético para uso como combustible marino*. ANAVE. Disponible en <https://www.anave.es/prensa/ultimas-noticias/2384-axpo-participa-en-un-consorcio-industrial-que-producira-metanol-sintetico-para-uso-como-combustible-marino> (Última consulta 26/04/2022).
- Asociación Navieros Españoles. (2021). *MAN firma dos acuerdos para fomentar el uso de amoniaco y metanol como combustible*. ANAVE. Disponible en <https://www.anave.es/prensa/archivo-noticias/2675-man-firma-dos-acuerdos-para-fomentar-el-uso-de-amoniaco-y-metanol-como-combustible> (Última consulta 21/04/2022).
- Bravo, C., Büschel, I., & Abbasov, F. (2019). *Reducir la contaminación de los barcos. 20 Minutos*. Disponible en <https://blogs.20minutos.es/la-energia-como-derecho/2019/06/27/reducir-la-contaminacion-de-los-barcos/> (Última consulta 04/04/2022).
- Casadelrey, M. L. (2021). *Megavatio por hora (MWh)*. La Voz de Galicia. Disponible en [https://www.lavozdegalicia.es/noticia/opinion/2021/09/01/megavatio-hora-mwh/0003\\_202109G1P10994.htm](https://www.lavozdegalicia.es/noticia/opinion/2021/09/01/megavatio-hora-mwh/0003_202109G1P10994.htm) (Última consulta 17/05/2022).
- Cerezo, R. (2021). *Catalizando la cuarta revolución de la propulsión marina*. Disponible en [https://www.anave.es/images/tribuna\\_profesional/2021/tribuna\\_bia0321.pdf](https://www.anave.es/images/tribuna_profesional/2021/tribuna_bia0321.pdf) (Última consulta 09/05/2022).
- Comisión Europea. (2020). *Emisiones de CO2 procedentes del transporte marítimo: fomento del uso de combustibles con bajas emisiones de carbono*. Unión Europea. Disponible en <https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12312-Emisiones-de-CO2-procedentes-del-transporte-maritimo->

[fomento-del-uso-de-combustibles-con-bajas-emisiones-de-carbono\\_es](#) (Última consulta 06/04/2022).

Comisión Europea. (2021a). *Conversión de CO2 en metanol por medio de la producción de acero para el transporte marino*. Unión Europea. Disponible en <https://ec.europa.eu/research-and-innovation/es/projects/success-stories/all/conversion-de-co2-en-metanol-por-medio-de-la-produccion-de-acero-para> (Última consulta 25/04/2022).

Comisión Europea. (2021b). Pacto Verde Europeo: la Comisión propone transformar la economía y la sociedad de la UE para alcanzar los objetivos climáticos. *Unión Europea*. Disponible en [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/IP\\_21\\_3541](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/IP_21_3541) (Última consulta 05/04/2022).

Comisión Europea. (2021c). Propuesta de REGLAMENTO DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO relativo al despliegue de infraestructuras de combustibles alternativos, y por el que se deroga la Directiva 2014/94/UE del Parlamento Europeo y del Consejo. *Unión Europea*. Disponible en <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX:52021PC0559> (Última consulta 06/04/2022).

Comisión Europea. (2021d). Un Pacto Verde Europeo. *Unión Europea*. Disponible en [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_es](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es) (Última consulta 05/04/2022).

Consejo de la UE, & Consejo Europeo. (2022). Cambio climático: lo que está haciendo la UE. *Unión Europea*. Disponible en <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/climate-change/> (Última consulta 05/04/2022).

Cryospain. (2021). *Barcos impulsados por metanol: combustible alternativo al GNL*. Cryospain. Disponible en <https://cryospain.com/es/barcos-impulsados-por-metanol> (Última consulta 22/04/2022).

de Aragón, E. (2022). El impulso de Geely y Dinamarca al e-metanol como combustible de futuro. *Movilidad Eléctrica*. Disponible en <https://movilidadelectrica.com/geely-en-dinamarca-pruebas-e-metanol/> (Última consulta 12/05/2022).

de La Barrera, E. (2022). Así es “Triskelion”, el proyecto ‘súper verde’ de la gallega Forestal del Atlántico. *El Español*. Disponible en <https://www.elespanol.com/quincemil/articulos/actualidad/asi-es-triskelion-el-proyecto-super-verde-de-la-gallega-forestal-del-atlantico> (Última consulta 28/04/2022).

Departamento de Medio Ambiente de Bester. (2017). Gases de efecto invernadero (GEI). Advertencia global sobre el cambio climático. *Bester*. Disponible en <https://bester.energy/gases-de-efecto-invernadero-gei/> (Última consulta 22/03/2022).

Eolivier. (2018). *Escalabilidad de un Negocio: Características y Ejemplos*. Emprendedores y Negocios. Disponible en <https://emprendedoresynegocios.com/escalabilidad-de-un-negocio/> (Última consulta 28/04/2022).

Foresa. (n.d.). *Fabricación de metanol verde*. Foresa. Disponible en <https://www.foresa.com/es/fabricacion-de-metanol-verde> (Última consulta 27/04/2022).

Freire, J. R. (2022). Forestal del Atlántico entra en el negocio de los ecocombustibles. *Energías Renovables*. Disponible en <https://bio-e.es/forestal-del-atlantico-entra-en-el-negocio-del-biometanol/> (Última consulta 30/04/2022).

*gCO<sub>2</sub>e/MJ Definition | Law Insider*. (n.d.). Law Insider. Disponible en <https://www.lawinsider.com/dictionary/gco2e-mj> (Última consulta 23/04/2022).

Real Decreto 61/2006, de 31 de enero, por el que se determinan las especificaciones de gasolinas, gasóleos, fuelóleos y gases licuados del petróleo y se regula el uso de determinados biocarburantes, Pub. L. No. 41, Boletín Oficial del Estado 8 (2006). Disponible en <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2006-2779&p=20151205&tn=1#a11> (Última consulta 07/04/2022).

Real Decreto 290/2015, de 17 de abril, por el que se modifica el Real Decreto 61/2006, de 31 de enero, por el que se fijan las especificaciones de gasolinas, gasóleos, fuelóleos y gases licuados del petróleo, se regula el uso de determinados biocarburantes y el contenido de azufre de los combustibles para uso marítimo, Pub. L. No. 93, Boletín Oficial del Estado 4 (2015). Disponible en

<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2015-4218> (Última consulta 19/04/2022).

Iberdrola. (2021). *Iberdrola y Foresa proyectan inversiones en hidrógeno renovable para la producción de metanol verde en Galicia*. Iberdrola. Disponible en <https://www.iberdrola.com/sala-comunicacion/noticias/detalle/iberdrola-foresa-proyectan-inversiones-hidrogeno-renovable-para-produccion-metanol-verde-galicia> (Última consulta 28/04/2022).

Iglesias, C. (2021). Medios de transporte que más y menos contaminan. *LetsFamily*. Disponible en <https://letsfamily.es/familia/medios-de-transporte-que-mas-y-menos-contaminan/#:~:text=Por%20%20C3%BA%20el%20avi%20es,una%20alternativa%20mucho%20m%C3%A1s%20ecol%C3%B3gica> (Última consulta 04/04/2022).

León, M. (2022). Forestal del Atlántico adelanta planta de metanol con hidrógeno verde. *Energía 16*. Disponible en <https://www.cambio16.com/forestal-del-atlantico-adelanta-planta-de-metanol-con-hidrogeno-verde/> (Última consulta 28/04/2022).

López de Benito, J. (2022). La primera planta de producción de metanol verde del mundo. *Hidrógeno Verde*. Disponible en <https://hidrogeno-verde.es/primera-instalacion-de-produccion-comercial-de-metanol-verde/> (Última consulta 22/04/2022).

Martin, A. (2021). Un paso adelante para el metanol “verde.” *ICCT*. Disponible en <https://ecodes.org/hacemos/cambio-climatico/incidencia-en-politicas-publicas/por-un-transporte-maritimo-limpio/un-paso-adelante-para-el-metanol-verde> (Última consulta 23/04/2022).

Martín, F. (2021). Descarbonización: el metanol verde avanza en la carrera. *Naucher*. Disponible en <https://www.naucher.com/descarbonizacion-el-metanol-verde-avanza-en-la-carrera/> (Última consulta 12/05/2022).

Merino, Á. (2021). ¿Cuánto contamina cada tipo de barco? *El Orden Mundial*. Disponible en <https://elordenmundial.com/mapas-y-graficos/contaminacion-barcos/#:~:text=Si%20atendemos%20a%20la%20emisi%C3%B3n,los%20portadores%20y%20los%20metaneros> (Última consulta 17/03/2022).

Mosquera, P. (2019). MefCO<sub>2</sub> demuestra que es posible producir metanol verde a partir de la captura de CO<sub>2</sub>. *Energías Renovables*. Disponible en <https://www.energias->

[renovables.com/panorama/mefco2-demuestra-que-es-posible-producir-metanol-20190531](https://renovables.com/panorama/mefco2-demuestra-que-es-posible-producir-metanol-20190531) (Última consulta 25/04/2022).

Naciones Unidas. (2021). ¿Volverán los barcos a llevar velas para reducir sus emisiones de carbono? *ONU*. Disponible en <https://news.un.org/es/story/2021/04/1490592> (Última consulta 28/03/2022).

Nolasco, S. (2022). Embarcaciones verdes de logística, con metanol de combustible. *El Economista*. Disponible en <https://www.economista.com.mx/empresas/Embarcaciones-verdes-de-logistica-con-metanol-de-combustible-20220124-0122.html> (Última consulta 26/02/2022).

Noya, C. (2021). Maersk presenta el diseño de nuevos portacontenedores alimentados con metanol verde. *ForoCochesElectricos*. Disponible en <https://forococheselectricos.com/2021/12/maersk-portacontenedores-alimentados-con-metanol-verde.html> (Última consulta 21/04/2022).

Organización Marítima Internacional. (2020a). Azufre 2020: reduciendo las emisiones de óxidos de azufre. *OMI*. Disponible en <https://www.imo.org/es/MediaCentre/HotTopics/Paginas/Sulphur-2020.aspx> (Última consulta 22/03/2022).

Organización Marítima Internacional. (2020b). *Fourth IMO GHG Study 2020 Full Report*. Disponible en <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Fourth%20IMO%20GHG%20Study%202020%20-%20Full%20report%20and%20annexes.pdf> (Última consulta 05/05/2022).

Organización Marítima Internacional. (2021a). Publicada la sinopsis del Cuarto Estudio de la OMI sobre los GEI. *OMI*. Disponible en <https://www.imo.org/es/MediaCentre/Pages/WhatsNew-1596.aspx> (Última consulta 28/03/2022).

Organización Marítima Internacional. (2021b). Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de los buques. *OMI*. Disponible en <https://www.imo.org/es/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx> (Última consulta 05/04/2022).

Partida Logistics. (n.d.). *Logística y transporte en el Puerto de Algeciras*. Partida Logistics. Disponible en <https://partidalogistics.com/logistica-y-transporte/> (Última consulta 21/04/2022).

Pérez-Barco, M. J. (2021). El metanol verde reclama su lugar en la ruta de la descarbonización. *ABC*. Disponible en [https://www.abc.es/economia/abci-metanol-verde-reclama-lugar-ruta-descarbonizacion-202109032327\\_noticia.html](https://www.abc.es/economia/abci-metanol-verde-reclama-lugar-ruta-descarbonizacion-202109032327_noticia.html) (Última consulta 24/04/2022).

PierNext. (2020). Una nueva era en los combustibles del transporte marítimo. *PierNext. Innovation by Port of Barcelona*. Disponible en <https://piernext.portdebarcelona.cat/entorno/una-nueva-era-en-los-combustibles-del-transporte-maritimo/#:~:text=El%20metano%20sint%C3%A9tico%2C%20el%20biometano,raprovechar%20f%C3%A1cilmente%20para%20obtener%20metano> (Última consulta 20/05/2022).

Reciclaje Internacional de Carbono. (2022). *CRI - Reciclaje Internacional de Carbono*. Carbon Recycling International. Disponible en <https://www.carbonrecycling.is/> (Última consulta 12/05/2022).

Redacción Naucher. (2021). *El metanol abre la era de los combustibles de transición hacia la descarbonización marítima*. Naucher. Disponible en <https://www.naucher.com/el-metanol-abre-la-era-de-los-combustibles-de-transicion-hacia-la-descarbonizacion-maritima/> (Última consulta 22/04/2022).

Rico, J. (2021). *El metanol renovable podría ser competitivo en costes antes de 2050*. Energías Renovables. Disponible en <https://www.energias-renovables.com/bioenergia/a-el-metanol-renovable-podria-ser-competitivo-20210205> (Última consulta 19/05/2022).