



Tecnun
Universidad
de Navarra

ESCUELA DE INGENIERÍA
INGENIARITZA ESKOLA
SCHOOL OF ENGINEERING

Proyecto Fin de Grado

INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

**TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO EN FORMA DE
METANOL**

Ane Arrillaga García
Donostia-San Sebastián, agosto de 2024

AGRADECIMIENTOS

Con este proyecto, doy por finalizados mis estudios en el grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales en Tecnun, Universidad de Navarra. Estos cuatro años han sido una etapa intensa y enriquecedora en mi vida, donde no solo he adquirido conocimientos técnicos de gran valor, sino también habilidades humanas que me acompañarán a lo largo de mi carrera profesional y personal. Estoy profundamente agradecida a la Universidad por ofrecerme las herramientas necesarias para mi crecimiento y desarrollo, preparándome así para enfrentar con éxito los desafíos del futuro.

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a los profesores que me han ido acompañando a lo largo de estos años su compromiso con la enseñanza han sido fundamentales en mi formación, especialmente, me gustaría agradecer a mi director del proyecto Tomás Gómez-Acebo por su dedicación y apoyo a lo largo de este trayecto que ha sido de gran ayuda en mi formación y en el desarrollo de este proyecto. Además, me gustaría agradecer a mi asesora de estos cuatro años, Aitziber López de Arancibia, su orientación y consejos han sido esenciales en mi trayectoria universitaria.

Asimismo, me gustaría agradecer a las personas que he conocido en estos años de carrera. Compañeros de clase, amigos: cada uno ha contribuido de manera única a esta experiencia. Ellos, han enriquecido mi vida universitaria y me han enseñado el valor del trabajo en equipo, la amistad y el apoyo mutuo en los momentos difíciles.

Finalmente, me gustaría dar mi más sincero agradecimiento a mi familia por darme la gran oportunidad de estudiar en esta universidad. Sin su apoyo constante y su fe en mí, este logro no habría sido posible. Este éxito es tanto suyo como mío, y les estaré eternamente agradecida por todo lo que han hecho por mí.

Concluyo esta etapa de mi vida con un profundo sentido de gratitud y con la convicción de que todo lo aprendido y vivido en estos años será la base sobre la cual construiré mi futuro profesional y personal. Gracias a todos los que han formado parte de esta etapa.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| 1. Introducción | 11 |
| 2. Propiedades..... | 13 |
| 2.1 Propiedades fisicoquímicas..... | 13 |
| 2.2 Toxicidad | 15 |
| 2.1.1 Modos de exposición | 15 |
| 2.1.2 Medidas de prevención y seguridad | 16 |
| 3. Utilización de metanol | 19 |
| 3.1 Industria química..... | 19 |
| 3.1.1 Usos del metanol..... | 19 |
| 3.1.2 Cantidad anual actual y prevista | 21 |
| 3.2 Metanol como combustible | 26 |
| 3.2.1 Ventajas..... | 28 |
| 3.2.2 Desafíos | 29 |
| 3.2.3 Aplicaciones futuras y actuales | 30 |
| 3.3 Metanol en el mercado del hidrógeno..... | 33 |
| 3.3.1 Hidrógeno..... | 33 |
| 3.3.2 Metanol como portador de hidrógeno | 40 |
| 4. Producción de metanol | 51 |
| 4.1 A partir de gas natural..... | 51 |
| 4.1.1 Conversión de gas natural a gas de síntesis | 52 |
| 4.1.2 Conversión de Gas de Síntesis a Metanol | 53 |
| 4.1.3 Purificación del metanol | 54 |
| 4.2 Metanol verde..... | 55 |
| 4.2.1 Biometanol | 56 |
| 4.2.2 E-metanol | 58 |
| 5. Almacenamiento y transporte | 61 |
| 5.1 Almacenamiento | 61 |
| 5.1.1 Tanques de almacenamiento | 61 |
| 5.1.2 Sistemas de seguridad..... | 62 |
| 5.1.3 Electricidad estática | 63 |

| | |
|--|----|
| 5.1.4 Procedimientos operacionales..... | 63 |
| 5.1.5 Ubicación y acceso | 64 |
| 5.1.6 Contenedores portátiles | 65 |
| 5.2 Transporte..... | 65 |
| 5.2.1 Transporte transoceánico | 65 |
| 5.2.2 Transporte con camiones cisterna | 69 |
| 5.2.3 Transporte ferroviario..... | 70 |
| 6. Presupuesto..... | 73 |
| 6.1 Presupuesto de Inmovilizado Material | 73 |
| 6.2 Presupuesto de Material Fungible | 74 |
| 6.3 Presupuesto de Equipamiento | 74 |
| 6.4 Presupuesto de Software | 74 |
| 6.5 Presupuesto de Mano de Obra | 74 |
| 6.6 Presupuesto total | 75 |
| 7. Conclusión | 77 |
| 8. Bibliografía | 79 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Diagrama de fase del metanol [2]. | 14 |
| Figura 2: Ejemplo de anticongelante. [7] | 19 |
| Figura 3: Aspartamo. [9] | 21 |
| Figura 4: Producción química primaria en el Escenario de Desarrollo Sostenible, 2000-2030. [11] | 22 |
| Figura 5: Demanda y producción global de metanol (2001-2019). [12] | 22 |
| Figura 6: Distribución de plantas en el mundo. [13] | 24 |
| Figura 7: Millones de toneladas de metanol verde. [14] | 24 |
| Figura 8: Mercado de metanol [15] | 25 |
| Figura 9: Tasa de crecimiento del metanol. [15] | 25 |
| Figura 10: Funcionamiento de un motor de combustión interna. [32] | 26 |
| Figura 11: Aumento de buques que funcionan de forma dual (metanol-gasolina). [22] | 31 |
| Figura 12: Hoja de ruta del SSI. [29] | 33 |
| Figura 13: Electrólisis (GrInHy2.0). [37] | 36 |
| Figura 14: Planta de producción hidrógeno verde. [39] | 37 |
| Figura 15: Métodos de producción de hidrógeno y sus colores. [38] | 38 |
| Figura 16: Funcionamiento de las pilas de combustible. [42] | 39 |
| Figura 17: Planta de producción de combustibles sintéticos. [45] | 40 |
| Figura 18: Tanques con techo flotante. [49] | 41 |
| Figura 19: Densidades energéticas de los portadores de hidrógeno. [50] | 42 |
| Figura 20: Reformado de metanol con vapor. [52] | 43 |
| Figura 21: Proceso de reformado de vapor. [59] | 52 |
| Figura 22: Proceso de conversión de gas síntesis a metanol. [59] | 53 |
| Figura 23: Planta de e-metanol. [68] | 60 |
| Figura 24: Buque Cisterna. [71] | 67 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Propiedades fisicoquímicas del metanol [1], [2] | 13 |
| Tabla 2: Millones de toneladas de metanol verde previstos según el informe de <i>Methanol Institute</i> | 23 |
| Tabla 3: Propiedades del hidrógeno. [37] | 34 |
| Tabla 4: Propiedades metanol-amoniaco. [56], [57]..... | 47 |
| Tabla 5: Ventajas y desventajas del metanol y amoniaco. [56], [57]..... | 48 |
| Tabla 6: Propiedades del metanol. [59] | 55 |
| Tabla 7: Cantidad de accesos en función de la capacidad de los tanques. [69] | 64 |
| Tabla 8: Presupuesto del Inmovilizado. | 73 |
| Tabla 9: Presupuesto de Material Fungible. | 74 |
| Tabla 10: Presupuesto de Equipamiento. | 74 |
| Tabla 11: Presupuesto de <i>Software</i> | 74 |
| Tabla 12: Presupuesto de mano de obra. | 74 |
| Tabla 13: Presupuesto total. | 75 |

RESUMEN

La creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad urgente de frenarlo es un tema que domina la agenda global en la actualidad. Esta inquietud está respaldada por una abrumadora cantidad de evidencia científica que demuestra los efectos adversos del cambio climático en nuestro planeta y en la vida humana. Por ello, se están investigando distintas soluciones para poder resolver este gran problema. En este contexto, se concretará en la reducción de emisiones de CO₂ y de gases de efecto invernadero mediante el uso de hidrógeno como fuente de energía.

No obstante, el hidrógeno presenta propiedades que complican su transporte y almacenamiento, lo que representa un desafío significativo para su uso generalizado. Debido a estas dificultades, se están investigando y desarrollando diversas soluciones para optimizar su manejo y facilitar su aplicación. Una de ellas y de la que trata este informe, es a través del compuesto químico metanol. En este proyecto, se expondrá cómo se debe de transportar y almacenar hidrógeno en forma de metanol, además de, sus propiedades, los usos del metanol en diversas industrias, como se produce y se hará un breve presupuesto de lo que cuesta hacer este informe.

ABSTRACT

The increasing concern for climate change and the urgent necessity to stop is an issue that rules the global agenda nowadays. This worry is endorsed from numerous scientific evidence that demonstrate the unfavourable effects of climate change on our planet and human life. Therefore, there are investigations of different solutions that could resolve this problem. In this context, it specifies the reduction of CO₂ and of greenhouse gases by the use of hydrogen as a source of energy.

Nevertheless, hydrogen presents properties that make its transportation and storage difficult, so it represents a meaningful challenge for its generalised use. Due to these difficulties, there are different studies and developments to optimise the use and ease its implementation. One of them and it is the one that this report involves, it is through the chemical compound methanol. In this project, it will present how hydrogen can be carried and stored in the form of methanol, besides, its properties, the uses of methanol in different industries, how it is produced and a small budget of how much this report costs.

1. Introducción

Este proyecto analiza con profundidad el estado actual del hidrógeno en forma de metanol cuyo propósito es determinar las ventajas e inconvenientes de esta alternativa y la rentabilidad del metanol como método de transporte y almacenamiento como portador del hidrógeno. Para ello, se explicarán las propiedades químicas y físicas del metanol, se realizará una revisión exhaustiva de la literatura científica y técnica sobre las tecnologías de producción de hidrógeno a partir de metanol, las innovaciones en el almacenamiento y manejo del metanol, y las infraestructuras de transporte necesarias. Asimismo, se hará una comparación sobre si es preferible el metanol como combustible directo o el metanol como portador de hidrógeno.

Mediante este proyecto, se quiere exponer una visión amplia sobre el estado actual del metanol como portador de hidrógeno y las claves fundamentales a tener en cuenta para futuras investigaciones. Debido al calentamiento global, muchas empresas están impulsando el uso del hidrógeno, siendo uno de los motivos el no pagar el impuesto que se está obligando a cobrar si emiten gases de efecto invernadero. Por tanto, el desarrollo, almacenamiento y transporte del hidrógeno (verde) es necesario porque se trata de una fuente de energía universal, limpia y que no deja residuos en el aire, como sucede con el carbón y el petróleo.

Como he mencionado anteriormente, el hidrógeno se está presentando como una alternativa clave para la transformación energética y para conseguir energía limpia en un futuro. No obstante, el transporte y almacenamiento de éste es complicado al tener una densidad muy baja y ocupa un gran volumen en condiciones ambientales, lo que hace que requiera métodos de compresión y licuefacción muy costosos, esto es, que involucren altas presiones y temperaturas muy bajas. Asimismo, su pequeño tamaño molecular permite que el hidrógeno penetre en la mayoría de los metales y polímeros, creando un riesgo de fuga y fragilización del material. Es por ello, que se presentan otras alternativas llamadas *hydrogen carriers* que son compuestos químicos que transportan átomos de hidrógeno. En este proyecto, tal como he señalado previamente, se enfocará en el metanol.

Este compuesto químico, con la fórmula CH_3OH , se caracteriza por ser un líquido a temperatura ambiente, lo que facilita su almacenamiento y manejo en comparación con el hidrógeno en estado gaseoso. Igualmente, el metanol se declara un buen portador del hidrógeno ya que contiene una alta densidad de hidrógeno en su estructura molecular. Además, es un líquido a temperatura ambiente, por lo que su transporte es mucho más sencillo y seguro.

Una de las ventajas clave, que más adelante se desarrollará con profundidad, es la producción del hidrógeno a partir de diversas materias primas, incluyendo fuentes renovables, además de que puede ser fácilmente transportado reutilizando la estructura existente para combustibles líquidos. Por otro lado, y punto clave para el éxito del metanol como portador, es la fácil liberación del hidrógeno por medio de métodos preestablecidos, convirtiendo al metanol un medio eficiente y ventajoso respecto a otros portadores para el transporte y almacenamiento del hidrógeno.

2. Propiedades

2.1 Propiedades fisicoquímicas

En el siguiente apartado se va a explicar las distintas características fisicoquímicas que componen al metanol. Para poder desarrollar este proyecto, es indispensable realizar un estudio que analice las características fisicoquímicas de este componente.

El metanol a temperatura ambiente es un líquido incoloro, transparente y volátil por lo que es sencillo su transporte y almacenamiento. Por otro lado, es una sustancia estable si no está en contacto con otros agentes, pudiendo reaccionar cuando se exponen a fuentes de calor, ignición o chispas. En particular, los materiales a evitar el contacto con, son: oxidantes, metales alcalinos, cauchos, y materias plásticas, plomo, aluminio a altas temperaturas, anhídrido crómico, yodo, perclorato de plomo, ácido perclórico, hidróxido sódico y potásico y trióxido de fósforo.

| Propiedad | Valor |
|-----------------------------|--------------------------------|
| Punto de ebullición | 64.7°C a 760 mm Hg |
| Densidad relativa | 791.8 kg/m ³ a 20°C |
| Masa molar | 32,04 g/mol |
| Punto de fusión | -97°C |
| Presión crítica | 81±1 atm |
| Inflamabilidad | 11°C |
| Viscosidad | 0,56 e-3 a 15 °C |
| Temperatura de autoignición | 440°C |
| Presión de saturación | 127 mm Hg |
| Punto triple | 1.84 e-6 atm |

Tabla 1: Propiedades fisicoquímicas del metanol [1], [2]

Por otra parte, la solubilidad en agua es totalmente miscible, por tanto, se emplea para producir químicos, para eliminar agua en combustibles, como disolvente para pinturas y plásticos y un componente más para una amplia gama de productos.

En la siguiente imagen se muestra el diagrama de fase del metanol. Este diagrama (P - T) presenta los distintos estados de la materia en función de la presión y la temperatura, es decir, de las condiciones termodinámicas en equilibrio.

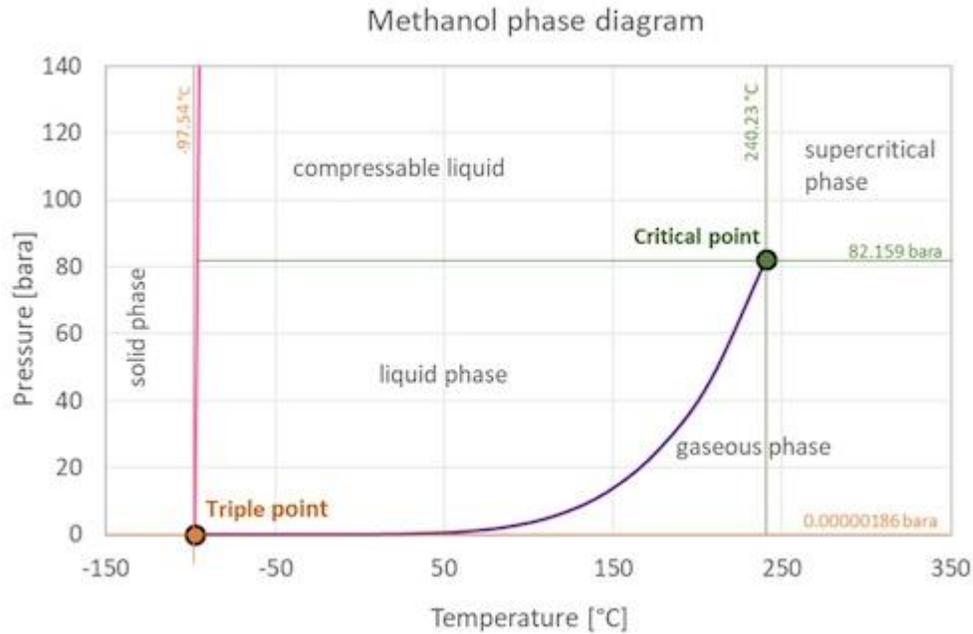


Figura 1: Diagrama de fase del metanol [2].

Como se ha mencionado previamente, el metanol es un líquido a temperatura ambiente. Sin embargo, a temperaturas extremas, se transforma en sólido o gas. La *Figura 1* ilustra cómo varía el estado del metanol en función de la temperatura y la presión. En el punto crítico, no se produce un cambio de estado cuando aumenta la temperatura y la presión (véanse los valores en la *Tabla 1* y la *Figura 1*, siendo el punto crítico 81 ± 1 atm). Del mismo modo, el punto triple representa la condición en la que las tres fases (sólido, líquido y gas) coexisten en equilibrio. Este punto es relativamente bajo, lo cual constituye una ventaja significativa para el transporte y almacenamiento del metanol, ya que permite un amplio rango de estado líquido (puede permanecer en estado líquido a temperaturas y presiones extremas). [2]

En la *Figura 1*, se observa que la curva entre el punto crítico y el punto triple representa la temperatura de ebullición del metanol. De igual manera, esta curva indica la temperatura de saturación conforme cambia la presión.

2.2 Toxicidad

Otro punto relevante e inconveniente a la hora de definir las propiedades del metanol es su toxicidad. En el siguiente apartado se explicará el modo de exposición y las medidas y prevenciones a tomar si en algún momento se está en contacto o se manipula con metanol. Además de los efectos que produce por la exposición a dicho componente.

El metanol es una sustancia tóxica. Esto implica que, independientemente de las vías de entrada al organismo humano (algunas de las cuales son más graves que otras), es recomendable administrar un tratamiento inmediato para evitar efectos irreversibles.

2.1.1 Modos de exposición

Hay distintas causas por las que uno puede intoxicarse con el metanol. Si en algún momento se está en contacto o manipulando con el metanol, hay que tener en cuenta los distintos modos de exposición a los que uno puede estar sometido.

Ingestión

Es la forma más peligrosa de exposición del metanol puesto que esta puede ser mortal, añadiendo que, el metanol tiene efectos acumulativos y éste puede permanecer en el organismo. Uno de los síntomas clave de la ingesta del metanol es tos, dolor de cabeza, vómitos, ... Se requiere atención médica inmediata. El tratamiento por intoxicación está preestablecido: se administra álcali, etanol y hemodiálisis. [3]

Inhalación

Este modo de exposición no es tan peligroso como el anterior pero sí puede provocar consecuencias muy graves, siendo algunas como la irritación en el tracto respiratorio, es decir, dificultad para respirar, tos, efectos neurológicos como confusión, visión borrosa, y daño permanente al sistema nervioso. [3]

Contacto

Existen dos tipos por los que puedes estar expuesto: la piel y por los ojos. Ambos no producen daños muy severos (no tanto como por inhalación e ingestión). No obstante, puede producir dermatitis por ejemplo (en el caso de contacto a través de la piel) y lagrimeo y daño en la córnea (en el otro caso). [3]

2.1.2 Medidas de prevención y seguridad

Como se ha mencionado al inicio del apartado, el metanol es una sustancia tóxica de la que se puede estar expuesto fácilmente, por ello, es necesario desarrollar un control de la exposición y medidas de prevención y seguridad, así evitando que el contacto con el metanol acarree graves consecuencias. Para ello, hay unas medidas vigentes, las cuales hay que obedecer para un correcto uso del metanol.

Control de exposición

Para el uso correcto del metanol, es necesario que en ningún momento esté abierto a la atmósfera y se debe mantener en sistemas cerrados. Por otro lado, la sala tiene que estar bien ventilada y tener en cuenta la posibilidad de fuga. Para ello, hay que tener una supervisión detallada de la exposición debido a que no es sencillo detectar el escape de él. En otras palabras, los efectos tóxicos no se manifiestan hasta alcanzar una concentración de al menos 2000 ppm¹, lo cual es diez veces superior al límite seguro de exposición para los seres humanos, que es de 200 ppm². [4]

Precauciones de seguridad

Antes de nada, es importante establecer un equipo de protección a la hora de manejar en metanol. En concreto, máscaras para la protección de tracto respiratorio siempre y cuando ya se haya medido la concentración de metanol, puesto que cuando el nivel de aglutinación es menor a 200 ppm, no se requiere protección. Asimismo, hay que portar una ropa u otros materiales de protección en específico para proteger la piel y los ojos, siendo estos más sensibles.

Hay dos tipos de operaciones dependiendo de la situación. Cuando estás manipulando metanol hay unas operaciones rutinarias que hay que tomar en cuenta siempre y las operaciones de emergencia, que se activan en casos específicos de peligro o accidente.

- Operaciones rutinarias

Para empezar, debido a que el vapor de metanol es altamente inflamable, la electricidad estática puede encenderlo. Por lo tanto, siempre se debe realizar una conexión a tierra cuando haya energía disponible. Para ello, se usan sistemas de llenado de tubos profundos y pinzas de sujeción para evitar ignición provocada por electricidad estática. [4]

¹ Unidad de medida con la que se mide la concentración, siendo parte por millón.

² Es un valor impuesto por la *American Conference of Governmental Industrial Hygienists*.

Por otro lado, el metanol debe ser almacenado en contenedores aprobados y etiquetados claramente. Como he mencionado previamente, estos contenedores deben estar en áreas bien ventiladas y alejadas de fuentes de ignición, como chispas, llamas abiertas o equipos eléctricos que no estén a prueba de explosiones. Los recipientes deben estar sellados adecuadamente para evitar fugas y la liberación de vapores. [4]

Finalmente, el personal que maneje el metanol debe de estar equipado con material y ropa adecuada para proteger la piel y los ojos. Asimismo, estos mismos empleados deben seguir unos procedimientos de manipulación, así como, que al llenar o transferir el metanol deben emplearse métodos que minimicen la formación de vapores y la generación de electricidad estática. Para ello, las áreas de trabajo deben de estar equipadas con detectores de metanol. [4]

- Operaciones de emergencia

Principalmente, es fundamental considerar los espacios confinados, es decir, aquellos espacios estrechos y de acceso limitado. Estos lugares no suelen ser transitados frecuente y generalmente no contienen tóxicos en su atmósfera. No obstante, debido a esta suposición, a menudo no se realizan análisis del estado antes de entrar a dichos espacios, lo que ha resultado en casos con consecuencias fatales. Para prevenir estas situaciones, es necesario implementar un sistema de ventilación adecuado. [4]

Otra situación para considerar es cuando se realizan trabajos en caliente, como soldadura, corte y rectificado, ... El metanol tiende a inflamarse durante estas actividades. Para prevenir la inflamación, es necesario obtener autorización previa para realizar el trabajo, seguir prácticas seguras de soldadura y establecer medidas de prevención contra incendios. [4]

Además de las previas situaciones, es necesario tener una respuesta rápida como por ejemplo cuando hay un derrame o un incendio. Para ello, se requiere el uso del material adecuado para no poner en peligro a ningún personal que esté en contacto o en la sala. [4]

3. Utilización de metanol

En la actualidad, el uso del metanol se ha impulsado e implementado en diversos sectores industriales. Como se ha mencionado previamente, el metanol posee múltiples aplicaciones, siendo una de ellas en la industria química, donde se utiliza, así como, disolvente industrial para facilitar la producción de tintas, resinas, adhesivos y colorantes. Igualmente, el metanol se emplea como combustible marino y en el mercado del hidrógeno. En el siguiente capítulo, se examinarán en detalle los diferentes métodos de utilización del metanol, así como las investigaciones y estudios actuales relacionados con esta sustancia.

3.1 Industria química

Como he señalado anteriormente, el metanol se emplea para múltiples aplicaciones en el sector de la industria química. La composición química del metanol, siendo esta soluble en agua, favorece a la hora de producir productos químicos. Asimismo, ayuda a reducir el punto de congelación de una sustancia y aumentar su punto de ebullición.

3.1.1 Usos del metanol

- Anticongelante

Es un fluido que circula por el sistema de refrigeración de un motor, reduciendo así su punto de solidificación. Se encarga de aumentar el punto de ebullición y bajar la temperatura para que no se congele el combustible protegiendo las amenazas de la oxidación y corrosión. Asimismo, prevé la formación de espuma y el fluido posee una viscosidad muy baja para que esta ayude a circular por el sistema. [6]



Figura 2: Ejemplo de anticongelante. [7]

TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO EN FORMA DE METANOL

El anticongelante está compuesto por agua destilada y alcohol metílico (metanol) o etilenglicol o dietilenglicol, siendo uno de estos el aditivo al agua destilada. Como he mencionado previamente, el metanol posee un punto de ebullición muy alto por tanto es un buen aditivo para este tipo de sustancias además de que tiene un punto de solidificación muy bajo.

En concreto, se emplea en el limpiaparabrisas para prevenir la congelación de líquidos de limpieza. Adicionalmente, se inyecta en las tuberías de gas natural con el propósito de reducir el punto de congelación del agua durante el transporte de gas y petróleo.

- Disolvente:

En el *Capítulo 2*, se ha explicado que el metanol es miscible con agua, es decir, que es soluble en agua. Por ello, es muy útil en disolventes. Se emplea como materia prima en el formaldehído siendo este un gas que se inflama a temperatura ambiente. Este gas se usa principalmente para destruir gérmenes y conservar muestras de laboratorio y tejidos. Por otro lado, se utiliza durante la fabricación de materiales de construcción (como la madera), pegamentos, telas, pinturas, abonos, plaguicidas y otras materias. [5]

Por otra parte, también se emplea como disolvente de sustancias farmacológicas como medicamentos para el colesterol, estreptomina³, vitaminas y hormonas.

- Combustible

El metanol es mundialmente conocido por su uso como combustible. El combustible pertenece a la industria química. No obstante, al ser de gran extensión le voy a dedicar un apartado más adelante.

- Alimentación

El metanol se encuentra en distintos alimentos, aunque no se puedan ver a primera vista. Siendo las fuentes principales frutas, verduras y bebidas de dieta que contienen aspartamo. Este último, es un tipo de edulcorante artificial no calórico que dulcifica y ayuda con el metabolismo de los alimentos y contribuye a regular la actividad genética humana. Sin embargo, es posiblemente carcinógeno para los seres humanos⁴. [5]

³ El primer fármaco usado en el tratamiento contra la tuberculosis.

⁴ Según el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (CIIC) y el Comité Mixto FAO/OMS de Expertos en Aditivos Alimentarios (JECFA) de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

Según JECFA, la ingesta diaria límite del aspartamo no debe superar los 0 a 40 mg/kg de peso corporal. Sin embargo, postulan que no es del todo cierto la carcinogenicidad del aspartamo, no obstante, eso no significa que no hay que consumirlo sin límites. [8]



Figura 3: Aspartamo. [9]

3.1.2 Cantidad anual actual y prevista

Como he mencionado anteriormente, el metanol es generalmente empleado en la Industria química. Según un informe desarrollado por IRENA⁵ en colaboración con *Methanol Institute*⁶, la producción de metanol a partir de fuentes fósiles alcanza aproximadamente 98M de toneladas anuales. Durante el ciclo de vida del metanol (producción y uso) emite hasta 0.3 gigatoneladas de CO₂ (alrededor del 10% del total provienen del sector químico). [10]

⁵ Es la Agencia Internacional de las Energías Renovables.

⁶ Es una asociación de comercio global para la industria de metanol representando a las empresas líderes de producción, distribución y tecnologías de metanol.

TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO EN FORMA DE METANOL

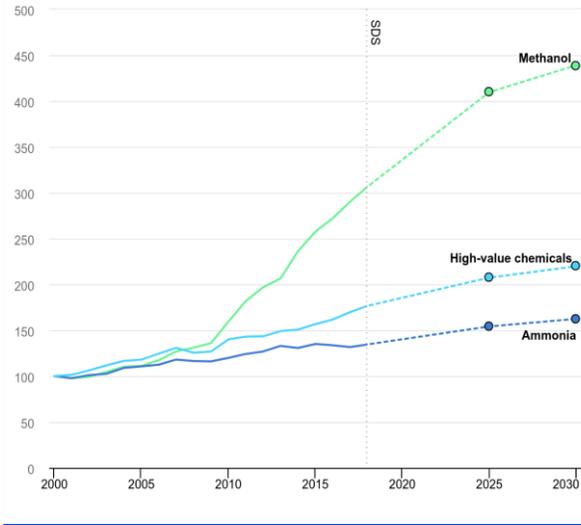


Figura 4: Producción química primaria en el Escenario de Desarrollo Sostenible, 2000-2030. [11]

El uso y la producción del metanol está aumentando a lo largo de los años, siendo su mayor crecimiento en China. El costo de producir metanol a partir de combustibles fósiles está entre 100 y 250 dólares por tonelada. El informe sostiene que la producción puede llegar hasta 500M toneladas en 2050, aumentando así, las emisiones de CO₂ si sólo se emplease metanol proveniente de combustibles fósiles. Por tanto, se está intentando incentivar la producción de metanol a partir de fuentes renovables (biometanol o metanol verde), siendo su producción anual, menor que 0.2M de toneladas. [10]

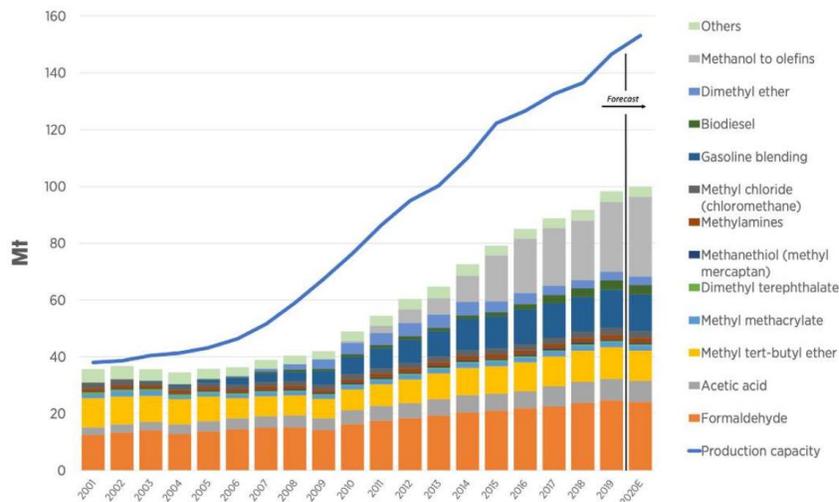


Figura 5: Demanda y producción global de metanol (2001-2019). [12]

El metanol verde cada vez va teniendo más presencia en el mercado y se prevén altas subidas de su producción y demanda. *Methanol Institute* con la ayuda de *Finland's GENA Solutions Oy*⁷ han desarrollado un *database* que evalúa las cantidades anuales de metanol verde. Este informe, sigue 152 proyectos de metanol verde que hay globalmente analizando la capacidad por m³ y millones de toneladas. Para 2027, la capacidad total de metanol reciclado se resumía en 19.2M m³ de toneladas y 24.2M de toneladas para 2029. [13]

| E-metanol | Biometanol | Año |
|-----------|------------|------|
| 11.6 | 7.7 | 2027 |
| 15 | 9.2 | 2029 |

Tabla 2: Millones de toneladas de metanol verde previstos según el informe de Methanol Institute.

La *Figura 6* muestra un mapa mundial que señala la ubicación de plantas de producción de e-metanol, biometanol y metanol de bajo carbono, representadas por círculos de diferentes colores. Los colores de los círculos indican el tipo de producto, siendo azul, las plantas de biometanol y naranja las plantas de e-metanol.

Cada círculo representa una planta, y su tamaño puede estar relacionado con la capacidad de producción o la relevancia de la planta. En el mapa se observan concentraciones notables de estas plantas en varias regiones del mundo.

El recuadro a la izquierda del mapa proporciona filtros para ver la información de las plantas, incluyendo nombre, empresa, país, ciudad, materia prima, producto, estado y año de inicio, con un rango de años desde 2010 hasta 2029.

⁷ Desarrollan *softwares* para guiar a una empresa hacia el futuro *Net-Zero*.

TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO EN FORMA DE METANOL

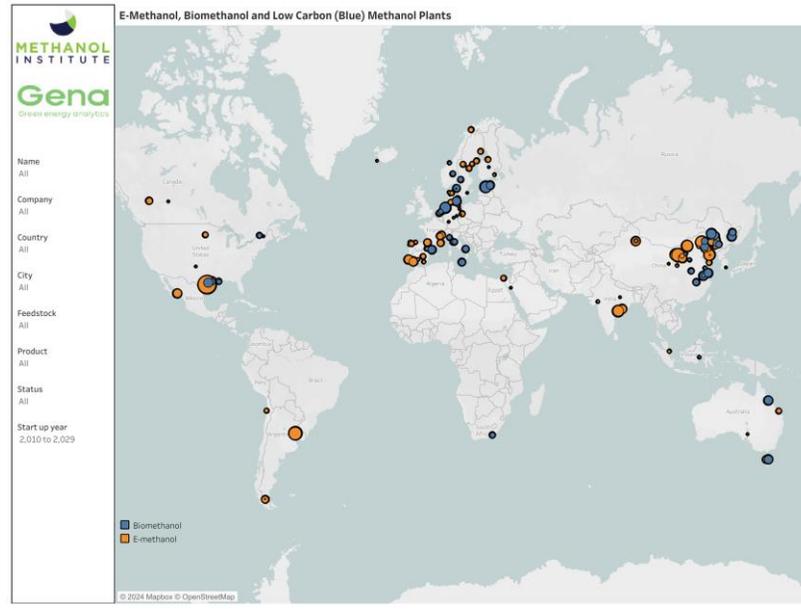


Figura 6: Distribución de plantas en el mundo. [13]

Por otra parte, la siguiente imagen representa la cantidad (en toneladas) de metanol renovable actual y previsto en 9 años. Como bien se puede observar, el metanol tendrá una subida significativa a lo largo de los años, debido a que las empresas querrán impulsarlo más.

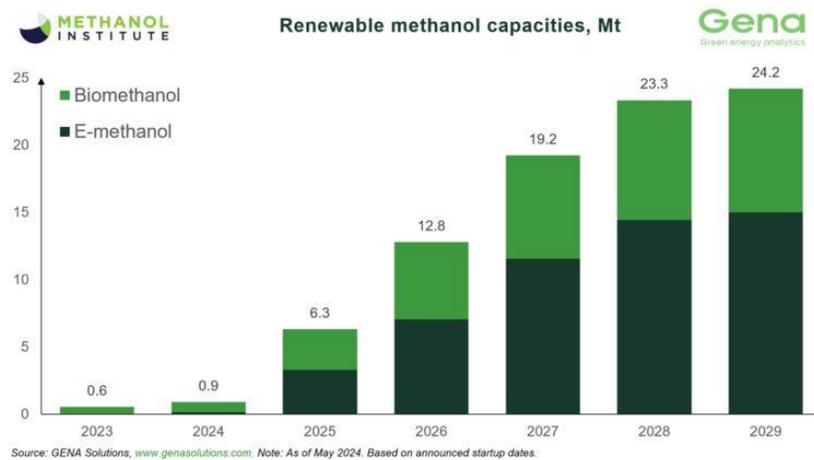


Figura 7: Millones de toneladas de metanol verde. [14]

MordorIntelligence, una empresa que se dedica a hacer estudios de los mercados actuales, ha desarrollado un informe que analiza el tamaño del mercado de metanol y análisis de participación tendencias de crecimiento y pronósticos (2024-2029). Hace una breve comparación entre el tamaño del mercado en 2024 y 2029 y de ello saca el CAGR⁸. [15]



Figura 8: Mercado de metanol [15]

A finales de 2024, se espera que el mercado del metanol alcance aproximadamente 92.700 kilotoneladas, lo que representa un aumento significativo y un paso crucial hacia la transición energética. Este reto, se veía insuperable debido a la reducción de la producción que hubo en los años 2020-2021 por el COVID-19. Asia-Pacífico es la zona que mayor demanda y producción hay de metanol mundialmente, siendo China el mayor productor del mercado con más de un 60% de metanol del mundo. [15]



Figura 9: Tasa de crecimiento del metanol. [15]

⁸ Es la tasa de crecimiento anual compuesta que muestra el incremento anual de una variable durante un período de tiempo superior a un año.

3.2 Metanol como combustible

Actualmente, se está empleando el uso de metanol como combustible directo o como portador de hidrógeno (en el siguiente apartado se desarrollará más este tema) por diversas razones y ventajas. A continuación, se explicará las diferentes ventajas y desventajas, los desafíos a afrontar, proyectos reales y actuales en los que se está implementando el metanol como combustible (marino).

Para comenzar, el metanol como combustible se puede implementar tanto para motores de motores de combustión interna, pilas de combustible y como mezcla con gasolina. Principalmente, la mayoría de las empresas que están utilizando el metanol como combustible, son empresas marinas, especialmente aquellas que usan buques. Por lo tanto, el apartado se enfocará fundamentalmente en este tipo de motores. [16]

¿Cómo se emplea el metanol como combustible?

El uso del metanol es generalmente para alimentar motores de combustión interna, siendo estas las máquinas en las que se quema combustible para producir trabajo, teniendo la combustión dentro de la propia máquina que genera el trabajo. Por ejemplo, el motor de un automóvil es un motor de combustión interna porque el combustible se quema dentro de los cilindros. Este proceso químico de combustión genera el movimiento y el trabajo del motor. [32]

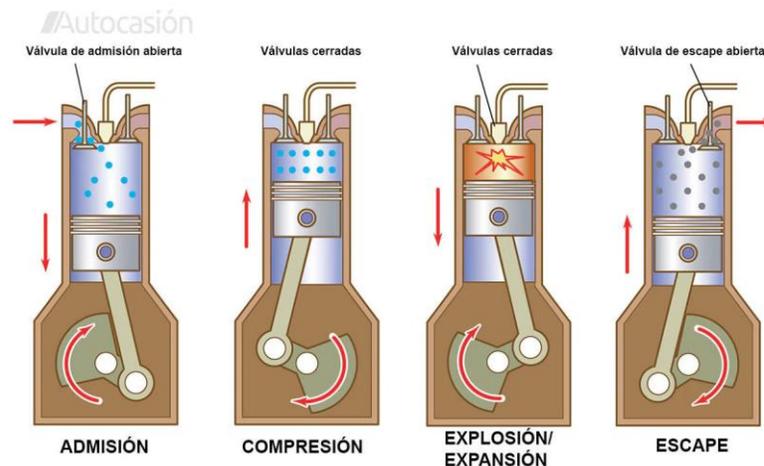
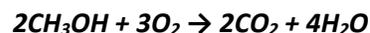


Figura 10: Funcionamiento de un motor de combustión interna. [32]

El metanol reacciona con oxígeno para producir dióxido de carbono y agua:



La principal ventaja de la economía del metanol radica en su capacidad para ser adaptado a los motores de combustión interna de gasolina con modificaciones mínimas en los motores y la infraestructura existente.

Las **pilas de combustible** de metanol destacan por su capacidad para operar a baja temperatura y presión atmosférica. Por otro lado, el metanol se mezcla con agua y se inyecta en motores diésel y de gasolina de alto rendimiento para aumentar la potencia y reducir la temperatura del aire de admisión, en un proceso conocido como inyección de metanol en agua.

¿Porque se usa principalmente como combustible marítimo?

- Regulaciones ambientales estrictas: hay una serie de convenios, regulaciones ambientales e informes que se están imponiendo para promover el uso del metanol, y así, reducir la huella de carbono:
 1. Convenio MARPOL: El Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques (MARPOL) establece medidas para reducir la contaminación marina y proteger el medio ambiente marítimo. [31]
 2. REGLAMENTO (UE) 2023/1805 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 13 de septiembre de 2023: Este reglamento, adoptado el 13 de septiembre de 2023, se enfoca en la reducción de la huella de carbono en diversos sectores industriales. Su objetivo es establecer límites más estrictos para las emisiones, fomentar prácticas sostenibles y apoyar la transición hacia una economía con bajas emisiones de carbono. [30]
 3. El informe publicado por la Agencia Europea de Medio Ambiente y la Agencia Europea de Seguridad Marítima proporciona un análisis exhaustivo del estado del sector marítimo. Revela que los buques son responsables del 13,5 % de las emisiones de gases de efecto invernadero del sector transporte en la UE, siendo superados solo por el transporte terrestre (71 %) y aéreo (14,4 %). En 2019, las emisiones de dióxido de azufre (SO₂) de los buques que operan en puertos europeos alcanzaron aproximadamente 1,63 millones de toneladas. Se espera que esta cifra disminuya en las próximas décadas gracias a la implementación de normas y requisitos medioambientales más rigurosos. [18], [40]
- Facilidad de adaptación de motores: Esto no implica la necesidad de cambiar por completo el motor, sino de realizar adaptaciones que son más viables en el contexto de la industria marítima.
- Reducción de emisiones de carbono: El uso de biometanol o e-metanol puede hacer que el combustible sea prácticamente neutro en carbono, lo que es una ventaja significativa para cumplir con los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.
- Infraestructura portuaria: los puertos pueden adaptar sus instalaciones para manejar el metanol.

3.2.1 Ventajas

El empleo de metanol crea muchas ventajas cuando se usa como combustible marítimo. Se ha mencionado anteriormente que se puede usar como combustible alternativo en motores de combustión interna, pilas de combustible y como mezcla con gasolina, siendo este último más ventajoso ya debido a que el metanol tiene un alto octanaje⁹, esto significa que puede mejorar la gasolina. En este subapartado, se van a explicar las distintas ventajas que tiene el metanol como combustible.

Para poder desarrollar las ventajas, es fundamental explicar el origen y los distintos tipos de metanol (estos se dividen dependiendo del tipo de materia prima que se ha empleado para producir el metanol, pudiendo ser a partir de combustibles fósiles o energías renovables).

- Metanol gris: proviene de combustibles fósiles.
- Metanol azul: es una mezcla entre combustibles fósiles y energías renovables.
- Metanol verde: solamente se produce a partir de energías renovables.

Ventajas del metanol verde:

Este tipo de metanol es considerado menos avanzado tecnológicamente, pero es el que más se está promoviendo debido a sus propiedades fisicoquímicas, su eficiencia como materia prima y su potencial para ser producido de manera sostenible. Estas características hacen que el metanol sea una opción atractiva para su uso en diversos sectores industriales y energéticos, apoyando la transición hacia una economía más verde y sostenible. A continuación, se explicarán algunas ventajas de esta sustancia.

1. Baja en emisiones de gases (NO_x y SO_x): el metanol produce significativamente menos óxidos de nitrógeno (NO_x) y prácticamente no emite óxidos de azufre (SO_x) en comparación con los combustibles marinos tradicionales. Esto es especialmente importante para cumplir con las regulaciones ambientales internacionales establecidas por la Organización Marítima Internacional (OMI), que imponen límites estrictos a las emisiones de NO_x y SO_x. No obstante, este tipo de metanol cumple las regulaciones impuestas puesto que está producido a partir de energías renovables.
2. Uso de materia prima sostenible: la materia prima principal es el dióxido de carbono capturado reciclado o de procesos industriales. Esto ayuda a reducir la huella de carbono sostenible debido a que no emplea recursos finitos dependientes de combustibles fósiles.
3. Cumplimiento de las normas ambientales: Como se mencionó anteriormente, el uso de este tipo de combustible contribuye al cumplimiento de las regulaciones impuestas por la Organización Marítima Internacional (OMI), ya que ayuda a reducir la huella de carbono. Además, muchos gobiernos y organizaciones brindan apoyo a aquellas empresas que generan energías limpias y libres de contaminantes, incentivando el desarrollo y adopción de tecnologías más sostenibles.

⁹ Es la relación de compresión es el indicador de qué tanto puede presionar el combustible antes de que haga explosión.

Ventajas del metanol gris y azul:

Ambos tipos de metanol son menos contaminantes que los combustibles fósiles y reducen la huella de carbono. Sin embargo, alcanzar la meta de *Net-Zero* no es sencillo teniendo como objetivo recortar las emisiones de gases de efecto invernadero hasta dejarlas lo más cerca posible a las emisiones nulas, es prácticamente imposible empleando estos tipos de metanol ya que siempre van a emitir, aunque sean mínimas, óxidos de nitrógeno y de azufre.

Sin embargo, puesto que este tipo de sustancias llevan tiempo produciéndose y siendo empleadas, las estructuras de producción y disponibilidad, están totalmente desarrolladas para su uso diario. Dado a su amplia producción industrial el metanol gris, tiene una cadena de suministro estable y costos relativamente bajos. Asimismo, la infraestructura para la producción y distribución de metanol gris está bien desarrollada, facilitando la adopción por la industria marítima sin necesidad de grandes inversiones en nuevas infraestructuras.

Por otro lado, la producción de metanol azul, que combina fuentes renovables con combustibles fósiles, recibe más apoyo gubernamental y subvenciones que el metanol gris debido a su mayor cumplimiento de normativas ambientales. Sin embargo, al ser un proceso relativamente nuevo, la cadena de suministro no está completamente establecida, lo que requiere una inversión considerable para impulsar su producción. Aunque este procedimiento es más costoso, los beneficios ambientales que ofrece pueden justificar la inversión necesaria, contribuyendo de manera significativa a la sostenibilidad a largo plazo.

3.2.2 Desafíos

Para poder llevar a cabo este tipo de proyectos empleando el metanol verde como combustible, hay distintos desafíos que deben abordarse para asegurar su viabilidad a largo plazo en la industria naval. Seguidamente, se expondrán algunos de ellos.

Baja densidad energética y mayor volumen de almacenamiento

Para poder hablar de la baja densidad energética, es necesario explicar el significado de ella. La densidad de energía representa la cantidad de energía acumulada en una materia dada por unidad de volumen. En el caso del metanol, la densidad energética tiene un valor de 16 MJ/L bastante más baja que la del diésel y la gasolina. Esto supone, que la capacidad de almacenamiento es mucho menor y que se requieren mayores volúmenes de almacenamiento de metanol para obtener la misma autonomía en los buques, es decir, repostar con más frecuencia. Esta limitación implica la necesidad de modificar los diseños de las embarcaciones para acomodar tanques de combustible más grandes, lo cual puede afectar el diseño y la eficiencia operativa de las embarcaciones. [1]

Costo inicial de conversión e inversiones iniciales

La producción de metanol verde presenta un coste muy alto. Su principal obstáculo como combustible marítimo son los elevados gastos de producción. Según un informe reciente de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), estos costos oscilan entre 800 y 1.600 dólares por tonelada. Según las estimaciones de la propia IRENA, el costo del metanol verde se prevé que esté entre 250 y 630 dólares para el año 2050. A pesar de esto, sigue siendo un precio considerablemente elevado comparado con el metanol derivado de combustibles fósiles, que no supera los 250 dólares. Sin embargo, la Unión Europea para impulsar el metanol verde, ha desarrollado el proyecto 'Laurelin' financiado por Horizonte 2020¹⁰. Este proyecto tiene como objetivo acelerar la producción de metanol renovable para el transporte, para ello, se implementarán unas medidas de producción a partir de la conversión CO₂ renovable. Aunque todavía es un proyecto muy pequeño, su futuro es prometedor. [17]

Por otro lado, aunque las adaptaciones de los motores para usar metanol suelen ser menos costosas que la construcción de nuevos motores desde cero, aún representan una inversión inicial significativa para las navieras. Las navieras deben evaluar cuidadosamente estos costos iniciales al considerar la transición al metanol como combustible.

Disponibilidad y producción de metanol renovable

Como he mencionado previamente, al ser el metanol verde prácticamente nuevo en el mercado de combustible, no hay infraestructuras suficientes para la producción del metanol. Por tanto, aún necesita ser escalada para satisfacer una demanda creciente en la industria marítima. Esto requiere inversiones significativas en infraestructura de producción y desarrollo de tecnologías más eficientes para garantizar un suministro sostenible y confiable de metanol renovable.

3.2.3 Aplicaciones futuras y actuales

Tanto en proyectos piloto como en desarrollos a mayor escala, el metanol se posiciona como una alternativa viable para enfrentar los desafíos ambientales y operativos de la navegación marítima. En este contexto, es fundamental explorar las aplicaciones actuales y el potencial futuro del metanol en esta industria.

La gran naviera danesa Maersk ha empezado a emplear el primer buque portacontenedor que está propulsado por metanol verde. Asimismo, quiere convertir a España en uno de los pilares de su plan de "descarbonización", que se apoyará en los gases renovables. Cepsa y C2X, filial de Maersk, convertirán al Puerto de Huelva en el principal centro de metanol verde de Europa. De hecho, se ha invertido hasta 1000 millones de euros y la creación de 2500 empleos directos e indirectos. Principalmente, la inversión

¹⁰ Programa de investigación de la Unión Europea con un presupuesto muy alto (80000M €) entre 2014- 2020.

la gestionará la compañía danesa y socios potenciales, sin embargo, aseguran que lo más probable es que el Gobierno termine entrando como inversor. [19], [20], [21]

Se han llevado a cabo otros proyectos importantes en el desarrollo del metanol como tecnología de combustible marino desde 2013, respaldados por Methanex¹¹ y su subsidiaria Waterfront Shipping¹² (WFS). Desde 2016, se ha demostrado la viabilidad y seguridad del metanol como combustible marino. Su primer proyecto fue el uso de barcos de doble combustible con metanol desde 2016, acumulando más de 200.000 horas de funcionamiento con metanol. Más tarde, apoyando el objetivo de emisiones netas cero, el buque de doble combustible “Cajun Sun”, operado por WFS y alquilado a MOL¹³, completó el primer viaje de emisiones netas cero alimentado con biometanol. Asimismo, en 2023, Methanex, Stena Line¹⁴ y el puerto de Gotemburgo, colaboraron para completar con éxito la primera operación de abastecimiento de combustible de barco a barco sin la utilización de un buque cisterna. Esta operación abasteció de combustible al primer ferry de metanol del mundo, el Stena Germanica. [22]

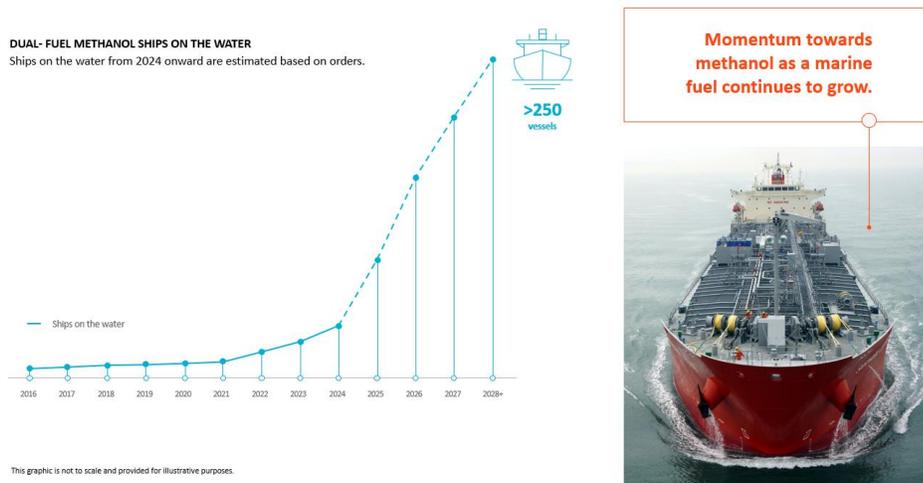


Figura 11: Aumento de buques que funcionan de forma dual (metanol-gasolina). [22]

¹¹ Es uno de los mayores productores y proveedores de metanol del mundo.

¹² Es una empresa marina global que está especializada en el transporte de metanol y petróleo limpio a mayores mercados internacionales.

¹³ Es una empresa internacional de petróleo y gas.

¹⁴ Es una empresa internacional de servicios de transporte y viajes.

Iniciativas de sostenibilidad y coaliciones industriales

Por otro lado, para impulsar el uso del metanol como combustible, han surgido diversas iniciativas de sostenibilidad y coaliciones industriales. Estas iniciativas buscan promover el metanol como una opción viable y eficiente para el sector marítimo, facilitando su adopción y contribuyendo a la reducción de emisiones en esta industria. El respaldo de estos esfuerzos es fundamental para establecer el metanol como un combustible marítimo estándar, ayudando a cumplir con las normativas ambientales y avanzando hacia una economía más sostenible.

- Coalición *Getting to Zero*: La Coalición *Net to Zero* es una alianza significativa compuesta por más de 200 organizaciones, incluidas más de 180 empresas privadas de los sectores marítimo, energético, de infraestructura y financiero. Esta coalición se ha comprometido a tener operativos, para el año 2030, buques comercialmente viables que no generen emisiones y que funcionen con combustibles de cero emisiones. Esta iniciativa es crucial para promover la sostenibilidad en la industria marítima y alcanzar los objetivos ambientales globales. [23]
- *European Innovation Council (EIC)*: El EIC está financiando proyectos de investigación y desarrollo para mejorar la tecnología de combustibles alternativos, incluido el metanol. [24]
- *Methanol Institute*: Como asociación comercial global, el *Methanol Institute* promueve el uso del metanol en diversas industrias, incluido el sector marítimo. [25]
- La Alianza Mundial de la Industria para Apoyar el Transporte Marítimo con Bajas Emisiones de Carbono (*Low Carbon GIA*): Es una colaboración público-privada establecida dentro del programa *GreenVoyage2050* de la Organización Marítima Internacional (OMI). Su propósito es reunir a los líderes de la industria marítima para promover un transporte marítimo más eficiente y con menores emisiones de carbono. Esta iniciativa busca fomentar prácticas y tecnologías que disminuyan la huella de carbono en el sector, mejorando la eficiencia energética y contribuyendo a la sostenibilidad ambiental a nivel global. [26]
- *Global Maritime Forum*: Esta organización sin ánimo de lucro coopera en conjunto con líderes de la industria, reguladores y otras partes interesadas para fomentar la sostenibilidad en el transporte marítimo. Promueven el metanol y otros combustibles alternativos a través de investigaciones, publicaciones y eventos. [27]
- *Sustainable Shipping Initiative (SSI)*: La SSI es una coalición de empresas marítimas que trabajan juntas para crear un futuro sostenible para el transporte marítimo (esta iniciativa es parecida a la *Global Maritime Forum*). Sus iniciativas incluyen la promoción de combustibles limpios como el metanol y el desarrollo de prácticas sostenibles. [28]



Figura 12: Hoja de ruta del SSI. [29]

3.3 Metanol en el mercado del hidrógeno

En el siguiente apartado se va a exponer la importancia del hidrógeno en forma de metanol, cómo influye en el mercado y porque se está impulsando esta alternativa para combatir el cambio climático. Para ello, es necesario comprender las propiedades generales del hidrógeno, su producción, almacenamiento, aplicaciones del hidrógeno, así como sus oportunidades y desafíos.

3.3.1 Hidrógeno

La generación de energía ha sido importante para la humanidad desde hace siglos y para lograr una transición energética eficaz se han ido analizando distintas opciones para conseguir este objetivo. Una de esas alternativas es el hidrógeno que se ha convertido en un vector energético clave debido a su alta densidad energética y capacidad para generar energía sin emisiones de carbono. Las causas que ayudan a buscar fuentes alternas sostenibles son: 1) la disminución de los suministros de hidrocarburos (petróleo); 2) la presión política de los importadores netos de energía; 3) las preocupaciones ambientales según el Protocolo de Kioto¹⁵. Todas estas razones apoyan el concepto de “economía del hidrógeno”. [33], [34]

La “economía del hidrógeno” es una noción que se acuñó hace muchos años que se apoya en un modelo económico que se basa en la producción del hidrógeno a gran escala en lugar de los combustibles fósiles, es por lo dicho, que se está impulsando el uso de hidrógeno en un futuro. Según *Kobad Bhavnagri*: “el hidrógeno tiene potencial de convertirse en el combustible que impulse una economía limpia. En consecuencia, podría lograr reducir un 34% las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero”. [35]

¹⁵ Acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero.

Por lo comentado anteriormente, se entiende que el hidrógeno va a poseer un buen desarrollo en las próximas décadas gracias a sus ventajas expuestas previamente. Sin embargo, todo bien siempre tiene algún desafío a afrontar. Uno de ellos es la falta de seguridad debido a incidentes explosivos que destacan por su naturaleza explosiva. Sin embargo, y a lo que este proyecto se centra principalmente, el hidrógeno como portador de energía es relativamente seguro. Un recipiente de hidrógeno comprimido no es más peligroso que uno con gasolina o diésel. Asimismo, al ser menos denso que el aire y el vapor del petróleo, se dispersa rápidamente, reduciendo el riesgo de ignición.

Al inicio del proyecto (*Capítulo 1*), se ha mencionado la dificultad de transporte y almacenamiento del hidrógeno debido a su baja densidad volumétrica, siendo esta 8.5 MJ/l, es más costoso transportarlo y almacenarlo. Por consiguiente, su solución es transformarlo en un elemento que pueda portar hidrógeno, en este caso metanol.

Propiedades

El hidrógeno es el primer elemento en la tabla periódica y es el más ligero de todos. Su átomo consiste en un protón y un electrón, y se encuentra en forma de molécula diatómica. A temperatura y presión normales, dos átomos de hidrógeno se unen para formar el hidrógeno molecular o dihidrógeno, un gas incoloro, inodoro e insípido que es inflamable y tiene la fórmula H₂. En la Tierra, el hidrógeno solo se encuentra en combinación con otros elementos. [36]

| Propiedad | Valor |
|-------------------------|----------------------------|
| Densidad | 0.08988 kg·m ⁻³ |
| Masa atómica | 1.00794(7) u |
| Punto de fusión | 14.025 K |
| Punto de ebullición | 20.268 K |
| Punto de inflamabilidad | 255 K |

Tabla 3: Propiedades del hidrógeno. [37]

Tecnologías de producción del hidrógeno

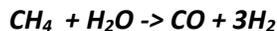
Como he señalado anteriormente, el hidrógeno no se puede hallar en la Tierra a menos que se una a otro elemento. Por esta razón, hay distintos métodos de producción en los que los principales materiales a unir son el agua y los hidrocarburos (fundamentalmente el metano).

Existen distintas fuentes de energía para este tipo (véase en la *Figura 15*) de producción combinadas con distintos procesos que dan como resultados el H₂. Hay muchas formas de crear hidrógeno, algunas estando en uso y otras solo teóricamente, no obstante, se expondrán las más estudiadas actualmente.

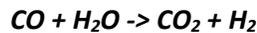
A continuación, se desarrollarán los distintos métodos de fabricación que existen que pueden utilizarse en función de los recursos disponibles y los requisitos específicos:

1. Reformado con vapor del gas natural: en este proceso, el vapor y el gas natural, previamente tratados para eliminar los contaminantes, se calientan juntos a alta presión a aproximadamente 900°C sobre un catalizador a base de níquel. Esta reacción, convierte el metano y el vapor en hidrógeno y monóxido de carbono. Este método es el más común para producir hidrógeno, debido a su eficiencia y costos relativamente bajos, aunque implica la emisión de dióxido de carbono como resultado. [38]

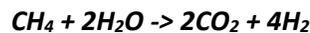
Cuando se presentan altas temperaturas el metano (CH₄ y el vapor de agua) reaccionan como se muestra en la siguiente ecuación. [38]



Al resultado de la reacción, el hidrógeno y el monóxido de carbono, se le llama syngas, esto puede aumentar la producción del hidrógeno, por tanto, introduciendo el syngas a la reacción, a temperaturas más bajas: [38]



Dando como resultado final del proceso:



El único problema de este método es que para poder extraer el hidrógeno de la anterior mezcla es necesario hacerlo a través de un proceso denominado “adsorción por oscilación de presión”, así necesitando más energía y esto provoca mayor liberación de CO₂. [38]

2. Oxidación parcial y reformado autotérmico: es un método para suministrar calor a la primera reacción del proceso anterior. Este no usa calor externo, por tanto, es más barato y es menos contaminante que el anterior. [38]

Al igual que el previo proceso la reacción produce syngas, solamente que en este caso reacciona el metano y el oxígeno. Asimismo, este puede reaccionar de nuevo para producir más hidrógeno. [38]



Reacción syngas para producir más hidrógeno:



3. Electrólisis: este método de producción, actualmente, es el que más se está promoviendo debido a que es un proceso que funciona a base de fuentes de energía renovables (por ejemplo, la energía eólica) siendo el resultado de este proceso el hidrógeno verde que más adelante se desarrollará más esta sustancia. [38]

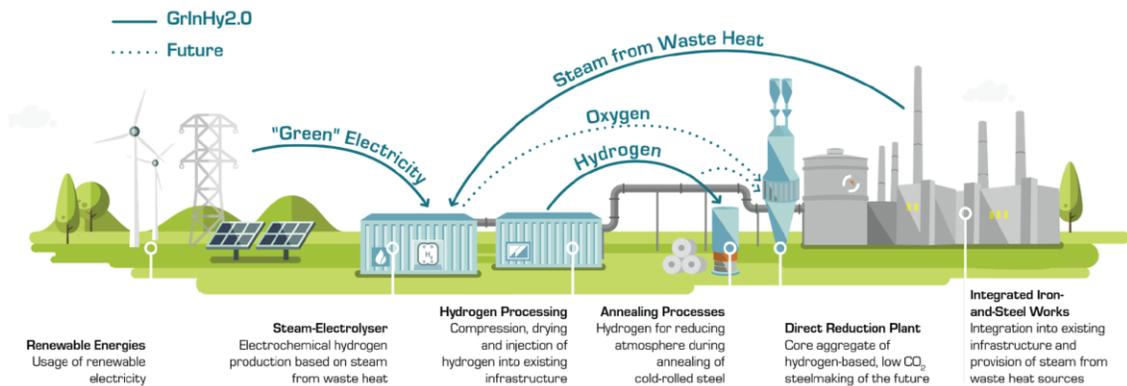


Figura 13: Electrólisis (GrInHy2.0). [37]

La electrólisis es un proceso químico que emplea corriente eléctrica para separar el hidrógeno del oxígeno presente en el agua. Durante este proceso, el agua se descompone en sus componentes básicos, liberando hidrógeno y oxígeno. El hidrógeno se recolecta para su uso como combustible, mientras que el oxígeno es devuelto a la atmósfera. Este método es sostenible cuando la electricidad empleada proviene de fuentes renovables, ya que no genera emisiones de carbono. [38]

Actualmente, este proceso no está prácticamente en uso por sus altos costes, no obstante, al ser un método sostenible y siendo su huella de carbono muy baja, se está intentando impulsar y muchas empresas están intentando implementar e invertir en este proceso. Por ejemplo, una planta de hidrógeno verde que emplea este método y que está en uso desde 2022 es la “Planta de Puertollano”, siendo su dueña Iberdrola (Figura 14). Dicha planta, está compuesta por una planta solar fotovoltaica de 100 MW, contando con un sistema de baterías ion-litio (20 MWh) y uno de los mayores sistemas de fabricación de hidrógeno verde a partir de electrólisis (20 MW). [39]

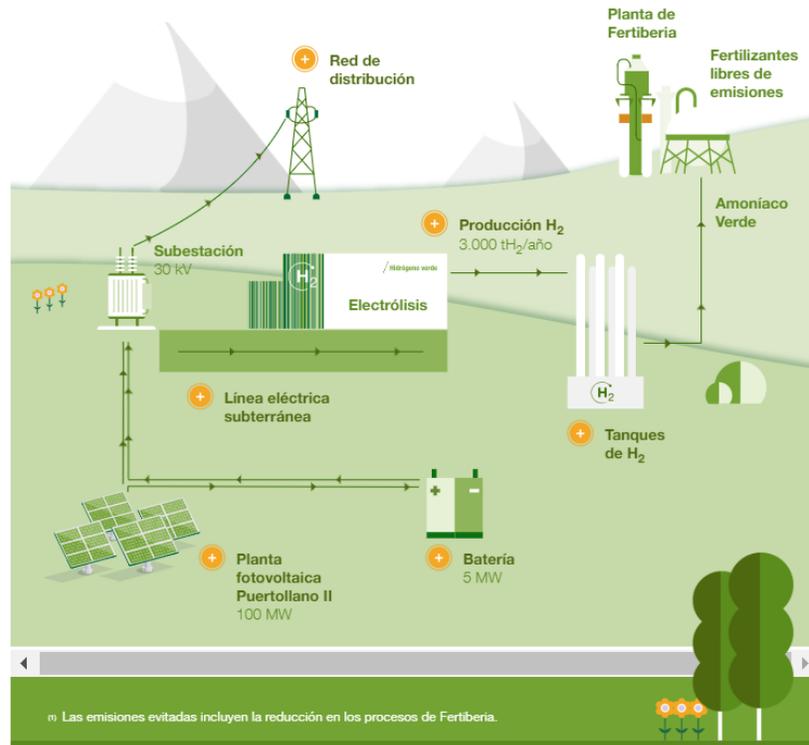


Figura 14: Planta de producción hidrógeno verde. [39]

Tipos de hidrógeno según el proceso [39]

- Hidrógeno gris: se obtiene mediante el proceso de reformado de metano con vapor y puesto que este proceso libera dióxido de carbono, no es una sustancia sostenible.
- Hidrógeno verde: se obtiene mediante electrólisis y es un proceso 100% renovable (fuentes de energía: eólica y/o solar).
- Hidrógeno azul: se elabora a partir del reformado de metano con vapor sin embargo el CO₂ emitido, se captura y se almacena en un sistema para reutilizarlo en un futuro.
- Hidrógeno rosa: al igual que el hidrógeno verde sin embargo su fuente de energía es la nuclear.
- Hidrógeno marrón: se consigue a partir de la gasificación (convierte una sustancia carbonosa a gas de combustible mediante una serie de reacciones). No obstante, es un método muy contaminante.

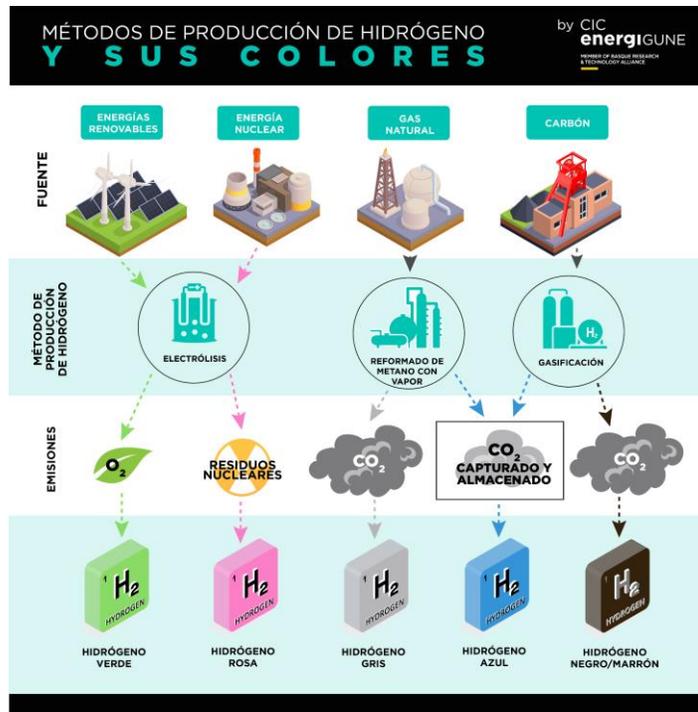


Figura 15: Métodos de producción de hidrógeno y sus colores. [38]

Aplicaciones de hidrógeno como combustible

1. Transporte (combustible): el desarrollo de políticas y estrategias activas en energía renovable es crucial para alcanzar las emisiones netas cero para 2050. Se necesitarán aproximadamente 1066 GW/año de electricidad renovable y mayores proporciones de biomasa e hidrógeno, señala IRENA. En enero de 2024, se anunciaron casi 2000 proyectos de hidrógeno a nivel mundial, con el 88% destinados a la producción por electrólisis, sumando una capacidad total de 142,5 Mt/año. El consumo global de hidrógeno alcanzó 95 Mt en 2022, liderado por refinerías e industrias, con EE. UU., Japón y Europa instalando más pilas de combustible de hidrógeno. Para poder desarrollar e impulsar el uso de hidrógeno, es necesario tener en cuenta las distintas tecnologías vigentes que se están usando para su transporte, especialmente, vehículos de pilas de combustible y combustible sintético. [41]
 - **Pilas de combustible**: estas pilas usan hidrógeno para generar electricidad mediante una reacción electroquímica. Una pila de combustible opera mediante la combinación de un combustible, típicamente hidrógeno, y un comburente, generalmente oxígeno, para generar agua, electricidad en corriente continua y calor. [42]

Los componentes principales son: **los electrodos** 1) Ánodo: donde el hidrógeno se divide en protones (H⁺) y electrones (e⁻). 2) Cátodo: Donde los protones (H⁺) y el oxígeno (O₂) reaccionan para formar agua; **el electrolito** que separa los gases permite el paso de

iones H^+ al cátodo y separa los electrones; **las placas bipolares** que separan las celdas conducen los gases y evacúan el agua. [42]

Las reacciones son:

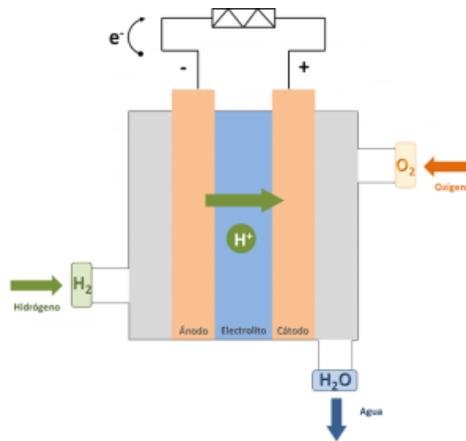
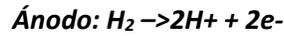


Figura 16: Funcionamiento de las pilas de combustible. [42]

- **Combustibles sintéticos:** Generalmente, se entienden como combustibles sintéticos aquellos que provienen de la fusión entre hidrógeno y dióxido de carbono. Son parecidos al petróleo, pero de orígenes distintos. Este método se está impulsando por su uso de energías renovables. Actualmente, Repsol está fabricando una planta de fabricación de combustibles sintéticos en Bilbao (2024). [43]

Los tres métodos principales para producir combustibles sintéticos son: 1) Licuefacción directa del carbón: transforma el carbón directamente en líquidos mediante procesos químicos y térmicos. 2) Producción de gas de síntesis seguida de síntesis Fischer-Tropsch: convierte carbón o gas natural en gas de síntesis ($CO + H_2$), que luego se transforma en hidrocarburos líquidos a través de la síntesis Fischer-Tropsch. 3) Producción de gas de síntesis seguida de síntesis de metanol: produce gas de síntesis, que se convierte en metanol y posteriormente se transforma en gasolina y gasóleo. [44]

TRANPORTE Y ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO EN FORMA DE METANOL

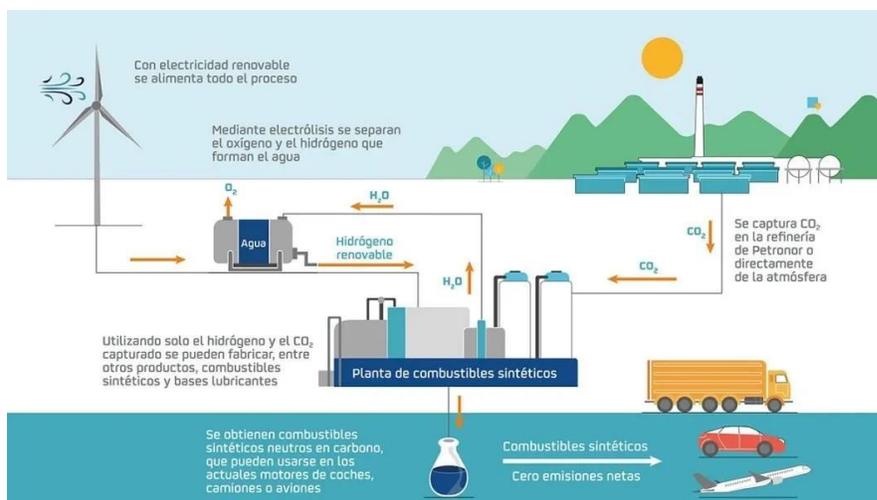


Figura 17: Planta de producción de combustibles sintéticos. [45]

2. Industria de la refinería, química y metalúrgica: Además de su uso como materia prima, el hidrógeno tiene aplicaciones en el sector industrial como vector energético. Se emplea en numerosos procesos, tales como la gasificación y la fusión. En la gasificación, el hidrógeno puede convertir materiales carbonosos en gas de síntesis, mientras que, en la fusión, se utiliza como combustible en experimentos de fusión nuclear. Estas aplicaciones resaltan la versatilidad del hidrógeno no solo como componente químico, sino también como fuente de energía para diversas industrias, contribuyendo a la eficiencia y sostenibilidad de los procesos industriales. [46]

3.3.2 Metanol como portador de hidrógeno

Como se explicó en el *Capítulo 1*, el metanol está ganando impulso como portador de hidrógeno debido a su facilidad de transporte y almacenamiento en condiciones ambientales, ya que es líquido a temperatura ambiente. En comparación con el hidrógeno, el aprovisionamiento y traslado del metanol es significativamente menos costoso. Además, aunque el hidrógeno es un combustible más limpio que el metanol, este último sigue siendo una opción viable por su manejo más sencillo y económico. En este apartado se centrará en las ventajas y aplicaciones del metanol en el contexto del hidrógeno, subrayando su impacto y potencial en la actualidad y, especialmente, en el futuro.

Ventajas

Durante el período de transición hacia la implementación de una infraestructura universal para la distribución de hidrógeno gaseoso, la tendencia actual en la evolución de los sistemas de almacenamiento sugiere que el almacenamiento químico del hidrógeno es el método más eficiente. Esto se debe a que el hidrógeno gaseoso, en su forma actual, requiere procesos de compresión y/o licuefacción y un transporte más complejo, esto conlleva a que los costos son mucho mayores. Además, el almacenamiento químico permite aprovechar en gran medida la infraestructura existente para el

manejo de combustibles fósiles. Habiendo varias formas para guardar el hidrógeno en el almacenamiento químico: 1) Como gas comprimido (CGH_2); 2) Como hidrógeno líquido (LH_2); 3) En borohidruros, amoniaco (NH_3) y metanol (CH_3OH); 4) En hidruros metálicos. [47]

Entre los diversos portadores químicos de hidrógeno, el metanol se considera uno de los más adecuados debido a su alto contenido de hidrógeno en la molécula (CH_3OH) y su baja toxicidad en comparación con otros compuestos similares. En este proceso, el metanol contribuye con 4 átomos de hidrógeno, mientras que el agua (H_2O) aporta los otros dos. [48]

Se ha hecho un estudio de las diversas ventajas que se han tenido en cuenta al metanol como un portador de hidrógeno viable:

1. Densidad energética, almacenamiento y transporte:

El metanol, comúnmente, se almacena como la gasolina, en tanques exteriores con techos flotantes. La Universidad Nacional Autónoma de México señala que los tanques, en general, “son equipos diseñados para almacenar y procesar fluidos, previos a la refinación del petróleo. La volatilidad del fluido almacenado, y la presión a la que se someterá el mismo, determinan el tipo de tanque que se usará”. Un tanque con techo flotante se refiere aquel que es utilizado para almacenar productos industriales, especialmente petróleo y sus derivados, debido a su capacidad para minimizar la evaporación. En consecuencia, el almacenamiento de esta sustancia no sería un inconveniente dado que podría emplear la tecnología que ya está diseñada y se utiliza actualmente para la gasolina. [49]



Figura 18: Tanques con techo flotante. [49]

El metanol, con su alta densidad energética volumétrica y facilidad de manejo, se presenta como una alternativa viable y económica al hidrógeno. Su estado líquido a temperatura ambiente simplifica significativamente su almacenamiento y transporte, comparado con el hidrógeno, que requiere condiciones especiales debido a su estado gaseoso a temperatura ambiente. Esta ventaja logística y económica hace que el metanol sea una opción atractiva para aplicaciones industriales y de transporte, donde se valora tanto la eficiencia energética como la practicidad en el manejo del combustible.

Por lo mencionado anteriormente, el metanol al poderse almacenar y transportar en las estructuras existentes los costos son mucho más bajos en comparación con otros portadores. En el siguiente gráfico se muestra las capacidades energéticas volumétricas en una función de las gravimétricas de los distintos portadores, siendo las del metanol y amoníaco mayor.

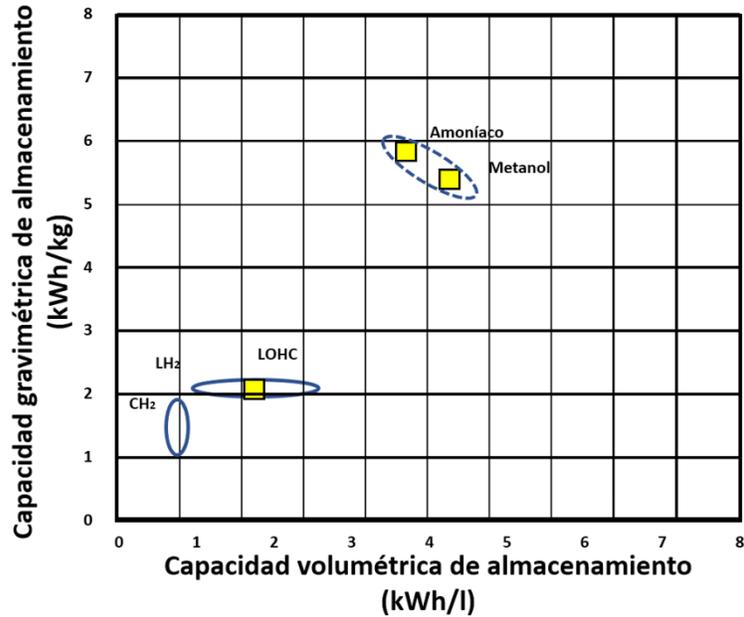


Figura 19: Densidades energéticas de los portadores de hidrógeno. [50]

2. Conversión a hidrógeno:

El desarrollo de catalizadores¹⁶ adecuados para microrreactores destinados a la obtención de hidrógeno a partir de metanol es crucial para su consumo in situ, dado que existen preocupaciones de seguridad en torno al manejo y distribución del hidrógeno. El metanol presenta un alto potencial para la generación de hidrógeno en comparación con otros alcoholes, debido a su elevada relación hidrógeno-carbón. Esto reduce significativamente el riesgo de envenenamiento del catalizador por la formación de carbón, ya que no contiene enlaces carbono-carbono.

A partir del metanol se puede obtener hidrógeno empleando tres procesos: 1) reformado de metanol con vapor; 2) descomposición; 3) oxidación parcial con oxígeno. [51]

¹⁶ Son sustancias que, al ser añadidas a una reacción química, incrementan la velocidad de dicha reacción sin consumirse ni alterarse permanentemente en el proceso.

- **Reformado de metanol con vapor (SRM):**

En un reformador de metanol, también conocido como craqueador de metanol, se vaporiza una mezcla de metanol y agua, dado su carácter endotérmico requiere el suministro de energía para que el proceso se lleve a cabo, a aproximadamente 280°C utilizando un supercalentador y se realiza a presiones relativamente bajas. Esta mezcla gaseosa de metanol y agua reacciona en presencia de un catalizador de cobre, produciendo dióxido de carbono e hidrógeno. El gas de síntesis resultante se enfría mientras se precalienta la mezcla de metanol y agua mediante un intercambiador de calor. La reacción química puede representarse de la siguiente manera: [51]

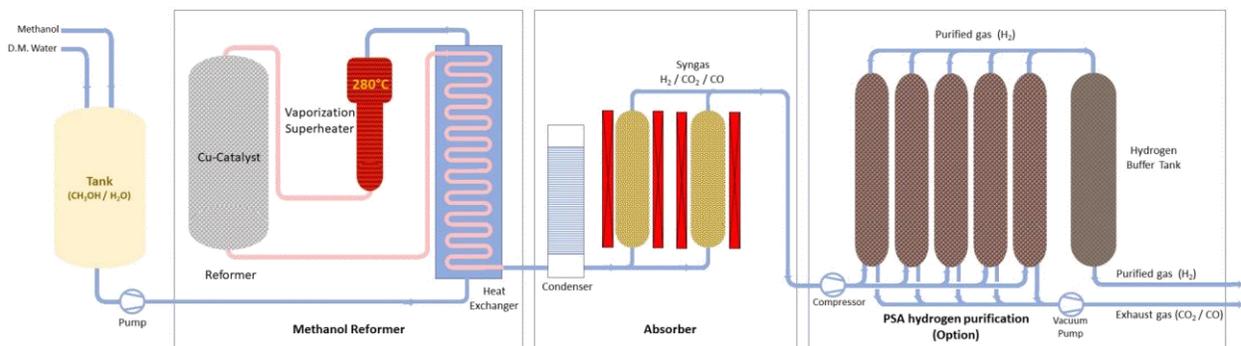
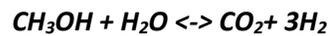


Figura 20: Reformado de metanol con vapor. [52]

El objetivo principal es separar el hidrógeno del dióxido de carbono, y así, purificarlo. Con ese propósito, un método es la adsorción por oscilación de presión (PSA) que es una técnica altamente eficaz para la separación de gases basada en sus diferentes propiedades de adsorción. Esta tecnología permite la purificación de gases como el hidrógeno mediante la separación de contaminantes como el monóxido de carbono y el dióxido de carbono, produciendo así hidrógeno de alta pureza. [52]

En el proceso PSA, se emplean materiales porosos especializados, tales como tamices moleculares o zeolitas, que tienen la capacidad de adsorber selectivamente ciertos gases. Durante la operación, una mezcla gaseosa se hace pasar a través de un tamiz molecular que está optimizado para adsorber el hidrógeno. Este tamiz tiene una alta afinidad por el hidrógeno, lo que permite que el hidrógeno se adhiera a su superficie mientras que otros gases, como CO y CO₂, no se adsorben en la misma medida. Esto permite que el hidrógeno purificado se libere del tamiz molecular y se recoja para su uso. Mientras tanto, el tamiz molecular que ha liberado el hidrógeno se somete a un proceso de regeneración para eliminar los gases adsorbidos previamente. Este ciclo de adsorción y desorción se repite continuamente, garantizando un suministro constante de hidrógeno puro. [52]

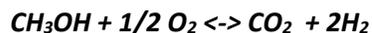
- **Descomposición de metanol:**

Esta tecnología se basa en la separación del metanol dando lugar a monóxido de carbono e hidrógeno, siendo la reacción siguiente la que representa este método. Además, se emplean catalizadores que prometen mejorar aún más la eficiencia y reducir los costos de operación. [51]



- **Oxidación parcial de metanol:**

La oxidación parcial de metanol es una reacción exotérmica, por lo que no requiere un aporte adicional de energía externa durante su proceso. Sin embargo, el control de la temperatura puede resultar complejo. Esta reacción se considera también una vía para la producción de hidrógeno. Debido a la ausencia de intercambiadores de calor externos, se puede utilizar un reactor de dimensiones reducidas en la oxidación parcial de metanol. No obstante, la cantidad de hidrógeno producida es aproximadamente la mitad de la obtenida mediante el reformado de metanol y puede disminuir aún más a través de una reacción de combustión con oxígeno. Al igual que en el reformado de metanol, la generación de dióxido de carbono es un subproducto de esta reacción, por lo que es necesario su purificación. [51]



3. Producción sostenible:

El metanol se puede producir sosteniblemente, por tanto, es un gran motivo para impulsarlo. Existe un tipo de metanol denominado metanol verde y dentro de él, existen el biometanol y e-metanol. Cada uno de ellos, se produce sosteniblemente, no obstante, su fabricación es de forma distinta. Cabe de explicar, que en este apartado sólo se explicará por encima debido a que en el *Capítulo 4*, se hará un estudio más detallado de la producción del metanol, incidiendo en el metanol verde.

- **Biometanol:** es producido a partir de biomasa, este ofrece una ruta sostenible para la producción de hidrógeno. Este método implica la gasificación de biomasa para producir gas síntesis, que luego se convierte en metanol.
- **E-metanol:** Usando dióxido de carbono capturado y electricidad renovable, se crea mediante la hidrogenación del dióxido de carbono. Este proceso no solo reduce las emisiones de carbono, sino que también para realizar este método se emplean fuentes de energía sostenibles para producir metanol a gran escala.

Aplicaciones del metanol como portador de hidrógeno

1. Transporte y almacenamiento:

Debido a que, en uno de los próximos capítulos, siendo el 5 concretamente, se explicará con más detalle cómo se realizaría el transporte y almacenamiento tan solo se hará una breve mención al uso del metanol en el mercado de hidrógeno. El metanol puede transportarse a granel en tanques convencionales y reformarse a hidrógeno en el punto de uso, eliminando los riesgos y costos asociados con el transporte de hidrógeno comprimido o líquido. Esto es especialmente ventajoso para aplicaciones industriales y estaciones de reabastecimiento de hidrógeno.

Habiendo ya explicado cómo se realiza la conversión de hidrógeno mediante el método de Reformado de metanol con vapor, siendo este el proceso más empleado puesto que permite la producción de hidrógeno según la demanda, optimizando el suministro y mejorando la seguridad logística.

2. Celdas de combustible de metanol directo:

Actualmente, estas celdas están en desarrollo y tienen un gran potencial dado a su simplicidad y eficiencia. El funcionamiento de estas pilas es la generación de electricidad mediante el proceso de oxidación parcial del metanol en un medio electroquímico sin necesidad de reformarlo previamente a hidrógeno. Son adecuadas para aplicaciones portátiles y de baja potencia, como vehículos eléctricos ligeros, equipos portátiles, y dispositivos electrónicos. Estas celdas son compactas y tienen una densidad energética adecuada para estas aplicaciones. [53]

Desafíos y Perspectivas Futuras

A pesar de las numerosas ventajas que ofrece el uso del metanol como vector de hidrógeno, existen desafíos técnicos, económicos y regulatorios que deben abordarse para maximizar su potencial. Dado que es una idea relativamente nueva, muchas de las aplicaciones mencionadas en el apartado anterior están orientadas hacia un futuro. A continuación, se detallan los distintos desafíos y perspectivas futuras.

1. Costos de producción:

El empleo de metanol renovable para cumplir las regulaciones ambientales y para dar un paso más a una transición energética, conlleva a que los costos de producción son más elevados puesto que su producción no está completamente desarrollada. Para ello, se necesitan más recursos, en este caso más apoyo económico, para su diseño e impulso.

Las economías de escala son aquellas que a mayor producción consiguen vender los productos a menor coste, siendo el mercado de hidrógeno una de ellas, se puede observar que la inversión en infraestructuras y en avances tecnológicos en un futuro, seguramente se consiga que la producción de metanol como portador de hidrógeno consiga un menor coste.

2. Eficiencia de los reformadores de metanol:

La eficacia de la conversión de hidrógeno es indispensable para impulsar el mercado de hidrógeno por ello debe ser optimizada para maximizar la conversión y minimizar las pérdidas energéticas. Se necesita el desarrollo de catalizadores más eficientes y procesos más avanzados para mejorar el rendimiento. El problema de los catalizadores es el trabajo a altas temperaturas ya que estas pueden desestabilizar el catalizador, el consumo energético es elevado y la disminución de la selectividad causada por la formación de monóxido de carbono como producto secundario, es un fenómeno que se va intensificando a medida que aumenta la temperatura.

Para hacer frente a esto, es necesario invertir en la investigación de nuevos catalizadores que trabajen a menores temperaturas con alta eficiencia y que sean estables en el tiempo. El Instituto de Tecnología Química (CSIC-UPV), está estudiando un catalizador con estas propiedades. Estos avances trabajan con una mayor eficiencia y viabilidad económica. [54]

3. Toxicidad y manejo:

Otro gran desafío es la toxicidad que posee el metanol cuando se manipula con él, aunque sea más seguro que el hidrógeno gaseoso. Por tanto, la manipulación del metanol requiere unas medidas de seguridad altamente restrictivas durante su almacenamiento y transporte, por lo tanto, estas técnicas de seguridad también requieren un costo.

Las instituciones tecnológicas al ver que esta idea tiene un futuro prometedor están estudiando en la implementación de prácticas de seguridad mejoradas y tecnologías de monitoreo avanzado que contribuirán a un manejo más seguro del metanol. Por ejemplo, la empresa *Dräger* ha desarrollado varios productos para hacer frente a este desafío, así como, detectores de gases, detección monogas y una herramienta para la manipulación segura de sustancias peligrosas (*Dräger VOICE*), siendo esta última, una base de datos que explicará información relevante y recomendaciones específicas de equipos de seguridad para más de 1500 sustancias peligrosas, el metanol inclusive. [55]

Comparación con amoniaco

Es pertinente comparar el metanol con otros vectores de hidrógeno, como el amoniaco. El amoniaco también ha sido considerado como un prometedor portador de hidrógeno debido a su alta densidad de almacenamiento de energía y su infraestructura de producción ya establecida. Sin embargo, presenta sus propios desafíos, como la toxicidad y los requisitos de seguridad más estrictos. Comparar ambos vectores puede proporcionar una visión más completa de sus respectivos beneficios y limitaciones, ayudando a determinar cuál es el más adecuado para diferentes aplicaciones y contextos.

Para poder comparar ambas sustancias, es necesario exponer las distintas propiedades que tiene cada uno, y así, se podrá observar cuál de los dos es más eficiente o económico o ambos.

| Propiedades | Amoniaco | Metanol |
|-----------------------------|---|-------------------------|
| Estado (20°C) | Gas | Líquido |
| Punto de ebullición | -33°C | 64,5°C |
| Punto de fusión | -78°C | -97°C |
| Temperatura de autoignición | 651°C | 11°C |
| Densidad | 0.68 kg/m ³ | 791.8 kg/m ³ |
| Toxicidad | Irritante, peligroso en concentraciones tóxicas | Altamente tóxico |
| Proporción de hidrógeno | 17.6% | 12.6% |
| Producción de hidrogeno | “cracking” de amoniaco | Reformado de metanol |
| Almacenamiento | A temperaturas muy bajas (-33°C) | A temperatura ambiente |

Tabla 4: Propiedades metanol-amoniaco. [56], [57]

Una vez desarrollado las distintas propiedades de cada vector, se pueden exponer las distintas ventajas y desventajas. Cada uno de estos compuestos ofrece diversos beneficios y enfrenta desafíos particulares que pueden influir en su capacidad para diferentes contextos. A continuación, se expondrán dichas ventajas y desventajas:

TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO EN FORMA DE METANOL

| Amoniaco | Metanol |
|--|--|
| La mayor proporción de hidrógeno (17.6%) en comparación con otros portadores permite transportar más hidrógeno por unidad de volumen, lo que es crucial para aplicaciones donde la eficiencia volumétrica es crítica. | El metanol contiene menos hidrógeno por unidad de volumen (12.6%) en comparación con el amoniaco, lo que puede ser una desventaja en aplicaciones donde se necesita maximizar la cantidad de hidrógeno transportado. |
| El amoniaco ya cuenta con una infraestructura global establecida para su producción, almacenamiento (tanque a presión) y transporte. | Puede ser fácilmente transportado reutilizando la estructura existente para combustibles líquidos. |
| La descomposición del amoniaco para producir hidrógeno no genera dióxido de carbono. ("cracking" de amoniaco). | El proceso de reformado del metanol para obtener hidrógeno genera dióxido de carbono como subproducto. |
| Requiere condiciones muy específicas (temperaturas de -33°C o alta presión) para ser almacenado y transportado en estado líquido, lo que incrementa significativamente los costos y complica la logística. | A temperatura ambiente, el metanol es un líquido, lo que simplifica su almacenamiento y transporte sin necesidad de costosos sistemas de enfriamiento o compresión. |
| El proceso de descomposición del amoniaco para obtener hidrógeno requiere altas temperaturas, lo que implica un consumo energético considerable y más costoso. | El proceso de reformado de metanol para producir hidrógeno es eficiente y puede realizarse a temperaturas más bajas que otros procesos, reduciendo los costos energéticos. |
| Su alta temperatura de autoignición (651°C) lo hace menos susceptible a incendios accidentales en comparación con otros combustibles. | Con una temperatura de autoignición más baja (464°C), el metanol presenta un mayor riesgo de incendios accidentales, |
| El amoniaco es altamente tóxico e irritante, lo que requiere estrictas medidas de seguridad en todas las etapas de su manejo, desde la producción hasta el transporte y el uso. | Aunque es menos tóxico que el amoniaco, el metanol sigue siendo altamente peligroso para la salud humana si se ingiere, inhala o absorbe a través de la piel, lo que exige estrictos protocolos de seguridad. |
| Si bien no genera CO ₂ durante el "cracking", la producción de amoniaco a partir de fuentes no renovables (como el gas natural) puede tener un impacto significativo en términos de emisiones de gases de efecto invernadero. | Gran parte del metanol actualmente se produce a partir de gas natural, lo que implica un vínculo con los combustibles fósiles. No obstante, se está intentando impulsar la producción de metanol a partir de fuentes y productos renovables. |
| El amoniaco es corrosivo, lo que puede dañar materiales y equipos, aumentando los costos de mantenimiento y la necesidad de materiales más resistentes. | Similar al amoniaco, el metanol puede ser corrosivo para ciertos materiales, lo que requiere materiales resistentes en la infraestructura de almacenamiento y transporte. |

Tabla 5: Ventajas y desventajas del metanol y amoniaco. [56], [57]

¿Cuál es mejor?

La elección entre metanol y amoniaco como vector de hidrógeno depende en gran medida de las prioridades y necesidades específicas de cada empresa, proyecto o industria y las capacidades de infraestructuras existentes. Ambos compuestos ofrecen ventajas distintas que pueden ser decisivas según el contexto en el que se apliquen. Por ejemplo, si la facilidad de manejo y transporte a temperatura ambiente es una prioridad clave, el metanol podría ser la opción más adecuada. Su estado líquido a temperatura ambiente y la eficiencia del proceso de reformado lo hacen conveniente en situaciones donde se valoran estos aspectos.

En contraste, si la alta densidad de hidrógeno y la disponibilidad de infraestructura existente son factores cruciales, el amoniaco podría ser el más adecuado, a pesar de los desafíos asociados con su toxicidad y los estrictos requisitos de almacenamiento. La decisión final depende de la importancia que cada organización les otorgue a factores como la eficiencia energética, la seguridad, el impacto ambiental y los costos operativos, ya que ambos vectores pueden ser altamente beneficiosos dependiendo de las circunstancias específicas.

4. Producción de metanol

En 2022, la demanda global de metanol se calculó en 105,8 millones de toneladas métricas, y en los últimos cinco años ha aumentado alrededor del 19%, lo que equivale a un crecimiento cercano al 4% anual (*Methanol Institute, 2023*). Se espera que la demanda de metanol continúe creciendo a una tasa anual del 4,9 % entre 2022 y 2027 (*Mordor Intelligence, 2023*). Debido a su creciente demanda, se han comenzado a desarrollar nuevas tecnologías para impulsar la producción sostenible del metanol. [58]

El metanol se produce a partir de combustibles fósiles como gas natural, fracciones de petróleo, carbón y de materias primas renovables, sin embargo, la principal materia prima para la producción de metanol es el gas natural. Como he mencionado anteriormente, se está intentando implementar el uso de fuentes sostenibles, así sustituyendo al gas natural, para fabricar el metanol. [59]

En el capítulo anterior, se han mencionado los distintos tipos de metanol que hay según la materia prima y método de producción que se utiliza para fabricar dicha sustancia. A continuación, se explicarán los distintos tipos de producción según la materia prima empleada y se incidirá más detalladamente en la producción del metanol verde.

4.1 A partir de gas natural

El gas natural es la principal materia prima para la producción de metanol debido a sus ventajas tecnológicas, ambientales y económicas. Representa una materia prima competitiva en términos de costos y disponibilidad, especialmente en regiones con abundantes reservas de gas natural.

Por otro lado, los avances en la producción de metanol están centrados en el desarrollo de catalizadores que permiten operar en condiciones de operación menos severas, con mayor selectividad y rendimientos. Los catalizadores a base de cobre han permitido la operación a menores temperaturas y presiones. [59]

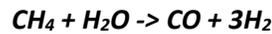
La producción de metanol a pequeña escala (menos de 3000 toneladas métricas por día) es viable, pero presenta mayores costos de capital por tonelada de metanol producido en comparación con las plantas de mayor escala. Sin embargo, el acceso a gas natural a precios reducidos puede mejorar la economía de estas plantas. [59]

La producción de metanol a partir del gas natural implica tres fases principales: 1) la transformación del gas natural en gas de síntesis mediante el reformado con vapor; 2) la conversión del gas de síntesis en metanol; 3) la purificación del metanol. [59]

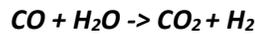
4.1.1 Conversión de gas natural a gas de síntesis

En esta primera etapa, el gas natural se convierte en gas de síntesis (syngas) mediante un proceso conocido como Reformado al Vapor del Metano (SMR). El proceso principal es, el gas natural compuesto principalmente de metano (CH_4), se convierte en gas de síntesis mediante una reacción con vapor de agua a altas temperaturas ($800\text{-}1000^\circ\text{C}$) y presiones ($20\text{-}30\text{ bar}$) en presencia de un catalizador a base de níquel. [59]

La reacción principal es: [59]



Esta reacción es altamente endotérmica, es decir, que absorbe energía. Y la reacción de desplazamiento del gas de agua, esta describe la reacción del monóxido de carbono y el vapor de agua dando lugar a dióxido de carbono e hidrógeno. [59]



Esta reacción es moderadamente exotérmica y ayuda a ajustar la relación H_2/CO en el gas de síntesis. [59]

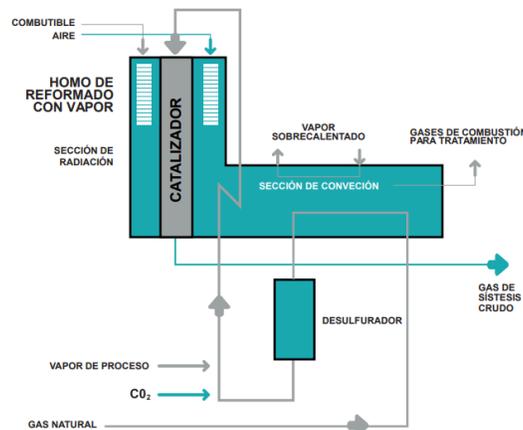


Figura 21: Proceso de reformado de vapor. [59]

Tecnologías Alternativas

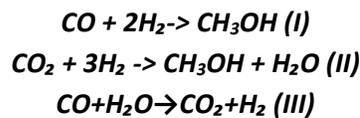
A continuación, se presentan las distintas tecnologías alternativas para este subproceso.

- Reformado autotérmico (ATR): Combina la oxidación parcial del metano y el reformado con vapor en un solo reactor. Opera a temperaturas de $950\text{-}1400^\circ\text{C}$ y presiones de $30\text{-}50\text{ bar}$. [59]
- Reformado combinado (CMR): Integra el SMR y el ATR para mejorar la eficiencia. Se utiliza para capacidades de producción mayores a 5000 toneladas métricas por día. [59]
- Reformado en seco por CO_2 (DMR): Utiliza dióxido de carbono en lugar de vapor para convertir el metano. Aunque ofrece beneficios ambientales, aún no es ampliamente utilizado a escala industrial debido a su menor eficiencia. [59]

4.1.2 Conversión de Gas de Síntesis a Metanol

En la segunda etapa, el gas de síntesis se convierte en metanol. El gas de síntesis, una mezcla de H_2 , CO y CO_2 , se convierte en metanol en un reactor de síntesis en presencia de un catalizador a base de cobre, zinc y aluminio. Las condiciones de esta operación son: temperaturas de 200-300°C y presiones de 50-100 bar. [59]

Las reacciones principales son: (I) hidrogenación del monóxido de carbono; (II) hidrogenación del dióxido de carbono; (III) reacción de desplazamiento del gas de agua. [59]



En los procesos actuales de producción de metanol, las condiciones de operación típicas incluyen temperaturas que varían entre 200 y 300 °C y presiones que oscilan entre 50 y 100 bar. La termodinámica del proceso indica que durante la hidrogenación del monóxido de carbono (Eq. I), pueden formarse productos secundarios como alcoholes superiores e hidrocarburos. Estos subproductos son más estables termodinámica que el metanol, lo que significa que el catalizador utilizado en la reacción debe ser muy selectivo para minimizar su formación. [59]

La composición ideal del gas de síntesis para la producción de metanol requiere una relación molar de hidrógeno a monóxido de carbono (H_2/CO) cercana a 2:1. Si esta relación es inferior a 2, se favorece la formación de subproductos indeseados. Por otro lado, si la relación es superior a 2, el proceso se vuelve menos eficiente debido al exceso de hidrógeno, que no se utiliza y debe ser eliminado mediante purgas. Esto no solo reduce la eficiencia del proceso, sino que también puede aumentar los costos operativos y de manejo de residuos. [59]

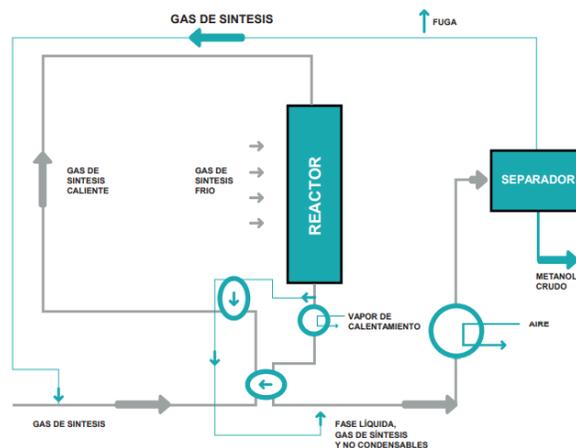


Figura 22: Proceso de conversión de gas síntesis a metanol. [59]

Catalizadores:

Inicialmente, la producción industrial de metanol utilizaba procesos que operaban a altas presiones y empleaban catalizadores a base de cromato. Estos catalizadores implicaban activarse a altas temperaturas, lo que implicaba que la presión de operación debía ser extremadamente elevada, entre 250 y 350 bar, para lograr conversiones aceptables. [59]

Sin embargo, estos métodos de alta presión fueron reemplazados por procesos que operan a bajas presiones y utilizan catalizadores a base de cobre. El desarrollo de catalizadores con cobre ha permitido que estos se activen a temperaturas más bajas, lo que hace posible operar a presiones significativamente menores, entre 50 y 100 bar. [59]

No obstante, aunque los catalizadores a base de cobre son muy activos, presentan un desafío: son susceptibles a la aglomeración de la fase activa. Esta aglomeración, que es la formación de conglomerados de partículas de cobre, aumenta con el tiempo y con el incremento de la temperatura de operación, lo cual puede reducir la efectividad del catalizador a largo plazo. [59]

La composición ideal del gas de síntesis es una relación molar H_2/CO de alrededor de 2 para maximizar la producción de metanol y minimizar la formación de subproductos. [59]

4.1.3 Purificación del metanol

La tercera y última etapa implica la purificación del metanol producido. Este proceso se lleva a cabo mediante destilación, eliminando impurezas y alcanzando la concentración deseada de metanol. La destilación puede involucrar múltiples columnas para lograr un metanol de alta pureza. [59]

1. Destilación: el proceso de destilación del metanol comienza con la obtención de metanol crudo, una mezcla líquida que contiene metanol, agua, etanol, acetona y otras impurezas. El primer paso en la purificación es la destilación *flash*, que puede alcanzar una pureza de metanol del 96%. A continuación, se utilizan varias columnas de destilación. La primera columna, conocida como estabilizadora, remueve gases disueltos y productos ligeros como dimetil éter y cetonas. Las columnas subsiguientes separan el metanol del agua y los alcoholes pesados. En plantas de gran capacidad, se pueden utilizar hasta cuatro columnas para maximizar la pureza del metanol. Finalmente, se obtiene metanol grado AA, con una pureza del 99.85%, típicamente mediante el uso de dos o tres columnas de destilación. [59]
2. Especificaciones de metanol: el metanol grado AA se utiliza en aplicaciones industriales que requieren metanol de alta pureza, mientras que el metanol grado combustible se utiliza como componente en mezclas de gasolina, con especificaciones menos estrictas respecto al contenido de agua y otros compuestos. [59]

| Parámetro | Metanol de grado AA | Metanol de combustible |
|------------------------|---------------------|------------------------|
| Pureza (%) | 99.85 | no especificado |
| Acidez (ppm) máx.. | 30 | no especificado |
| Acetona (ppm) máx.. | 20 | no especificado |
| Etanol (ppm) máx.. | 10 | no limitado |
| Agua (ppm) máx.. | 1000 | 500 |
| No volátiles (mg/L) | 100 | no limitado |
| Densidad a 20°C (g/mL) | 0.7928 | 0.7928 |

Tabla 6: Propiedades del metanol. [59]

4.2 Metanol verde

Actualmente, la producción global de metanol asciende a 100 millones de toneladas anuales, de las cuales solo el 0.2% proviene de fuentes renovables. Esto significa que prácticamente toda la producción de metanol, el 99.8%, se basa en combustibles fósiles, principalmente gas natural. Este hecho resalta la dependencia significativa de la industria química en recursos no renovables y su contribución a las emisiones de carbono. [60]

El proyecto en cuestión tiene como objetivo transformar esta realidad mediante la producción de metanol verde, es decir, metanol generado a partir de fuentes renovables. Este enfoque no solo busca reducir la dependencia de combustibles fósiles sino también disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la producción de metanol. La producción de metanol verde puede involucrar diversas tecnologías, incluyendo el uso de biomasa, residuos agrícolas, dióxido de carbono capturado y energía renovable, como la solar o eólica, para generar el hidrógeno necesario para el proceso.

Este proyecto se enmarca en una iniciativa más amplia de la Unión Europea para descarbonizar la economía. El objetivo final es alcanzar la neutralidad climática antes del año 2050, lo que significa que las emisiones netas de carbono serían nulas. [61]

La producción de metanol verde representa un paso importante en esta dirección. Al cambiar la fuente de materia prima de combustibles fósiles a recursos renovables, no solo se reduce la emisión directa de carbono, sino que también se promueve el desarrollo de tecnologías sostenibles y la economía circular. Además, el metanol verde puede servir como un componente crucial en la fabricación de productos químicos, combustibles y materiales plásticos, proporcionando una alternativa más ecológica a los métodos de producción tradicionales.

En resumen, mientras que la producción actual de metanol está dominada por el uso de gas natural, el proyecto de producción de metanol verde busca cambiar esta dinámica. Utilizando fuentes renovables, el proyecto no solo contribuirá a la reducción de emisiones de carbono, sino que también apoyará los objetivos climáticos de la Unión Europea, encaminándose hacia una economía más sostenible y climáticamente neutral para el 2050. A continuación, se hará una explicación sobre la producción del metanol verde, habiendo dos tipos: biometanol y e-metanol.

4.2.1 Biometanol

El biometanol se utiliza en motores de combustión interna de encendido por chispa. En países como Canadá, Brasil, Estados Unidos y China, la venta de gasolina pura está restringida y se ofrecen mezclas que contienen 10%, 15%, 85% y hasta 100% de metanol combinado con gasolina. El biometanol se produce a partir del método de gasificación de fuentes sostenibles de biomasa. [62]

La biomasa, un recurso de origen natural, posee un gran potencial para la producción de combustibles, servicios y compuestos químicos de alto valor añadido, todo ello bajo condiciones sostenibles. Este recurso puede ser transformado mediante procesos biológicos o termoquímicos, dependiendo de la aplicación deseada. En la última década, se ha observado un significativo aumento en la producción mundial de gas de síntesis obtenido a través de la gasificación de la biomasa. Este crecimiento refleja el interés de las corporaciones energéticas en la producción de combustibles alternativos basados en recursos renovables, tales como el biometano, el diésel sintético (Fischer-Tropsch diésel), el etanol y el metanol. [63]

Recolección y preparación de la biomasa

Para producir biometanol, la principal materia prima es, por ejemplo, restos ganaderos, agrícolas y forestales y residuos urbanos, es decir, residuos reutilizables. Sin embargo, la principal materia que se utiliza para generar biomasa es la madera, que puede crear bioenergía desde los propios restos de la madera, serrín, palillos, aglomerados, pellets y palés.

Una vez ya recolectada la materia prima, es esencial la preparación de esta: el secado y la trituration de la biomasa. El principal desafío que presentan este tipo de biomasa es su alto contenido de humedad, lo cual disminuye significativamente su poder calorífico y, por ende, su capacidad energética. Para aumentar este poder calorífico, es esencial reducir el contenido de humedad de la biomasa. La mejor solución para lograr esto es el secado, que no solo incrementa el poder calorífico, sino que también estabiliza el producto, facilitando su almacenamiento. A continuación, se explicará dos tipos de secaderos que emplea una empresa llamada "GRUPO VENTO". [64]

- **Tipos de Secaderos**

1. Secadero Directo:

El objetivo principal es el uso de gases de combustión de una unidad de cogeneración o de la propia cámara de combustión del secadero. Existe un contacto directo entre los gases de combustión y el producto húmedo. Para comenzar, el producto a secar se introduce junto con los gases de combustión en corrientes paralelas. El aire de secado a mayor temperatura está en contacto con el producto cuando este tiene la mayor cantidad de humedad, minimizando el impacto térmico. La biomasa se desplaza a través del secadero mediante el movimiento de rotación, eliminando la cantidad de agua requerida. El diseño interior del secadero, con palas que cizallan constantemente el producto, evita la formación de bolas y permite un secado uniforme y eficiente. [64]

2. Secadero Indirecto:

El funcionamiento es el uso de vapor o agua sobrecalentada (ASC) como fuente calorífica, sin contacto directo entre el vapor y el producto a secar. Estas fuentes de calor suelen proceder de procesos de cogeneración eléctrica. Para empezar, el secadero incorpora tubos de circulación de vapor. El producto se desplaza a lo largo del secadero en un movimiento de translación a través del intersticio de los tubos de vapor. La unidad de secado dispone de un cuadro eléctrico para regular la velocidad de giro del secadero y monitorear parámetros de presión y temperatura tanto en los tubos de vapor como en el producto.

Por otro lado, la trituración de biomasa es un proceso esencial para optimizar el uso de materiales orgánicos en la producción de energía. Este proceso reduce el tamaño de la biomasa, facilitando su manejo, transporte y eficiencia en la combustión. Existen diversos tipos de equipos de trituración, como trituradoras de martillos, cuchillas, rodillos y rotor, cada uno adecuado para diferentes tipos de biomasa y requisitos de procesamiento. La elección adecuada y el mantenimiento de estos equipos son cruciales para maximizar la producción de biocombustibles y otros derivados de la biomasa. [65]

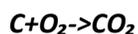
Gasificación de biomasa

La gasificación es un proceso de combustión en una atmósfera con bajo contenido de oxígeno, que produce una corriente de gas y un residuo sólido con propiedades combustibles. Este proceso abarca varios fenómenos, incluyendo el secado, la descomposición térmica o pirólisis, la combustión parcial, el craqueo de gases, vapores y alquitranes, y la gasificación de los productos finales. Un esquema típico de gasificación consta de un gasificador, un sistema de limpieza de gases y una aplicación final, que puede incluir quemadores directos, turbinas o la síntesis de Fischer-Tropsch¹⁷. [66]

¹⁷ Proceso químico para la producción de hidrocarburos líquidos a partir de gas síntesis.

La biomasa preparada se introduce en un gasificador, donde se somete a altas temperaturas (700-1400°C) en un ambiente controlado con cantidad limitada de oxígeno. Este proceso está compuesto por diversas etapas: [66]

1. Pirólisis: La biomasa se descompone térmicamente, produciendo gases volátiles, alquitrán y carbón vegetal. Durante este proceso, se produce un gas de síntesis (conocido como syngas) a partir de los compuestos volátiles, el cual generalmente se dirige a una cámara de combustión para su oxidación. Además, se genera un residuo sólido denominado "char", que está enriquecido en carbono. [66]
2. Oxidación parcial: Parte del carbón reacciona con oxígeno, produciendo calor, CO₂ y CO. [66]

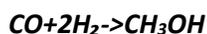


3. Gasificación: el carbón restante reacciona con vapor de agua o CO₂, produciendo gas de síntesis (syngas), compuesto por H₂ y CO. [66]



Síntesis de Metanol

Proceso catalítico a partir de monóxido de carbono e hidrógeno. Los catalizadores empleados suelen ser de cobre, zinc y aluminio. Actualmente, la síntesis de metanol se hace a partir de un reactor.



Purificación del Metanol

Al igual que el anterior método, se necesita hacer una purificación de las reacciones anteriores. El método que se emplea a la hora de purificar el metanol es la destilación *flash* - no se explicará este método debido a que ya está desarrollado previamente (*Subapartado 4.1.3*) -. El producto final es el metanol grado AA siendo su pureza del 99.85%, adecuado para aplicaciones industriales y combustibles.

4.2.2 E-metanol

La producción de e-metanol a partir de hidrógeno verde está ganando relevancia en la industria de biocombustibles como una tecnología emergente. Este proceso implica la electrólisis del agua, una técnica que usa electricidad para dividir el agua en oxígeno e hidrógeno. El hidrógeno resultante se mezcla con dióxido de carbono para crear metanol. Este enfoque es sostenible porque emplea energía renovable para la generación de hidrógeno y reutiliza el CO₂, contribuyendo a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. A continuación, se explicará con más detalle la producción de este tipo de metanol.

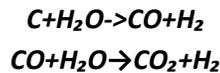
Captura de CO₂

La captura de carbono se basa en la retención del carbono durante las operaciones que normalmente lo liberaran. En otras palabras, se captura el carbono justo cuando estaría a punto de emitirse a la atmósfera. Lo más notable de este proceso es que no solo reduce la emisión de CO₂, sino que también permite almacenarlo de manera segura y sostenible, e incluso reutilizarlo. En este caso, para la producción de e-metanol.

El dióxido de carbono puede ser capturado de plantas industriales o directamente del aire (DAC). Por consiguiente, es necesario una serie de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CCS) o captura directa del aire. Hoy en día, se está impulsando la Bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (BECCS) que es una tecnología que combina la generación de energía a partir de biomasa con la captura y almacenamiento de CO₂, eliminándolo de la atmósfera. Esto la convierte en una tecnología de emisiones negativas, capaz de generar energía mientras reduce el CO₂ atmosférico. BECCS emplea diversas tecnologías como la oxidación, precombustión y postcombustión para capturar CO₂ de procesos industriales. [67]

1. Precombustión:

La biomasa se gasifica para producir gas síntesis (CO y H₂), y después, el CO se convierte en CO₂ mediante una reacción de cambio agua-gas. [67]



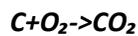
El CO₂ se separa del hidrógeno y se captura antes de la combustión del H₂.

2. Postcombustión:

El CO₂ se captura después de la combustión usando solventes químicos.[67]

3. Oxidación:

La biomasa se quema en presencia de oxígeno puro, produciendo una corriente de gases de combustión rica en CO₂ y vapor de agua. [67]



Producción del hidrógeno verde

Puesto que este proceso ya está previamente explicado (*apartado 3.3.1*), se hará una breve mención que se usará electricidad generada a partir de fuentes renovables (solar, eólica o hidroeléctrica) para poder emplear el proceso de electrólisis del agua que consiste en la división del oxígeno e hidrógeno.

Síntesis de metanol:

El CO₂ capturado y el hidrógeno verde producido se combinan en un reactor en presencia de catalizador (generalmente de cobre-zinc) para generar metanol. Se almacena en tanques a temperatura ambiente.



La producción de e-metanol es actualmente más costosa que la del metanol tradicional debido al costo de la captura de CO₂ y la producción de hidrógeno verde. Asimismo, el proceso de electrólisis requiere una gran cantidad de energía. La eficiencia del proceso debe mejorarse para que sea competitivo.

En la *Figura 23*, se puede observar la planta de metanol diseñada por Iberdrola en la localidad gallega de Caldas de Reis, a 12 kilómetros del parque eólico Castro Valente con el que posee un acuerdo de suministro energético. [68]

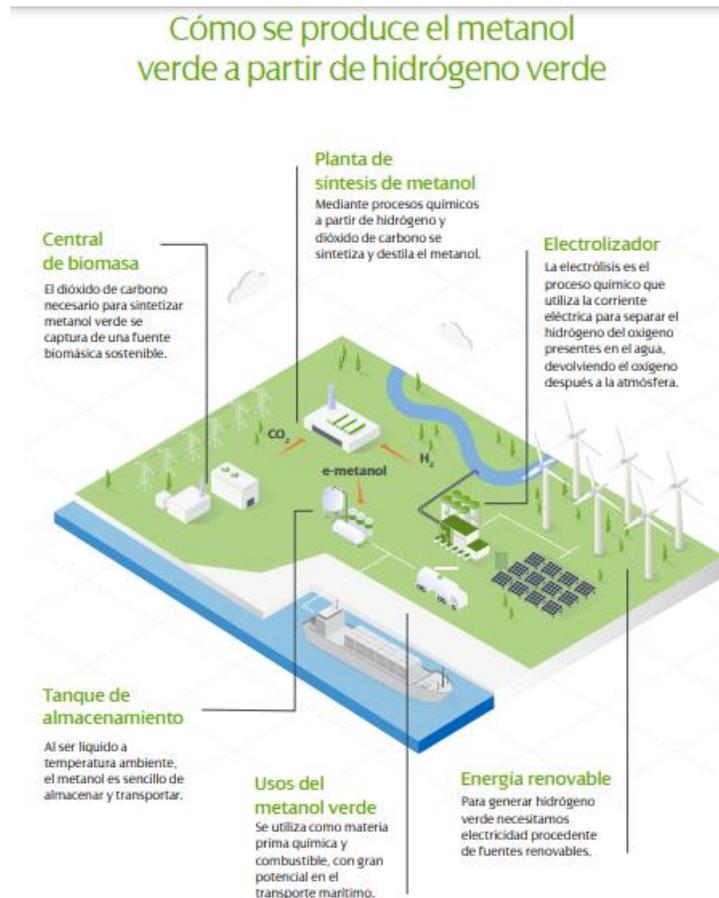


Figura 23: Planta de e-metanol. [68]

5. Almacenamiento y transporte

5.1 Almacenamiento

El almacenamiento de metanol debe cumplir con disposiciones similares a las de la gasolina. Por lo general, se utiliza en zonas de tanques que consisten en tanques exteriores con techos flotantes y tanques menores flotantes con deflectores internos. [4]

Debido a que el metanol se almacena comúnmente junto con otros disolventes y materias primas, todas las tuberías y válvulas en contacto con metanol deben estar claramente etiquetadas e indicar el sentido del flujo. Los materiales de almacenamiento, incluidas las cajas y los barriles, requieren bermas y ventilación adecuada. Las bermas deben estabilizarse mediante compactación, usando una tela adecuada resistente al metanol o con hormigón. [4]

El metanol arde con una llama no luminiscente que puede ser invisible a la luz solar. Por lo tanto, el personal de respuesta debe estar equipado con dispositivos infrarrojos para la detección de calor y temperatura relativa. Idealmente, esta capacidad debe estar disponible en el aire con un helicóptero de respuesta de emergencia. [4]

5.1.1 Tanques de almacenamiento

Los tanques deben de ser construidos de acero al carbono o acero inoxidable para asegurar la resistencia a la corrosión y la durabilidad. Por otro lado, deben tener un diseño muy meticuloso para así evitar problemas en un futuro. A continuación, se explicarán las distintas características que deben de tener todos los dispositivos de almacenamiento de metanol: [4]

- Los tanques deben de estar cerrados para minimizar la evaporación del metanol y evitar la entrada de los contaminantes. El no tener cerrados estos tanques puede suponer distintos problemas:
 1. La evaporación y contaminación del metanol significa una pérdida directa del producto almacenado, por lo tanto, se perdería la pureza y calidad del metanol.
 2. Supondría una contaminación directa del aire (libera COVs) al ambiente y provoca reacciones no deseadas, aumentaría riesgos de salud, seguridad (inhalación de vapores del metanol) e impacto medioambiental.
 3. La entrada de contaminantes, especialmente de aquellos que contienen humedad o químicos corrosivos, puede acelerar la corrosión de los tanques de almacenamiento, reduciendo su vida útil.
 4. La presencia de contaminantes puede requerir paradas no programadas en la producción de limpieza y descontaminación de sistemas.

- Como se ha mencionado previamente, los tanques deben de poseer techos flotantes internos para reducir emisiones de vapor y evitar la contaminación del contenido del tanque. Este diseño permite que el techo se ajuste al nivel del líquido, reduciendo el espacio de vapor. No obstante, la construcción de estos tanques es más costosa puesto que los materiales y la precisión requerida es indispensable para asegurar que el techo flotante funcione correctamente. Adicionalmente, estos ayudan a disminuir los riesgos de fuga e impacto ambiental, además de que el almacenamiento del metanol está sujeto a regulaciones ambientales y de seguridad estrictas. [4], [69]
- En tanques menores, los deflectores internos ayudan a controlar la inflamabilidad y mejoran la seguridad de almacenamiento. Estos, ayudan a reducir la turbulencia de los tanques y, por ende, disminuyen la evaporación de vapores inflamables. Asimismo, previenen explosiones y ayudan a estabilizar los tanques. [4]

Otra prevención para tomar y que se ha mencionado previamente, es el equipamiento de sistemas de ventilación adecuados para liberar los vapores de metanol de manera controlada, evitando acumulaciones peligrosas. Además, la implementación de sistemas pasivos puede ser empleada para desplazar el oxígeno y reducir el riesgo de inflamación. Estos dos métodos de almacenamiento tienen un gran costo económico dado a que cada instalación posee un diseño en concreto por lo que no se puede plantear un sistema general, además, requieren equipos especializados. Adicionalmente, se requiere un mantenimiento regular e inspecciones periódicas para comprobar que todo funciona correctamente. [4], [69]

5.1.2 Sistemas de seguridad

En el *Capítulo 2*, se ha explicado las medidas de prevención a tomar y los modos de operación, habiendo dos (rutinarios y de emergencia). En este subapartado, se tratará el tema de los sistemas de seguridad a emplear a la hora de almacenar metanol. [70]

1. Detección de fugas: El sistema de almacenamiento debe de contener sistemas de monitoreo (sensores y alarmas) que sean capaces de detectar fugas. Estos sistemas deben estar calibrados regularmente para asegurar su eficacia. Asimismo, debe de haber inspecciones periódicas para detectar posibles puntos de fuga y repararlos de inmediato. Este mantenimiento requiere altos costos y personal capacitado para que puedan realizar las inspecciones de manera eficiente y segura. [70]
2. Control de derrames: Para su control, es necesario cubetos de retención, siendo su función la prevención de derrames accidentales al recolectar sustancias contaminantes si los contenedores que las almacenan se agrietan, fallan o experimentan algún problema que provoque la pérdida del producto almacenado. El material de estos cubetos suele ser el hormigón. Este material es resistente al metanol y tiene una larga vida útil. Por otra parte, la disponibilidad de materiales absorbentes es esencial para manejar derrames menores rápidamente y evitar la propagación de metanol. [70]

3. Prevención de incendios: Deben de estar disponibles extintores adecuados para líquidos inflamables (clase B) en las proximidades de las áreas de almacenamiento. Adicionalmente, es necesario la instalación de sistemas de rociadores automáticos en áreas de almacenamiento que ayudan a controlar incendios rápidamente en caso de emergencia. [70]

5.1.3 Electricidad estática

La electricidad estática en un tanque es una acumulación de carga eléctrica que permanece inmóvil en su superficie. Esto puede ocurrir cuando se llenan o vacían líquidos, ya que el movimiento de los líquidos puede generar fricción entre el tanque y el líquido, resultando en un desequilibrio de electrones. Este desequilibrio provoca que el tanque o el líquido adquieran una carga eléctrica. Aunque las cargas inicialmente están estáticas, pueden descargarse repentinamente al encontrar un conductor, lo que podría causar chispas. Este fenómeno es especialmente preocupante en tanques que contienen metanol, ya que las chispas pueden provocar incendios o explosiones. Para prevenirlo, se utilizan métodos de conexión a tierra y otros sistemas de control de electricidad estática.

- Conexión a tierra:

Todos los tanques, tuberías y equipos deben estar conectados a tierra para evitar la acumulación de cargas de electricidad estática, que podrían provocar chispas y, en consecuencia, incendios. Es esencial seguir procedimientos estrictos para asegurar que todos los componentes del sistema estén debidamente conectados a tierra antes de la operación. [4], [69]

- Protección adicional:

Uso de dispositivos antiestáticos y procedimientos de descarga segura durante la manipulación y transferencia del metanol para minimizar el riesgo de inflamación accidental. Por ejemplo, un dispositivo antiestático es un aparato que reduce, amortigua o inhibe la descarga electrostática. Este tipo de dispositivos controla el aumento o la descarga de electricidad estática.[4], [69]

5.1.4 Procedimientos operacionales

Se hace una breve mención a los procedimientos de operaciones debido a que en el *Capítulo 2* ya se ha hecho una más detallada explicación sobre esto. Se deben hacer mantenimientos regulares (inspecciones y reparaciones) y entrenamientos del personal para capacitarlos en el manejo del metanol.

5.1.5 Ubicación y acceso

En refinерías y plantas de procesos químicos, las zonas de tanques suelen tener sistemas especiales para almacenamiento y manipulación de metanol, con tuberías y tanques generalmente sobre la superficie. Los tanques de almacenamiento deben ubicarse en áreas alejadas de edificios ocupados y otras instalaciones para minimizar el riesgo de fuga o incendio. Se necesita la implementación de barreras físicas y perímetros de seguridad para restringir el acceso no autorizado. [69]

Especificaciones

Se requiere diversas especificaciones a la hora de almacenar los tanques:

- Las calles que rodean las áreas de almacenamiento de tanques deben tener un mínimo de ancho de 7 metros. [69]
- Todos los tanques de almacenamiento deben contar con diques de contención para controlar posibles derrames. [69]
- Las válvulas en registros deben tener extensiones que permitan su operación a una altura de 0.90 m desde el nivel del piso terminado, incluyendo la válvula de interconexión. [69]
- La protección contra incendios debe incluir, como mínimo, sistemas de espuma y agua. Si el estudio de riesgos indica la necesidad de requisitos adicionales debido a la naturaleza del producto almacenado o las características del tanque, estos deben incorporarse en el diseño. [69]

| Capacidad de los tanques | Acceso |
|---|---|
| < 8,745 m ³ | 1 acceso vehicular en el lado de la espuma (protección contra incendios). |
| 8,745 m ³ - 15,900 m ³ | 2 accesos vehiculares. |
| 15,900 m ³ - 31,800 m ³ | 3 accesos vehiculares. |
| >31,800 m ³ | Accesos vehiculares en todos sus lados. |

Tabla 7: Cantidad de accesos en función de la capacidad de los tanques. [69]

Se debe de implementar un control de acceso para asegurar que solo el personal autorizado pueda acceder a las áreas de almacenamiento de metanol. [69]

5.1.6 Contenedores portátiles

Este tipo de contenedores requiere precauciones adicionales debido al mayor riesgo de contacto directo. Para poder seleccionar adecuadamente el contenedor, se debe consultar con los proveedores, además, ellos enseñaran métodos de contención adecuados y establecer medidas de respuesta para derrames. [69]

Se desarrollarán procedimientos específicos para la manipulación segura y respuesta a emergencias en el uso de contenedores portátiles.

La mayoría de los lugares en los que se almacena el metanol es en los muelles y terminales marítimos, así están próximos los tanques para el futuro transporte. Actualmente, Cepsa y Evos han firmado un acuerdo para el almacenamiento de metanol verde en los puertos de Algeciras y Rotterdam.

5.2 Transporte

El transporte de metanol requiere medidas específicas de seguridad debido a su alta inflamabilidad y toxicidad. La utilización de equipos adecuados, la implementación de procedimientos estrictos de seguridad y el cumplimiento de regulaciones internacionales y locales son esenciales para minimizar riesgos y garantizar la seguridad y eficiencia en el manejo del metanol. La formación continua del personal y el mantenimiento regular de los sistemas de transporte son fundamentales para asegurar un transporte seguro y confiable.

El metanol se transporta principalmente mediante 3 vías: transoceánico, por ferrocarril y con camiones cisterna. Sin embargo, el transporte transoceánico de metanol es preferible debido a su capacidad para manejar grandes volúmenes, eficiencia de costos, altos estándares de seguridad, flexibilidad en la entrega y menor impacto ambiental. Estas ventajas hacen que el transporte marítimo sea una opción superior para la distribución global de metanol, permitiendo satisfacer la demanda en diversos mercados de manera eficiente y segura.

5.2.1 Transporte transoceánico

El transporte marítimo es el método más comúnmente utilizado para el comercio global del petróleo. La capacidad de los buques varía según su tamaño, el servicio que brindan y la ruta que cubren, usualmente transportando cientos de miles de barriles. [69]

El transporte transoceánico del metanol es similar al de otros hidrocarburos líquidos como el petróleo crudo, la gasolina, el diésel y los aditivos de combustible como el MTBE. Los transportistas suelen utilizar buques, una práctica que probablemente se convertirá en estándar a medida que aumente la producción mundial. [69]

TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO EN FORMA DE METANOL

El metanol se transfiere desde tanques de almacenamiento en el muelle hasta las bodegas selladas de los buques tanque. Esta transferencia hacia los tanques en los muelles puede realizarse mediante tuberías, barcasas, ferrocarriles o camiones.

Es fundamental evitar derrames accidentales de metanol en el océano, aunque estos representan un riesgo menor para el medio ambiente comparado con otros materiales como el petróleo crudo, el combustible para calderas, la gasolina o el diésel. El metanol puro (100%) se disuelve rápida y completamente en el agua. Esta dilución reduce la concentración de metanol a niveles no tóxicos para la vida marina en distancias menores a 1.5 kilómetros, incluso en casos de grandes fugas catastróficas. [69]

Para las operaciones de carga y descarga, es necesario que los equipos deben estar conectados a tierra para evitar la acumulación de electricidad estática. Adicionalmente, se usan dispositivos antiestáticos y seguimiento de procedimientos rigurosos para la transferencia segura del metanol entre el buque y las instalaciones de almacenamiento. [69]

Buques cisterna

El tipo de buque que es usado principalmente para el transporte de metanol es el buque cisterna que es una embarcación diseñada específicamente para el transporte o almacenamiento de líquidos o gases a granel. El transporte de metanol en barcos cisterna requiere estrictas medidas de limpieza para evitar su contaminación, y sistemas específicos para la detección de fugas y combate de incendios, incluyendo espumas resistentes al alcohol. Las bombas, tuberías y mangueras deben ser las adecuadas para el metanol. La operación de carga puede durar entre 12 horas y dos días, con la participación de diversas autoridades y especialistas. [69]

Los barcos que transportan metanol deben tener una estructura más resistente para soportar las fuerzas y cargas, tanques estancos para evitar mezclas explosivas, y sistemas de ventilación para expulsar los vapores. Además, deben manejar la variación de volumen de la carga con la temperatura para evitar riesgos de estabilidad y explosión. [69]

Dentro de los buques cisterna, están los buques quimiqueros, estos deben cumplir con regulaciones internacionales, como el Convenio MARPOL (más adelante se detallarán algunas de estas regulaciones). Los tanques deben ser de acero inoxidable o estar revestidos para prevenir la corrosión.

Por otro lado, deben de estar equipados con sistemas avanzados de monitoreo de fugas, inertización para evitar la acumulación de vapores inflamables y procedimientos de emergencia. También deben tener sistemas de conexión a tierra y protección contra descargas estáticas. [69]



Figura 24: Buque Cisterna. [71]

Regulaciones de transporte (ambientales)

El transporte de metanol, una sustancia peligrosa, requiere de estrictas normativas y medidas de seguridad para el transporte transoceánico. Aquí se presenta un resumen detallado de los procedimientos y normativas aplicables en España.

1. Código IMDG (Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas): Regula el transporte de mercancías peligrosas por vía marítima a nivel mundial. Requisitos: Incluye normas sobre el embalaje, etiquetado, documentación, formación de la tripulación y equipamiento de los buques. Los contenedores deben estar claramente etiquetados con símbolos de peligro y la identificación del producto. Información en las etiquetas: Deben incluir el número de identificación de la sustancia, la clase de peligro, y los pictogramas correspondientes. Asimismo, la tripulación debe estar certificada en el manejo y transporte de mercancías peligrosas. [72]
2. Convenio SOLAS (Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar): Es un tratado internacional clave para la seguridad marítima, también es aplicable al transporte de mercancías peligrosas. Establece normas mínimas para: [73]
 - Construcción y diseño de buques: Normas sobre estructura, integridad del casco y estabilidad. [73]
 - Equipamiento de seguridad: Incluye equipos de salvamento, sistemas de detección y extinción de incendios. [73]
 - Operación y gestión: Procedimientos seguros y capacitación de la tripulación. [73]
 - Medidas de seguridad: Sistemas de comunicación y navegación, gestión de carga y estabilidad. [73]

El objetivo principal de SOLAS es proteger la vida de las personas en el mar. La convención se actualiza regularmente para incluir mejoras tecnológicas y nuevas lecciones aprendidas. [73]

3. Convención internacional para la prevención de la contaminación por los buques (MARPOL): es un tratado internacional que busca minimizar la contaminación de los océanos y mares por los buques. En relación con los hidrocarburos (metanol), el MARPOL incluye disposiciones específicas en su Anexo I. [26]

El Anexo I de MARPOL establece medidas para prevenir y minimizar la contaminación por hidrocarburos provenientes de los buques. Este anexo se centra en la prevención de la contaminación operativa y la gestión de derrames accidentales. [26]

- **Disposiciones Generales:** 1) Aplicabilidad: El Anexo I se aplica a todos los buques de más de 400 toneladas brutas y a todos los petroleros de más de 150 toneladas brutas; 2) Certificación: Los buques deben contar con un Certificado Internacional de Prevención de la Contaminación por Hidrocarburos, que certifica su conformidad con las disposiciones del anexo. [26]
- **Requisitos de Construcción y Equipamiento:** 1) Separación de tanques: Los petroleros deben tener tanques segregados para evitar la mezcla de carga de hidrocarburos con el agua de lastre; 2) Sistemas de detección de hidrocarburos: Instalación de sistemas para detectar y medir la concentración de hidrocarburos en el agua de lastre y otros líquidos de desecho. [26]
- **Control de Descargas Operativas:** 1) Límites de descarga: Establece límites estrictos para la descarga de hidrocarburos en el mar. Las descargas sólo pueden realizarse si la concentración de hidrocarburos en el agua de lastre es inferior a 15 partes por millón (ppm); 2) Equipos de filtración: Los buques deben estar equipados con separadores de agua de sentina y alarmas de hidrocarburos para asegurar que las descargas cumplan con los límites establecidos. [26]
- **Planes y Procedimientos de Emergencia:** 1) Plan de emergencia a bordo: Los buques deben contar con un Plan de Emergencia para Derrames de Hidrocarburos, que detalle los procedimientos a seguir en caso de un derrame; 2) Capacitación de la tripulación: La tripulación debe recibir capacitación regular sobre los procedimientos de emergencia y el uso de equipos de respuesta.
- **Informes y Registro:** 1) Libro registro de hidrocarburos: Los buques deben mantener un registro detallado de todas las operaciones relacionadas con los hidrocarburos, incluyendo carga, descarga, y eliminación de residuos. [26]
- **Inspecciones y Cumplimiento:** 1) Inspecciones del estado del puerto: Las autoridades de los países miembros pueden inspeccionar los buques que entran en sus puertos para asegurar que cumplan con las disposiciones de MARPOL; 2) Sanciones: Los incumplimientos pueden resultar en sanciones que varían según las legislaciones nacionales de los países miembros. [26]

Por otra parte, se deben realizar auditorías periódicas y obtener certificaciones para asegurar que los buques y las operaciones de transporte cumplan con todas las regulaciones internacionales y locales. [26]

5.2.2 Transporte con camiones cisterna

El camión cisterna es un tipo de vehículo diseñado para transportar una amplia gama de líquidos, como agua, combustibles y productos químicos, o para almacenarlos durante periodos prolongados, dependiendo de sus características específicas. Este es el tipo de transporte es el menos común dado a varios motivos principales. Para empezar, tienen una capacidad de carga inferior en comparación con los buques y los trenes, por lo tanto, la cantidad a transportar solo se puede en una operación (se requieren más viajes para transportar la misma cantidad que un buque o un tren). Adicionalmente, el costo por tonelada de metanol transportado es generalmente más alto debido a su menor capacidad de carga y a los costos operativos elevados (combustible y mantenimiento del vehículo). Por otra parte, el impacto ambiental es generalmente mayor puesto que contribuyen a la contaminación del aire en áreas urbanas y suburbanas, lo que puede tener impactos negativos en la salud pública y el medio ambiente. [74]

El material principal de estos camiones es el acero al carbono o acero inoxidable para resistir la corrosión y asegurar la pureza del metanol. Sus características principales de este tipo de camiones son:

1. Rótulos de identificación: Al igual que en los buques, el vehículo debe de indicar claramente que la unidad de transporte contiene sustancias químicas peligrosas. [69]
2. Placa de identificación de la ONU: Facilitar la identificación de las sustancias peligrosas transportadas mediante el número "UN" asignado por el comité de expertos en transporte de sustancias químicas peligrosas de la ONU. [69]
3. Equipo de carretera: Gato, cruceta, señales reflectivas, botiquín de primeros auxilios, extintores, tacos, caja de herramientas, kit de derrame, llanta de repuesto y linterna. [69]
4. Equipos para atención a emergencias: Mínimo dos extintores portátiles, ubicados estratégicamente para acceso rápido. [69]
5. Carta de Porte y Hoja de seguridad: Debe de incluir información detallada sobre la sustancia transportada, el remitente, el destinatario y las medidas de emergencia. [69]

Normativas y regulaciones

Al igual que en el transporte transoceánico, el terrestre está estrictamente regulado por diversas normativas y directrices europeas y nacionales para garantizar su manipulación segura.

1. ADR (Acuerdo Europeo sobre el Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas por Carretera): es el marco legal principal para el transporte de mercancías peligrosas en Europa, incluyendo España (regulaciones: embalaje, etiquetado, documentación, formación de conductores, y equipamiento de los vehículos). [75]
2. Real Decreto 97/100: Establece las normativas para el transporte de mercancías peligrosas en España, en línea con el ADR. [76]

5.2.3 Transporte ferroviario

Este modo de transporte es muy útil para transporte de mercancías peligrosas, no obstante, es vital seguir estrictas medidas de seguridad, incluyendo la conexión a tierra, el uso de vagones cisterna especializados, y la preparación adecuada para emergencias. La correcta implementación de estos procedimientos minimiza los riesgos de accidentes graves, como incendios y explosiones, y asegura la protección de las personas y el medio ambiente.

Vagones Cisterna Especializados

Los vagones cisterna utilizados para transportar estas sustancias están especialmente diseñados. Están equipados con dispositivos para aliviar la presión, lo que les permite adaptarse a la expansión térmica que puede ocurrir durante el tránsito y el almacenamiento temporal, que no debe exceder los 30 días, durante las maniobras y tiempos de retención. Estos vagones están configurados para transportar metanol de manera segura siempre que se mantenga dentro de un vagón cisterna en posición vertical. [69]

En caso de un descarrilamiento, es esencial que los primeros en responder traten el metanol como una sustancia extremadamente inflamable y tóxica. Según la Guía de Respuesta en Caso de Emergencia 2008 (ERG2008), se debe establecer una zona de aislamiento inmediato de 50 metros en todas las direcciones. En situaciones de grandes fugas, pueden retroceder las llamas y son especialmente peligrosos si alcanzan alcantarillas o desagües. [69]

Por otra parte, si ocurre un derrame debido a un descarrilamiento u otra situación que comprometa la contención, la ERG2008 recomienda que los primeros en responder aislen la zona y consideren evacuar un radio de 800 metros alrededor del derrame para evitar explosiones. En contacto con llamas o altos flujos térmicos, los vagones cisterna de metanol corren el riesgo de sufrir una BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*), que implica una falla instantánea del tanque y una liberación catastrófica de vapor inflamado. Los primeros en responder deben usar ropa protectora contra sustancias químicas y equipos autónomos de respiración, ya que los trajes de bomberos estándar no son adecuados para manejar derrames de metanol debido a su contacto directo con la sustancia. [69]

Regulaciones

Estas son las principales normativas para el manejo de sustancias peligrosas, en este caso metanol. Estas son las dos principales:

1. RID (Reglamento relativo al Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas por Ferrocarril): Es el marco legal que regula el transporte de mercancías peligrosas por ferrocarril en Europa. Establece normas sobre el embalaje, etiquetado, documentación, formación de conductores y equipamiento de los vagones. Establece que los vagones deben de estar claramente etiquetados con símbolos de peligros y la identificación del producto, UN 1230 para el metanol. [77]

2. Reglamento de Circulación Ferroviaria: Regula la operación de trenes en el territorio nacional, incluyendo el transporte de mercancías peligrosas.

6. Presupuesto

El presente apartado detalla el presupuesto estimado para la realización del proyecto titulado "Transporte y almacenamiento de metanol en forma de hidrógeno". Este presupuesto incluye todos los costos directos e indirectos asociados con el desarrollo del informe, abarcando desde la adquisición de recursos materiales hasta el coste de la mano de obra involucrada.

El presupuesto se ha estructurado de manera que se puedan identificar claramente las diferentes partidas que han contribuido a la consecución del proyecto. Estas partidas incluyen el material inmovilizado, los materiales fungibles, el equipamiento técnico, el software utilizado, y la mano de obra. Cada una de estas categorías ha sido analizada para asegurar una estimación precisa y realista de los recursos necesarios.

La finalidad de este apartado es proporcionar una visión transparente y detallada de los costos incurridos, permitiendo así evaluar la viabilidad económica del proyecto y garantizar una correcta planificación financiera. Además, se pretende facilitar la toma de decisiones en futuros proyectos similares, proporcionando un marco de referencia basado en datos reales y bien documentados.

Este presupuesto se fundamenta en precios de mercado actuales y en una proyección razonable del tiempo y los recursos empleados, asegurando así su relevancia y aplicabilidad en contextos similares.

6.1 Presupuesto de Inmovilizado Material

Esta tabla incluye cualquier equipo especializado o herramientas físicas que he tenido que adquirir o alquilar para la realización del informe.

| Cantidad | Referencia | Descripción | Precio unitario (€) | Precio total (€) |
|----------|------------|--------------------|---------------------|------------------|
| 1 | 1 | Ordenador portátil | 800 | 800 |
| 1 | 2 | Impresora | 3.56 | 3.56 |

Tabla 8: Presupuesto del Inmovilizado.

6.2 Presupuesto de Material Fungible

Aquí se incluyen los materiales que se consumieron durante la realización del proyecto, como papel, tinta, etc.

| Cantidad | Referencia | Descripción | Precio unitario (€) | Precio total (€) |
|----------|------------|-------------|---------------------|------------------|
| 90 | 3 | Folios A4 | 0,01 | 0,9 |

Tabla 9: Presupuesto de Material Fungible.

6.3 Presupuesto de Equipamiento

Incluye el costo asociado al uso de maquinaria o equipamiento tecnológico.

| Equipamiento | Cuota de Adquisición (€) | Tiempo de Amortización (años) | Cuota Mensual (€) | Tiempo de Uso (meses) | Amortización (€) |
|--------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------|-----------------------|------------------|
| Computadora | 800 | 4 | 16,66666667 | 3 | 50 |

Tabla 10: Presupuesto de Equipamiento.

6.4 Presupuesto de Software

Aquí se consideran los costos del software utilizado durante el desarrollo del informe.

| Software | Cuota de Adquisición (€) | Tiempo de Amortización (años) | Cuota Mensual (€) | Tiempo de Uso (meses) | Amortización (€) |
|-----------|--------------------------|-------------------------------|-------------------|-----------------------|------------------|
| MS Office | 30 | 1 | 10 | 3 | 30 |

Tabla 11: Presupuesto de Software.

6.5 Presupuesto de Mano de Obra

Detalle del tiempo invertido y el costo correspondiente.

| Tarea | Duración (horas) | Precio Unitario (€) | Precio Total (€) |
|--------------------|------------------|---------------------|------------------|
| Investigación | 30 | 15 | 450 |
| Redacción | 45 | 15 | 675 |
| Revisión y edición | 10 | 15 | 150 |

Tabla 12: Presupuesto de mano de obra.

6.6 Presupuesto total

Este es un resumen global donde se detallan los costes en función de su tipo de presupuesto.

| Partida | Importe (€) |
|----------------------|--------------------|
| Inmovilizado | 803.56 |
| Materiales Fungibles | 0,9 |
| Equipamiento | 50 |
| Software | 30 |
| Mano de Obra | 1275 |
| Total | 2159.46 |

Tabla 13: Presupuesto total.

7. Conclusión

El metanol se presenta como una alternativa viable no solo para el transporte y almacenamiento de hidrógeno, sino también como combustible. Ambas soluciones contribuyen significativamente a la reducción de emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero. El uso del metanol como combustible ya está bien establecido en diversas industrias, como la marítima, debido a su capacidad para cumplir con estrictas normativas ambientales. Por otro lado, su papel como portador de hidrógeno es una solución emergente que ofrece una opción eficiente y segura para el manejo del hidrógeno, especialmente en aplicaciones donde el almacenamiento y transporte directo de hidrógeno presentan desafíos. De este modo, el metanol puede consolidarse como un componente clave en la transición hacia un sistema energético más limpio y sostenible.

Aunque el uso del metanol como combustible, es significativamente más ecológico que otros combustibles, sigue emitiendo un porcentaje (aunque es relativamente más bajo) de CO₂. Sin embargo, el uso del hidrógeno verde como combustible es una energía limpia que no contamina, por ello, es el objetivo principal para conseguir el propósito de *Net Zero*.

Una de las principales ventajas del uso de metanol como combustible, es su buena adaptación a la infraestructura existente debido a que puede ser integrado en motores de combustión interna con mínimas modificaciones. En comparación, su uso como portador de hidrógeno, aunque prometedor, aún enfrenta desafíos mayores en términos de desarrollo tecnológico y costos asociados. Sin embargo, ambos usos del metanol presentan oportunidades significativas para avanzar hacia una energía más limpia.

Una vez transportado el hidrógeno en forma de metanol, es necesario convertirlo a hidrógeno para poder usarlo como combustible, para ello, hay un proceso (mencionado en el *subapartado 3.3.2: Metanol como portador*) denominado reformado con vapor que está ampliamente empleado en la industria por tanto no se requiere una gran inversión y es un proceso muy eficiente y permite la conversión a hidrógeno in situ.

El plan REPowerEU tiene como objetivo dejar de depender de Rusia con respecto a los combustibles fósiles. Por tanto, la Unión Europea está intentando impulsar e invertir en el desarrollo de hidrógeno verde como combustible. Aunque el metanol como combustible requiere un coste mucho más bajo, la UE está priorizando inversiones en tecnologías que fomenten el uso del hidrógeno debido a su potencial como energía limpia a largo plazo. Dado que el hidrógeno es difícil de transportar y almacenar puesto que necesita condiciones extremas en términos de presión y temperatura, se están explorando todas las alternativas viables, incluyendo el metanol como un portador eficaz que podría facilitar la adopción del hidrógeno en la transición energética.

TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO EN FORMA DE METANOL

El metanol que puede derivarse de fuentes renovables representa una alternativa con costos de producción y almacenamiento relativamente bajos, el enfoque de la UE en el hidrógeno se debe a su capacidad para ofrecer una solución de cero emisiones en sectores difíciles de descarbonizar, como la industria pesada y el transporte de larga distancia. El hidrógeno verde, producido a partir de fuentes renovables como la energía eólica y solar, no emite CO₂ durante su producción y, por lo tanto, se alinea perfectamente con los objetivos de neutralidad climática de la UE para 2050. [79]

8. Bibliografía

- [1] Wikipedia, “Propiedades químicas.” [En línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Metanol> (consultado el 3 de junio de 2024).
- [2] *Engineering Toolbox*, “Methanol - Thermophysical Properties” [En línea]. Disponible en: https://www.engineeringtoolbox.com/methanol-methyl-alcohol-properties-CH3OH-d_2031.html
- [3] Servicio Andaluz de Salud, “Metanol (Alcohol Metílico) - Ficha de datos de seguridad”, 2007. Disponible en: https://www.sspa.juntadeandalucia.es/servicioandaluzdesalud/hrs3/fileadmin/user_upload/area_servicios_generales/prevencion_riesgoslaborales/fichas_seguridad/metanol.pdf
- [4] *Methanol Institute*, “Methanol safe handling manual”. Disponible en: https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2020/03/Safe-Handling-Manual_5th-Edition_Final.pdf
- [5] Chemical Safety Facts, “Metanol - Información sobre la seguridad química.” [En línea]. Disponible en: <https://es.chemicalsafetyfacts.org/chemicals/methanol>
- [6] OISS – Organización Iberoamericana de la Seguridad Social, “Refrigerantes - Anticongelantes”. Disponible en: <https://oiss.org/wp-content/uploads/2019/06/28-RefrigerantesMecanica.pdf>
- [7] Volkswagen de México (2023), “¿Qué es el anticongelante?” [En línea]. Disponible en: <https://www.vw.com.mx/es/experiencia/tips/para-que-sirve-anticongelante.html>
- [8] Organización Mundial de la Salud (2023), “Se publican los resultados de la evaluación del riesgo y la peligrosidad del aspartamo.” [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news/item/14-07-2023-aspartame-hazard-and-risk-assessment-results-released>
- [9] Soto, B. E. (2023) “Aspartamo: ¿Qué es y qué alimentos lo llevan?” . Disponible en: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/que-debes-saber-sobre-aspartamo_20349
- [10] Irena & *Methanol Institute*, “INNOVATION OUTLOOK - RENEWABLE METHANOL”, 2021. Disponible en: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jan/IRENA_Innovation_Renewable_Methanol_2021.pdf
- [11] Irena, “Primary chemical production in the Sustainable Development Scenario, 2000-2030” [En línea]. Disponible en: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jan/IRENA_Innovation_Renewable_Methanol_2021.pdf
- [12] *Methanol Market Services Asia* (15-may-2018), “Home”. [En línea]. Disponible en: <https://www.methanolmsa.com/>
- [13] *Methanol Institute* (16-oct-2019), “Renewable methanol”. [En línea]. Disponible en: <https://www.methanol.org/renewable/>
- [14] *Methanol*, “Renewable methanol capacities”. [En línea]. Disponible en: <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2024/05/RM-by-product-May-24-750x424.jpg>.
- [15] *MordorIntelligence*, “Mercado de metanol - Tendencias, análisis y perspectivas.” [En línea]. Disponible en: <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/methanol-market>.
- [16] AIMPLAS (02-oct-2023), “Metanol, el motor para alcanzar la transición energética”. [En línea]. Disponible en: <https://www.aimplas.es/blog/metanol-el-motor-para-alcanzar-la-transicion-energetica/>

- [17] Laurelin, “Laurelin” [En línea]. Disponible en: <https://laurelin.eu/>
- [18] L. Fernández (25-may-2024), “Metanol marítimo. Los costos son la piedra en el camino” [En línea]. Disponible en: <https://rm-forwarding.com/2024/05/25/metanol-maritimo-los-costos-son-la-piedra-en-el-camino/>
- [19] LM/Agencias (03-nov-2022), “Maersk quiere producir el 10% del hidrógeno verde para sus barcos en Galicia y Andalucía”. [En línea]. Disponible en: <https://www.libremercado.com/2022-11-03/maersk-quiere-producir-el-10-del-hidrogeno-verde-para-sus-barcos-en-galicia-y-andalucia-6950362/>
- [20] El Periódico de la Energía (10-ene-2024), “El metanol verde, clave para la descarbonización”. [En línea]. Disponible en: <https://elperiodicodelaenergia.com/metanol-verde-clave-descarbonizacion/>
- [21] Cepsa (01-oct-2024), “Cepsa y C2X convertirán al Puerto de Huelva en el principal hub de metanol verde de Europa”. [En línea]. Disponible en: <https://www.cepsa.com/es/prensa/el-puerto-de-huelva-sera-el-hub-de-metanol-verde-en-europa>
- [22] Methanex (23-ene-2023), “*Marine fuel*”. [En línea]. Disponible en: <https://www.methanex.com/about-methanol/marine-fuel/>
- [23] *Globalmaritimeforum*, “*Getting to Zero Coalition*”. [En línea]. Disponible en: <https://globalmaritimeforum.org/getting-to-zero-coalition/>
- [24] *European Innovation Council*, “*European innovation council*”. [En línea]. Disponible en: https://eic.ec.europa.eu/index_en
- [25] *Methanol Institute* (25-mar-2016), “*What is Methanol, its uses, energies*”. [En línea]. Disponible en: <https://www.methanol.org/>
- [26] OMI, “El sector se une para apoyar un transporte marítimo bajo en emisiones de carbono”. [En línea]. Disponible en: <https://www.imo.org/es/MediaCentre/PressBriefings/Paginas/17-GIA-GloMeep-launch.aspx>
- [27] *Global Maritime Forum*, “*Shaping the future of global seaborne trade*”. [En línea]. Disponible en: <https://globalmaritimeforum.org/>
- [28] *Sustainable Shipping*, “*Sustainable shipping – the sustainable shipping initiative*”. [En línea]. Disponible en: <https://www.sustainablesipping.org/>
- [29] *Sustainable Shipping*, “*Roadmap to a sustainable shipping industry*”. [En línea]. Disponible en: <https://www.sustainablesipping.org/roadmap/>
- [30] Boe, “BOE.es - DOUE-L-2023-81311 Reglamento (UE) 2023/1805 del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de septiembre de 2023 relativo al uso de combustibles renovables y combustibles hipocarbónicos en el transporte marítimo y por el que se modifica la Directiva 2009/16/CE,”. [Online]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2023-81311>
- [31] OMI, “Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques (MARPOL),” [Online]. Disponible en: [https://www.imo.org/es/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/es/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)
- [32] Autocasion. [En línea]. Disponible en: <https://www.autocasion.com/diccionario/motor-de-combustion-interna>
- [33] M. Softysik, K. Mucha-Kuś, y J. Kamiński, “*The new model of energy cluster management and functioning*”, *Energies*, vol. 15, núm. 18, p. 6748, 2022.

- [34] J. E. Garzón Baquero y D. Bellon Monsalve, “From fossil fuel energy to hydrogen energy: Transformation of fossil fuel energy economies into hydrogen economies through social entrepreneurship”, *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 54, pp. 574–585, 2024.
- [35] Enagas.es, “Request Rejected”. [En línea]. Disponible en: <https://goodnewenergy.enagas.es/innovadores/que-es-la-economia-del-hidrogeno/>
- [36] Centro Nacional del Hidrógeno (06-feb-2019), “Hidrógeno - Centro Nacional del Hidrógeno”. [En línea]. Disponible en: <https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/>
- [37] , Quimica.es, “Hidrógeno”. [En línea]. Disponible en: <https://www.quimica.es/enciclopedia/Hidr%C3%B3geno.html>
- [38] Cic Energigune “Métodos de producción de hidrógeno y sus colores”. [En línea]. Disponible en: <https://cicenergigune.com/es/blog/metodos-produccion-hidrogeno-colores>
- [39] Iberdrola. [En línea]. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/hidrogeno-verde/puertollano-planta-hidrogeno-verde>
- [40] *European Environment Agency* (16-ago-2021), “El transporte marítimo en la UE: el primer estudio sobre impacto ambiental reconoce los progresos realizados hasta la fecha hacia la sostenibilidad aun cuando reitera la necesidad de redoblar esfuerzos ante el aumento de la demanda”. [En línea]. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/es/highlights/el-transporte-maritimo-en-la>
- [41] H. H. Cho, V. Strezov, y T. J. Evans, “Life cycle assessment of renewable hydrogen transport by liquid organic hydrogen carriers”, *J. Clean. Prod.*, vol. 469, núm. 143130, p. 143130, 2024.
- [42] Centro Nacional del Hidrógeno (07-feb-2019), “Pilas de Combustible - Centro Nacional del Hidrógeno”. [En línea]. Disponible en: <https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/>
- [43] REPSOL, 20-jun-2024, “Combustibles sintéticos”. [En línea]. Disponible en: <https://www.repsol.com/es/sostenibilidad/ejes-sostenibilidad/medio-ambiente/economia-circular/nuestros-proyectos/combustibles-sinteticos/index.cshtml>
- [44] Wikipedia contributors, “Combustible sintético”. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Combustible_sint%C3%A9tico&oldid=160621688
- [45] Petronor (17-jun-2020), “Petronor avanza el futuro con la producción de combustibles sintéticos”. [En línea]. Disponible en: <https://petronor.eus/es/2020/06/petronor-avanza-el-futuro-con-la-produccion-de-combustibles-sinteticos/>
- [46] REPSOL (11-sep-2023), “Hidrógeno como combustible”. [En línea]. Disponible en: <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/movilidad-sostenible/hidrogeno-como-combustible/index.cshtml>
- [47] ARIEMA (23-jul-2023), “Almacenamiento de Hidrógeno”. [En línea]. Disponible en: <https://www.ariema.com/almacenamiento-de-h2>
- [48] MMM Group (08-sep-2022), “Metanol”. [En línea]. Disponible en: <https://mmm.es/energy-systems/metanol/>
- [49] PLAREMESA®, 10-sep-2020 “Tanques de techo flotante”. [En línea]. Disponible en: <https://www.plaremesa.net/tanques-de-techo-flotante/>
- [50] SynerHy, “Métodos de almacenamiento y transporte de hidrógeno”. [En línea]. Disponible en: <https://synerhy.com/2022/05/metodos-de-almacenamiento-y-transporte-de-hidrogeno/>

- [51] E. Conmemorativa, “Contribuciones del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares al avance de la Ciencia y la Tecnología en México”. [En línea]. Disponible en: <https://www.inin.gob.mx/documentos/publicaciones/contridelinin/Cap%C3%ADtulo%2015.pdf>
- [52] R. Luedicke, “Reformador de metanol. Generador de hidrógeno”, Crystec.com. [En línea]. Disponible en: <https://www.crystec.com/klmethz.htm>
- [53] Tecpa (22-ene-2024), “La pila de combustible de metanol directo: qué es y cómo funciona”. [En línea]. Disponible en: <https://www.tecpa.es/pila-de-combustible-de-metanol/>
- [54] CSIC, “Desarrollan un catalizador más estable y eficiente para mejorar la utilización del hidrógeno como vector energético”. Disponible en: <https://www.csic.es/es/actualidad-del-csic/desarrollan-un-catalizador-mas-estable-y-eficiente-para-mejorar-la-utilizacion-del-hidrogeno-como-vector-energetico>
- [55] Draeger.com. [En línea]. Disponible en: https://www.draeger.com/es_es/Safety/Clean-Energy-Solutions/Methanol-Production-Safety
- [56] , Ministerio de Agricultura, alimentación y medio ambiente, “NH₃ (Amoníaco)”. [En línea]. Disponible en: <https://prtr-es.es/NH3-amoniaco,15593,11,2007.html>
- [57] IDEA Ingeniería (24-may-2021), “Ingeniería Detalle”. [En línea]. Disponible en: <https://ideaingenieria.es/project/ampliacion-de-tanques-de-almacenamiento-de-amoniaco/>
- [58] M. F. S. Quiñones y A. R. M. Ron, “Producción de metanol a pequeña escala a partir de gas natural”, ENERLAC, vol. 7, núm. 2, 2023.
- [59] O. L. de Energía, “Vista de Producción de metanol a pequeña escala a partir de gas natural”, Olade.org. [En línea]. Disponible en: <https://enerlac.olade.org/index.php/ENERLAC/article/view/251/319>
- [60] Foresa (15-oct-2021), “Fabricación de metanol verde”. [En línea]. Disponible en: <https://www.foresa.com/es/fabricacion-de-metanol-verde>
- [61] Parlamento Europeo, “¿Qué es la neutralidad de carbono y cómo alcanzarla para 2050?”. [En línea]. Disponible en: <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20190926STO62270/que-es-la-neutralidad-de-carbono-y-como-alcanzarla-para-2050>
- [62] A. Montesinos Castellanos, J. I. Huertas Cardozo, A. M. Castellanos, y J. I. Huertas Cardozo, “Usos del biodiésel, bioetanol y biometanol”, p. 631139, 2018.
- [63] David (15-jul-2023), “Italia Se Prepara Para Transformar Su Biogas En Biometanol, Un Innovador Sistema Para El Aprovechamiento De”. [En línea]. Disponible en: <https://ecoinventos.com/bigsquid-biometanol-a-partir-del-biogas/>
- [64] Toni González, “Secado y estabilización de biomasa”. [En línea]. Disponible en: <https://www.energetica21.com/descargar.php?seccion=articulos&archivo=jRbkgHNJErKdRWZ6bXYrwES3NdFg0V0hmaHHhUQIBbESydMO1I7mpNd.pdf>
- [65] ORI ALNITAK (23-ene-2023), “Trituración de biomasa: información para optimizar combustibles”. [En línea]. Disponible en: <https://orialnitak.es/equipos-de-tritruacion-biomasa/>
- [66] Wikipedia, “Gasificación de biomasa”. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/Gasificaci%C3%B3n_de_biomasa
- [67] Wikipedia, “Bioenergía con captura y almacenamiento de carbono”. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/Bioenerg%C3%ADa_con_captura_y_almacenamiento_de_carbono
- [68] Iberdrola. [En línea]. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/hidrogeno-verde/metanol-verde>

- [69] Guía Virtual Uso Metanol, “[guiavirtualusometanol](https://guiavirtualusometanol.es.tl/)”. [En línea]. Disponible en: <https://guiavirtualusometanol.es.tl/>
- [70] MINISTERIO DIRECCIÓN GENERAL DE INDUSTRIA, COMERCIO Y TURISMO, “GUÍA TÉCNICA DE APLICACIÓN DEL REGLAMENTO DE ALMACENAMIENTO DE PRODUCTOS QUÍMICOS Y SUS INSTRUCCIONES TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS”. [En línea]. Disponible en: https://industria.gob.es/Calidad-Industrial/seguridadindustrial/instalacionesindustriales/almacenamiento-quimicos/Documents/Tercera_version_guia_APQ.doc.pdf
- [71] Interempresas, “Bureau Veritas clasifica el primer buque cisterna de metanol para el Puerto de Singapur”. [En línea]. Disponible en: <https://www.interempresas.net/construccion-naval/Articulos/510046-Bureau-Veritas-clasifica-el-primer-buque-cisterna-de-metanol-para-el-Puerto-de-Singapur.html>
- [72] BOE, “BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO”. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/boe/dias/2022/06/24/pdfs/BOE-A-2022-10449.pdf>
- [73] OMI, “Convenio internacional para la seguridad de la vida humana en el mar, 1974 (Convenio SOLAS)”. [En línea]. Disponible en: [https://www.imo.org/es/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-\(SOLAS\)%2C-1974.aspx](https://www.imo.org/es/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-(SOLAS)%2C-1974.aspx)
- [74] *Hello Auto* (20-mar-2024), “¿Qué es un Camión Cisterna? - Glosario de mecánica”. [En línea]. Disponible en: <https://helloauto.com/es-es/glosario/camion-cisterna/>. [Consultado: 25-ago-2024].
- [75] MINISTERIO DE FOMENTO, “Acuerdo europeo sobre transporte internacional de mercancías peligrosas por carretera”. [En línea]. Disponible en: <https://www.fomento.gob.es/AZ.BBMF.Web/documentacion/pdf/R16959.pdf>
- [76] BOE, “BOE-A-2014-2110 Real Decreto 97/2014, de 14 de febrero, por el que se regulan las operaciones de transporte de mercancías peligrosas por carretera en territorio español”. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2014-2110>
- [77] BOE, “BOE-A-2021-8360 Texto enmendado del Reglamento relativo al transporte internacional de mercancías peligrosas por ferrocarril (RID 2021), Apéndice C del Convenio relativo a los Transportes Internacionales por Ferrocarril (COTIF), hecho en Berna el 9 de mayo de 1980, con las Enmiendas adoptadas por la Comisión de expertos para el transporte de mercancías peligrosas mediante procedimiento escrito”. [En línea]. Disponible en: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2021-8360
- [78] BOE, “BOE-A-2015-8042 Real Decreto 664/2015, de 17 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Circulación Ferroviaria”. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2015-8042>
- [79] *European Commission*, “Press corner”. [En línea]. Disponible en: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/ip_23_594

