

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**ESTADO DEL ARTE Y PROYECCIONES DEL PROCESO DE
PRODUCCIÓN DE ELECTROFUEL (E-FUEL)**

CRISTÓBAL ALONSO HERNÁN SÁEZ ULLOA

HABILITACIÓN PROFESIONAL
PRESENTADA A LA FACULTAD
DE INGENIERÍA AGRÍCOLA DE
LA UNIVERSIDAD DE
CONCEPCIÓN PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO
AMBIENTAL

CHILLÁN-CHILE

2024

**ESTADO DEL ARTE Y PROYECCIONES DEL PROCESO DE
PRODUCCIÓN DE ELECTROFUEL (E-FUEL)**

Aprobado por:

Christian Correa Farias
Ing. Civil Agrícola, Dr.
Profesor Asociado

Profesor Guía

Wilson Esquivel Flores
Ing. Civil Mecánico, Dr.
Profesor Asistente

Profesor Asesor

David Lara Castells
Ingeniero Civil Eléctrico, Dr.
Profesor Asociado

Profesor Asesor

Christian Correa Farias
Ing. Civil Agrícola, Dr.
Profesor Asociado

Director de departamento

María González Rodríguez
Ingeniera Agrónoma, Ph. D.
Profesora Asociada

Decana

ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. Objetivos.....	4
2.1 Objetivo General.....	4
2.2 Específicos.....	4
3. MARCO TEORICO.....	5
3.1 Procesos y tecnologías para la producción de E-fuels.....	6
3.1.1 E-Metanol.....	7
3.1.2 E-metanol a gasolina y keroseno.....	9
3.1.3 E-Destilados: combustibles de Fischer-Tropsch.....	12
3.2 Tecnologías habilitantes: captura de carbono y la producción de hidrógeno.....	15
3.2.1 Captura de carbono.....	15
Vías de captura de carbono.....	16
Tecnologías para la captura de carbono.....	18
3.2.2 Producción de Hidrógeno.....	22
Electrólisis del agua.....	22
4. Desafíos y limitaciones a superar.....	25
5. Proyecciones y tendencias futuras.....	30
6. Chile y su papel en el desarrollo de E-fuels.....	33
7. Discusión.....	35
8. Conclusiones.....	38
9. Bibliografía.....	40

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Balance de masa y energía del proceso de producción de metanol.....	9
Tabla 2. Balance de masa y energía del proceso MTG.....	11
Tabla 3. Balance de masa y energía necesario para la producción de 1 kg de e-keroseno.....	11
Tabla 4. Consumo de energía y concentraciones de CO ₂ para diferentes opciones para de captura de carbono.....	18
Tabla 5. Comparación de las características de las tecnologías de electrólisis.....	24

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1.	Reactor Fischer Tropsch tipo "slurry".....	14
Figura 2.	reactor catalítico de lecho fijo utilizado en la producción de e-metanol.....	15
Figura 3.	Curva de carga continua para varios sistemas de generación de electricidad a partir de energías renovables. Las áreas bajo las curvas de carga continua representan el rendimiento de energía eléctrica alcanzable para las ubicaciones individuales. Estas áreas corresponden al producto de la potencia nominal y las horas de carga completa. Nota: Machhammer (2021 p.6).....	29
Figura 4.	Costos de E-fuels en el sur de Europa por año en € por litro equivalente a diésel. Nota: Concawe (2022, p. 65).....	31

ÍNDICE DE ECUACIONES

	Página
Ecuación 1. Hidrogenación del monóxido de carbono.....	7
Ecuación 2. Reacción desplazamiento de gas de agua.....	8
Ecuación 3. Hidrogenación del dióxido de carbono.....	8
Ecuación 4. Radio estequiométrico.....	8
Ecuación 5. Reacción Fischer Tropsch.....	12

GLOSARIO

E-fuels	Combustibles sintéticos producidos mediante la combinación de hidrógeno obtenido de la electrólisis del agua y dióxido de carbono (CO ₂) capturado, utilizados como sustitutos de los combustibles fósiles.
Electrólisis	Proceso químico que utiliza electricidad para descomponer el agua en oxígeno e hidrógeno. Este hidrógeno puede ser utilizado para producir E-fuels.
Hidrógeno verde	Hidrógeno producido mediante electrólisis, utilizando electricidad proveniente de fuentes renovables, como la energía solar o eólica.
Captura de Carbono	Conjunto de tecnologías utilizadas para capturar dióxido de carbono de fuentes industriales o del aire, para su posterior utilización o almacenamiento.
Direct Air Capture	Tecnología que captura dióxido de carbono directamente del aire atmosférico, clave en la producción de E-fuels.
Fischer-Tropsch	Proceso químico que convierte el monóxido de carbono (CO) y el hidrógeno en hidrocarburos líquidos, como diésel o queroseno, a través de la polimerización de hidrocarburos.
Reactor Slurry	Reactor utilizado en la síntesis Fischer-Tropsch, en el que los catalizadores se suspenden en un líquido, mejorando la transferencia de calor y masa en la reacción.

Metanol	Un alcohol utilizado como intermediario en la producción de E-fuels, producido mediante la hidrogenación de CO ₂ .
MTG	Proceso que convierte metanol en gasolina, utilizando un catalizador de zeolita para deshidratar el metanol y formar olefinas, que luego se convierten en hidrocarburos más complejos.
Catalizador	Sustancia que acelera una reacción química sin consumirse en el proceso. En la producción de E-fuels, los catalizadores son clave para reacciones como la hidrogenación o la síntesis Fischer-Tropsch.
Electrólisis PEM	Tipo de electrólisis que utiliza una membrana para separar el hidrógeno y el oxígeno, con alta eficiencia y aplicabilidad en la producción de hidrógeno verde.
DME	Compuesto químico utilizado como intermediario en la producción de hidrocarburos a partir de metanol.
Olefinas	Hidrocarburos insaturados que sirven como precursores en la síntesis de combustibles más complejos durante los procesos de deshidratación del metanol o Fischer-Tropsch.
Neutralidad de Carbono	Estado en el que las emisiones de dióxido de carbono se equilibran mediante su captura o compensación, objetivo clave de los E-fuels.

INVESTIGACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE Y PROYECCIONES DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE E-FUEL

INVESTIGATION OF THE STATE OF ART AND PROJECTIONS OF THE E-FUEL PRODUCTION PROCESS

Palabras claves: E-fuel, producción de E-fuel, captura de carbono, electrólisis, hidrógeno.

RESUMEN

El calentamiento global es causado principalmente por la emisión de gases de efecto invernadero, generados por el uso de combustibles fósiles, por lo que se buscan nuevas vías energéticas para mitigar estos efectos. La producción de E-fuels, a partir de hidrógeno verde y carbono capturado desde la atmosfera, puede ser una buena alternativa, ya que puede reemplazar los combustibles fósiles, pero con emisiones de carbono neutrales.

En este estudio, se realizó una revisión bibliográfica con el objetivo de analizar el estado y avance de las tecnologías necesarias para la producción de E-fuels en los últimos 10 años. Además, se identifican los principales desafíos y limitaciones para su implementación. Uno de los principales hallazgos es que aún no se alcanza la madurez tecnológica suficiente para su implementación. Sin embargo, se estima que, en 2050 estas tecnologías alcanzarán la madurez necesaria para lograr viabilidad económica, centrándose su implementación en sectores específicos como el transporte pesado, por lo que Chile debería apuntar a jugar el papel de productor y exportador debido a su potencial para la generación de energía renovable.

INVESTIGATION OF THE STATE OF ART AND PROJECTIONS OF THE E-FUEL PRODUCTION PROCESS

Keywords: E-fuel, E-fuel production, carbon capture, electrolysis, hydrogen.

ABSTRACT

The climate change, due to anthropogenic activities, has brought environmental consequences, mainly due to the global warming caused by greenhouse gas emissions, the mainly responsible being the global energetic dependence in fossil fuels, therefore, new energy avenues are being sought to mitigate these effects. The E-fuels productions from green hydrogen and carbon captures from the atmosphere can be a good alternative, this due to its carbon-neutral emissions.

In this study, a bibliographic review was carried out with the objective of seeing the state and development of the technologies necessary for E-fuels production in the last 10 years. Additionally, the study seeks to identify key challenges and limitations for its implementation. As a result, it was found that the technology maturity for its widespread implementation has not been achieved yet. However, projections suggest that by 2050 these technologies will reach the maturity for economic viability, with a focus on specific sector such as heavy transportation. With Chile envisioned to play a crucial role as producer and exporter, given to its potential for renewable energy generation.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático y el calentamiento global es uno de los principales problemas que enfrenta la sociedad, por lo que es de gran importancia disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, al buscar fuentes de energía renovables y más amigables con el medio ambiente se espera lograr esto; En Chile según la Comisión Nacional de Energía, la inyección de centrales de Energía Renovable No Convencional a la matriz durante el mes de diciembre de 2022 fue de 2.799 GWh, lo cual corresponde al 38,6% de la generación total. (CNE, 2023).

El sector de transporte es uno de los mayores contribuidores en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), por lo que deben tomarse medidas para reducir la emisión de GEI. Entre esas medidas está la adopción de los electrocombustibles o E-fuels, donde la energía para la producción de estos combustibles proviene de la energía eléctrica renovable.

Si bien el hidrógeno puede ser considerado el E-fuel ideal, además que tiene una alta eficiencia de conversión de energía alcanzando el 80%, este tiene también una baja densidad de energía volumétrica (5.6 MJ L^{-1} a 700 Bar) comparado con la gasolina (32.0 MJ L^{-1}) y dificultad para almacenar. (Hameed, 2022).

Sin embargo, los E-fuels son combustibles hidrocarburos sintetizados a partir de hidrógeno y dióxido de carbono, donde el hidrógeno es producido a partir de electricidad y agua, y el CO_2 es capturado de fuentes fósiles de la

atmosfera. Los combustibles gaseosos y líquidos resultantes presentan características que los hacen los sustitutos perfectos de los combustibles fósiles: alta densidad energética, almacenamiento, transportabilidad y combustibilidad. (Ueckerdt, 2021).

Este combustible sintético presenta un aspecto importante, este es su compatibilidad con los automóviles actuales, por lo que en teoría los propietarios de automóviles tradicionales podrán seguir usándolos sin causar un impacto cultural y económico brusco en la población general o que no tienen el poder adquisitivo para un automóvil eléctrico.

Por lo tanto, el objetivo de este estudio es realizar un análisis del desarrollo de los E-fuels, incluyendo tecnologías de captura de CO₂ del aire, además se analizan los desafíos técnicos y económicos para la producción a gran escala de E-fuel.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Evaluar el estado del desarrollo e investigación de la tecnología de producción de E-fuels, mediante la revisión de publicaciones científicas.

2.2 Específicos

- Identificar los procesos tecnológicos más importantes para la producción de E-fuels.

- Identificar los desafíos para la implementación de los E-fuels de forma sostenible.
- Detallar proyecciones y tendencias en el desarrollo y viabilidad económica de los E-fuels.
- Evaluar el papel de Chile en el desarrollo de los E-fuels en el panorama mundial.

3. MARCO TEORICO

La finalidad de esta revisión bibliográfica es evaluar el estado del arte de las tecnologías de producción de E-fuels a partir de hidrógeno verde y la captura de carbono, esto se realizará a través de la búsqueda y análisis de publicaciones científicas con el propósito de identificar las distintas tecnologías de producción y las ventajas y desventajas de cada una de estas.

Desde la plataforma de Science Direct y Web of Science, se obtuvieron las publicaciones más actuales, con un máximo de 10 años de antigüedad; para ello se utilizaron palabras claves como “E-fuel production”, “Dioxyde Carbon Capture technologies”, “green hydrogen production”, “electrolysis technologies” entre otras.

Se tomó como base los procesos que pueden ser utilizados para la producción de E-fuel, enfocándose más en aquellos que son más atractivos en temas de desarrollo sustentable para lograr la neutralidad de emisiones.

Los hallazgos derivados de la exploración de literatura científica exponen una diversidad de procesos y tecnologías para la producción de E-fuels. Asimismo, se analizan las tecnologías vinculadas con la captura de carbono y la producción de hidrógeno verde mediante la electrólisis del agua, ya que ambos procesos son los habilitantes para producir E-fuels. La revisión también destaca los desafíos y limitaciones que estas tecnologías enfrentan en la actualidad, identificando obstáculos para su adopción generalizada. Adicionalmente, se examinan las tendencias futuras y proyecciones asociadas con la producción de E-fuels, junto con una evaluación del papel que Chile podría desempeñar en este panorama global en evolución.

3.1 Procesos y tecnologías para la producción de E-fuels

Los E-fuels son de interés para todos los modos de transporte, ya que algunos se pueden utilizar en los motores de combustión y no requieren grandes inversiones en nueva infraestructura. Los E-fuels se producen mezclando hidrógeno y CO₂ en un reactor para formar portadores de energía como metano y diésel. El proceso de producción también genera subproductos comerciales, como el oxígeno de alta pureza y el calor. (Brynnolf *et al.*, 2018).

Las vías de producción de E-fuels pueden ser varias, esto debido a la posibilidad de diferentes portadores de energía, siendo estos: e-metanol, e-metano, e-gasolina, etc. Siendo el metanol al que más énfasis se le da, debido a su versatilidad como combustible y la función de materia prima para la producción de otros combustibles limpios.

3.1.1 E-Metanol

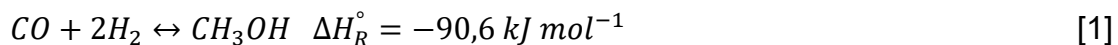
El E-metanol o metanol electrosintético, es el metanol producido de forma limpia y sustentable producido a partir de dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O), utilizando electricidad a partir de fuentes renovables como la solar, eólica o hidroeléctrica. (Sollai *et al.*, 2023).

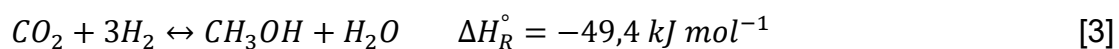
Actualmente, el metanol es producido comercialmente a partir de gas natural y carbón. Los principales pasos de producción son, generación de syngas, síntesis de metanol y destilación. La producción global de metanol, generado a partir de combustibles fósiles, es de 98 millones de toneladas al año, produciendo 0,3 gigatoneladas de CO₂, lo cual equivale a aproximadamente al 10% de las emisiones del sector químico. (Nemmour *et al.*, 2023).

La vía del e-metanol usa hidrógeno verde (normalmente proviene de la electrólisis del agua) y una fuente sostenible o reciclado de CO₂ para substituir el combustible fósil. (Van Antwerpen *et al.*, 2023).

El E-metanol puede ser generado a partir de una síntesis de dos pasos usando syngas, el cual es generalmente una mezcla de monóxido de carbono e hidrogeno, (**ruta de dos pasos**) o una de un paso utilizando en CO₂ directamente como materia prima (**ruta directa**).

La ruta directa: utiliza una mezcla de CO₂ e hidrógeno en una relación molar de 1:2,8. Las reacciones principales son las siguientes.





E-metanol es producido por medio de la hidrogenación catalítica del CO_2 utilizando un reactor catalítico de lecho fijo. Cu y Zn son los componentes principales del catalizador, con algunos aditivos como Al, Zr, Cr, Si, B, Ga, etc. El hidrógeno precalentado y el dióxido de carbono convertidos catalíticamente por medio de la hidrogenación del CO (1), reacción de desplazamiento de gas de agua (2) y la hidrogenación del CO_2 (3). (Yousaf *et al.*, 2022). El proceso opera a temperaturas entre 250 y 300 °C y un rango de presión de 50-100 bar, usando catalizadores basados en Cu/Zn/Al. La eficiencia de conversión se maximiza cuando la reacción opera con un radio estequiométrico óptimo $M = 2$ (Del Pozo *et al.*, 2022), donde M se define como:

$$M = \frac{[H_2] - [CO_2]}{[CO] + [CO_2]} \approx 2 \quad [4]$$

Considerando “[x]” la concentración correspondiente.

La ruta 2 pasos: La primera etapa, consiste en la producción del syngas. Esto se logra gasificando materiales orgánicos como carbón, gas natural, biomasa o residuos. En la segunda etapa, el syngas se somete a la síntesis de metanol siguiendo las mismas condiciones que la ruta directa.

El producto resultante es una mezcla de metanol y agua que debe ser destilado para obtener un metanol puro. El gas que no reaccionó (principalmente H_2 y

CO) es recirculado al reactor, para mejorar la eficiencia. El metanol es temporalmente almacenado en estado líquido a temperatura ambiente.

La Tabla 1 muestra el consumo y producción de energía en la síntesis de E-metanol. El balance de masa está basado en Stefansson, (2015) y el balance de energía está basado en Prussi *et al.* (2020).

Tabla 1. Balance de masa y energía del proceso de producción de metanol.

Entrada al Proceso	
Consumo de H ₂	0,193 kg kg ⁻¹ combustible
Consumo de CO ₂	1,40 kg kg ⁻¹ combustible
Salida al Proceso	
Producción de metanol	1,00 kg
Producción de agua	0,59 kg kg ⁻¹ combustible
Consumo de energía	1,07 MJ kg ⁻¹ combustible
Producción de calor	1,72 MJ kg ⁻¹ combustible
Eficiencia	0,71 kg metanol kg ⁻¹ Dióxido de Carbono

Nota: Concawe (2022)

3.1.2 E-metanol a gasolina y keroseno

Cuando el e-metanol está disponible, la producción de gasolina es posible con dos pasos adicionales:

Metanol a olefinas: proceso en el que el metanol es convertido en olefinas, que son compuestos de carbono e hidrógeno con uno o más pares de átomos de carbono unidos por un doble enlace, principalmente etileno y propileno.

Oligomerización de olefinas ligeras: es un proceso en el que monómeros son convertidos en oligómeros complejos.

Metanol-a-gasolina: La tecnología metanol a gasolina (MTG) fue desarrollada por Mobil en los 80's. Este proceso transforma selectivamente metanol en hidrocarburos en el rango de la gasolina a través de la acción catalítica de una zeolita tipo ZSM-5. El mecanismo en el que está basado este proceso consiste primero de la deshidratación del metanol hasta lograr un equilibrio de mezcla de metanol, dimetil-eter (DME), y agua. Después, el metanol y DME son deshidratadas completamente por el catalizador tipo HZSM-5 formando olefinas ligeras y agua. En las condiciones del reactor MTG las olefinas ligeras se oligomerizan para formar olefinas superiores, las cuales se combinan en parafinas, naftenos, y aromáticos metilados. (Sanz-Martínez *et al.*, 2022).

La reacción de deshidratación tiene una alta selectividad al agua y mínima producción de otros oxigenados u óxidos de carbono. El rendimiento de agua es, por tanto, del 56-57% en peso sobre metanol. El producto hidrocarburo comprende típicamente entre un 78-80% de gasolina, entre un 18-20% GLP y entre un 1-2% de gas combustible. La gasolina MTG suele estar compuesta por un 50% de parafinas, un 20% de olefinas y un 30% de aromáticos (Concawe, 2022).

La Tabla 2 muestra la producción y consumo de energía necesaria para producir 1 kg de e-gasolina con el proceso MTG.

Tabla 2. Balance de masa y energía del proceso MTG.

Entrada al Proceso	
Consumo de metanol	2,29 kg kg ⁻¹ combustible
Consumo de hidrógeno	0,001 kg kg ⁻¹ combustible
Salida al Proceso	
Producción de gasolina	1 kg
Producción de agua	1,29 kg kg ⁻¹ combustible
Consumo de energía	0,710 MJ kg ⁻¹ combustible
Producción de calor	1,298 MJ kg ⁻¹ combustible
Eficiencia	0,44 kg gasolina kg ⁻¹ metanol

Nota: Concawe (2022)

Metanol-a-keroseno: En el caso de la conversión metanol-a-keroseno, a la cual se le refiere como metanol-a-destilados medios (MTGD) sigue el mismo proceso químico que el metanol-a-gasolina. La tecnología MTGD muestra una deshidratación casi completa del metanol a agua e hidrocarburos. El producto hidrocarburo contiene un aproximado del 90% de líquidos (gasolina y diésel), con 5-8% de parafinas C3+C4 y 1-2% de gas combustible. El producto líquido es cerca de 20-30% nafta, el resto siendo diésel.

En la Tabla 3 se observa la producción y consumo de energías necesarios para producir 1 kg de e-keroseno.

Tabla 3. Balance de masa y energía necesario para la producción de 1 kg de e-keroseno.

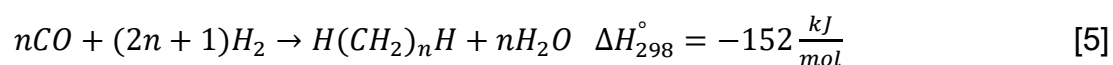
Entrada al Proceso	
Consumo de metanol	2,32 kg kg ⁻¹ combustible
Consumo de hidrógeno	0,01 kg kg ⁻¹ combustible
Salida al Proceso	
Producción de keroseno	1 kg
Producción de agua	1,31 kg kg ⁻¹ combustible
Consumo de energía	0,0718 MJ kg ⁻¹ combustible
Producción de calor	1,314 MJ kg ⁻¹ combustible
Eficiencia	0,43 kg keroseno kg ⁻¹ metanol

Nota: Concawe (2022)

3.1.3 E-Destilados: combustibles de Fischer-Tropsch

Una vía de producir combustibles hidrocarburos limpios para reemplazar a los combustibles fósiles es la de Fischer-Tropsch (FT), Que es un proceso químico industrial utilizado para convertir monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂), comúnmente conocidos como syngas, en hidrocarburos ligeros de diferentes longitudes de cadena, que van desde gases ligeros hasta líquidos como gasolina, diésel y ceras, así como alcoholes y otros productos químicos.

Utiliza CO₂ y H₂ como materia prima, las cuales se pueden obtener con captura directamente del aire y electrólisis de agua respectivamente, este proceso consiste en la polimerización de cadenas de hidrocarburos por medio de la hidrogenación del CO, obteniendo como producto crudo de petróleo, el cual se fracciona y se refina según los hidrocarburos de interés. Este proceso consiste en dos etapas principales, la reacción de desplazamiento de gas de agua [2] (sección 3.1.1) y la reacción Fischer-Tropsch [5].



Siendo “n” el orden de la reacción.

El reactor para síntesis Fischer-Tropsch consiste en dos grupos de reactores FT de lecho fijo, un separador de cera, un separador líquido/gas y un separador de hidrógeno por oscilación de presión para promover la producción de hidrocarburos. Generalmente, se utilizan catalizadores basados en cobalto y

hierro en la síntesis FT. Los catalizadores basados en cobalto son usados para tecnología FT a bajas temperaturas en el caso de los catalizadores de hierro, estos se pueden utilizar en configuraciones a altas y bajas temperaturas. (Zang *et al.*, 2021).

Se pueden usar dos rutas, indirectas o directas:

Proceso indirecto: requiere de dos reactores separados, en el primer reactor el CO_2 y H_2 son transformados en syngas por medio de la reacción de desplazamiento de agua, el cual puede ser CO o CH_3OH dependiendo del catalizador, este syngas es enviado al segundo reactor donde se produce la reacción de Fischer-Tropsch, produciendo hidrocarburos.

Proceso directo: consiste en una sola etapa, en donde el H_2 y CO_2 alimentan a un solo reactor, en donde la reacción de desplazamiento del gas de agua y Fischer-Tropsch toman lugar. (Corrao *et al.*, 2023).

Existen diferentes tipos de reactores industriales para llevar a cabo las reacciones:

- Reactor “slurry”: en este reactor el catalizador se encuentra en suspensión en el líquido, estos reactores trabajan a bajas temperaturas. La reacción ocurre en la superficie del catalizador donde el gas producido sale hacia arriba, y los hidrocarburos pesados son recolectados del fondo.

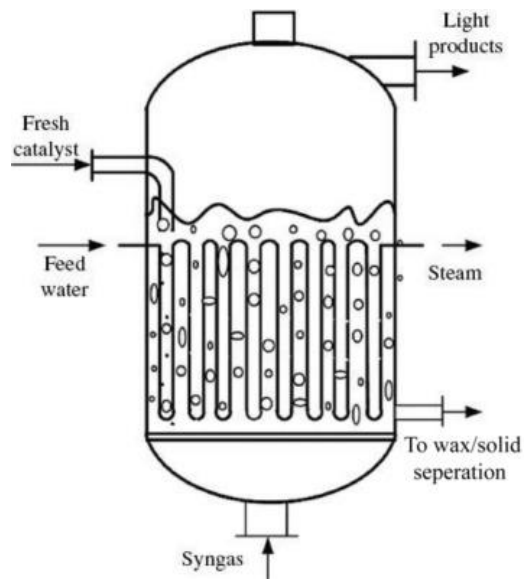


Figura 1. Reactor Fischer Tropsch tipo "slurry"

- Reactor de lecho fluidizado: estos reactores necesitan altas temperaturas para alcanzar una alta producción. Esto impide la utilización de catalizadores de alta área superficial ya que se desgastarían en estas condiciones.
- Reactor tubular de lecho fijo: este reactor ofrece un alto rendimiento, menores costos de mantenimiento y menores pérdidas debido al desgaste. (Martinelli *et al.*, 2020)

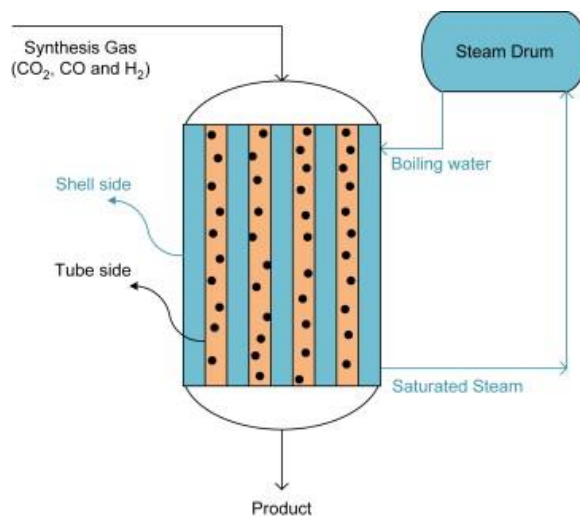


Figura 2. Reactor catalítico de lecho fijo utilizado en la producción de e-metanol.

3.2 Tecnologías habilitantes: captura de carbono y la producción de hidrógeno

3.2.1 Captura de carbono

El Dióxido de carbono es el gas de efecto invernadero predominante, esto debido a las actividades antropogénicas, con consecuencias ambientales irreparables. Según la Agencia de Energía Internacional (IEA), se estima que la captura y secuestro de dióxido de carbono (CCS) podría reducir las emisiones globales en un 19% para el 2050, además sin CCS el costo para cumplir los objetivos de emisiones de CO₂ aumentarían en un 70%. Hay varias vías para la captura de carbono, estas son: Captura atmosférica, captura postcombustión y captura precombustión (García *et al.*, 2022).

Vías de captura de carbono

Captura atmosférica: Consiste en la captura desde el aire atmosférico del carbono, esto tiene el potencial de lograr no solo emisiones neto cero, sino que también puede lograr emisiones neto-negativas, al capturar carbono que fue emitido en el pasado. La captura directa del aire (CDA) se realiza al hacer circular el aire atmosférico a través de filtros regenerativos. La mayor dificultad que presenta este proceso es la baja concentración de CO₂ en comparación con los otros componentes del aire. Aun así, la eficiencia de la CDA ha aumentado rápidamente en los últimos años, ya que, en 2007, la ratio de captura era cerca del 50%, que luego se vio incrementada por la compañía Carbon Engineering que obtuvo una ratio de 74,5% en el 2014, y Climeworks, en asociación con Audi, capturaron en una planta piloto en Dresden cerca del 80% del CO₂ del aire (Fasihi *et al.*, 2019). Las tecnologías utilizadas en CDA son: absorción química con aminas, hidróxidos y otros sorbentes químicos, ya que son más efectivos que la adsorción física a bajas temperaturas. En los procesos a altas temperaturas se utilizan soluciones acuosas de NaOH y KOH produciendo carbonatos que se regeneran en un proceso de circuito cerrado. (García *et al.*, 2022).

Captura postcombustión: Esta es una técnica madura de captura de CO₂ que es aplicada en plantas de energía para generar electricidad o calor mediante la combustión de combustibles fósiles para la mitigación de las emisiones de CO₂. El proceso de combustión resulta en un flujo de gases con

un volumen de CO₂ de 3-20% a una temperatura de cerca 400 °C. este flujo de gas es enfriado para lograr las condiciones óptimas para la captura de CO₂. La remoción del CO₂ del gas es principalmente mediante tecnologías de absorción, adsorción y separación con membrana. A causa de la combustión se pueden encontrar contaminantes como cenizas, NO_x y SO_x (García *et al.*, 2022).

Captura pre-combustión: En este proceso el combustible fósil es tratado antes de la combustión. El pretratamiento consiste en un proceso de reformación o gasificación, formando un syngas que consiste principalmente de CO y H₂. Luego, el syngas pasará por una reacción de desplazamiento de agua con el vapor formando más H₂ mientras el CO se convertirá en CO₂, luego el CO₂ es separado del H₂. Debido a la alta concentración de CO₂ y presión parcial más alta comparada con la técnica de postcombustión, resulta en una captura más eficiente con alta eficiencia que reduce la energía requerida para la captura de carbono y operaciones de compresión. Las tecnologías utilizadas, para la captura en este proceso, pueden ser absorción física, química, adsorción, separación por membrana y separación criogénica.

Tabla 4. Consumo de energía y concentraciones de CO₂ para diferentes opciones de captura de carbono.

Flujo fuente de CO ₂ Tecnología proxy	Concentrado Reformado con vapor (SMR) gas pre-combustión	Promedio Central eléctrica de gas natural	Diluido Captura directa del aire
Consumo de energía [MJ kg ⁻¹ CO ₂]	0,14	0,27	1,44
Consumo de calor [MJ kg ⁻¹ CO ₂]	0,90	3,00	5,76
Concentración de CO ₂	45%	8,5%	0,04%

Nota: Concawe (2022)

Tecnologías para la captura de carbono

La selección de la tecnología apropiada para la captura de CO₂ depende de varios factores, tales como el efecto de las impurezas, pureza del CO₂ deseada, la concentración de CO₂ en la corriente de gas, regeneración del solvente, y el capital y costos de operación.

Absorción Química: debido a que el CO₂ es un gas ácido, la absorción química del CO₂ desde un flujo gaseoso está basada en la neutralización ácido-base (García *et al.*, 2022), por lo que se utiliza un solvente líquido, estos se dividen en dos clases, aminas y no aminas. Las aminas son las más comunes y es el proceso para la separación de CO₂ más maduro, los solventes más comunes, generalmente alcanolaminas, son monoetanolamina (MEA), dietanolamina (DEA), y diglicolamina (DGA). Las aminas se usan formando sales carbonatadas con el CO₂ gaseoso, sin embargo, las alcanolaminas tienen desventajas, como el alto uso de energía para regenerar los solventes, además de la excesiva corrosión y degradación del solvente (Leung, 2014).

En los solventes no aminos tenemos al amoníaco acuoso, comparado con las aminas no presenta degradación del absorbente o corrosión del equipo, la energía requerida para la regeneración del absorbente es mucho menor que el de las aminas. Además, tiene subproductos como el bicarbonato de amonio, sulfato de amonio y nitrato de amonio, los cuales son fertilizantes bien conocidos. (García *et al.*, 2022).

Adsorción: este método utiliza sorbentes sólidos que atrapa el CO₂ a su superficie, estos pueden ser tamices moleculares, carbón activado, zeolitas, óxidos de calcio, hidrotalcitas y circonato de calcio. Una gran área superficial específica, alta selectividad y capacidad de regeneración son los criterios principales al seleccionar un sorbente. Las zeolitas son los sorbentes más comúnmente disponibles, esto debido a alta capacidad de adsorción de CO₂ y selectividad. El proceso de adsorción requiere que el dióxido de sulfuro sea removido y enfriar el flujo de gas a 40-70 C° para que se den las condiciones de adsorción. La adsorción por oscilación de presión (PSA), adsorción por oscilación al vacío (VSA), y adsorción por oscilación de temperatura (TSA) son las tecnologías para la captura de carbono basadas en la adsorción. Las ventajas de la adsorción se basan a que es un proceso reversible y el adsorbente puede ser reciclado, generando una cantidad mínima de residuos. Además, la utilización de residuos industriales y la agricultura para desarrollar adsorbentes para la captura de CO₂ ha llamado significativamente la atención para reducir el costo total de captura.

Membranas: Las membranas se utilizan para que solo el CO₂ pase a través de ellas, mientras que los otros componentes se excluyen del flujo de gas, este método ha sido considerado prometedor debido a su baja huella de carbono y bajo consumo de energía térmica. Particularmente las membranas poliméricas han sido investidas de forma extensiva para su aplicación industrial. Separación de gas impulsado por presión es el proceso más común para la captura de CO₂ con membrana. Una de las mayores ventajas de los procesos basados en membranas es el bajo requerimiento de solvente o sorbente, la producción de muy pocas emisiones tóxicas, una huella de carbono más pequeña y menores gastos en capital y costos de operación.

Absorción física: El CO₂ y otros gases ácidos, pueden ser absorbidos físicamente por distintos solventes, debido a que no hay reacciones químicas presentes, la regeneración de solventes es mucho más fácil que en la absorción química y adsorción. La solubilidad del CO₂ es directamente proporcional con la presión e indirecta con la temperatura, el CO₂ capturado es liberado con la despresurización. Uno de los métodos es el lavado con agua a presión (PWS), este proceso opera con el gas comprimido, el cual entra por el fondo de la columna de absorción, mientras que el agua entra por arriba, logrando un contraflujo líquido-gas. Sin embargo, este proceso necesita grandes cantidades de agua y genera grandes cantidades de agua residual y existe la posibilidad de obstruirse por algún crecimiento bacteriano (García *et al.*, 2022). Otros procesos como Selexol, Rectisol y FLUOR utilizan solventes

orgánicos, los cuales, a comparación de las aminas, no dependen de reacciones químicas para capturar gases ácidos. El proceso Selexol utiliza el solvente Union Carbide Selexol (dimetil eter polietilenglicol). Este solvente puede capturar CO₂, agua, azufre y compuestos aromáticos, este proceso se realiza a bajas temperaturas, alrededor de 0-5 °C. el proceso de Rectisol utiliza metanol enfriado como absorbente, opera en temperaturas de entre -30 y -45 °C. El proceso FLUOR utiliza carbonato de propileno como solvente para capturar CO₂. (García *et al.*, 2022)

Separación criogénica: Este proceso consiste en la condensación fraccional y destilación a bajas temperaturas para separar mezclas de gases. Esta tecnología es utilizada para altas concentraciones de CO₂ (mayor a 50%). Para la separación de CO₂, el flujo de gas es enfriado a temperatura de sublimación (-100 a -135 °C) y luego el CO₂ solidificado es separado de otros gases ligeros y comprimido con altas presiones de 100-200 atm. Debido a que el proceso es a bajas temperaturas y altas presiones el consumo de energía es alto, donde se estima el consumo de 600-650 kWh por tonelada de CO₂. (Leung *et al.*, 2014).

Mineralización: Una de las tecnologías emergentes es la de la mineralización, la cual consiste en fijar el CO₂ con óxidos de calcio o magnesio en un mineral de silicato para formar un carbonato estable como producto final (Levänen & Eloneva, 2017). Abanades *et al.* (2023), presentan un sistema de captura directa del aire, donde se utilizan ladrillos de hidróxido de calcio que son

carbonatados en contacto con el aire. Los ladrillos son destruidos y reciclados utilizando tecnologías maduras para la extracción del carbono capturado.

3.2.2 Producción de Hidrógeno

En la actualidad el hidrógeno puede ser sintetizado a partir de fuentes de energía renovables y no renovables, para el 2020 el 95% de hidrógeno se sintetizaba a partir de combustibles fósiles, significando 930 ton/año de CO₂, por lo que para que los E-fuels se adopten de forma global, este debería ser sintetizado con hidrógeno verde, el cual se produce a partir de electrólisis del agua (Kumar *et al.*, 2022).

Electrólisis del agua

Es un proceso, en el cual, el agua se descompone de forma electroquímica en H₂ y O₂, este proceso es utilizado para la producción de hidrógeno verde utilizando energía eléctrica renovable, por lo que es una tecnología libre de emisiones, y el método principal de obtención de hidrógeno para abastecer la producción de E-fuels. Este método lleva siglos de estudio y desarrollo, donde se desarrollaron los tres principales tipos de electrólisis del agua, (i) Electrólisis alcalina, (ii) Electrólisis PEM y (iii) Electrólisis de óxido sólido.

Electrólisis Alcalina: Este método fue primeramente introducido por Troostwijk and Diemann en el año 1739. Es una tecnología bien establecida y madura, la cual ha sido utilizada comercialmente en la industria química y la producción de hidrógeno a larga escala (Kumar *et al.*, 2022). Óxidos de níquel y cobalto son utilizados para formar los materiales del ánodo y cobalto

respectivamente. Además, el electrolito más usable es el hidróxido de potasio (KOH) y opera a temperaturas de entre 60-80 °C. La electrólisis alcalina es un sistema favorable para aplicaciones a gran escala. Sin embargo, esta tecnología presenta problemas de pureza de los gases y corrosividad debido a los electrolitos utilizados, lo que incrementa los costos de mantención (El-shafie, 2023).

Electrólisis PEM: Los electrolizadores de membrana de intercambio de protones (PEM) pueden producir hidrógeno de alta pureza a rangos de temperatura de 70-90 °C. Este proceso comienza en el lado del ánodo, la molécula del agua se descompone en oxígeno, protones (H^+) y electrones. El oxígeno generado se elimina de la superficie anódica y los protones restantes, viajan a través de la membrana, hasta el lado del cátodo, donde los protones y electrones son combinados para producir H_2 . Normalmente, se utiliza una membrana nafion para conducir los iones (H^+); se aplica un electrolito sólido en contraparte de los líquidos en la electrólisis alcalina. Los iones de hidrógeno migran a través de la membrana sólida para formar moléculas de hidrógeno. Debido a la naturaleza ácida del electrolito y la superficie metálica del electrodo, la cinética de reacción del electrolizador PEM son rápidamente inducidas a comparación de la electrólisis alcalina, además de ser más segura. Sin embargo, los desafíos que presenta la electrólisis PEM es la dificultad de su aplicación a gran escala, esto debido al alto costo de los componentes. (El-Shafie *et al.*, 2023).

Electrólisis de Óxido sólido: El desarrollo de la electrólisis de óxido sólido empezó en Estados Unidos en los años 70s por General Electric y Brookhaven National Laboratory seguido por Dornier en Alemania. El electrolizador de óxido sólido ópera a altas temperaturas de entre 500-850 °C con vapor de agua, lo que reduce significativamente en consumo de energía en la separación del hidrógeno del oxígeno y por consecuencia se traduce en una alta eficiencia energética. En este proceso la molécula de agua se descompone en hidrógeno y ion óxido mediante la adición de dos electrones. El hidrógeno liberado de la superficie catódica y el ion óxido viajan a través de la membrana de intercambio iónico hasta el lado del ánodo, donde los iones óxido se reducen aún más para generar oxígeno y electrones, luego el oxígeno producido se libera de la superficie anódica y los electrones viajan a través del circuito externo hasta el lado del cátodo por la atracción positiva del cátodo. Sin embargo, la estabilidad insuficiente a largo plazo ha evitado la comercialización de esta tecnología (Kumar *et al.*, 2022).

Tabla 5. Comparación de las características de las tecnologías de electrólisis.

Parámetro	Alcalina	PEM	Óxido sólido
Eficiencia, kWh kgH ₂ ⁻¹	50-78	50-83	>90
Rango de voltaje, V	1,4-3	1,4-2,5	1,0-1,5
Densidad de corriente nominal, A cm ⁻²	0,2-0,8	1-2	0,3-1
Temperatura operativa, °C	70-90	40-60	700-850
Vida útil, h	60.000	50.000-80.000	<20.000
Tiempo de inicio del sistema, min	20-120	<1	>300
Costo capital, USD kW ⁻¹	500-1.100	700-1.800	>2.000

Nota: Galitskaya (2022)

4. Desafíos y limitaciones a superar

Si bien los E-fuels son una alternativa prometedora para la mitigación del cambio climático y reemplazo de los combustibles fósiles, en la actualidad aún se encuentran en etapa de desarrollo las distintas tecnologías necesarias para la producción de estos combustibles. Estas tecnologías presentan diversas complicaciones y limitantes, tanto de costos como de eficiencia y aplicabilidad a gran escala para que la adopción de esta sea viable en el escenario global (Nemmour *et al.*, 2023).

Eficiencia de conversión energética: Uno de los desafíos para los E-fuels es la eficiencia energética, ya que los E-fuels y el hidrógeno son una forma de electrificación indirecta, sufren pérdidas energéticas, los distintos procesos de conversión en la producción de E-fuels (Electrólisis, síntesis de hidrocarburos y procesos de combustión) y en el almacenamiento y transporte, por lo que los E-fuels compiten con la electrificación directa, la cual es más eficiente energéticamente.

En el lado de la oferta de los E-fuels, con electricidad-a-combustible, la pérdida de eficiencia es de cerca del 40%. En el lado de la demanda de los E-fuels, cerca del 70% del contenido energético es perdido cuando se combustiona el E-fuel para trabajo mecánico (Ueckerdt *et al.*, 2021), Resultando eficiencias de electricidad-a-energía útil para el transporte del 10%, por lo que, en comparativa, utilizar E-fuels en un automóvil de combustión interna requiere cerca de cinco veces más electricidad renovable que utilizar directamente la

electricidad en vehículo eléctrico (electrificación directa) donde las cadenas de conversión son más cortas (Ueckerdt *et al*, 2021).

Costos de producción: el principal desafío al que se enfrenta la producción de los diferentes E-fuels incluye el costo de la construcción de instalaciones, disponibilidad de energía, infraestructura, seguridad, transporte y suministro. De acuerdo con un reporte de la International Renewable Energy Agency (IRENA (2021)), el costo de las energías renovables como la eólica y solar sigue cayendo de forma continua.

Otra preocupación mayor es el costo de producción del hidrógeno verde, el cual es 2-3 veces más alto que el hidrógeno azul (producido a partir de combustibles fósiles) y el hidrógeno gris (producido con la reforma con vapor del gas natural) (Nemmour *et al.*, 2023). Generalmente, el costo del hidrógeno verde depende principalmente del tipo de electrolizador utilizado, su capacidad de generación y el costo de electricidad generada a partir de recursos renovables. Para reducir el costo de producción de hidrógeno verde se necesita aumentar la producción aumentando la capacidad de los electrolizadores a escalas de MW o GW, reduciendo los costos de capital y operación (Nemmour *et al.*, 2023). Además, de incentivar la investigación y desarrollo para mejorar el rendimiento de los electrolizadores y desarrollar tecnologías que sean costo efectivas.

En el caso de la producción de E-metanol, su costo de producción es superior en comparación del metanol producido a partir de combustibles fósiles, siendo

el precio del metanol producido a partir de gas natural y carbon en un rango de 100-250 USD t⁻¹ (Nemmour *et al.*, 2023). El costo del E-metanol es directamente proporcional al del H₂ y CO₂. En caso de que el metanol sea producido con CO₂, generado con bioenergía y CCS a un costo de 10-50 USD t⁻¹, el costo del e-metanol estaría en un rango de entre 800-1600 USD t⁻¹ (Nemmour *et al.*, 2023). En caso de que el CO₂ se obtenga directamente del aire, a un costo de 300-600 USD t⁻¹, el costo del e-metanol aumentaría a 1200-2400 USD t⁻¹ (Nemmour *et al.*, 2023). Sin embargo, se estima que para 2050 el precio del e-metanol se verá reducido a un rango de entre 250-630 USD t⁻¹ debido a las expectativas en la reducción del costo de las energías renovables (Nemmour *et al.*, 2023).

S. Sollai *et al.* (2023) estimaron los costos y rentabilidad, para una planta de 4000 t año⁻¹ de e-metanol y 6500 t año⁻¹ de oxígeno como subproducto, utilizando 820 t año⁻¹ de hidrógeno verde, producido a partir de 46 GWh año⁻¹ de electricidad renovable, evitando la emisión de 5700 t año⁻¹ de dióxido de carbono. Esta planta, requirió de una inversión inicial de 16,22 MM USD, de la cual el 52% (8,43 MM USD) se debe al electrolizador PEM para la producción de hidrógeno verde. Además, el costo de electricidad es el 75% de los costos de operación.

Bajo las condiciones actuales del mercado, el e-metanol está muy lejos de ser competitivo, en comparación a la producción de metanol a base de combustibles fósiles, el cual cuesta 487 USD t⁻¹, por lo que, asumiendo que él

e-metanol se venda a este precio, la inversión no es rentable, ya que presenta un Valor Actual Neto (VAN) negativo de cerca de 22,71 MM USD. en cambio, el precio del e-metanol para que el VAN sea igual a cero, es de 1038 USD t⁻¹, lo cual es más del doble del precio de mercado actual (Sollai *et al*, 2023).

Sitios de Producción: La selección de los sitios de producción son una variable importante a considerar, ya que estos deben ser seleccionados por sus condiciones favorables para producir energías renovables a bajo costo, y que al mismo tiempo dispongan de un buen acceso al mar para el transporte de los combustibles, por medio de buques cisterna, a los sitios de consumo alrededor del mundo. Algunos de los sitios prometedores, por su disponibilidad de energías renovables (eólica, fotovoltaica, geotérmica o hidroeléctrica), son: la Patagonia, Karas en Namibia, el golfo de Suez, Australia occidental, Labrador en Canadá, Islandia y el desierto de Atacama. (Runge *et al*, 2023).

Alemania (Machhammer, 2021) considera la importación de E-fuels desde Chile producido en la Patagonia, esto debido a su potencial de generación eléctrica renovable en las zonas ventosas de Chile, donde en la Figura 3 se observa la diferencia de las capacidades de generación de electricidad de Alemania y Chile.

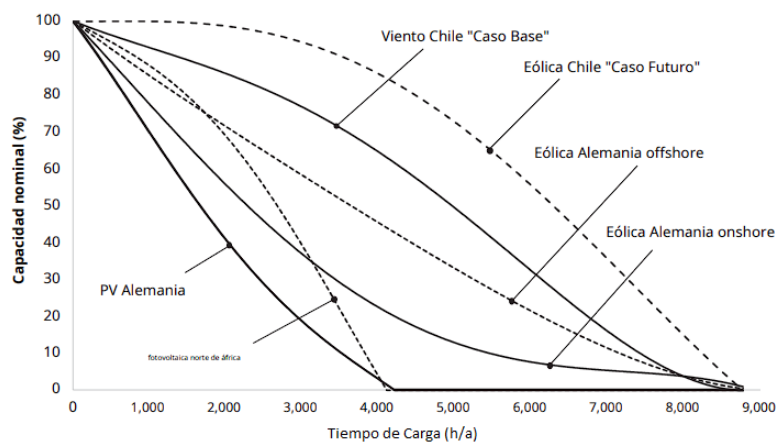


Figura 3. Curva de carga continua para varios sistemas de generación de electricidad a partir de energías renovables. Las áreas bajo las curvas de carga continua representan el rendimiento de energía eléctrica alcanzable para las ubicaciones individuales. Estas áreas corresponden al producto de la potencia nominal y las horas de carga completa. Nota: Machhammer (2021 p.6)

5. Proyecciones y tendencias futuras

La producción de E-fuels está experimentando una rápida evolución, impulsada por la necesidad de frenar los efectos del cambio climático y avanzar hacia una sociedad que satisfaga sus necesidades energéticas de forma sostenible, por lo que, al considerar las proyecciones y tendencias futuras, se destacan varios aspectos clave:

Reducción de costos: Se espera que los costos asociados con la producción de hidrógeno y E-fuels experimenten una notable disminución gracias al continuo avance tecnológico y a la realización de inversiones acumulativas. Este descenso en los costos de capacidad para tecnologías clave como la electrólisis, la síntesis de hidrocarburos y la Captura Directa de Aire, junto con mejoras marginales en la eficiencia de la electrólisis, se combina con la reducción de costos en la generación de energía y un aumento en la proporción de energía proveniente de fuentes eólicas y solares fotovoltaicas. Las proyecciones indican que, para el año 2050, los costos podrían situarse en el rango de 51-55 USD MWh⁻¹ para la producción de e-gasolina y 65-70 USD MWh⁻¹ para el e-metano. Cabe destacar que el e-metano enfrentará costos de transporte más elevados, especialmente debido a procesos como la licuefacción y el almacenamiento criogénico a bordo. Estos avances en eficiencia y reducción de costos se traducen en previsiones de precios para el cambio de CO₂ que podrían disminuir desde los 865 USD tCO₂⁻¹ hasta aproximadamente 22 USD tCO₂⁻¹ para la e-gasolina, y

desde los 1298 USD tCO_2^{-1} hasta alrededor de 292 USD tCO_2^{-1} para el e-metano en el año 2050. (Ueckerdt *et al.*, 2021). La aplicación de la tecnología para la producción de e-metanol se espera que se vuelva rentable a mediano plazo (2030-2035) gracias al efecto combinado de la divulgación de políticas europeas, la disminución de la inversión en el electrolizador debido a la difusión y optimización de la tecnología y la reducción exponencial en el costo de energía eléctrica renovable. (Sollai *et al.*, 2023).

En Concawe (2022) se hizo una estimación del costo de producción de E-fuels para 2020, 2030 y 2050; como se puede observar en el gráfico de la Figura 2.

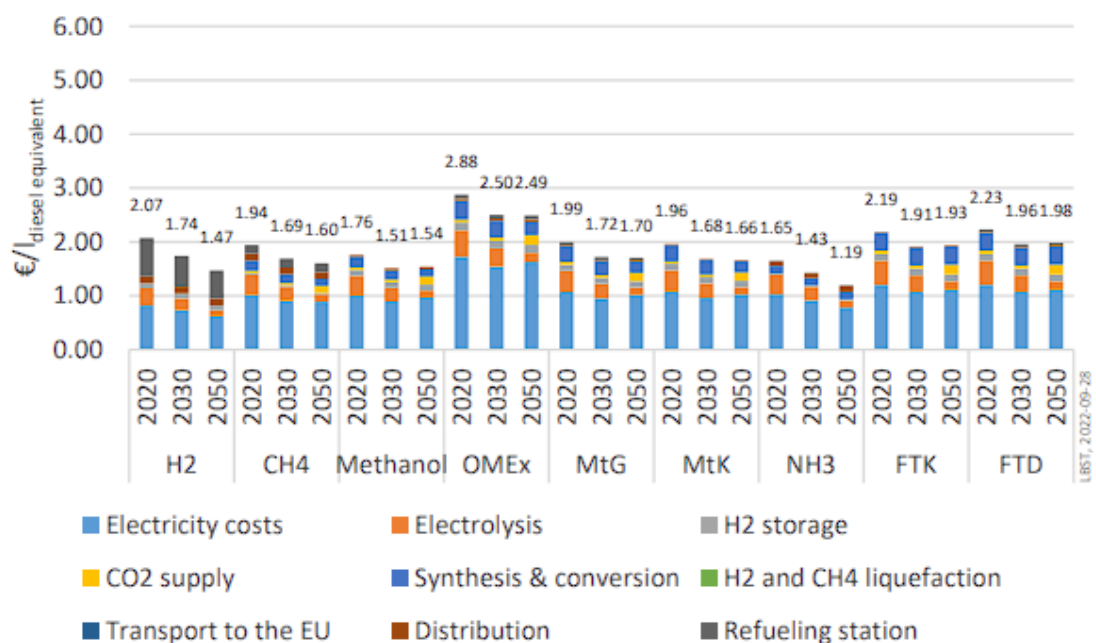


Figura 4. Costos de E-fuels en el sur de Europa por año en € por litro equivalente a diésel. Nota: Concawe (2022, p. 65)

Aplicaciones en sectores específicos: Mientras la electricidad puede ser la energía ideal para el transporte ligero, no es así cuando se aumenta la masa y tamaño de los vehículos, ya que, debido al volumen de las baterías y tiempos de recarga, la electrificación se dificulta, por lo que en los sectores de transporte pesado y la aviación los E-fuels pueden ser utilizados para su descarbonización, ya que los E-fuels pueden utilizarse en los motores de combustión interna sin modificaciones significativas. (Gray *et al.*, 2021). El uso de E-fuels en motores convencionales de combustión interna pueden implicar bajas o nulas emisiones de CO₂, pero las emisiones locales seguirían, las cuales pueden afectar la salud humana en zonas urbanas. Para el tráfico fuera de la ciudad, estas emisiones locales no afectarían a la salud, por lo que el uso de E-fuels se centraría solo en buques, aeronaves y transporte por carretera de larga distancia. (Brynolf *et al.*, 2018).

6. Chile y su papel en el desarrollo de E-fuels

Chile puede tener un papel importante en la producción de E-fuels, ya que existe la capacidad de proveer energía eléctrica de fuentes renovables a bajo costo debido a la disponibilidad de recursos como energía solar, eólica e hídrica (Armijo & Philibert, 2020), lugares como la Patagonia son prometedores, ya que presenta las condiciones ideales para generar fuertes vientos y un potencial para la generación de energía renovable (Aprea & Bolcich, 2020). Siendo esto atractivo para países europeos como Alemania, el cual está interesado en la importación de E-fuels desde nuestro país, por medio de embarcaciones desde la Patagonia hasta Rotterdam, debido a su potencial bajo costo de producción. (Machhammer *et al.*, 2021).

Johnson Matthey (JM), una empresa multinacional británica de tecnologías sostenibles y productos químicos especializados, anuncio un acuerdo para suministrar tecnologías, equipos y servicios de asesoramiento a la primera planta del mundo que aprovecha la energía del viento, el proyecto Haru Oni ubicado en la región de Magallanes, Chile.

El proyecto Haru Oni, el cual está siendo desarrollado por Siemens Energy en asociación con Johnson Matthey y varias corporaciones importantes, incluyendo Porsche, se convertirá en la primera planta integrada y comercial a gran escala del mundo en producir e-metanol y e-gasolina climáticamente neutral.

JM otorgará la licencia de la tecnología de metanol y suministrará la ingeniería, el catalizador y el equipo para el innovador proyecto. La unidad diseñada por JM tomará dióxido de carbono atmosférico como materia prima para la conversión a e-metanol. Este dióxido de carbono se recuperará mediante la captura directa de aire y se combinará con hidrógeno verde (producido a partir de la electrólisis de la membrana de intercambio de protones (PEM) del agua). Utilizando el catalizador innovador más reciente de JM, la unidad piloto demostrará aún más el liderazgo de JM en el área de productos químicos y combustibles ecológicos, y el compromiso con la descarbonización y la sostenibilidad.

En la fase piloto inicial de Haru Oni, la planta será capaz de producir 900.000 litros al año de e-metanol. En dos fases más, la capacidad se verá incrementada a cerca de 55 millones de litros al año por 2024, y cerca 550 millones de litros de E-fuels para 2026, lo suficiente para cerca de 220.000 vehículos de gasolina con un consumo de 50 litros por semana.

Por lo que Chile, debido a su potencial para generar energías renovables a bajo costo, principalmente eólica y fotovoltaica, en sitios con condiciones favorables para estas como la antes mencionada Patagonia y el Desierto de Atacama, el cual presenta condiciones excepcionales para la energía fotovoltaica (Bayo-Besteiro *et al.*, 2023), lo vuelve un país atractivo para el desarrollo de plantas de producción de E-fuels.

7. Discusión

La investigación sobre el estado del arte y proyecciones del proceso de producción de E-fuels muestra una visión de los avances tecnológicos, desafíos y oportunidades que presentan estos combustibles limpios. A continuación, se presentarán los principales hallazgos sobre las diferentes vías de producción, el proceso de producción de hidrógeno, captura de carbono y las proyecciones para la implementación de E-fuels.

Respecto a las vías de producción se destacan la producción de e-metanol y la síntesis Fischer-Tropsch, las cuales utilizan como materia prima hidrógeno verde y carbono capturado, el metanol destaca debido a su versatilidad como E-fuel, ya que este puede ser combustible o materia prima para la producción de otros combustibles como puede ser el keroseno y la gasolina, en cambio, la síntesis Fischer Tropsch cuyo producto es crudo de petróleo, el cual permite su fraccionamiento y refinamiento en distintos hidrocarburos de interés (gasolina, diésel y keroseno). Estas vías de producción presentan cada uno sus desafíos, entre los que destacan la eficiencia en la conversión energética y viabilidad económica.

La captura de carbono es un habilitante de esta tecnología, ya que permite que los E-fuels sean carbono neutro, ya que, al hacer combustión, los gases emitidos, son los mismos que se capturaron para su producción, siendo en teoría un ciclo de carbono neutro. Sin embargo, la captura de carbono presenta varias vías, estas pueden ser pre-combustión, postcombustión y directamente

del aire, la producción de E-fuels considera principalmente esta última opción, ya que esta respalda el objetivo de la neutralidad en las emisiones de carbono en el proceso productivo de los E-fuels. Para la captura de carbono existen diversos tipos de tecnologías como: adsorción, absorción química y física, separación criogénica, membranas y la mineralización, estas tecnologías cada una tiene sus ventajas y desventajas, por lo que se debe hacer una evaluación a la hora de saber qué tecnología utilizar, ya que la elección depende de la fuente de emisión, ubicación geográfica, viabilidad económica y su compatibilidad con el proceso de producción de E-fuels.

El hidrógeno verde es el principal medio de conversión de energía, desde energía eléctrica renovable a E-fuels, Mediante el proceso de electrólisis se pretende producir hidrógeno verde a partir de agua, este proceso tiene como subproducto oxígeno, existen varias tecnologías para llevar a cabo este proceso, las cuales son: electrólisis alcalina, electrólisis PEM y electrólisis de óxido sólido. La producción de E-fuels se evalúa normalmente con la electrólisis PEM, esto debido a su alta eficiencia comparado con la electrólisis alcalina y nivel de desarrollo comparado con la electrólisis de óxido sólido. Sin embargo, presenta una dificultad para su aplicación a escala debido a sus componentes costosos, lo cual se puede observar en la estimación que hizo Sollai *et al.* (2023) cuyo valor alcanza los 8,43 MM USD lo que representa el 52% de la inversión inicial para una planta con una capacidad de producción de 4000 t año⁻¹ de e-metanol.

La versatilidad de los E-fuels ofrece la posibilidad de reemplazar los combustibles fósiles a gran escala, sin necesidad de transformaciones significativas en el lado de la demanda. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, dependiendo de la aplicación de los E-fuels, la eficiencia de conversión de electricidad a energía útil puede variar considerablemente, oscilando entre el 10% y el 35%. Esta variabilidad implica que los requisitos de generación de energía renovable pueden ser de 2 a 14 veces mayores que los necesarios para la electrificación directa (Ueckerdt *et al.*, 2021). Esta diferencia en la eficiencia energética tiene implicaciones significativas en los costos de producción de E-fuels, ya que una menor eficiencia se traduce en una mayor demanda de energía eléctrica renovable. En consecuencia, la implementación de tecnologías de electrificación directa se presenta como una alternativa más eficiente y potencialmente más económica, al requerir una menor cantidad de energía eléctrica renovable para su funcionamiento.

Sin embargo, se espera un crecimiento en la producción del E-fuel, respaldado por las innovaciones tecnológicas, reducción de costos y una mayor integración con fuentes renovables, dándole a los E-fuels el papel importante de ser fuente de energía para sectores como la aviación y el transporte pesado, logrando así una sociedad más limpia.

8. Conclusiones

Finalmente, a modo de conclusiones podemos señalar que:

- La captura de CO₂ y producción de hidrógeno verde, son las tecnologías habilitantes para producción de E-fuels.
- Los procesos más relevantes para producir E-fuels son: el E-metanol, usado directamente como combustible o como insumo para producir gasolina y queroseno; y la síntesis Fischer-Tropsch, desde la cual se obtiene crudo de petróleo sintético.
- En el caso de la captura de carbono, existen tres formas de captura: postcombustión, pre-combustión y directamente del aire.
- El hidrógeno, es producido por medio de la electrólisis del agua, a partir de tecnologías, tales como: la electrólisis alcalina, electrólisis PEM y electrólisis de óxido sólido.
- Estas tecnologías, sin embargo, presentan ciertos desafíos que dificultan su implementación en la actualidad. Estos desafíos son de índole técnico y económico, siendo los costos de producción, la eficiencia de conversión energética y la disponibilidad de fuentes de energía renovable
- Se espera que, debido al progreso tecnológico y la baja del costo de la electricidad renovable, el costo de producción de los E-fuels también

disminuya. Además, su implementación se centrará en el transporte pesado debido a la dificultad de electrificación del sector.

- Chile juega un papel estratégico en el desarrollo de los E-fuels, debido a su potencial para generar energía renovable a bajo costo. Esto llevaría a Chile a ser uno de los principales productores y exportadores de E-fuels en el futuro, atrayendo la inversión extranjera.

9. Bibliografía

- Ababneh, H., & Hameed, B. (2022). *Electrofuels as emerging new green Alternative fuel: A review of Recent literature*. *Energy Conversion and Management*, 254, 115213. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115213>
- Abánades, J. C., Criado, Y. A., & White, H. I. (2023). *Direct capture of carbon dioxide from the atmosphere using bricks of calcium hydroxide*. *Cell Reports Physical Science*, 4(4), 101339. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2023.101339>
- Adhikari, B. B., Orme, C. J., Stetson, C., & Klaehn, J. R. (2023). *Techno-economic analysis of carbon dioxide capture from low concentration sources using membranes*. *Chemical Engineering Journal*, 474, 145876. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.145876>
- Aprea, J. L., & Bolcich, J. (2020). *The energy transition towards hydrogen utilization for green life and sustainable human development in Patagonia*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(47), 25627-25645. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.246>
- Armijo, J., & Philibert, C. (2020). Flexible production of green hydrogen and ammonia from variable solar and wind energy: Case study of Chile and Argentina. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 45(3), 1541-1558. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.028>
- Bayo-Besteiro, S., De la Torre, L., Costoya, X., Gesteira, M. G., Pérez-Alarcón, A., deCastro, M., & Añel, J. A. (2023). Photovoltaic power resource at the Atacama Desert under climate change. *Renewable Energy*, 216, 118999. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.118999>
- Brynolf, S., Taljegård, M., Grahn, M., & Hansson, J. (2018). *Electrofuels for the transport sector: A review of production costs*. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 81, 1887-1905. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.288>
- Colelli, L., Segneri, V., Bassano, C., & Vilardi, G. (2023). *E-fuels, Technical and Economic analysis of the production of synthetic kerosene precursor as sustainable aviation fuel*. *Energy Conversion and Management*, 288, 117165. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117165>
- Concawe & Aramco. (2022). *E-fuels: A technoeconomic assessment of European domestic production and imports towards 2050 (report no. 17/22)*.

- Corrao, E., Salomone, F., Giglio, E., Castellino, M., Ronchetti, S. M., Armandi, M., Pirone, R., & Bensaid, S. (2023). *CO₂ conversion into hydrocarbons via modified Fischer-Tropsch synthesis by using bulk iron catalysts combined with zeolites*. *Chemical Engineering Research and Design*, 197, 449-465. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.07.052>
- Del Pozo, C. A., Cloete, S., & Alvaro, Á. J. (2022). *Techno-economic assessment of long-term methanol production from natural gas and renewables*. *Energy Conversion and Management*, 266, 115785. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115785>
- El-Shafie, M. (2023). *Hydrogen Production by Water Electrolysis Technologies: A review*. *Results in Engineering*, 20, 101426. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101426>
- M. Fasihi, O. Efimova, C. Breyer, Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants, *J. Clean. Prod.* 224 (2019) 957–980, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.086>.
- Galitskaya, E., & Жданеев, О. (2022). *Development of electrolysis technologies for hydrogen production: A case study of green steel manufacturing in the Russian Federation*. *Environmental Technology and Innovation*, 27, 102517. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102517>
- García, J. G., Villén-Guzmán, M., Rodríguez-Maroto, J. M., & Paz-García, J. M. (2022). Technical analysis of CO₂ capture pathways and technologies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(5), 108470. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108470>
- Gray, N., McDonagh, S., O'Shea, R., & Smyth, B. (2021). Decarbonising Ships, planes and trucks: An analysis of suitable low-carbon fuels for the maritime, aviation and haulage sectors. *Advances in Applied Energy*, 1, 100008. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100008>
- Hassan Q *et al.*, Green hydrogen: A pathway to a sustainable energy future, *International Journal of Hydrogen Energy*, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.32>
- He, X. (2017). Techno-economic Feasibility Analysis on carbon membranes for hydrogen purification. *Separation and Purification Technology*, 186, 117-124. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.05.034>
- IEA - Publication:- *Technology Roadmap: Carbon Capture and Storage*, 2019. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015. *Climate Change*

- 2014: Mitigation of Climate Change. *Clim. Chang.* 2014. Mitig. Clim. Chang. doi:10.1017/cbo9781107415416.
- IRENA (2021), Renewable Power Generation Costs in 2020, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- Johnson Matthey. (2021, marzo). Technology selected for worlds first climate neutral methanol plant. matthey.com. <https://matthey.com/news/2021/jm-technology-selected-for-worlds-first-climate-neutral-methanol-plant>
- Kamkeng, A. D., & Wang, M. (2023). Technical analysis of the modified Fischer-Tropsch synthesis process for direct CO₂ conversion into gasoline fuel: Performance improvement via ex-situ water removal. *Chemical Engineering Journal*, 462, 142048. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142048>
- Krishnan, A., Nighojkar, A., & Kandasubramanian, B. (2023). Emerging towards zero carbon footprint via carbon dioxide capturing and sequestration. *Carbon Capture Science & Technology*, 9, 100137. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2023.100137>
- Kumar, S., & Lim, H. (2022). An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. *Energy Reports*, 8, 13793-13813. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.127>
- Leung, D. Y., Caramanna, G., & Maroto-Valer, M. M. (2014). An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 39, 426-443. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.093>
- Levänen, J., & Eloneva, S. (2017). Fighting sustainability challenges on two fronts: material efficiency and the emerging carbon capture and storage technologies. *Environmental Science & Policy*, 76, 131-138. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.07.002>
- Martinelli, M., Gnanamani, M. K., LeViness, S., Jacobs, G., & Shafer, W. D. (2020). An overview of Fischer-Tropsch Synthesis: XtL processes, catalysts and reactors. *Applied Catalysis. A, General*, 608, 117740. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2020.117740>
- Méndez, C. I., & Ancheyta, J. (2020). Kinetic models for Fischer-Tropsch synthesis for the production of clean fuels. *Catalysis Today*, 353, 3-16. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2020.02.012>
- Machhammer, O. (2021). Regenerativer Strom aus Deutschland oder e-Fuels aus Chile: Worauf sollte die zukünftige Mobilität bauen? *Chemie*

- Ingenieur Technik, 93(4), 641-654.
<https://doi.org/10.1002/cite.202100003>
- Nemmour, A., Inayat, A., Janajreh, I., & Ghenai, C. (2023). Green hydrogen-based E-fuels (E-methane, e-methanol, e-ammonia) to support clean energy transition: a literature review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(75), 29011-29033.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.240>
- Prussi, M., Yugo, M., De Prada, L., Padella, M. and Edwards, R., JEC Well-To-Wheels report v5, EUR 30284 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-20109-0 (online), doi:10.2760/100379 (online), JRC121213;
<https://ec.europa.eu/jrc/en/jec/publications/reports-version-5-2020>
- Sanz-Martínez, A., Lasobras, J., Soler, J., Herguido, J., & Menéndez, M. (2022). Methanol to Gasoline (MTG): Parametric study and validation of the process in a two-zone fluidized bed reactor (TZFBR). *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 113, 189-195.
<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.05.045>
- Sollai, S., Porcu, A., Tola, V., Ferrara, F., & Pettinau, A. (2023). Renewable methanol production from green hydrogen and captured CO₂: A techno-economic assessment. *Journal of CO₂ Utilization*, 68, 102345.
<https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102345>
- Steffanson, B., Power and CO₂ emissions to methanol, 2015 European Methanol Policy Forum, 2015
- Ueckerdt, F., Bauer, C., Dirnaichner, A., Everall, J., Sacchi, R., & Luderer, G. (2021). Potential and risks of hydrogen-based E-fuels in climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 11, 384-393.
<https://doi.org/10.1038/s41558-021-01032-7>
- Van Antwerpen, J., Khan, M. H. A., Shepherd, J., Tan, T. H., Grundy, S., MacGill, I., Amal, R., & Daiyan, R. (2023). A model for assessing pathways to integrate intermittent renewable energy for e-methanol production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(78), 30221-30237. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.177>
- Yousaf, M., Mahmood, A., Elkamel, A., Rizwan, M., & Zaman, M. (2022). Techno-economic analysis of integrated hydrogen and methanol production process by CO₂ hydrogenation. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 115, 103615.
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2022.103615>

Zang, G., Sun, P., Elgowainy, A., Bafana, A., & Wang, M. Q. (2021). Performance and cost analysis of liquid fuel production from H₂ and CO₂ based on the Fischer-Tropsch process. *Journal of CO₂ Utilization*, 46, 101459. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101459>