

VIABILIDAD TECNO-ECONÓMICA Y ANÁLISIS DE EMISIONES DEL USO DE E-KEROSENE EN ITALIA EN EL SECTOR AERONÁUTICO

Isabella Tamayo¹, Ramiro Rodriguez²

¹Aeronautical Consulting and Solutions SRL - Via Masaccio 87/89 (50132), Florencia, Italia.

www.aeronauticales.com +39 3510583390 isabellatmejia04@gmail.com

²Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba - Av. Vélez Sarsfield 299, CP (5000), www.fcefyn.unc.edu.ar +54 351 5353800, ramiro.rodriguez@unc.edu.ar

³Calden Consultoría SRL – Av. Padre Mariani 478, Villa Allende (5105), Provincia de Córdoba
www.caldenconsultoria.com +54 351 7000717, rodriguez@calcencconsultoria.com

RESUMEN

Este trabajo presenta el análisis de viabilidad técnico-económica y de emisiones de la producción de e-kerosene (SAF) mediante la síntesis química de Fischer-Tropsch para su uso en el sector transporte aéreo italiano. La viabilidad técnica se analiza usando como materia prima sostenible hidrógeno verde y dióxido de carbono (CO₂) capturado. La valoración económica analiza el Costo Nivelado de SAF y su producción en la Unión Europea (UE) y el análisis de emisiones analiza la reducción de estas al usar SAF en reemplazo de combustibles fósiles. Proyectos en marcha en 9 países de la UE demuestran la viabilidad técnica. El costo medio del SAF disminuirá con una tendencia cuadrática desde el año 2020 hasta el 2050, por lo que en el futuro podrá competir en el mercado si se consideran incentivos fiscales y externalidades, como las emisiones de CO₂ en el costo del kerosene fósil. El análisis ambiental muestra que las emisiones de CO₂ del e-kerosene, igualan al CO₂ capturado, neutralizando las emisiones netas globales.

Palabras clave: Captura de carbono, hidrógeno verde, combustibles sintéticos, e-kerosene, síntesis química de Fischer-Tropsch, syngas.

INTRODUCCIÓN

Se estima que las actividades humanas, en especial la quema de combustibles fósiles para la obtención de energía, han contribuido al incremento de aproximadamente 1°C al calentamiento global, por encima de los niveles preindustriales. La temperatura media global podría aumentar en 1,5°C entre 2030 y 2050 si continúa el ritmo de crecimiento actual. Esto implicaría una serie de riesgos ambientales que podrían poner en peligro los ecosistemas del planeta. Para tratar de mitigar el efecto climático, que se acelera con las emisiones de GEI a la atmósfera, se han pactado importantes acuerdos internacionales como el de París firmado en la COP21 en el año 2015 donde se estableció el objetivo de limitar el calentamiento global por debajo de los 2°C y preferiblemente a 1,5°C (IPCC, 2022).

La producción de electricidad y calor son los mayores contribuyentes a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) globales, seguidos por el sector transporte y la industria (Ritchie et al., 2020a). Se estima que el sector transporte es responsable de aproximadamente el 25% del total de las emisiones de CO₂ antropogénico a nivel mundial, por lo que su descarbonización se convierte en un punto de acción clave para lograr los objetivos ambientales (Agudelo, 2023). Dentro de la Unión Europea (UE), el sector del transporte representó el 28,5% de las emisiones totales de GEI en el año 2022, donde los mayores contribuyentes dentro del sector fueron el transporte por carretera, la navegación y el transporte aéreo. Aunque la aviación representa apenas el 4% de las emisiones totales de GEI en la UE, ha sido la fuente con mayor velocidad de crecimiento. En 2019, las emisiones de la aviación internacional aumentaron un 146% en comparación con los niveles de 1990 y se prevé que sigan en aumento (Parlamento Europeo, 2022a). Para enfrentar esta problemática se han venido estudiando alternativas para

reemplazar los combustibles fósiles en el sector del transporte aéreo. Una de éstas es el kerosene sintético de fuentes renovables que podría impulsar la transición energética hacia vuelos con balance nulo en las emisiones de carbono. Al utilizar energía renovable y CO₂ de la atmósfera se produce un gas de síntesis (syngas) y a partir de éste se pueden fabricar combustibles sintéticos que pueden usarse directamente en los motores aéreos actuales. El proceso de producción consiste en la captura de CO₂ de la atmósfera para luego desdoblarse en CO y O₂ utilizando energía proveniente de fuentes renovables. El syngas se mezcla con hidrógeno y finalmente se convierte en hidrocarburo líquido a través de la síntesis química de Fischer-Tropsch (FT). El CO₂ que se requiere como materia prima para producir combustibles sintéticos puede encontrarse en los gases que emite la combustión de combustibles fósiles o en procesos biogénicos. Dichos gases están directamente relacionados con el calentamiento global ya que incrementan el efecto invernadero al absorber radiación en la región infrarroja del espectro electromagnético. La remoción de estos gases de la atmósfera a través de la captura y almacenamiento de carbono y su utilización (CCSU) contribuiría a la mitigación de emisiones de GEI y por ende a limitar el calentamiento global (Agudelo, 2023).

El segundo componente necesario para la fabricación de combustibles sintéticos es el hidrógeno. Este vector energético puede clasificarse por colores según su método de obtención y la fuente de energía primaria utilizada en su producción. El hidrógeno marrón, gris y negro es producido con combustibles fósiles mediante métodos contaminantes que generan altas emisiones de GEI (por ejemplo, la producción de 1 kg de hidrógeno gris lleva asociada la emisión de 11 kg de CO₂). Por el contrario, el hidrógeno verde (H2V) que se produce mediante electrólisis de agua con electricidad proveniente de energías renovables (ER), conlleva bajas emisiones de carbono (Syirat et al., 2024).

Con la captura de CO₂ y la producción de H2V se garantiza un procedimiento de síntesis de combustibles limpio y con bajas emisiones de GEI que contribuye a la desfossilización de los sectores que utilizan combustibles fósiles. La producción de los combustibles sintéticos aún presenta desafíos técnico-económicos que limitan su comercialización (Nemmour et al., 2023). Durante el periodo 2018-2022 se llevó a cabo el proyecto “Kerogreen” donde participaron 4 países de la UE (Bélgica, Alemania, Noruega y los Países Bajos) financiados con fondos de la Comisión Europea para investigar sobre la producción de e-kerosene a partir de agua y aire usando electricidad renovable, mediante el desdoble de CO₂ y la formación de syngas a través de la síntesis de FT. El objetivo fue desarrollar y probar una ruta de conversión innovadora para la producción segura y rentable de e-kerosene para su uso en la aeronáutica. Una ventaja importante del e-kerosene como combustible para el transporte aéreo, es que el sector puede mantener la infraestructura y los motores existentes. Además, el e-kerosene no emite azufre y minimiza las emisiones totales cumpliendo con los estándares de contaminación cada vez más estrictos. El proyecto fue exitoso a escala de laboratorio y los elementos del sistema diseñado lograron integrarse en un contenedor (Goede, 2022; Goede et al., 2022).

El e-kerosene muestra una capacidad de adaptación prometedora a los estrictos requisitos de la industria de la aviación, ya que está diseñado para coincidir químicamente con el combustible convencional para aviones, lo que permite su uso en motores de aeronaves y sistemas de combustible existentes sin modificaciones. Esta compatibilidad lo convierte en una opción práctica para la transición hacia una aviación sostenible sin necesidad de grandes cambios de infraestructura. El concepto de vías de conversión de energía en líquido (PtL), donde se utiliza energía renovable para convertir materias primas renovables en combustibles electrónicos, ha sido recientemente investigado por Ozkan et al. (2024), donde indican que el e-kerosene se puede producir utilizando fuentes de ER, lo que lo hace escalable y factible para satisfacer las demandas de combustible del sector de la aviación de manera neutral en carbono.

Por otra parte, desarrollos actuales en la UE, como la iniciativa ReFuelEU Aviation (ReFuelEU, 2024), que promueve un mayor uso de combustibles de aviación sostenibles (SAF) como la herramienta más poderosa para reducir las emisiones de CO₂ de la aviación, exigen la mezcla de e-kerosene en combustible para aviones, aumentando gradualmente su proporción para apoyar los esfuerzos de descarbonización. Los proyectos en toda Europa están aumentando la producción y, aunque algunos permanecen en la fase de estudio de viabilidad, se prevé un despliegue a gran escala en los próximos años. Sin embargo, el costo de producir e-kerosene sigue siendo alto en comparación con los combustibles convencionales. Superar estas barreras económicas requerirá innovación, subsidios y

colaboración internacional en estándares e incentivos para escalar la producción de manera eficiente. Con las políticas y los avances tecnológicos adecuados, el queroseno electrónico puede satisfacer las necesidades de la industria de la aviación y, al mismo tiempo, reducir significativamente su huella de carbono. Por consiguiente, profundizar y continuar con estos estudios es de gran importancia. En este trabajo se realiza un análisis de viabilidad tecno- económica y de emisiones sobre la producción de e-kerosene usando la captura de carbono e H2V para su uso en el sector del transporte aéreo en Italia.

METODOLOGÍA

La evaluación de viabilidades tecno-económica y de emisiones conduce a la elección de variables a investigar vinculadas a estos tres conceptos. En este sentido, la descripción de la síntesis química de FT se vincula a la viabilidad técnica, el análisis de los costos del proceso y su rentabilidad justificará (o no) la viabilidad económica y se contempla la comparación de emisiones con otros tipos de combustibles fósiles con aplicaciones similares. Para la consecución de estos objetivos se analizan resultados de la bibliografía más reciente referida a esta temática. Entonces, las variables para investigar son: la síntesis química de FT, la reducción de emisiones de CO₂, los costos del proceso y los beneficios ambientales y sociales, que se resumen en la siguiente lista:

- *Descripción de los procesos de:*
 - emisiones, captura, almacenamiento y uso de CO₂ (CCSU)
 - la síntesis química de FT para convertir la mezcla H2V/CO₂ en e-kerosene.
- *Análisis y discusión de:*
 - la potencialidad de las energías renovables en Italia.
 - el mecanismo de producción de H2V en Italia.
 - la reducción de emisiones de GEI.
 - los costos nivelados de producción vinculados al e-kerosene.
 - el alcance de los últimos acuerdos ambientales globales.

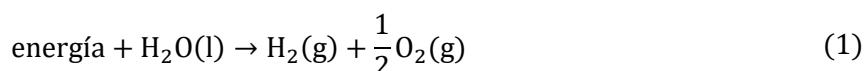
DESARROLLO

1. Análisis técnico

Se lleva a cabo el análisis técnico de la producción de e-kerosene a través de la síntesis química de FT. Para esto se partirá de la descripción de la obtención del H2V:

1.1 Electrólisis de agua

Para finales del año 2022, los electrolizadores alcalinos representaron el 60% de la capacidad instalada, seguida por los PEM con el 30% y los SOEC alcanzaron menos del 1% (IEA, 2022). Si bien la tecnología alcalina resultó ser la más económica y eficiente, se espera que para 2030 haya un crecimiento importante de capacidad instalada de PEM y SOEC (IEA, 2022). La reacción química general que describe el proceso de obtención de H₂ a partir de agua y energía viene dada por la ecuación (1):



La energía libre de formación para esta reacción endotérmica viene dada por la ecuación (2):

$$\Delta G = -nFE^0 \quad (2)$$

donde:

n = 2; es el número de electrones transferidos por mol en la ecuación (1)

F = 96500 C/mol; constante de Faraday

*E*⁰: Potencial estándar de electrodo (voltios)

Esta energía libre de formación de la ecuación (2) es fuertemente dependiente de la temperatura, así en condiciones estándar (*P* = 1 bar, *T* = 298K), $\Delta G = 273,75 \text{ kJ/mol}$, mientras que llevando las condiciones a (*P* = 1 bar, *T* = 1273K), $\Delta G = 177,66 \text{ kJ/mol}$, es decir un 25,3% más eficiente. Por

este motivo, la electrólisis alcalina se lleva a cabo a presiones y a temperaturas mayores que la estándar (Sánchez Delgado, 2019).

El alto costo energético requerido para la electrólisis conduce a plantear diversos caminos para su consecución:

1. Uso de energía renovable no despachada
2. Construcción de un parque eólico o solar dedicado para la electrólisis
3. Contratos de adquisición de energía renovable adquirida mediante Power Purchase Agreement (PPA), que certifica el origen renovable de la energía para la producción de H2V

Considerando la estequiométrica de la reacción de la ecuación (1), para la producción de 1 kg de H₂ y 8 kg de O₂ se requieren teóricamente 9 litros de agua y 1,23 V en condiciones estándar.

1.2 Captura de carbono por sistemas de pre-combustión

La captura de CO₂ puede llevarse a cabo de manera directa extrayéndolo del aire o de manera indirecta cuando se evita su liberación a la atmósfera. Su posterior utilización para producir combustibles sintéticos como el e-kerosene conlleva una reducción de la concentración de dicho gas en la atmósfera. La Figura 1 ilustra el ciclo de producción y uso de los combustibles sintéticos verdes de manera esquemática.

Es importante destacar que el CO₂ con el que se sintetizan los combustibles sintéticos verdes se libera a la atmósfera nuevamente luego de la combustión, por esta razón se los clasifica como neutros en carbono.

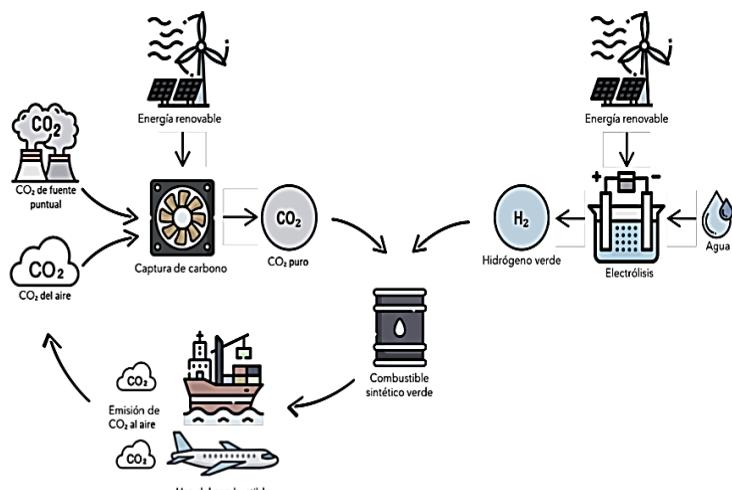


Figura 1: Ciclo de producción y uso de los combustibles sintéticos verdes.

Fuente. Análisis de la captura de carbono para la producción de combustibles sintéticos en Chile (p.8), por INODÚ, 2021, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

Actualmente existen sistemas con tasas de captura del orden de 90% lo que puede implicar costos considerablemente altos. Hay tres tipos de fuentes desde las que se puede capturar CO₂:

1. *Fuentes Puntuales (FP)*: generan emisiones estacionarias y puntuales por un proceso industrial.
2. *Fuentes biogénicas (BtL)*: son emisiones de CO₂ que dependen del ciclo natural del carbono, como las resultantes de la combustión, cosecha, fermentación, descomposición o procesamiento de materiales biológicos.
3. *Aire atmosférico (DACP)*: captura de CO₂ directamente de la atmósfera (DACP, por sus siglas en inglés).

Para que un combustible sintético pueda considerarse sustentable se debe asegurar la renovabilidad de los insumos y de las fuentes de energía utilizadas para su fabricación y debe tener el potencial de generar emisiones netas cero o incluso ser negativo en carbono, especialmente si se captura y almacena más CO₂ del que se emite. La tecnología de captura más adecuada para una aplicación específica depende de la concentración inicial y final deseada, la presión y la temperatura de funcionamiento, la composición y costos, entre otros (Fasihi et al., 2019; INODÚ, 2021). El sistema de pre-combustión suele usarse para la producción de syngas (Peres et al., 2022) por lo que en este trabajo se enfatiza esta

técnica, priorizando la captura de CO₂ directamente de fuentes puntuales por su menor coste respecto a las otras tecnologías (Christensen y Petrenko, 2017; Terwel y Kerkhoven, 2018).

Existen 4 tipos principales de tecnologías pre-combustión (Peres et al., 2022):

1. *Adsorción*: esta tecnología se basa en la transferencia de masa de las moléculas de CO₂ a una superficie sólida (adsorbente) a altas temperaturas y presión atmosférica. Es una tecnología simple y económica pero no logra capturar grandes cantidades de masa.
2. *Absorción*: se usa un solvente químico que solubiliza el CO₂ y forma una nueva solución. Es un proceso que presenta bajo costo, pero conlleva procesos considerablemente tóxicos y corrosivos. Dos proyectos americanos que usan esta tecnología reportan que la demanda energética es de 0,25 a 0,30 MWh por tonelada capturada de CO₂.
3. *Membranas*: se utilizan membranas permeables porosas para separar el CO₂. Es un proceso sencillo, eficiente, escalable y más amigable con el medio ambiente si se lo compara con la absorción y la adsorción, pero no es suficientemente específico para CO₂ y no tiene larga vida útil.
4. *Bucle químico*: implica procesos químicos de combustión indirecta de combustibles fósiles o renovables, dividiendo el procedimiento en dos pasos.

Actualmente, la mayoría de los sistemas de captura registran una tasa de captura del 85 al 90% en el mejor de los casos. Las principales combinaciones electrólisis/fuente de carbón utilizadas para la CCS para la producción de e-combustibles son: AEL/DAC; PEM/DAC; SOEC/DAC - AEL/ BtL; PEM/ BtL; SOEC/ BtL - AEL/FP; PEM/ FP; SOEC/ FP.

1.3 Kerosene Verde (e-kerosene)

El kerosene de aviación es un hidrocarburo con una cadena de carbono de C8 a C16. Suele estar formado por grupo de parafinas, naftenos o ciclopárafinas y aromáticos, estando presentes las olefinas en pequeñas cantidades (Blakey et al, 2011). La Figura 2 muestra un esquema de la producción del e-kerosene. El valor estándar de emisiones de CO₂ para el kerosene, según el informe de emisiones de CO₂ del tráfico aéreo de la Confederación Suiza (s.f), determina que 1 kg de kerosene fósil produce 3,16 kg de CO₂.

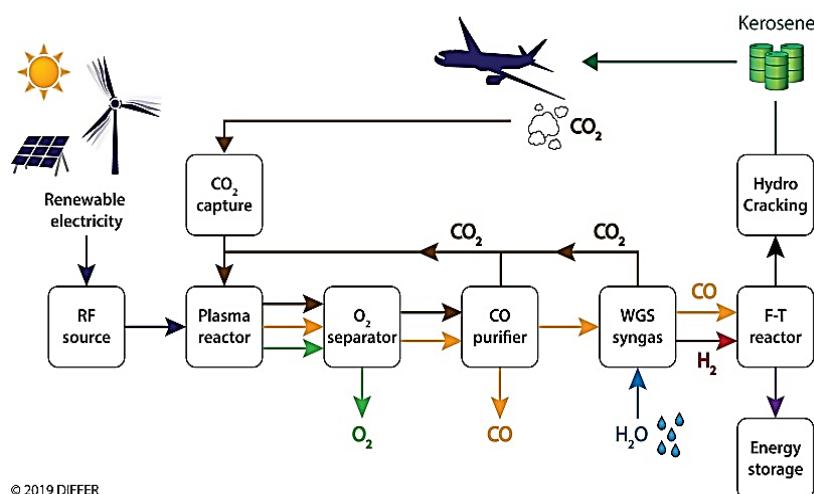


Figura 2: Esquema de la producción del e-kerosene.

Fuente. Production of Sustainable aircraft grade Kerosene from water and air powered by Renewable Electricity, through the splitting of CO₂, syngas formation and Fischer-Tropsch synthesis, Comisión Europea, Horizon 2020 Kerogreen, recuperado el 23 de enero de 2024 de:

<https://cordis.europa.eu/project/id/763909/reporting/es>

Como se mencionó anteriormente, una de las principales ventajas del uso de e-kerosene en la aviación es que permite utilizar la infraestructura y los motores existentes sin necesidad de reemplazos o modificaciones. La flota comercial global activa actualmente es cercana a las 35000 aeronaves (Wyman, 2024). Una vez obtenido el e-kerosene se almacena en tanques para la posterior distribución hacia el cliente final (Rojas-Michaga et al., 2023). En diferentes países de Europa un estudio de la ONG

europea Transport & Environment contabiliza 25 proyectos industriales y 20 proyectos piloto más pequeños que prometen producir combustibles sintéticos para la aviación, que se muestran en la Figura 3. Los 25 proyectos industriales identificados en el estudio tienen la ambición de producir 1,7 Mt de e-kerosene para 2030, que podrían abastecer el equivalente a 70000 vuelos transatlánticos con una mezcla de 50% de e-kerosene y ahorrar un total de 4,6 millones de toneladas de CO₂ (Transport and Environment, 2024).

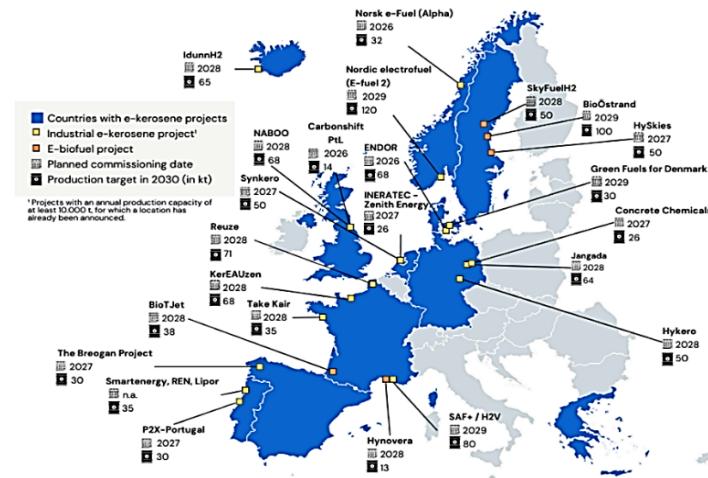


Figura 3. Proyectos de e-kerosene anunciados en Europa para 2023. Fuente: The challenges of scaling up e-kerosene production in Europe, (p.2), por Transport and Enviorment, 2024.

La cadena de producción del e-kerosene contempla los siguientes pasos:

1. *Plasmólisis*: un reactor de plasma permite la división del CO₂ en CO y O₂. El plasma (gas ionizado) sirve como vehículo para facilitar las condiciones de descomposición del CO₂. Es producido mediante aceleración de electrones por microondas que excitan vibracionalmente las moléculas a un estado que propicia su disociación.
 2. *Separador de oxígeno*: emplea membranas conductoras de oxígeno a alta temperatura que transportan selectivamente el oxígeno fuera de la corriente de gas mezclado lo que aumenta la producción de CO.
 3. *Purificación de CO*: el CO debe ser purificado para remover moléculas de otros gases a través de técnicas de destilación criogénica, eliminación de gases ácidos y deshidratación.
 4. Generación de syngas: es la principal fuente de CO e H₂ y se obtiene mediante la oxidación parcial o reformado con vapor de materias primas carbonosas (Evans et al., 2018). El CO previamente purificado se mezcla con agua o directamente con H₂V para producir el syngas (Kerogreen, s.f).
 5. *Síntesis química de Fischer-Tropsch*: con el uso del syngas y un reactor para la síntesis se obtiene un hidrocarburo sintético.
 6. *Hidrocraqueo*: es un proceso de craqueo catalítico en el cual, mediante la adición de hidrógeno, las moléculas de hidrocarburos de cadena larga se rompen en moléculas más cortas. (Weitkamp, 2012).

Actualmente la única opción posible para descarbonizar el transporte aéreo con combustibles sintéticos es el e-kerosene ya que no requiere un cambio en la infraestructura existente.

2. Análisis económico-Costo nivelado del e-kerosene

En este apartado se realiza el análisis económico de la producción del e-kerosene, considerando la cadena de valor PtL como se muestra en la Figura 4.

A diferencia de otros SAF que son relativamente maduros, PtL es un mercado emergente y la aplicación del e-kerosene enfrenta múltiples desafíos. En primer lugar, como se indica en la Figura 4, convertir la electricidad en hidrógeno y luego en e-kerosene es poco eficiente: aproximadamente la mitad de la energía se disipa, lo que plantea la cuestión de si debieran utilizarse estos valiosos recursos (electricidad e hidrógeno) directamente como combustibles, en lugar de desperdiciar energía en pérdidas por

conversión (Searle, 2020). En segundo lugar, el costo es una barrera importante. Algunos estudios han mostrado una enorme variación en el costo estimado de la producción de e-kerosene debido a diferentes supuestos con respecto a las fuentes y precios de la electricidad y el CO₂ (Isaacs et al., 2021).

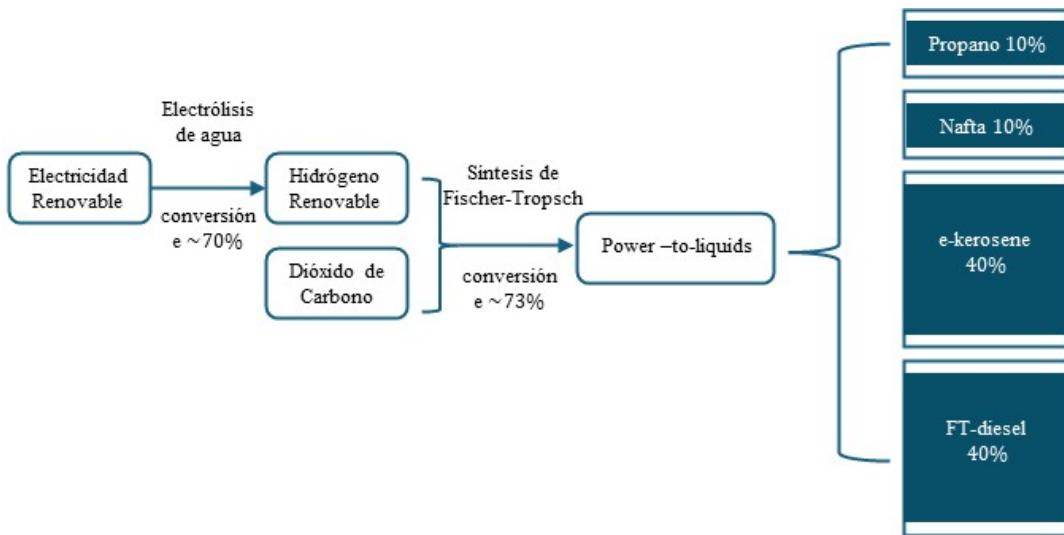


Figura 4. Descripción general de un esquema PtL y distribución de productos por porcentaje de energía. Fuente. Current and future cost of e-kerosene in the United States and Europe, (p.1), Zhou et al., 2022, International Council on Clean Transportation.

Para comprender el papel potencial del e-kerosene en la descarbonización del sector de la aviación en Italia, se toman datos estimados del costo de producción en la UE de 2020 a 2050 (Zhou et al., 2022). El estudio considera la electricidad renovable para la producción y asume que el CO₂ se proporciona desde una fuente puntual. Luego se analiza la competitividad de costos del e-kerosene en comparación con otros combustibles fósiles de aviación, así como la necesidad de apoyo político. La metodología empleada estima el costo de producción de PtL utilizando un modelo de flujo de caja descontado (DCF) (Christensen y Petrenko, 2017). Este modelo DCF calcula el costo nivelado para que una inversión sea económicamente viable y alcance una tasa de rendimiento objetivo. Los componentes principales del modelo DCF incluyen la inversión de capital inicial, los costos operativos anuales y los ingresos por ventas de productos. Además de estos componentes de costos, los supuestos financieros relacionados con la deuda y el capital también son cruciales en un modelo DCF, ya que determinan el rendimiento requerido para que el proceso sea económicamente viable. Para este análisis se utilizan los costos de producción nivelados de PtL de 27 países de la UE, considerando el promedio aritmético del costo estimado entre regiones o países para representar la UE. El plazo para las estimaciones de costes es entre 2020 y 2050 y todas las cifras de costes se dan en euros valor 2020.

2.1 Supuestos para los costos nivelados de producción

Estimar el costo de PtL requiere el análisis de tres procesos clave: generación de electricidad renovable, electrólisis del agua y síntesis FT. Este estudio, combina dos conjuntos de análisis DCF, uno para estimar el costo nivelado de la electricidad renovable (LCOE) y el otro para PtL (PtLcost) que cubre la electrólisis del agua y la síntesis FT. El precio del CO₂ se recopila de estudios anteriores.

Los factores de capacidad (FC) solar y eólica de los 27 países europeos se toman de (Zhou et al., 2022), suponiendo que la capacidad instalada de la planta de electricidad capital y operativos (CAPEX y OPEX) de las plantas de energía solar y eólica asumen los mismos costos en toda la región europea y la proyección de los precios futuros de la electricidad renovable, sigue la tasa de reducción de costos y la tasa de mejora del FC de NREL (2021).

La instalación PtL tiene dos opciones: conectarse directamente a un parque de electricidad renovable o a la red eléctrica y aquí se consideran ambas opciones. En el primer caso, se toma el (LCOE) calculado para la producción de PtL. En el caso de la conexión a la red, se agregan costos de transmisión y distribución de electricidad (T&D) tomados de Searle y Christensen (2018) y se supone la celebración de un PPA para la compra de electricidad renovable.

El FC —la fracción de un año que una planta de energía puede operar— de la instalación PtL depende del escenario; si está conectado directamente a una generación de electricidad renovable, el FC de la instalación PtL coincide con el del parque de renovables; si se utiliza electricidad de la red, el FC es cercano a 1, es decir, la planta podría funcionar casi a tiempo completo. Por lo tanto, el beneficio de la conexión directa son menores costos de electricidad renovable (LCOE), mientras que el beneficio de la conexión a la red es un mayor FC de las instalaciones, lo que reduce el costo nivelado de los gastos de capital por unidad de PtL producida. La opción más barata depende del FC renovable específico y de las tarifas de la red en cada sitio de instalación.

2.2 Supuestos para el Costo de producción de PtL - LCOK

La Tabla 1 presenta los supuestos clave para el costo del proceso Pt (LCOK) y detalles adicionales se encuentran en Zhou et al. (2022). Se asume el uso de una gran planta de producción central de PtL con una capacidad instalada anual de 400 MW de potencia de entrada. En el modelo económico, la capacidad de la planta PtL supuesta no es relevante para la capacidad de electricidad renovable admitida en el cálculo de LCOE, que representa el precio de mercado de las energías renovables que los productores de PtL deben pagar). No obstante, la producción real está determinada por el FC, que en el caso de la conexión directa estaría restringido por el FC del parque de renovables y en el caso de la conexión a la red, se asume un FC de 95% que considera las posibles pérdidas en la distribución de electricidad y en el tiempo de inactividad de las instalaciones.

Tabla 1: Supuestos de parámetros de producción PtL

PARÁMETROS DE ENTRADA		SUPOSICIÓN DE DATOS		
Capacidad Instalada		400 MW		
Factor de Capacidad		Conexión a la red: 95%		Conexión Directa: igual a la de la generación renovable
Factor de Contingencia		1.2		
CAPEX del Electrolizador (USD/kW-2020)	AEL	PEM	SOEC	
	988	1,182	1,346	
Reducción futura del CAPEX del Electrolizador		2% anual		
Eficiencia del Electrolizador en 2020	70%	60%	81%	
	Eficiencia del Electrolizador en 2050	80%	74%	90%
Vida útil del Electrolizador en 2020 (hs)	75.000	60.000	20.000	
Vida útil del Electrolizador en 2050 (hs)	125.000	125.000	87.500	
CAPEX síntesis de FT		450 USD/kW de combustible		
Eficiencia síntesis de FT		73%		
OPEX Costos fijos de Operación anual		4% del CAPEX		
Precio de la energía LCOE		Específico para cada país		
Precio del agua LCOW		Específico para cada país		
Precio del CO ₂		40USD/t		
Precio mayorista del oxígeno		0.15 USD/m ³		

Nota. Elaboración propia con datos de Current and future cost of e-kerosene in the United States and Europe (Zhou et al., 2022).

Se estiman los costos de PtL utilizando solo CO₂ de fuente puntual a \$40/t (Christensen y Petrenko, 2017; Terwel y Kerkhoven, 2018). El costo de producción de e-kerosene calculado es un precio mayorista que excluye los costos de entrega y combustible, así como los impuestos.

2.3 Resultados para el LCOK

Las estimaciones de costos obtenidas se comparan con diferentes combustibles de aviación (SAF) para evaluar la competitividad de costos del e-kerosene y proporcionar elementos a los formuladores de políticas y a la industria para comprender mejor el papel potencial del e-kerosene. En la Tabla 2 se muestra el coste medio estimado de producción de e-kerosene y otros SAF en la UE.

Tabla 2: Coste medio estimado de producción de e-kerosene y otros SAF en la UE

Año	e-kerosene USD/MJ	HEFA USD/MJ	Jet A USD/MJ	e-kerosene USD/Galón*	e-kerosene USD/Litro
2020	0,098	0,030	0,010	12,840	2,822
2025	0,086	0,029	0,015	11,168	2,455
2030	0,073	0,028	0,018	9,585	2,107
2035	0,067	0,026	0,019	8,802	1,935
2040	0,062	0,025	0,020	8,133	1,787
2045	0,057	0,024	0,022	7,499	1,648
2050	0,053	0,023	0,023	6,939	1,525

* Galón imperial aprox. 4,55L.

En la Figura 5 se grafica este coste medio estimado de producción de e-kerosene que muestra una disminución cuadrática entre 2020 y 2050.

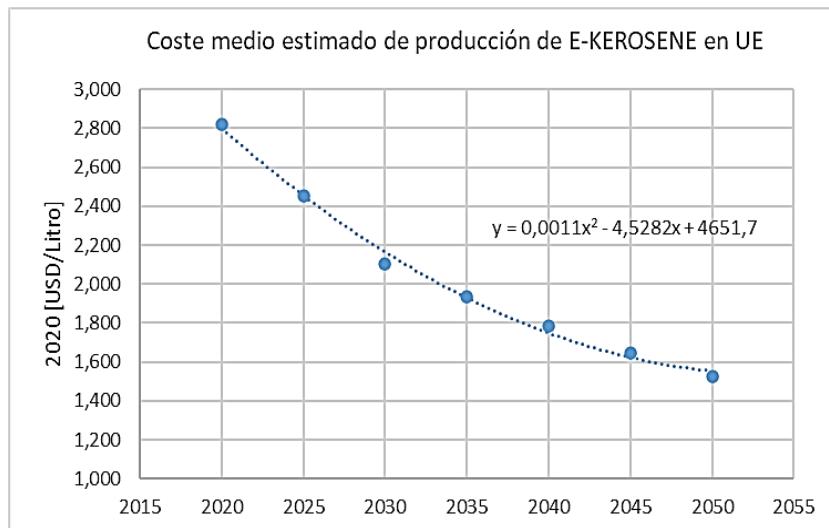


Figura 5: Coste medio estimado de producción de e-kerosene en UE. Elaboración propia a partir de los datos recopilados de Zhou et al, 2022.

En la Figura 6 se grafican los datos de la Tabla 4 a modo de comparación, mostrando los precios mayoristas de e-kerosene, HEFA y el combustible Jet A, es decir, kerosene fósil, recopilado de la Administración de Información Energética de EE. UU. (2021) y de aceite de cocina usado como materia prima para representar el precio de HEFA. Debido a su mejor desempeño climático y menor costo en comparación con los aceites vegetales se asume una disminución lineal del precio de HEFA para los años entre 2020 y 2050 (Pavlenko et al., 2019). Este estudio no considera ayudas gubernamentales y/o incentivos financieros. Tampoco considera las externalidades como pueden ser las emisiones de CO₂ (externalidad negativa) o, por el contrario, el ahorro en emisiones de CO₂ (externalidad positiva). Al momento que se consideren las externalidades en los costes del kerosene fósil, y que se cuenten con apoyos gubernamentales de diferentes tipos, el e-kerosene podrá competir en el mercado con otros combustibles como lo son los HFA y el Jet-A.

3. Análisis de emisiones de CO₂

El análisis ambiental del proceso se basa en la reducción de emisiones de CO₂, asumiendo que el emitido en la combustión de los e-combustibles es igual al CO₂ capturado para producirlo como se ha explicado anteriormente. Producir 1 kg de combustible de aviación sostenible (SAF), se requiere aproximadamente 3,1 kg de CO₂. (OACI, 2023) lo que quiere decir que la combustión de 1 kg de e-kerosene genera 3,1 kg de CO₂.

Cuando el e-kerosene se produce a partir de H2V y captura y utilización de carbono (CCU, por sus siglas en inglés), las emisiones de CO₂ igualan al CO₂ capturado y retirado de la atmósfera, siendo las

emisiones netas globales de su combustión prácticamente cero. Por otro lado, el kerosene de origen fósil que entra en combustión liberará esos mismos 3,1 kg. Sin embargo, el CO₂ no es el único componente de esta combustión, sino que produce dióxido de azufre (SO₂) y ácido sulfúrico (H₂SO₄) además de óxidos de nitrógeno (NO_x) pero estos no estarían presentes en la combustión del PtL kerosene por lo que se reduciría casi al 100% la emisión de estos gases secundarios (Micheli et al., 2022). Según la IEA, en el año 2022, el consumo total de kerosene para la aviación en Italia fue de 51,146 TJ.

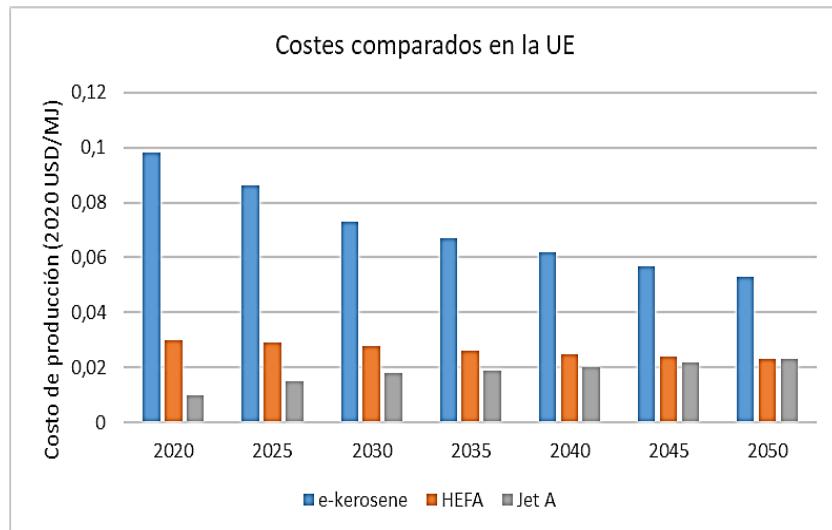


Figura 6: Costo estimado de producción de e-kerosene en la UE, en comparación con los ésteres y ácidos grasos hidroprocesados (HEFA) y el combustible fósil Jet A. Elaboración propia a partir de los datos recopilados de Zhou et al, 2022.

Teniendo en cuenta que el poder calorífico medio de este combustible es de 41.600 kJ/kg, se puede calcular el consumo en masa como se indica en la ecuación (3):

$$5,1146 \times 10^{13} \text{ kJ} \times \left(\frac{1 \text{ kg}}{41600 \text{ kJ}} \right) \approx 1.229.471.154 \text{ kg} \quad (3)$$

Entonces, en el año 2020 el consumo de kerosene fósil en Italia fue de más de mil doscientos millones de kilogramos. Las emisiones de CO₂ por combustión de esta cantidad de kerosene para transporte aéreo se calculan como se muestra a continuación en la ecuación (4):

$$1.229.471.154 \text{ kg} \times \left(\frac{3,1 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ kg}} \right) \approx 3.811.360.576 \text{ kg CO}_2 \quad (4)$$

Las emisiones resultaron de casi cuatro mil millones de kilogramos de CO₂. Si se usara el e-kerosene en vez de kerosene de origen fósil, se podrían evitar las emisiones netas calculadas, haciéndolas circular por la atmósfera donde habría períodos donde se capturan y se remueven para volverlas a liberar en la combustión y así cíclicamente.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se llevó a cabo el análisis técnico, económico y de emisiones de la producción de e-kerosene en Italia. Con base en los resultados obtenidos, se puede conjeturar que su producción y uso es viable según el conjunto de variables analizadas. De este análisis es posible concluir lo siguiente:

- La descarbonización del sector aéreo es urgente para cumplir con los objetivos ambientales globales. El e-kerosene podría ser clave en este proceso como opción renovable y sostenible.
- Aunque la producción de e-kerosene es técnicamente viable, se necesita mejorar la eficiencia y reducir pérdidas energéticas.
- Los altos costos de energía eléctrica y CCU dificultan que el e-kerosene compita con el fósil.

- La producción de e-kerosene es carbono-neutral y evita emisiones de gases contaminantes como los de nitrógeno y azufre, comunes en el kerosene fósil.
- Su uso es compatible con los motores y sistemas de combustible actuales, lo que evita la necesidad de nuevas infraestructuras, a diferencia del hidrógeno o la electricidad.
- Considerar las externalidades en el costo de los combustibles permitiría que el e-kerosene se abarate y que el kerosene fósil se encarezca por impuestos a las emisiones.
- Incentivos financieros y apoyo gubernamental son esenciales para que el e-kerosene se adopte a gran escala y se convierta en un actor clave en la descarbonización de la aviación, integrando subsidios y políticas de apoyo e inclusión de externalidades, para competir en el mercado.

Recomendaciones para la reducción de costos del e-kerosene:

- Ampliar plantas para aprovechar economías de escala y reducir costos.
- Optimizar procesos de electrólisis y uso de energía solar/eólica para producir hidrógeno verde.
- Mejorar tecnologías de CCU para obtener CO₂ de manera eficiente y económica.
- Implementar créditos fiscales y mandatos de mezcla para asegurar mercados y reducir costos.
- Desarrollar procesos avanzados que optimicen la conversión de CO₂ e hidrógeno.

REFERENCIAS

- Agudelo, I.M. (2023). Análisis técnico, económico y ambiental del proceso power to fuel. Trabajo de Fin de Máster, Universidad Internacional de Valencia VIU.
- Blakey, S., Rye, L. y Wilson, C.W. (2011). Aviation gas turbine alternative fuels: A review. Proceedings of the Combustion Institute Volume 33, Issue 2, 2011, Pages 2863-2885
- Evans, A., Luebke, R. y Petit, C. (2018). The use of metal-organic frameworks for CO purification. Journal of Materials Chemistry A.
- Christensen, A., y Petrenko, C. (2017). CO₂-based synthetic fuel: Assessment of potential European capacity and environmental performance. International Council on Clean Transportation. <<https://theicct.org/publication/co2-based-synthetic-fuel-assessment-of-potential-european-capacity-and-environmental-performance/>> [consulta: 10 de enero de 2024]
- Fasihi, M., Efimova, O. y Breyer C. (2019). Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants. Journal of Cleaner Production 224 (2019) 957 - 980.
- Goede, A., Pandiyan, A., Kyriakou, V., Neagu, D., Welzel, S., Van de Sanden, M. y Tsampas, M. (2022). CO₂ conversion via coupled plasma-electrolysis process. Europhysics News. The magazine of the European Physical Society.
- Goede, A. (2022). Kerogreen: for green kerosene. Glossy brochure for policy makers. Kerogreen.
- Green Car, (2024). <<https://www.greencarcongress.com/2024/01/20240125-ekerosene.html>>
- IEA. (2022). Global Hydrogen Review 2023.
- INODÚ Chile energy & sustainability. (2021). Análisis de la captura de carbono para la producción de combustibles sintéticos en Chile. Informe Final. <https://www.energypartnership.cl/fileadmin/user_upload/chile/media_elements/Studies/20210818_Carbon_Capture_Full_Study.pdf> [consulta: 10 de julio de 2024]
- IPCC, (2022). Global Warming of 1.5°C. Intergovernmental panel on climate change special report.
- Isaacs, S. A., Staples, M. D., Allroggen, F., Mallapragada, D. S., Falter, C. P., y Barrett, S. R. H. (2021). Environmental and Economic Performance of Hybrid Power-to-Liquid and Biomass-to-Liquid Fuel Production in the United States. Environmental Science & Technology, 55(12), 8247–8257. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07674>
- Micheli, M., Moore, D., Bach, V., y Finkbeiner, M. (2022). Life-Cycle Assessment of Power-to-Liquid Kerosene Produced from Renewable Electricity and CO₂ from Direct Air Capture in Germany.
- Nemmour, A., Inayat, A., Janajreh, I., y 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. ELSEVIER. <<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.240>>
- NREL. (2021). Data | Electricity | 2021 | ATB | NREL. <<https://atb.nrel.gov/electricity/2021/data>>
- OACI. (2023). Training Material on Model Regulations to Assist States in the Implementation of CORSIA. International Civil Aviation Organization.

- Ozkan, M., Narappa, A. B., Namboodiri, T., Chai, Y., Babu, M., Jennings, J. S., & Watkins, J. M. (2024). Forging a sustainable sky: Unveiling the pillars of aviation e-fuel production for carbon emission circularity. *Iscience*.
- Pavlenko, N., Searle, S., y Christensen, A. (2019). The cost of supporting alternative jet fuels in the European Union. International Council on Clean Transportation. <<https://theicct.org/publication/the-cost-of-supporting-alternative-jet-fuels-in-the-european-union/>> [consulta: 14 de febrero de 2024]
- Peres, C.B., Resende, P.M.R., Nunes, L.J.R., Morais, L.C.d. (2022). Advances in Carbon Capture and Use (CCU) Technologies: A Comprehensive Review and CO₂ Mitigation Potential Analysis. *Clean Technol.* 2022, 4, 1193-1207. <<https://doi.org/10.3390/cleantechnol4040073>>
- Parlamento Europeo. (2022a). Emisiones de aviones y barcos: datos y cifras (infografía). <<https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20191129STO67756/emisiones-de-aviones-y-barcos-datos-y-cifras-infografia>> [consulta: 8 de febrero de 2024]
- ReFuelEU Aviation (2024). Disponible en: <https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/environment/refueleu-aviation_en> [consulta: 10 de octubre de 2024]
- Ritchie, H., Roser, M., y Rosado P. (2020a). Emissions by sector: where do greenhouse gases come from? Our World in Data. Recuperado el 7 de enero de 2024 de: <<https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>>
- Rojas-Michaga, M.F., Michailos, S., Cardozo, E., Akram, M., Hughes, K.J., Ingham, D., y Pourkashanian, M. (2023). Sustainable aviation fuel (SAF) production thorough power-to-liquid (PtL): A combined techno-economic and life cycle assessment. *Energy Conversion and Management*. ELSEVIER.
- Searle, S., y Christensen, A. (2018). Decarbonization potential of electrofuels in the European Union. International Council on Clean Transportation. <<https://theicct.org/publication/decarbonization-potential-of-electrofuels-in-the-european-union/>> [consulta: 20 de abril de 2024]
- Searle, S. (2020). E-fuels won't save the internal combustion engine. ICCT Staff Blog. <<https://theicct.org/e-fuels-wont-save-the-internal-combustion-engine/>>
- Sánchez Delgado, M. (2019). Desarrollo y validación de un modelo para la simulación de sistemas de electrólisis alcalina para la producción de hidrógeno a partir de energías renovables. (Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid).
- Syirat, Z., Ker, J., Mohamed, H., y Ong, H.C. (2024). Recent advancement and assessment of green hydrogen production technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. ELSEVIER
- Terwel, R., y Kerkhoven, J. (2018). Carbon neutral aviation with current engine technology: The take-off of synthetic kerosene production in the Netherlands (p. 62). <https://kalavasta.com/assets/reports/Kalavasta_Carbon_Neutral_Aviation.pdf>
- Transport & Environment. (2024). The challenges of scaling up e-kerosene production in Europe. <https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2024/01/2024_01_E-kerosene_Tracker_TE.pdf> [consulta: 20 de mayo de 2024]
- Weitcamp, J. (2012). Catalytic Hydrocracking—Mechanisms and Versatility of the Process. CHEMCATCHEM.
- Zhou, Y., Searle, S., Pavlenko, N. (2022). Current and future cost of e-kerosene in the United States and Europe. International Council on Clean Transportation

TECHNOLOGICAL AND ECONOMIC FEASIBILITY AND EMISSIONS ANALYSIS OF THE USE OF E-KEROSENE IN ITALY IN THE AERONAUTICAL SECTOR

ABSTRACT: This paper presents the technical, economic feasibility and emission analysis of the production of e-kerosene (SAF) by Fischer-Tropsch chemical synthesis for use in the Italian air transport sector. The technical feasibility is analysed using green hydrogen and captured carbon dioxide as sustainable feedstock. The economic assessment analyses the SAF Levelised Cost and its production in the European Union and the environmental analysis analyses the emission reduction by using SAF instead of fossil fuels. Ongoing projects in 9 EU countries demonstrate technical feasibility. The average cost of SAF will decrease with a quadratic trend from 2020 to 2050, so that in the future it will be able to compete in the market if fiscal incentives and externalities, such as CO₂ emissions, are considered in the cost of fossil kerosene. Environmental analysis shows that CO₂ emissions from e-kerosene equal the CO₂ captured, offsetting global net emissions.

Keywords: Carbon Capture, Green Hydrogen, Synthetic Fuels, e-kerosene, Fischer-Tropsch Chemical Synthesis, Syngas