

ANÁLISIS

Desfossilización de la aviación con e-SAF

Introducción a las tecnologías, políticas y mercados de
combustibles de aviación sostenibles



Pie de impresión

Desfossilización de la aviación con e-SAF

Introducción a las tecnologías, políticas y mercados de combustibles de aviación sostenibles

ANÁLISIS

Publicado por

Agora Verkehrswende

Anna-Louisa-Karsch-Str. 2 | 10178 Berlín | Alemania
www.agora-verkehrswende.de
info@agora-verkehrswende.de

International PtX Hub

Potsdamer Platz 10 | 10785 Berlín | Alemania
Tel. +49 61 96 79-0
Fax: +49 61 96 79-11 15
www.ptx-hub.org
info@ptx-hub.org

Implementación

Gestión de proyectos

Ulf Neuling
ulf.neuling@agora-verkehrswende.de
Leon Berks
leon.berks@agora-verkehrswende.de

Autores

Ulf Neuling, Leon Berks, Torsten Schwab, Ruth Barbosa,
Ulrich Kast, Christoph Michel

Edición lingüística: Mariana Panella

Diagramación: Marica Gehlfuß

Imagen de portada: Michal Krakowiak / iStock

Publicación: Julio 2024 (versión original en inglés),
Julio 2025 (traducción al español)

131-2025-ESP

Agradecimientos

Los autores deseamos agradecer a todos los expertos internacionales a los que hemos consultado por sus valiosos aportes en relación con las políticas internacionales de PtX, así como a los asesores de Alemania por su apoyo. Como autores no asumimos responsabilidad alguna por la exactitud de la información facilitada en gráficos o mapas provenientes de fuentes secundarias ni por la información presentada en relación con las políticas internacionales de PtX.

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) ha contribuido con esta publicación a través del proyecto International Power-to-X Hub. Este proyecto está financiado por la Iniciativa Climática Internacional (IKI) del Ministerio Federal de Economía y Protección del Clima (BMWK) de Alemania.

Con el apoyo de:



on the basis of a decision
by the German Bundestag

Citar como:

Agora Verkehrswende y PtX Hub (2025): *Desfossilización de la aviación con e-SAF – Introducción a las tecnologías, políticas y mercados de combustibles de aviación sostenibles.*

www.agora-verkehrswende.org

Prólogo

Estimados lectores:

Lo que comenzó como un humilde experimento con un fuselaje revestido de algodón en Kitty Hawk hace un siglo se ha transformado en una industria multimillonaria que desempeña un papel crucial en nuestro mundo globalizado. Sin duda, la aviación es mucho más que un medio de transporte, acortando distancias y permitiendo la cooperación y el intercambio entre los pueblos. Sin embargo, no todos los efectos de la aviación son beneficiosos. Las emisiones del sector han seguido una tendencia ascendente durante décadas, y se prevé que aumenten aún más, pese al incremento en la eficiencia de las aeronaves.

La eliminación progresiva de los combustibles fósiles en la aviación representa un desafío importante dentro del proyecto más amplio de alcanzar la neutralidad climática. Una opción es un cambio modal hacia soluciones de movilidad libres de emisiones y más eficientes, pero la demanda de vuelos seguirá siendo significativa. Y, al igual que el transporte marítimo, la aviación es un sector "difícil de descarbonizar", pues existen importantes impedimentos técnicos para la electrificación directa y la propulsión basada en hidrógeno. Juntas, la aviación y el transporte marítimo representan alrededor del 5 % de las emisiones globales de CO₂, y es probable que este porcentaje aumente a medida que otros sectores se desfosilizan.

¿Cómo lograr una aviación con impacto climático neutro sin renunciar a los beneficios que brinda a nuestro mundo globalizado? Existe un consenso inusual entre políticos, académicos y líderes empresariales: la neutralidad climática en la aviación solo será posible a largo plazo si se reemplaza el combustible convencional por alternativas más sostenibles y respetuosas con el clima. Los combustibles de aviación sostenibles (SAF) abarcan opciones desde biocombustibles hasta e-SAF sintéticos. Sin embargo, la producción mundial de estos combustibles crece muy lentamente.

Dadas las limitaciones técnicas asociadas a las rutas específicas de producción de e-SAF, los expertos consideran que la producción a gran escala de e-SAF a partir de electricidad renovable y CO₂ atmosférico es la opción más prometedora para una aviación neutra en carbono. No obstante, su producción suficiente requeriría un aumento masivo de la generación de energías renovables, así como inversión adicional en I+D y en tecnología de

captura directa de aire (DAC). También consumiría grandes volúmenes de agua dulce, lo que exigiría, especialmente en regiones áridas con buenas condiciones solares, desalinización a gran escala.

En consecuencia, los desafíos son considerables. Sin embargo, los países que se comprometan a desarrollar la producción de e-SAF para satisfacer la demanda mundial de combustible sostenible podrían obtener beneficios económicos significativos, no solo en la balanza comercial, sino también mediante externalidades positivas para el desarrollo nacional. A medida que las regiones óptimas para producir e-SAF aprovechen esta oportunidad, habrá que garantizar que las inversiones no canibalicen los esfuerzos nacionales de transición energética, respondan a criterios de sostenibilidad coherentes y no vulneren los principios de un desarrollo justo e inclusivo.

Este documento ofrece una visión general del estado actual de la investigación con vistas a la desfosilización del sector de la aviación utilizando e-SAF. Está estrechamente relacionado con nuestro documento de debate E-fuels: Separating the substance from the hype, en el que describimos cómo los combustibles sintéticos basados en electricidad pueden contribuir a la transición energética en el transporte. Las principales conclusiones de ambos documentos son similares. Sin embargo, aquí nos centramos estrictamente en la aviación y analizamos en profundidad el potencial del e-SAF.

Nuestro objetivo es proporcionar un fundamento basado en evidencia para el debate político, destacando opciones para un desarrollo justo e inclusivo. Si los responsables políticos desean aumentar la producción mundial de e-SAF y permitir así la desfosilización de la aviación, deben tomarse decisiones a corto plazo sobre la base de una estrategia concertada internacionalmente, sustentada en prioridades claras. Para ello, es crucial distinguir entre opciones viables y meras ilusiones.

Esperamos que este documento sea de utilidad e informativo.

Saludos cordiales,

Wiebke Zimmer y Torsten Schwab

Director Ejecutivo Adjunto | Director

En representación de Agora Verkehrswende y el equipo del International PtX Hub

Berlín, julio de 2024

Principales conclusiones

1

El sistema actual de combustibles fósiles no es una opción viable para el futuro, y el SAF será indispensable para impulsar la protección del clima en el sector de la aviación. El objetivo de la transición del sector de la aviación a sistemas eléctricos de batería, eléctricos de hidrógeno y/o de combustión de hidrógeno enfrenta grandes desafíos técnicos, lo que hará necesaria la dependencia de los hidrocarburos líquidos durante muchos años, sobre todo cuando se trate de vuelos de larga distancia o de la descarbonización de las aeronaves existentes. Aunque se puede avanzar en la reducción de las emisiones del sector de la aviación mediante innovaciones técnicas y mejoras operativas, la demanda restante de combustible de hidrocarburos tendrá que cubrirse con e-SAF, que ofrece la ventaja de una escalabilidad prácticamente ilimitada. La principal tarea en los próximos años será avanzar en las curvas de aprendizaje y explotar las economías de escala para conseguir las mayores reducciones posibles en los costos de producción del e-SAF.

2

Los responsables políticos de todo el mundo deberían facilitar el crecimiento del mercado de e-SAF mediante la adopción de marcos políticos y normativos adecuados. En lugar de basarse en medidas individuales, los formuladores de políticas deberían esforzarse por adoptar paquetes normativos integrales dirigidos a los actores de toda la cadena de suministro de combustible. La introducción coordinada de estas medidas en varios países contribuiría a reducir el riesgo de fragmentación del mercado y la fuga de carbono. En consecuencia, es esencial la cooperación internacional en materia de inversión y política normativa de los e-combustibles.

3

El desarrollo de criterios integrales de sostenibilidad para los e-SAF -y no solo para el hidrógeno- es esencial para garantizar su producción y uso social y ambientalmente responsable. En este sentido, la cooperación, las normas y los sistemas de certificación internacionales deben regirse por los siguientes principios: (1) el suministro de electricidad renovable para la economía nacional y la población debe priorizarse sobre la producción de e-combustibles destinados a la exportación; (2) los proyectos de e-SAF deben basarse exclusivamente en capacidad adicional desarrollada como un suplemento a las necesidades nacionales de energía renovable; (3) dicha capacidad adicional debe desarrollarse de manera que respalde la expansión de la infraestructura y el desarrollo económico locales; y (4) la electricidad renovable debe utilizarse de la manera más eficiente posible en los países productores de e-combustible, priorizando las aplicaciones eléctricas directas, como los vehículos eléctricos.

4

Una vez establecidos los marcos políticos para el e-SAF, corresponderá a la industria y a los inversores ampliar rápidamente su suministro. La producción mundial de e-SAF prevista para 2030 representa aproximadamente el 3% de la demanda actual de combustible de aviación de la UE. En consecuencia, para lograr una descarbonización significativa del sector, no solo es fundamental materializar los proyectos anunciados hasta la fecha, sino también ampliar significativamente el número de proyectos en desarrollo (tanto a gran como a pequeña escala). En el ámbito de la captura de carbono, se requiere una mayor inversión en I+D para optimizar las soluciones tecnológicas (incluida, en particular, la captura directa de aire (DAC) y permitir su adopción generalizada.

5

No basta con centrarse únicamente en las regiones que ofrecen condiciones especialmente favorables para la producción de e-SAF, sino que es necesaria una estrategia global que abarque todas las dimensiones críticas de su producción. Una estrategia eficaz para acelerar la producción de e-SAF debe garantizar una amplia generación de energías renovables, un abastecimiento sostenible de carbono y modelos viables para la financiación de proyectos. Además, los responsables de la formulación de políticas deben enfocarse en dirigir la producción y el uso de e-SAF hacia la consecución de los objetivos de la política climática. En este sentido, el establecimiento de normas internacionales robustas desempeñará un papel importante.

Inhalt

Prólogo	3
Principales conclusiones	4
1 Introducción: La aviación en el contexto mundial	7
1.1 Mitigación del cambio climático en la aviación	9
1.2 Descripción general de los combustibles de aviación	12
2 Combustibles de aviación sostenibles	14
2.1 Propiedades del combustible de aviación	14
2.2 Rutas de producción de SAF aprobadas	15
2.3 El potencial de reducción de GEI del SAF	17
3 Qué es el e-SAF y cómo se produce	19
3.1 Definición del e-SAF	21
3.2 Suministro de materias primas	21
3.3 Síntesis del combustible	22
3.4 Procesamiento del combustible	24
4 Producción de e-SAF sostenible	26
4.1 Dimensiones de la sostenibilidad	26
4.2 Normas y criterios de sostenibilidad para la aviación	30
4.3 Certificación de sostenibilidad	31
4.4 Contabilización: el enfoque de “Book and Claim” (registro y reclamación)	33
5 Costos de producción del e-SAF	35
6 Instrumentos de política existentes y ambición	39
6.1 Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) de las Naciones Unidas	39
6.2 Unión Europea	40
6.3 Estados Unidos de América	41
6.4 Reino Unido	42
6.5 Japón	43
6.6 Brasil	43
6.7 India	43
6.8 Sudáfrica	44
7 Demanda y disponibilidad de e-SAF	45
7.1 Previsión de la demanda futura de e-SAF	46
7.2 Producción anunciada de e-SAF	47
7.3 Demanda europea de e-SAF	49

8 La misión de desfossilizar la aviación	53
9 Conclusión	56
Bibliografía	58
Lista de abreviaturas	71
Anexo	73

1 | Introducción: La aviación en el contexto mundial

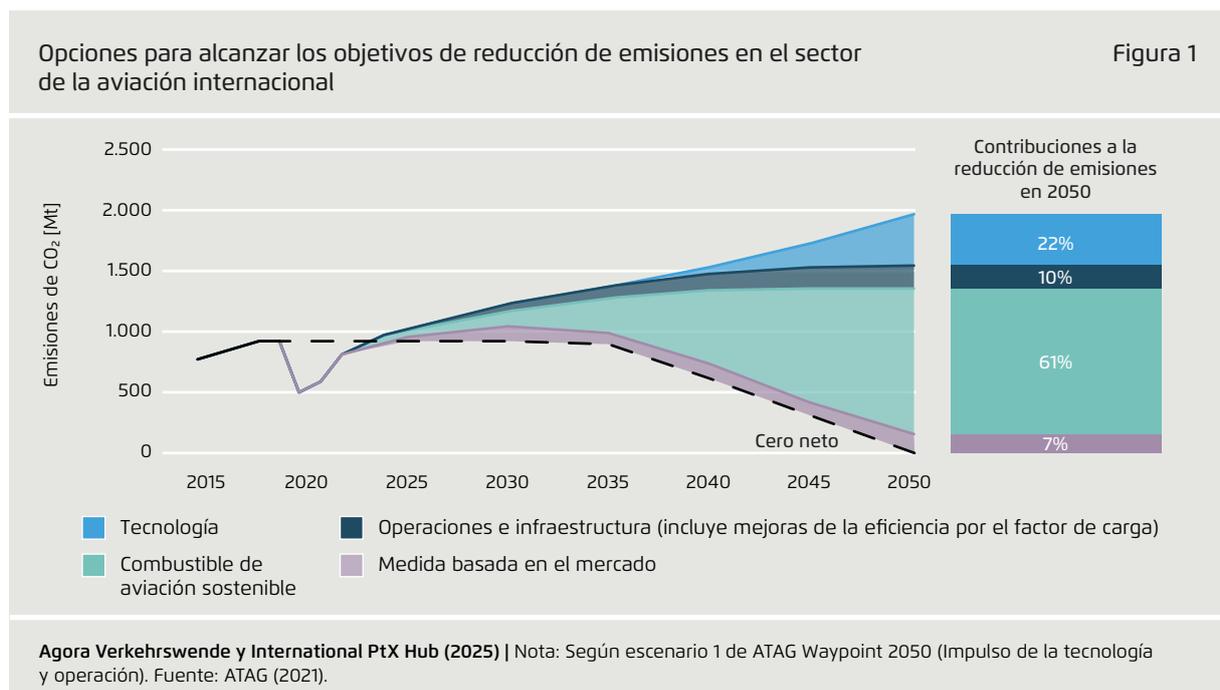
La aviación internacional representa alrededor del 3 de las emisiones mundiales de CO₂. Sin embargo, es probable que su impacto climático real sea mucho mayor. Además de las emisiones directas de CO₂ derivadas de la combustión de combustibles de aviación fósiles y la emisión de otros gases de efecto invernadero en la producción y el suministro de combustibles, también hay otros efectos „no relacionados con el CO₂“ que repercuten en el balance energético de la tierra, como la formación de estelas de condensación y los cirros resultantes. Asimismo, el tráfico aéreo no ha dejado de crecer sistemáticamente en las últimas décadas, a pesar de una caída temporal provocada por la pandemia mundial. En consecuencia, el impacto climático total de la aviación va en aumento, a pesar de que los aviones son cada vez más eficientes.

El sector de la aviación debe reducir significativamente su impacto climático para estar en consonancia con el objetivo de 1,5 °C. Teniendo en cuenta esto, el Grupo de Acción del Transporte Aéreo (ATAG) y otras asociaciones de aviación han fijado como objetivo: 1. lograr un crecimiento neutro en carbono a partir de 2025 y, 2. alcanzar emisiones netas cero de CO₂ para 2050 (Figura 1).

Sin embargo, la eliminación progresiva de los combustibles fósiles - también conocida como desfosilización -

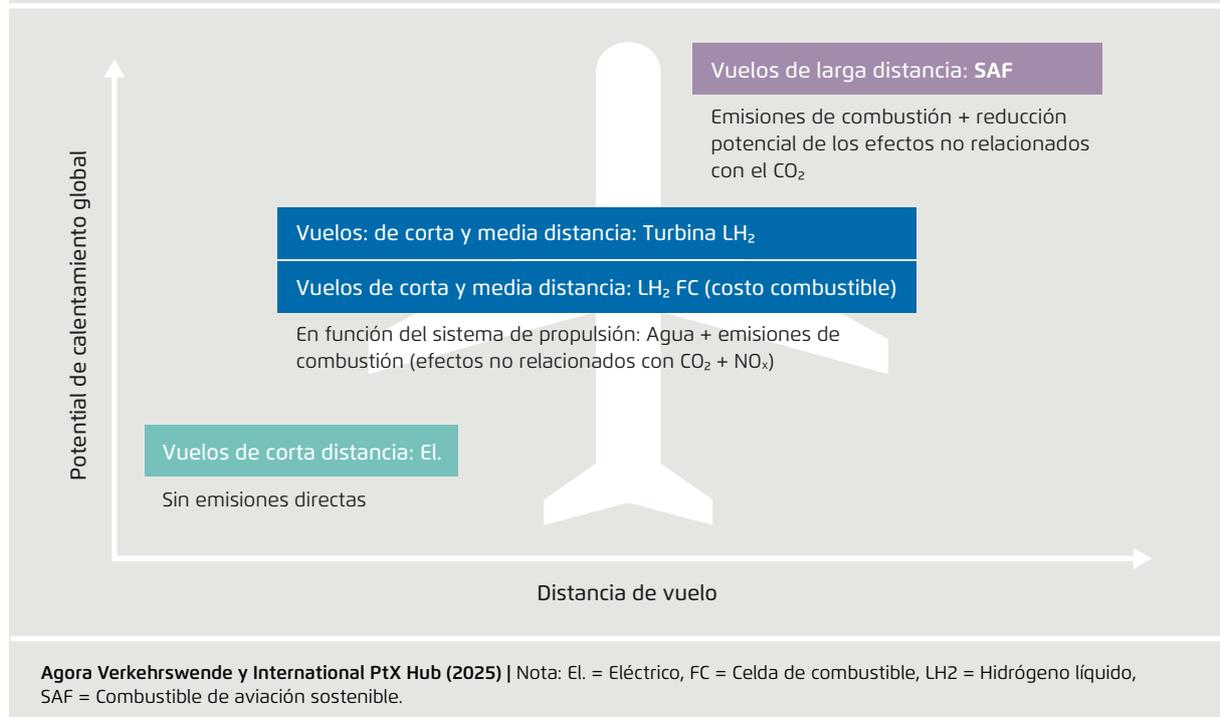
enfrenta retos únicos en el sector de la aviación. Entre ellos se destacan la larga vida útil de las aeronaves (20 – 30 años) y los requisitos especiales que deben cumplir los combustibles de aviación (especificaciones sobre densidad energética, punto de inflamación, y flujo en frío). Aunque se están desarrollando aeronaves eléctricas a batería y propulsadas por hidrógeno que podrían reducir la dependencia de los combustibles de hidrocarburos líquidos, en un futuro previsible el tráfico aéreo seguirá dependiendo de los combustibles líquidos, sobre todo en vuelos de larga distancia. Por ello, el sector de la aviación busca una mayor eficiencia climática a través de diversos medios, como las innovaciones técnicas (por ejemplo, construcción de estructuras más ligeras y sistemas de propulsión más eficientes en el consumo de combustible), la mejora de las medidas operativas (por ejemplo, la optimización de rutas de vuelo y altitudes de crucero) y, por último, pero no por ello menos importante, la utilización de combustibles de aviación sostenibles (SAF), es decir, combustibles alternativos que sean lo más sostenibles y respetuosos con el clima posible. La Figura 2 presenta una visión general de las opciones de propulsión en función de distancias de vuelo y los impactos climáticos.¹

1 BDLI (2020), DLR (2020), T&E (2022 a).



Opciones de propulsión y transición energética para la aviación y su impacto climático

Figura 2



Efectos no-relacionados con el CO₂

La dependencia de combustibles de aviación sostenibles (SAF) neutros en carbono y casi neutros en carbono reduce el impacto climático de la aviación al evitar la emisión adicional de CO₂ fósil. Sin embargo, debido a los „efectos no relacionados con el CO₂“, el impacto climático real del sector es significativamente mayor que las emisiones directas provenientes de la combustión de combustibles. El término „efectos no relacionados con el CO₂“ hace referencia a una serie de impactos atmosféricos, como las estelas de condensación de los aviones, que pueden favorecer la formación de nubes cirros que atrapan el calor, y las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) que favorecen la formación de ozono, un potente gas de efecto invernadero (véase Figura 3). Aunque algunos efectos no relacionados con el CO₂ tienden a reducir el calentamiento global, los impactos netos sobre el calentamiento siguen siendo, como mínimo, tan elevados como las emisiones de carbono de la aviación.

Según las estimaciones actuales, los efectos no relacionados con el CO₂ -que, al menos en parte, son causados por cualquier combustible de hidrocarburos- representan hasta dos tercios del impacto climático total de la aviación.² Dichos efectos pueden producirse incluso cuando los aviones funcionan totalmente con hidrógeno, aunque los impactos climáticos asociados son aún más inciertos en este caso.³ De cualquier modo, los impactos no relacionados con el CO₂ no se consideran actualmente, ni en las metas de neutralidad de carbono en la aviación internacional, ni en los regímenes de comercio de derechos de emisión de CO₂.⁴

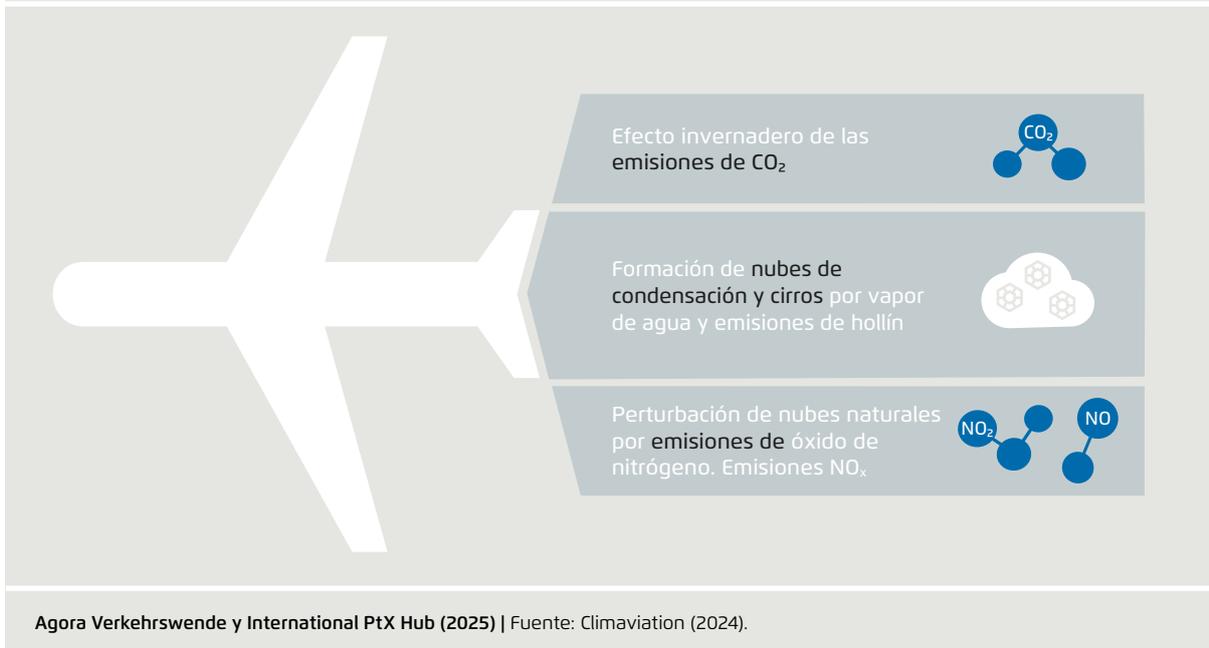
2 DLR (2024), Lee et al. (2021).

3 Airbus (2023 a).

4 Sin embargo, el RCCDE revisado (véase la sección 6) al menos aborda esta cuestión, señalando que „un marco MRV para las emisiones no relacionadas con el CO₂ procedentes de la aviación debería aplicarse a partir de 2025, y evaluarse en 2027. En 2028, tras una evaluación de impacto, la Comisión podrá presentar una propuesta para examinar las

El impacto climático de los efectos no relacionados con CO₂

Figura 3



No obstante existen varias estrategias para reducir los efectos no relacionados con el CO₂. La composición específica del combustible de aviación influye en las propiedades de las estelas de condensación y puede reducir el riesgo de formación de nubes cirros. Los combustibles sintéticos, como el e-SAF, tienen altos niveles de pureza, lo que se traduce en menos emisiones de partículas, reduciendo así la probabilidad de formación de nubes cirros.⁵

En este contexto, los instrumentos normativos destinados a reducir el impacto climático de la aviación ya no deben centrarse exclusivamente en las emisiones de carbono procedentes de la combustión de combustibles, sino que también deben tener en cuenta los efectos no relacionados con el CO₂ y cómo evitarlos, promoviendo la modificación de los procedimientos operativos (por ejemplo, el cambio de rutas de vuelo en función de las condiciones meteorológicas) y la utilización de combustibles sintéticos.

emisiones no relacionadas con el CO₂ procedentes de la aviación" (Parlamento Europeo 2024).²

⁵ T&E (2022b).

1.1 Mitigación del cambio climático en la aviación

Además de las medidas implementadas dentro del propio sector de la aviación, existen varias opciones para reducir su impacto climático global. Entre ellas se incluyen políticas orientadas a fomentar un cambio en la movilidad (por ejemplo, una mayor dependencia del ferrocarril de alta velocidad); mecanismos de fijación de precios del carbono (por ejemplo, la inclusión de la aviación en el Régimen de Comercio de Derechos de Emisión de la UE (RCCDE/EU-ETS); y medidas destinadas a la reducción de la demanda (como restricciones a los viajes de negocios). Según un estudio realizado por T&E, la combinación estratégica de las políticas de gestión de la demanda con el objetivo de maximizar su impacto podría reducir aproximadamente a la mitad las emisiones de la aviación en Europa.⁶

Sin embargo, tales escenarios de políticas de reducción de las emisiones en el sector de la aviación son poco probables que se alcancen a escala mundial, especialmente si se consideran las regiones emergentes. Por consiguiente, es

⁶ T&E (2022a).

necesario estudiar medidas que puedan adoptarse para reducir el impacto climático de la aviación pero que no requieran de una legislación nacional exhaustiva. Como primer paso, se debería incentivar a la industria de la aviación a aplicar medidas de eficiencia que reduzcan la cantidad de combustible consumido por pasajero-kilómetro, reduciendo así las emisiones de GEI. Hay dos formas de aumentar la eficiencia: (1) la innovación técnica; y (2) la optimización de las operaciones de vuelo y en tierra. Independientemente de cualquier compromiso con la protección del medio ambiente, las aerolíneas tienen un incentivo económico considerable para aplicar tales medidas, ya que reducen el consumo de combustible, que tiene un fuerte impacto en su rentabilidad.

Innovación técnica

Las innovaciones técnicas orientadas a la eficiencia buscan reducir directamente el consumo específico de combustible de las aeronaves por diversos medios (por ejemplo, reduciendo el peso, mejorando la aerodinámica y aumentando la eficiencia de los sistemas de propulsión). Aunque hace décadas que se habla de diseños de aeronaves disruptivos⁷, como los conceptos de alas arriostradas y ala integrada al fuselaje, la producción en serie de estos tipos de aeronaves aún no se ha materializado, entre otras cosas debido a los elevados costos de desarrollo y a la necesidad de nuevas tecnologías de producción. Otros obstáculos para la adopción de diseños radicalmente nuevos son la necesidad de adaptar la infraestructura aeroportuaria (pasarelas de embarque, pistas) y el riguroso proceso de certificación que precedería necesariamente a un uso comercial generalizado.

Los fabricantes de aeronaves se han esforzado por reducir el peso de las nuevas generaciones de aeronaves, no sólo mejorando las técnicas de fabricación, sino también recurriendo a materiales compuestos más ligeros que puedan sustituir a los metales (particularmente el aluminio). Las innovaciones en diseño y producción, como la impresión 3D, permitirán reducir aún más el peso de los fuselajes en los próximos años. También se vislumbra un potencial prometedor en el ámbito de las estructuras y componentes integrados, que pueden reducir el número total de piezas necesarias y, por extensión, el peso total.⁷

Otro medio para reducir el consumo de combustible es mejorar la aerodinámica de las aeronaves. Entre las opciones técnicas importantes en este sentido figuran la curvatura variable del ala, los dispositivos de punta de ala y las superficies adaptadas para reducir la resistencia aerodinámica (por ejemplo, riblets, perfiles aerodinámicos supercríticos, tecnología de piel de tiburón). Si bien algunas de estas características deben implementarse durante el proceso inicial de diseño, otras pueden añadirse a las aeronaves ya existentes. Las alas adaptables que ajustan su forma en función de las condiciones de vuelo para optimizar la sustentación y reducir el consumo de combustible representan un área de desarrollo de vanguardia.

También se pueden lograr reducciones significativas en el consumo de combustible con sistemas de propulsión más eficientes (Figura 4). A modo de ejemplo, el Airbus A320neo es entre un 10 y un 20 % más eficiente que su modelo predecesor, el A320, gracias a la mejora de la tecnología de sus motores. Sin embargo, para la próxima generación de motores turbofán, prevista a partir 2030, se prevén aumentos de la eficiencia del combustible de sólo un 5 – 10 %, debido al escaso potencial para optimizaciones adicionales.⁸ Por ello, los ingenieros están explorando diseños alternativos, como los motores turbohélice y de rotor abierto, que podrían ofrecer aumentos de eficiencia de hasta un 20 – 30 % en comparación con los actuales motores turbofán.⁹ Aunque se pueden conseguir grandes mejoras de eficiencia con las nuevas tecnologías, la ley de los rendimientos decreciente limita invariablemente las mejoras adicionales a medida que los diseños evolucionan.

Optimización de las operaciones de vuelo y en tierra

Las reducciones de emisiones que pueden lograrse mediante la optimización de las operaciones en tierra y en vuelo suelen englobarse en la categoría de „medidas operativas“, aunque ambas son considerablemente distintas. La principal diferencia radica en quién aplica las medidas asociadas: las compañías aéreas y los organismos de control del tráfico aéreo son responsables de mejorar las operaciones de vuelo, mientras que los operadores aeroportuarios y los fabricantes de los equipos de apoyo en tierra son responsables de mejorar las operaciones en tierra.

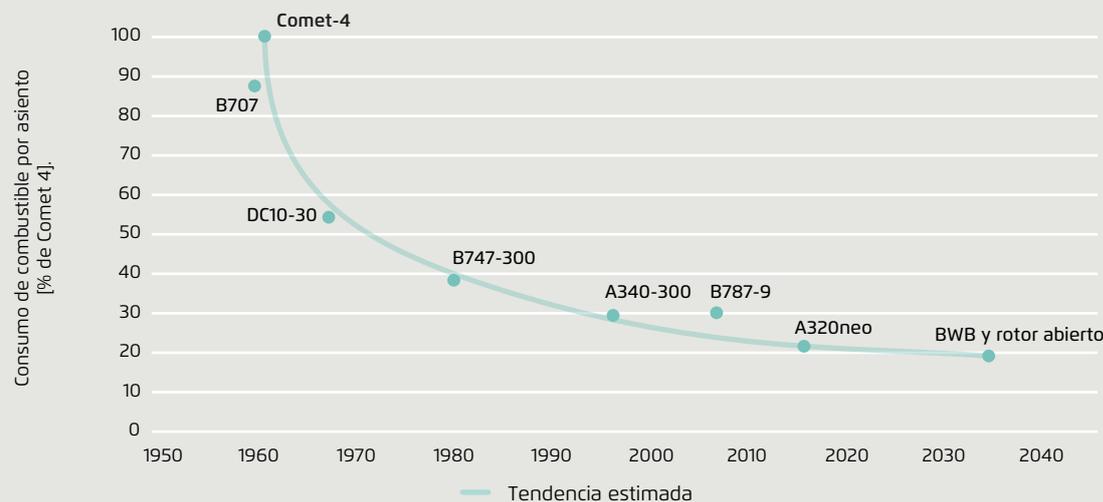
⁸ IATA (2019).

⁹ Safran (2019). IATA (2019), por el contrario, solo observa un potencial de mejora de la eficiencia del 5 – 10 % para estos tipos de motores.

⁷ Airbus (2021).

Las ganancias en eficiencia energética de las nuevas generaciones de turbinas a reacción disminuyen gradualmente en el tiempo

Figura 4



Agora Verkehrswende y International PtX Hub (2025) | Nota: Consumo de combustible o energía por asiento de las distintas aeronaves en comparación con Comet-4 (primer avión comercial propulsado a reacción). Fuente: IATA (2023).

La optimización de las operaciones en tierra abarca una serie de medidas, desde la adopción de equipos de apoyo en tierra con cero emisiones hasta la adaptación de las posiciones de estacionamiento con suministro de energía eléctrica para reducir las emisiones de las unidades auxiliares de energía (APU) de las aeronaves. La optimización de las operaciones en tierra también se extiende a la mejora de la infraestructura aeroportuaria en general (incluida la climatización de edificios y una mayor dependencia de la electricidad renovable). Varios aeropuertos en todo el mundo también han adoptado vehículos eléctricos y de celda de combustible de hidrógeno para la logística terrestre (remolcadores, tractores y cintas transportadoras de equipaje). Como complemento de estas medidas, los aeropuertos han instalado sistemas eólicos y fotovoltaicos. Delta Airlines ha sido pionera en este campo, con equipos de apoyo en tierra casi 100 % eléctricos en sus centros de Salt Lake City y Boston.¹⁰ Estas medidas no sólo contribuyen a mitigar el cambio climático en el sector de la aviación, sino que también reducen otras emisiones locales nocivas como las partículas, los NOx, los SOx e incluso el ruido. Sin embargo, es importante tener en cuenta que las emisiones de las

operaciones en tierra no suelen tenerse en cuenta a la hora de calcular el impacto climático de la aviación.

La optimización de las operaciones de vuelo, por el contrario, se refiere principalmente a la gestión optimizada de la velocidad y la altitud, así como a la mejora de las rutas para reducir el consumo de combustible y, por extensión, el impacto climático de la aviación. La optimización del control del tráfico aéreo (como prevé, por ejemplo, la iniciativa del Cielo Único Europeo¹¹) y otras medidas operativas podrían lograr una reducción acumulada de las emisiones de aproximadamente un 5%, según un estudio del año 2021.¹² También podrían lograrse otros pequeños aumentos de eficiencia incrementando el factor de carga (es decir, el número de pasajeros por vuelo) y

11 El Cielo Único Europeo es una iniciativa de la Comisión Europea que pretende combinar las jurisdicciones de control del tráfico aéreo, en su mayoría nacionales, en una zona de control combinado más amplia y, por tanto, más optimizada, lo que permitiría utilizar el espacio aéreo de forma más eficiente. Aunque la fusión de las jurisdicciones de tráfico aéreo lleva debatiéndose en la UE desde 1999, aún no se ha llevado a la práctica, principalmente por motivos de seguridad y soberanía de algunos Estados miembros.

12 Royal NLR, SEO Amsterdam Economics (2021).

10 Delta (2023).

el tamaño de las aeronaves. El Grupo de Acción del Transporte Aéreo (ATAG) ha calculado un potencial de reducción de emisiones de entre 0% y 6% hasta 2050 basado en la mejora de las operaciones de vuelo.¹³

Sin embargo, lo más probable es que éstas y otras mejoras de la eficiencia se vean superadas por el crecimiento de la demanda del transporte aéreo (véase también Figura 5). Sin duda, las medidas de eficiencia nunca podrán eliminar totalmente las emisiones. Por consiguiente, es necesario el uso de portadores de energía renovables para acercarse mínimamente a las emisiones netas cero en la aviación. Hasta que los avances tecnológicos posibiliten la producción en serie de aeronaves propulsadas por hidrógeno y baterías, la transición hacia la eliminación de combustibles convencionales en la aviación requerirá el uso de combustibles de aviación sostenibles (SAF) en motores de propulsión convencionales.

1.2 Descripción general de los combustibles de aviación

El sector de la aviación depende de varios tipos de combustible, definidos por normas internacionales (como las establecidas por ASTM International). Los tipos de combustible más utilizados son:

- Combustible para aviación (Jet A, Jet A-1, Jet-8)
- Mezcla de queroseno y nafta (Jet B)
- Gasolina de aviación (AVgas)
- Combustibles de aviación sostenibles (SAF)

Combustible para aviación

La norma ASTM D1655 fue adoptada en 1959, y establece los requisitos para los combustibles de turbina de aviación, definiendo así la norma para el combustible A-1. Esta norma, basada en DEFSTAN 91 (la norma británica para combustibles de aviación), se aplica en la mayor parte del mundo. Rusia, China, India y Brasil tienen sus propias normas, pero éstas representan principalmente implementaciones nacionales de la norma ASTM D1655. En general, el combustible de aviación (jet) A-1 es un producto de petróleo ligero refinado (queroseno) con características muy específicas (por ejemplo, en lo que respecta a sus puntos de inflamación y congelación. La principal diferencia entre el combustible Jet A (sólo

utilizado en EE.UU.) y el A-1 (resto del mundo) es el punto de congelación (el Jet A se congela a -40 °C; el Jet A-1, a -47 °C). Tras el refinado, diversos aditivos se mezclan en el combustible para ajustar sus propiedades. El combustible Jet Propellant 8 (JP-8) de grado militar de la OTAN se basa en Jet A-1, pero contiene aún más aditivos.

Jet B

En las regiones muy frías, se utiliza una mezcla de nafta y queroseno llamada Jet B debido a su excelente comportamiento en climas fríos. Gracias a la elevada proporción de nafta/gasolina (aproximadamente 7:10), tiene un punto de inflamación bajo y un punto de congelación muy bajo (-60 °C). Sin embargo, esto lo hace más peligroso de manipular que el combustible Jet A-1, por lo que sólo se utiliza en climas muy fríos (y principalmente con fines militares).

AVgas

Las aeronaves privadas deportivas y más pequeñas suelen tener motores de pistón, lo que exige otro tipo de combustible. La gasolina de aviación, o AVgas para abreviar, es un combustible con plomo de octanaje alto. Sin embargo, la demanda mundial de este tipo de combustible es muy baja en comparación con el Jet A-1 o la gasolina para vehículos. Además, como el AVgas suele ser más caro que los combustibles de aviación a base de queroseno, los niveles de consumo han ido disminuyendo en los últimos años.

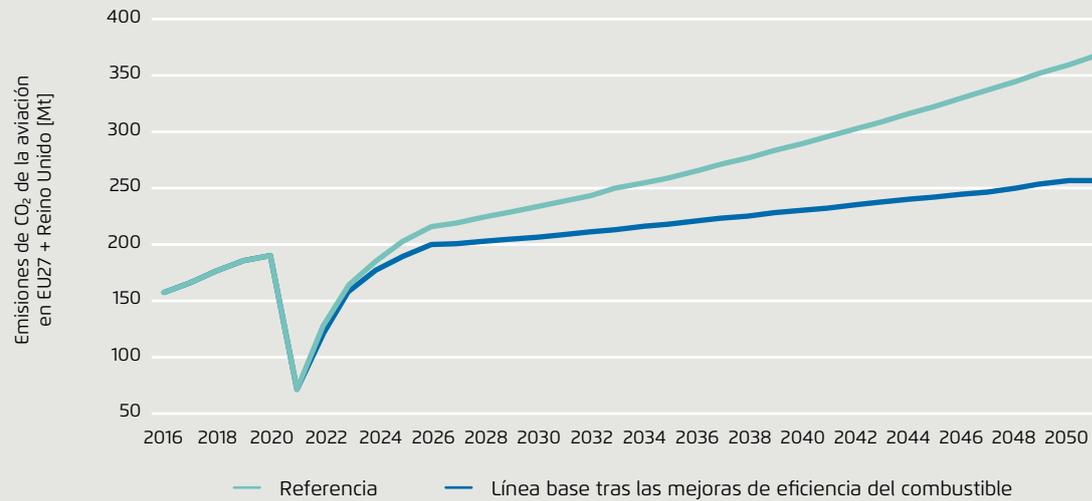
Bio-SAF

Los biocombustibles para la aviación se engloban en la categoría más amplia de combustibles de aviación sostenibles (SAF). Otros nombres comunes son biojet, bioqueroseno y biocombustible de aviación o combustible de aviación de base biológica. Para ser utilizados en la aviación comercial, estos biocombustibles deben producirse mediante procesos de producción certificados y materias primas específicas (según la norma ASTM D7566, véase más abajo). El combustible producido de este modo se denomina componente sintético de mezcla (SBC) y puede mezclarse con combustible Jet A-1 convencional hasta determinadas proporciones de mezcla, en función del proceso de producción (véase más adelante). A diferencia de otros combustibles de aviación sintéticos (como el e-SAF), el contenido energético del combustible final y el carbono que contiene proceden de la biomasa utilizada como materia prima.

13 ATAG (2021).

Potencial de reducción de las emisiones de CO₂ por mejoras en la eficiencia del combustible en la aviación de UE27 y Reino Unido

Figura 5



Agora Verkehrswende y International PtX Hub (2025) | Fuente: T&E (2022 a).

e-SAF

Otra opción de SAF es sintetizar combustible utilizando energía eléctrica. El proceso de síntesis del combustible se parece al del bio-SAF, pero el hidrógeno electrolítico y el dióxido de carbono sirven como materias primas. El proceso de producción debe estar certificado según las normas existentes (ASTM D7566; véase más adelante) para su mezcla con el combustible convencional para aviación y uso en la aviación comercial. Aunque el carbono utilizado para sintetizar los e-combustibles puede proceder de fuentes biogénicas, la principal diferencia con los bio-SAF o los biocombustibles es que el contenido energético proviene del hidrógeno. Si este hidrógeno se obtiene mediante electrólisis, el principal contenido energético procede de la electricidad. En el debate general, se emplean diversos términos para hacer referencia a estos combustibles, como e-combustibles, e-queroseno, e-jetfuel y PtL-SAF. Sin embargo, en el contexto de esta publicación, se utilizará exclusivamente el término e-SAF.

2 | Combustibles de aviación sostenibles

Debido a los requisitos especiales que deben cumplir los combustibles de aviación, incluidos los relacionados con la seguridad, los nuevos combustibles están sujetos a un complejo proceso de aprobación. Este proceso se define en la norma ASTM D4054. El tipo de combustible más utilizado en la aviación civil es el Jet A-1, que suele ser un producto derivado del petróleo.¹⁴ Sin embargo, el Jet A-1 también puede incluir un componente sintético de mezcla hasta el límite de mezcla definido por la norma ASTM D7566. La mezcla de combustible resultante debe cumplir las especificaciones generales definidas por la norma ASTM D1655 (véase más adelante).¹⁵ Los componentes de mezcla pueden producirse sintéticamente a partir de carbón o gas natural. Alternativamente, pueden derivarse de biomasa (bio-SAF) o hidrógeno y CO₂ (e-SAF). Estas mezclas se denominan „combustibles drop-in”, porque son compatibles con los sistemas técnicos y las infraestructuras existentes. Con el fin de aprovechar el potencial de reducción de emisiones que ofrecen estos combustibles renovables, el sector de la aviación está explorando activamente el uso de SAF al 100 % como alternativa al

- 14 Definido en ASTM D1655 – Especificaciones de la norma para combustible de turbina de aviación.
 15 Definido en ASTM D7566 – Especificaciones de la norma para combustible de turbina de aviación que contiene hidrocarburos sintetizados.

Jet A-1. La sustitución completa del Jet A-1 se vislumbra como una opción viable en un futuro próximo para algunas rutas de producción de SAF.

2.1 Propiedades del combustible de aviación

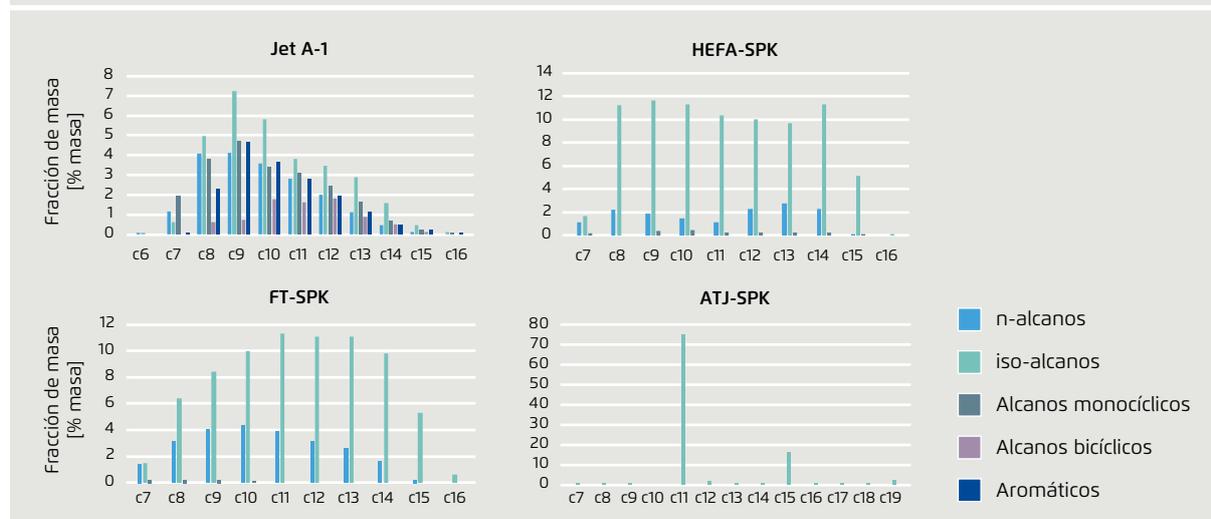
La homologación ASTM exige el cumplimiento de una serie de especificaciones. Algunos de los parámetros químicos y físicos más importantes del combustible con umbrales muy estrictos son:

- Densidad
- Punto de inflamación
- Punto de congelación
- Calor de combustión
- Porcentaje volumétrico de aromáticos

A menudo, estas propiedades están relacionadas o condicionadas por propiedades adicionales que no se verifican directamente durante la certificación. Además de su impacto en el diseño del motor y las operaciones de vuelo, estas propiedades son relevantes para el manejo en tierra y la ingeniería del sistema de combustible (por ejemplo, sistemas de seguridad de los tanques, intercambiadores de calor, bombas de combustible).

Comparación de diferentes SAF producidos a través de rutas de producción aprobadas, y resultados experimentales de dos nuevos candidatos a combustible

Figura 6



Agora Verkehrswende y International PtX Hub (2025) | Fuente: P. Le Clercq, comunicación personal, 18 de junio de 2024.

Las especificaciones definidas son, por supuesto, cumplidas por el combustible Jet A-1 convencional, ya que éste representa la norma mundial para la operación segura y fiable de las aeronaves. Sin embargo, las diversas especificaciones y umbrales también pueden cumplirse con varias fórmulas de combustible basadas en procesos de producción alternativos. La Figura 6 muestra los principales grupos de hidrocarburos para las opciones SAF aprobadas, (como se describe en la sección siguiente).

Aunque los tipos de SAF descritos en la Figura 6 presentan perfiles de hidrocarburos divergentes, existen algunas similitudes generales, sobre todo en lo que respecta a la prevalencia de algunos grupos de hidrocarburos (incluidos los alquenos y los oxigenantes). Los experimentos en I+D en el ámbito del diseño de combustibles siguen avanzando. Por lo general, el objetivo de este tipo de I+D es crear tipos de combustible optimizados que cumplan todas las especificaciones y que, además, presenten propiedades de combustión mejoradas, así como ventajas medioambientales o económicas.

2.2 Rutas de producción de SAF aprobadas

Debido a las estrictas normas de seguridad de la aviación, todos los procesos utilizados para producir SAF deben estar certificados por la organización internacional de normalización ASTM International. Normalmente, una ruta de producción se certifica en combinación con los recursos aplicables, por ejemplo, con los diferentes tipos de biomasa. El proceso de aprobación de una nueva ruta de producción de SAF (tal como se describe en la norma ASTM D4054) es costoso y demanda mucho tiempo; suele durar varios años y puede consumir una gran cantidad de combustible (hasta 100.000 litros). Recientemente se ha añadido un procedimiento más rápido y menos intensivo en la norma ASTM, denominado método Clearinghouse.¹⁶ Además, ASTM ha puesto en marcha un procedimiento acelerado con menos cantidad de ensayos, pero sólo para proporciones de mezclas de hasta el diez por ciento.¹⁷

Hasta la fecha, se han aprobado diez procesos diferentes: en concreto, ocho procesos independientes según la

norma ASTM D7566 y dos procesos de co-refinado según la norma ASTM D1655 (Tabla 1).¹⁸ Actualmente se están evaluando otros procesos de producción para su aprobación según la norma ASTM D4054, y se están desarrollando incluso otros procesos, pero aún no han comenzado su calificación formal.¹⁹ El proceso Fischer-Tropsch fue la primera vía de producción de combustible sintético de aviación que recibió la aprobación de la norma ASTM (ASTM D7566 Anexo 1). La aprobación de este combustible, denominado FT-SPK (queroseno parafínico sintético de Fischer-Tropsch), se concedió en 2009. La empresa energética Sasol sudafricana fue la primera en producir combustible sintético para aviación mediante el método Fischer-Tropsch. Originalmente, el carbón se gasificaba para producir gas de síntesis, a menudo llamado „syngas“, que es una mezcla de hidrógeno (H₂) y monóxido de carbono (CO). A continuación, se procesaba el syngas en un reactor Fischer-Tropsch para la síntesis de combustible. Sin embargo, la norma ASTM D7566 no hace referencia al carbón como materia prima; sólo exige la síntesis Fischer-Tropsch con cobalto o hierro como catalizadores. Esto significa que cualquier materia prima puede utilizarse para producir el gas de síntesis /syngas) necesario. Por consiguiente, no se requiere una nueva certificación cuando el FT-SPK se produce utilizando gas de síntesis procedente de fuentes sostenibles (es decir, hidrógeno verde y CO₂ procedente de la captura directa de aire).

Desde 2009 se han aprobado muchas otras rutas de producción, que abarcan un enorme abanico de posibles materias primas (tanto fósiles como renovables).

En cuanto al combustible e-SAF, actualmente hay tres rutas diferentes disponibles según ASTM: FT-SPK (ASTM D7566 Anexo 1); FT-SPK/A (ASTM D7566 Anexo 4); y el coprocesamiento de productos intermedios de FT (el llamado proceso crudo sintético) según ASTM D1655 - Anexo 2. Otro proceso que es prometedor (al menos desde el punto de vista técnico) es el denominado proceso de conversión de metanol en combustible de aviación, que aún no ha sido aprobado; pero cuyo proceso de certificación se inició a principios de 2023.²⁰

18 El término co-refinado se utiliza generalmente cuando las materias primas renovables o los productos intermedios se procesan junto con productos derivados del petróleo crudo en una refinería tradicional.

19 CAAFI (2024).

20 Central de Biocombustibles (2023 a).

16 ASCENT (2023).

17 Rumizen (2021).

Procesos de producción de SAF aprobados según ASTM D7566 y D1655 desde marzo de 2024 Tabla 1

ASTM	Anexo	Aprobación	Producto / Proceso	Max. Prop. de mezcla	Principal producto intermedio	Base de recursos	Compatible (potencialmente) con e-SAF)
D7566	1	2009	FT-SPK	50 vol%	Syngas	LC, H ₂ +CO ₂	Sí
	2	2011	HEFA-SPK	50 vol%	Lípidos (Pre-refinados)	Animal Fats, Veg. Oils	No
	3	2014	HFS-SIP	10 vol%	Azúcar	Azúcar, almidón, LC	No
	4	2015	FT-SPK/A	50 vol%	Syngas	LC, H ₂ +CO ₂	Sí
	5	2016	AtJ-SPK	50 vol%	Alcohol (etanol, isobutanol e isobuteno)	Azúcar, almidón, LC	No ^a
	6	2020	CH-SK	50 vol%	Lípidos (Pre-refinados)	Grasas animales, Aceites veg.	No
	7	2020	HC-HEFA-SPK	10 vol%	Aceite de algas (prerrefinado)	Algas	No
	8	2023	AtJ-SKA	50 vol%	Alcohol (etanol a pentanol)	Azúcar, almidón, LC	No
D1655	1	2018	Coprocesamiento	5 vol%	Lípidos (Pre-refinados)	Grasas animales, Aceites veg.	No
	1	2020	Coprocesamiento	5 vol%	FT Crudo sintético	LC, H ₂ +CO ₂	Sí

a Aunque la producción de e-SAF a partir de metanol puede considerarse técnicamente como un proceso AtJ, el proceso de producción y las propiedades del combustible final, muy probablemente diferirán de las rutas AtJ actualmente aprobadas y, por tanto, lo más probable es que se aprueben dentro de un nuevo anexo.

A = Aromáticos; ATJ = conversión de alcohol en combustible de aviación; CH = Hidrotermólisis catalítica; FT = Fischer-Tropsch; HC = hidrocarburos; HEFA = ésteres hidroprocesados y ácidos grasos; HFS = azúcares fermentados hidroprocesados; LC = lignocelulosa; SIP = isoparafinas sintéticas; SK = queroseno sintetizado; SKA = queroseno sintetizado con aromáticos; SPK = queroseno parafínico sintético.

SAF totalmente sintético

Debido a las normas vigentes para el combustible de aviación sintético y a las respectivas proporciones máximas de mezcla descritas anteriormente, el SAF totalmente sintético (es decir, SAF al 100% sin ningún combustible de aviación fósil) no se utiliza en la aviación comercial. Esto se debe principalmente a problemas de seguridad operativa (por ejemplo, para evitar fugas de combustible en los aviones más antiguos, se requiere un nivel mínimo de aromáticos para el hinchamiento adecuado de los anillos de sellado, compuestos que no están presentes en la mayoría de las opciones de SAF).²¹ Para llegar a un combustible 100% renovable, se exploran dos opciones, ambas actualmente en desarrollo por la ASTM:

1. Modificación del combustible: El diseño de los combustibles de aviación totalmente sintéticos podría modificarse para garantizar que cumplan todas las especificaciones pertinentes que tiene el combustible Jet A-1.
2. Modificación de la infraestructura de combustible (en tierra y en el avión).²² En teoría, la infraestructura de combustible y los aviones podrían ser compatibles al 100% con el SAF. Los combustibles para aviación totalmente sintéticos no plantean ningún problema desde el punto de vista técnico, a pesar de sus propiedades mínimamente diferentes (por ejemplo, menor contenido o sin contenido de aromáticos). El término „combustibles near drop-in“ se utiliza para hacer referencia a los combustibles que requieren ajustes en el motor y otras piezas. Tanto Airbus como Boeing ya han realizado pruebas exhaustivas con distintos tipos de SAF.²³ La agencia aeroespacial alemana DLR ha probado diversos combustibles en diferentes campañas de evaluación, y ha concluido que los aviones más modernos no tienen problemas con combustibles 100% SAF.²⁴ Además, Rolls-Royce ha anunciado que todos sus motores de aviación actualmente en producción son 100% compatibles con SAF.²⁵

21 Quante et al. (2023).

22 ASTM (2023).

23 Airbus (2023 b), Boeing (2023).

24 DLR (2021).

25 Rolls Royce (2023).

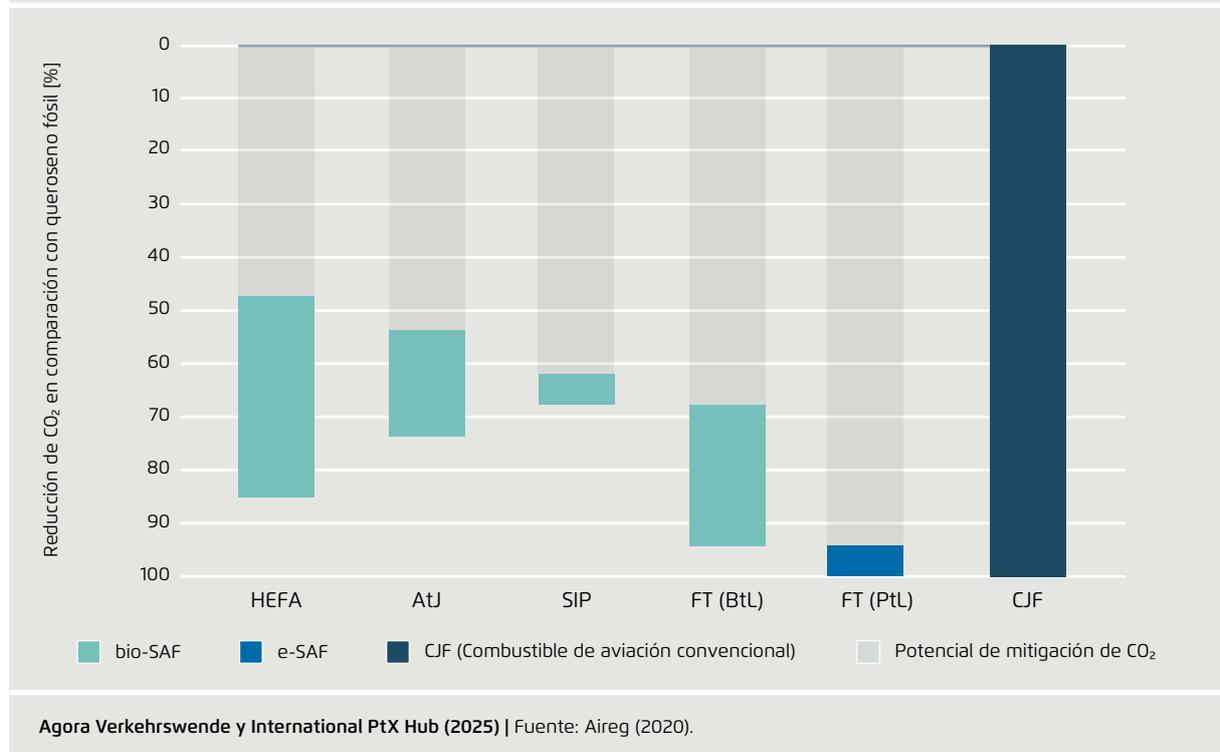
La aprobación de combustibles de aviación sostenibles (SAF) totalmente sintéticos podría acelerar significativamente el mercado de e-SAF. La supresión del requisito de mezclar SAF con Jet A-1 fósil permitiría que cualquier país produjera combustible de aviación, sin necesidad de instalaciones de almacenamiento o de mezcla separadas para SAF y combustible de aviación fósil. Aunque la mayoría de las aeronaves actuales no pueden almacenar SAF totalmente sintético, este obstáculo se superará gradualmente a medida que se vayan sustituyendo las flotas. La nueva infraestructura podría diseñarse para ser compatible con las nuevas normas y tipos de combustible emergentes, simplificando el proceso de homologación del combustible a un único proceso, en comparación con la necesidad actual de aprobar la producción de Jet A-1, SAF y sus mezclas. Por estas razones, el abastecimiento de combustible 100% SAF podría convertirse en un factor impulsor del crecimiento económico, sobre todo en países en desarrollo y economías emergentes.

2.3 El potencial de reducción de GEI del SAF

Un método ampliamente utilizado para comparar las emisiones de GEI de diversos combustibles es el análisis del ciclo de vida, o ACV (LCA). El método del ACV permite estimar las emisiones que se producen desde la producción inicial hasta el uso final (es decir, desde „el pozo a la estela“). Por consiguiente, puede utilizarse para comparar el potencial de mitigación climática de diferentes rutas de producción de SAF (incluidas las materias primas; véase Figura 7). Sin embargo, hay que tener en cuenta que las emisiones directas de CO₂ solo representan aproximadamente un tercio del impacto climático de la aviación. Los efectos no relacionados con el CO₂, incluidos los óxidos de nitrógeno (NOx), las estelas de vapor y la formación de nubes, representan los otros dos tercios.

La principal ventaja de los SAF es que el CO₂ emitido durante la combustión fue extraído previamente de la atmósfera, lo que permite un circuito cerrado de carbono (al menos en términos de emisiones directas de CO₂). Como resultado, la huella de GEI global de un SAF

Potencial de mitigación de CO₂ de diferentes tipos de SAF en comparación con el queroseno fósil Figura 7



específico se ve afectada principalmente por las materias primas subyacentes, el diseño del proceso y la combinación de fuentes de energía. El cálculo de las emisiones de GEI procedentes de la biomasa puede resultar especialmente complicado, ya que, en función del tipo de biomasa en cuestión, se deben tener en cuenta los denominados cambios indirectos en el uso de la tierra. Si se utiliza biomasa no alimentaria para la producción de SAF, normalmente no se produce una competencia directa por la tierra. Sin embargo, en algunos casos, el suministro de biomasa para la producción de combustible puede dar lugar a la conversión de tierras vírgenes, como selvas tropicales o pantanos, en tierras agrícolas, con el consiguiente aumento de las emisiones. Estos cambios indirectos en el uso de la tierra deben tenerse en cuenta a la hora de estimar las emisiones de GEI de los biocombustibles, ya que pueden tener un impacto enorme en el balance de emisiones de una ruta de producción de biocombustibles.

En cambio, no hay emisiones adicionales de GEI cuando la producción de biocombustibles se basa en insumos residuales (como subproductos agrícolas, residuos

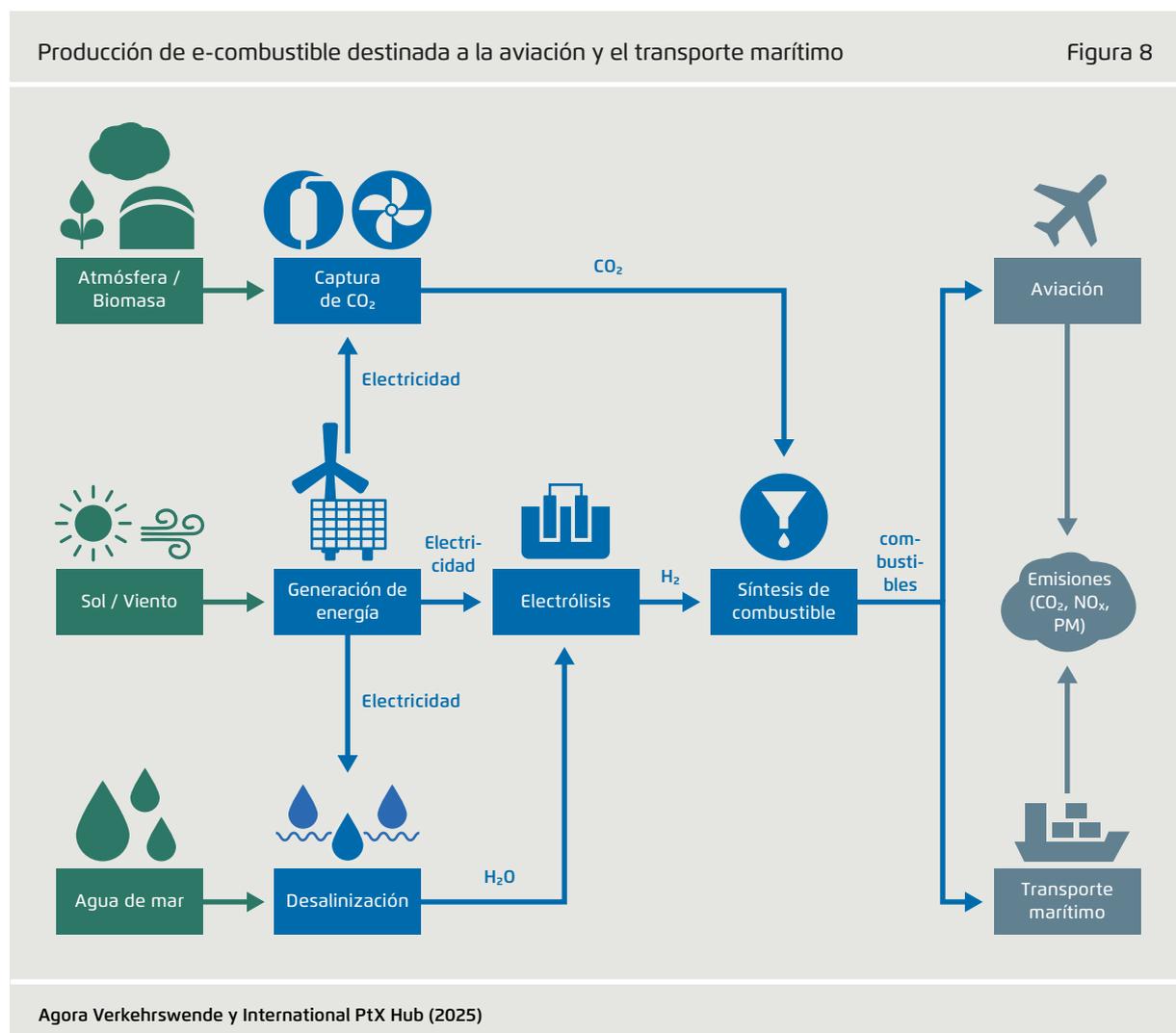
forestales o residuos sólidos urbanos), puesto que estas emisiones ya se han contabilizado. Cuando se utilizan residuos como materia prima, el combustible respectivo se denomina „biocombustible avanzado“ (término que designa generalmente un combustible con bajas emisiones de GEI). Sin embargo, el perfil de emisiones de GEI más bajo lo presenta el e-SAF que se produce a partir de electricidad renovable y captura directa de aire (DAC) de CO₂. En el e-SAF basado al 100% en energías renovables, la (menor) huella de GEI es atribuible a la construcción de plantas eólicas y fotovoltaicas, la síntesis del combustible y el suministro de CO₂.

3 | Qué es el e-SAF y cómo se produce

El „e-combustible“ (incluido el e-SAF) es un término colectivo para los combustibles producidos a partir de hidrógeno verde y CO₂ o, en el caso del e-amoniaco, a partir de hidrógeno verde y nitrógeno. En este caso, la „e“ representa la electricidad utilizada para producir el hidrógeno. A nivel europeo, estos combustibles -junto con el hidrógeno verde- también se denominan RFNBO, es decir, „combustibles renovables líquidos y gaseosos para el transporte de origen no biológico“. Las tecnologías de proceso utilizadas para producir e-combustibles (e-fuels) se denominan generalmente procesos „power-to-X“ (PtX). La „X“ representa el producto deseado correspondiente: Si se trata de producir combustibles gaseosos, como metano sintético, se habla de procesos „power-to-gas“ (PtG); si el producto deseado son com-

bustibles líquidos, como gasolina, diésel o combustible de aviación se habla de procesos „power-to-liquid“ (PtL). En algunos casos, los e-combustibles también se denominan combustibles PtX, PtG o PtL.

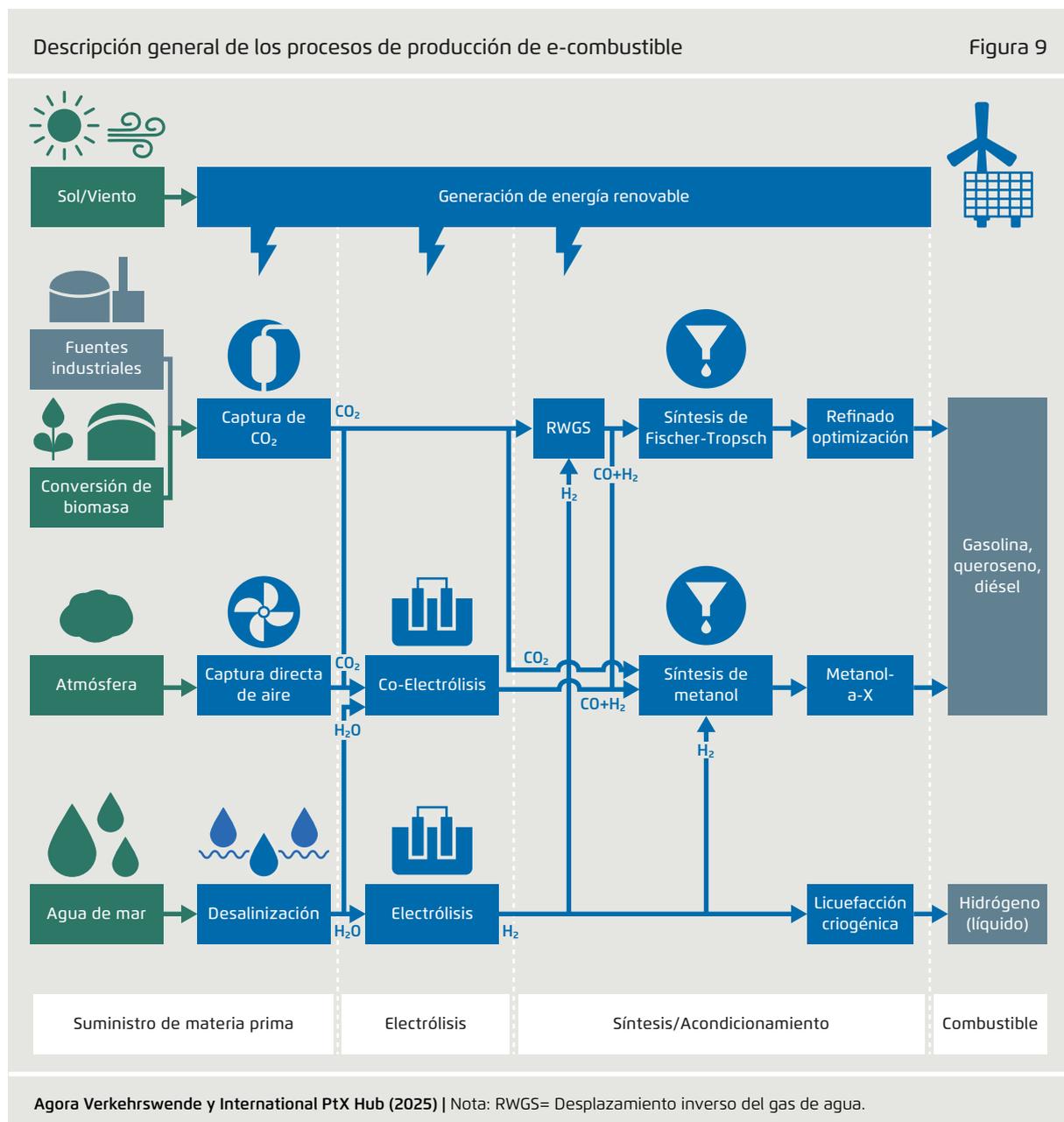
Dado que los e-combustibles se producen mediante procesos de síntesis química, también pueden denominarse combustibles sintéticos. Sin embargo, los e-combustibles a menudo se confunden con los combustibles sintéticos. Aunque se producen utilizando los mismos procesos de síntesis, el gas de síntesis puede generarse a partir de otras fuentes (por ejemplo, gasificación de carbón o biomasa, o reformado de gas natural o biogás). Los e-combustibles son, por tanto, siempre combustibles sintéticos, pero los combustibles sintéticos no son siempre e-combustibles.



Si el hidrógeno necesario para esta síntesis se produce mediante electrólisis a partir de electricidad renovable (para obtener hidrógeno verde) y el CO₂ necesario se extrae de la atmósfera,²⁶ estos combustibles son práctica-

mente neutros en CO₂. No ocurre lo mismo cuando el CO₂ se captura a partir de procesos industriales (por ejemplo, producción de vidrio o de cemento), que utilizan materia prima fósil o un vector energético. Este proceso, conocido como captura desde una "fuente industrial puntual", puede considerarse como un uso en cascada del CO₂ fósil generado en los procesos originales. Los e-combustibles producidos de esta manera podrían sustituir los combustibles fósiles en el transporte, pero emitirían CO₂

26 Esto se consigue bien técnicamente con la ayuda de sistemas de captura directa en el aire (DAC), o bien el CO₂ se liga primero en la biomasa mediante fotosíntesis, que luego se convierte para que el CO₂ vuelva a ser utilizable.



adicional a la atmósfera. Por tanto, en el largo plazo, no constituyen una fuente sostenible de CO₂ en un mundo climáticamente neutro.²⁷

Debido a las emisiones residuales que son difíciles de evitar (por ejemplo, de la construcción de turbinas eólicas y sistemas fotovoltaicos necesarios), los e-combustibles no son -como se suele suponer- climáticamente neutros, pero tienen un impacto significativamente menor sobre el clima. Dado que la mayoría de los e-combustibles siguen basándose en el carbono (debido al CO₂ utilizado para su producción), no pueden contribuir a la descarbonización del sector del transporte (es decir, a evitar las emisiones de CO₂), sino únicamente a la desfossilización del sector de transporte (es decir, a evitar materias primas/combustibles fósiles). Una excepción es el amoníaco, del que se habla como combustible para la navegación marítima y que no se basa en el carbono, sino en el nitrógeno. Sin embargo, como los combustibles de aviación basados en el nitrógeno siguen siendo en gran medida teóricos en la actualidad, no profundizaremos en ellos en este documento.

3.1 Definición del e-SAF

Hasta la fecha, no existe un sistema de clasificación generalmente aceptado para los procesos de producción de e-SAF. Aunque el procedimiento de producción básico es similar en todos los casos, los pasos específicos del proceso, las condiciones de funcionamiento y los resultados pueden variar significativamente. La mayoría de los procesos requieren hidrógeno verde (es decir, hidrógeno producido a partir de la electrólisis del agua utilizando electricidad renovable) como insumo inicial. A continuación, este hidrógeno se combina con dióxido de carbono (CO₂) para sintetizar hidrocarburos. Estos hidrocarburos sintéticos pueden utilizarse directamente como combustible o ser procesados nuevamente. La figura 9 presenta una visión general -centrada en la aviación- de las rutas del proceso, las materias primas y los productos finales.

Con respecto al PtL-SAF o e-SAF, existen dos rutas de producción principales: la síntesis de Fischer-Tropsch (FTS) y el proceso de metanol a combustible de avia-

ción (MtJ). Ambos procesos combinan hidrógeno (H₂) y carbono (C) para producir un combustible basado en hidrocarburos. En el proceso MtJ, se produce e-metanol como producto intermedio, que puede transformarse fácilmente en e-queroseno. El e-metanol en sí mismo puede utilizarse directamente como combustible marino o producto químico base, y por lo tanto tiene aplicaciones de mercado flexibles. El resultado de la síntesis de Fischer-Tropsch es un crudo sintético, que es similar al petróleo crudo y puede utilizarse para producir queroseno. Sin embargo, la síntesis FTS siempre produce nafta y diésel como productos secundarios. La investigación actual se centra en aumentar la proporción de queroseno producido en el proceso (la llamada „selectividad de queroseno“) minimizando la fracción de diésel. No obstante, los productos secundarios son comercialmente valiosos y pueden venderse en diversos mercados.

En las siguientes subsecciones se analizan los procesos de obtención de hidrógeno y CO₂ y se ofrecen detalles adicionales sobre las rutas de síntesis.

3.2 Suministro de materias primas

Existen varias opciones técnicas para obtener las materias primas necesarias para la producción de e-combustible (agua, hidrógeno y nitrógeno/CO₂).

Agua: desalinización y tratamiento del agua de mar

Para producir hidrógeno verde se necesitan grandes cantidades de agua. En concreto, se necesitan unos 10 kilogramos de agua por kilogramo de hidrógeno producido en una reacción estequiométrica. La mayoría de los electrolizadores requieren agua ultrapura, de modo que incluso el agua de calidad potable como insumo debe purificarse aún más para eliminar sales y minerales. Esta depuración suele realizarse en una planta de tratamiento de agua situada directamente aguas arriba del electrolizador. Los investigadores también están explorando el uso directo de agua salobre y agua de mar como materia prima. Sin embargo, estas tecnologías aún están confinadas al laboratorio.²⁸

Para suministrar grandes volúmenes de agua sin efectos adversos en las aguas subterráneas -especialmente en las „regiones óptimas“ para la generación de energía reno-

²⁷ Para una evaluación diferenciada de la sostenibilidad del CO₂, véase la sección 4.

²⁸ Asghari et al. (2022).

vable, que a menudo son áridas- suelen necesitarse plantas desalinizadoras de agua de mar. Este tipo de plantas ya se utilizan en todo el mundo para suministrar agua potable a hogares e industrias, por lo que puede considerarse una tecnología madura. El método de desalinización más común es la „evaporación instantánea multietapa“, en la que el agua de mar se evapora añadiendo calor (a menudo calor residual de centrales eléctricas cercanas) en varias etapas de condensación. Debido a los elevados requisitos energéticos de este proceso, cada vez más se utilizan las plantas de ósmosis inversa como alternativa. En este proceso, el agua de mar se somete a alta presión a través de una membrana, lo que permite separar la sal y otras impurezas. Las plantas desalinizadoras de agua de mar requieren electricidad para su funcionamiento, aunque su consumo de energía es significativamente menor que el de la electrólisis. Además, es fundamental gestionar adecuadamente la salmuera residual (un subproducto altamente concentrado en sales). Para minimizar su impacto en la vida marina local, este subproducto debe reintroducirse cuidadosamente en el mar o evaporarse por completo.²⁹

Hidrógeno: electrólisis

En el contexto de la producción de hidrógeno verde, la electrólisis se entiende generalmente como la división del agua (H₂O) en hidrógeno (H₂) y oxígeno (O₂) utilizando electricidad renovable. En función del nivel de temperatura al que se realice este proceso, cabe distinguir entre los denominados electrolizadores de baja y alta temperatura. Actualmente, la tecnología más utilizada en el primer caso es la electrólisis alcalina (AEL), en la que se utiliza una solución alcalina como electrolito. En un contexto de aumento de la inyección de energías renovables fluctuantes, la electrólisis de membrana de electrolito polimérico (PEMEL) se ha establecido como otra tecnología de electrólisis de baja temperatura en los últimos años, debido a su mayor compatibilidad con cargas fluctuantes. La electrólisis de óxido sólido (SOEL), a menudo denominada electrólisis de alta temperatura, opera a temperaturas significativamente más altas y requiere vapor de agua (en lugar de agua líquida) como insumo, pero se caracteriza por eficiencias más altas que los procesos de baja temperatura. Una variante de SOEL es la co-electrólisis, en la que se utilizan CO₂ y vapor de agua simultáneamente como materia prima, produciendo directamente un gas de síntesis compuesto de hidrógeno

y monóxido de carbono (CO), que puede utilizarse para la posterior síntesis (de combustible). En comparación con los electrolizadores de baja temperatura hasta ahora establecidos en el mercado, los procesos de alta temperatura solo se han realizado en plantas de demostración más pequeñas.³⁰

CO₂: biomasa y captura directa de aire

Existen esencialmente dos formas diferentes de capturar artificialmente CO₂ de la atmósfera: bien directamente a través de la captura directa de aire (DAC), bien indirectamente a través de la biomasa. En este último caso, el CO₂ se absorbe durante la fotosíntesis y se libera durante la conversión posterior (por ejemplo, en la combustión de biomasa o en la producción de biogás/bioetanol). En la producción de biogás y bioetanol, el CO₂ se produce como subproducto de los procesos de conversión biológica en concentraciones relativamente altas, lo que requiere una purificación adicional comparativamente baja. Como subproducto de los procesos de combustión, el CO₂ está presente en los gases de escape en una concentración considerablemente menor y debe separarse y purificarse, lo que requiere un proceso considerablemente más exigente.³¹

El proceso DAC, en cambio, se utiliza para capturar CO₂ directamente de la atmósfera y se desarrolla en tres pasos básicos: en un primer paso, grandes volúmenes de aire ambiente son impulsados mediante ventiladores a través de un dispositivo que contiene un sorbente, el cual aglutina el CO₂ (y, dependiendo del sorbente, también moléculas de agua). Esto permite separar el dióxido de carbono de las demás sustancias presentes en el aire. En un segundo paso, se interrumpe el flujo de aire y mediante energía térmica, se libera el CO₂ y el agua del sorbente. Como resultado, se obtiene CO₂ puro ³² al final de la cadena del proceso.

3.3 Síntesis del combustible

El término genérico power-to-liquid (PtL) hace referencia a diversos procesos de síntesis para la producción de combustibles sintéticos. Esto incluye la síntesis de

29 Jones et al. (2019).

30 AIE (2022).

31 ifeu (2019).

32 Viebahn et al. (2019).

Fischer-Tropsch para la producción de hidrocarburos sintéticos (e-queroseno, e-diesel), la síntesis de metanol y los procesos para el procesamiento posterior del metanol en hidrocarburos sintéticos (es decir, los procesos de metanol a X). El hidrógeno verde y las moléculas portadoras respectivas (CO o CO₂) son necesarios como materias primas en todos estos procesos.

Síntesis de Fischer-Tropsch

El proceso químico inicial, que luego se dio a conocer como síntesis de Fischer-Tropsch, se desarrolló originalmente a principios del siglo XX para la producción de diésel sintético a partir de carbón gasificado. La síntesis de Fischer-Tropsch requiere en primer lugar un gas de síntesis compuesto principalmente por hidrógeno y monóxido de carbono (CO). Para producir e-combustibles, este gas de síntesis se obtiene a partir de la reducción de CO₂ en combinación con hidrógeno verde. Esto se hace mediante la ya mencionada coelectrólisis, o en una reacción de desplazamiento inverso del gas de agua (RWGS). La implementación técnica de la reacción RWGS representa actualmente el mayor reto técnico en la producción de e-combustible. El producto de la síntesis de Fischer-Tropsch subsiguiente es una mezcla de diferentes hidrocarburos, a menudo denominada petróleo crudo sintético, o crudo sintético para abreviar.

El crudo sintético puede seguir procesándose en los procesos de refinería convencionales (craqueo, isomerización, destilación, etc.) para producir materias primas químicas como nafta (gasolina cruda) o combustibles que cumplen con los estándares, como diésel o combustible de aviación. Este procesamiento posterior puede tener lugar directamente en la planta de crudo sintético o en refinerías de procesamiento de materias primas fósiles existentes (es decir, petróleo crudo). Si el crudo sintético se vuelve a procesar junto con petróleo crudo (o productos intermedios del petróleo crudo), se habla de co-procesamiento. En principio, las refinerías existentes también pueden utilizarse exclusivamente para el tratamiento posterior de crudo sintético, introduciendo modificaciones técnicas mínimas. El e-SAF producido por la síntesis de Fischer-Tropsch está aprobado como componente de mezcla para la aviación civil y actualmente puede mezclarse con combustible de aviación fósil en proporciones de hasta un 50 %.

En la actualidad existen plantas con síntesis de Fischer-Tropsch a gran escala, pero hasta ahora se utilizan exclusivamente para la conversión de materias primas fósiles, como carbón (carbón a líquidos, CtL) o gas natural (gas a líquidos, GtL). Las dos plantas GtL más grandes del mundo, la planta Pearl GtL de QatarEnergy y Shell, y la planta ORYX GtL de QatarEnergy y Sasol, ambas en Ras Laffas, Qatar, tienen una capacidad de producción combinada de 8,5 millones toneladas por año.³³ También se viene trabajando desde hace varios años para utilizar biomasa (biomasa a líquidos, BtL) o materiales de desecho (desechos a líquidos, WtL) como materias primas para la síntesis de Fischer-Tropsch. Las primeras plantas industriales de este tipo se están construyendo actualmente o han entrado en funcionamiento recientemente en los EE.UU. y en otros lugares.³⁴ Son significativamente más pequeñas que las plantas mencionadas anteriormente para procesar portadores de energía fósil (produciendo varios cientos de miles de toneladas de productos sintéticos por año). Las primeras plantas de demostración para la producción de e-combustibles a través de la síntesis de Fischer-Tropsch (que son mucho más pequeñas, con capacidades de producción de aproximadamente 350 toneladas métricas por año) se están poniendo en marcha actualmente en Alemania.³⁵ También se están planificando o ya se están construyendo plantas PtL de mayor tamaño.

Síntesis de metanol

El metanol es una de las materias primas químicas orgánicas más producidas y comercializadas del mundo. Las capacidades de producción global existentes superan los 100 millones de toneladas, y la producción de metanol a gran escala (hasta 10.000 toneladas por día) es bastante frecuente. Estas plantas de producción de metanol convencionales utilizan típicamente gas natural o carbón como materia prima.

El metanol renovable puede producirse proporcionando un gas de síntesis no fósil (similar a la síntesis de Fischer-Tropsch) sin cambios significativos en el proceso de síntesis establecido. Actualmente, se están planificando o construyendo varias plantas comerciales de conversión de biomasa y residuos municipales. Sin embargo, además del uso de gas de síntesis, también existen pro-

33 Oxford Business Group (2023).

34 Cision PR Newswire (2022a).

35 Atmosfair (2023); P2X Europa (2022).

cesos de síntesis que pueden convertir hidrógeno y CO₂ directamente como materia prima, es decir, sin reducción previa de CO₂ a CO. Debido a la menor complejidad de estos procesos, se consideran más económicos. Además de las plantas de demostración más pequeñas para la producción de e-metanol – por ejemplo, en Islandia (con una capacidad de producción de aproximadamente 4.000 toneladas por año)³⁶, está previsto construir plantas mucho mayores.

3.4 Procesamiento del combustible

Antes de que el queroseno sintético pueda utilizarse en la aviación, son necesarias otras fases de mejora y procesamiento para cumplir con las normas de combustibles sintéticos para aviación (principalmente la ASTM D7566).

Refinado de productos de la síntesis Fischer-Tropsch

El combustible de aviación sintético producido mediante la síntesis de Fischer-Tropsch está aprobado bajo la especificación de la norma para combustible de turbina de aviación que contiene hidrocarburos sintetizados (ASTM D7566). Puede mezclarse hasta una proporción del 50% con combustible de aviación a base de petróleo (Jet A-1). Un requisito previo para que el e-queroseno se utilice en aeronaves comerciales es el hidropocesamiento, para el cual son aplicables principalmente tres procesos diferentes: el hidrocrqueo, el hidrotatamiento y la hidroisomerización. Estos procesos son tecnológicamente maduros y se utilizan hoy en día en refinerías convencionales para mejorar el petróleo crudo.³⁷

El hidrocrqueo consiste en la conversión catalítica de hidrocarburos de cadena larga en hidrocarburos de cadena corta mediante la adición de hidrógeno. Para el queroseno sintético, el objetivo es una longitud de cadena de C8 a C17. En el proceso, los productos sólidos de la síntesis de FT, especialmente las ceras, se transfieren a la fase líquida. Como las ceras y otros hidrocarburos de cadena larga pueden tener una proporción de más del 80 por ciento en el crudo sintético obtenido (especialmente si se utiliza Fischer-Tropsch de baja temperatura), el hidrocrqueo es el paso central para la mejora del crudo sintético³⁸.

La hidroisomerización es un proceso catalítico en el que los hidrocarburos no ramificados se convierten en hidrocarburos ramificados. Como resultado, se mejora el comportamiento a baja temperatura del queroseno sintético, lo que puede ser necesario para cumplir la especificación del punto de congelación del combustible de aviación de -47 °C. El hidrotatamiento implica la saturación de dobles enlaces y la eliminación de heteroátomos como el oxígeno con el objetivo de obtener hidrocarburos totalmente hidrogenados.

Metanol a combustible de aviación

Además de su uso directo como combustible o materia prima química, el metanol puede procesarse aún más para obtener combustibles de reemplazo directo como gasolina o combustible de aviación a través de diversas variantes de proceso. También en este caso, los procesos suelen denominarse con el nombre del producto objetivo. Metanol-a-gasolina (MtG) se refiere a la producción de gasolina a partir de metanol, y metanol-a-combustible de aviación (MtJ), al proceso de transformación de metanol a combustible de aviación. Estos procesos son similares en cuanto a su tecnología y estructura de proceso básico, pero actualmente se encuentran en diferentes niveles de madurez técnica. Por ejemplo, el e-SAF a través de la ruta MtJ aún no ha sido aprobado para su uso en la aviación; el proceso de certificación correspondiente se inició a principios de 2023.³⁹

Las plantas para la síntesis de gasolina a partir de metanol han estado operando durante el último siglo, y una primera planta de demostración (con una capacidad de producción de unas 450 toneladas al año) para la producción de e-combustibles empezó a operar en Chile a finales de 2022.⁴⁰ En cambio, el proceso de producción de e-SAF a partir de metanol se encuentra todavía en fase de investigación y hasta la fecha solo existen plantas a escala de laboratorio. Sin embargo, diferentes proveedores de tecnología industrial ofrecen aplicaciones MtJ, por lo que en un futuro próximo podrían realizarse plantas de mayor tamaño.

36 Carbon Recycling International (2023 a).

37 De Clerk (2011).

38 De Clerk (2011), König et al. (2015).

39 Central de Biocombustibles (2023 a).

40 HIF (2022).

La conversión y mejora del metanol en combustible de aviación puede lograrse combinando varios procesos aplicados, a saber, la deshidratación, la oligomerización y la hidrogenación.⁴¹ El primer paso del proceso es la conversión del metanol en hidrocarburos de cadena corta. Este paso suele denominarse proceso de metanol a olefinas (MTO). En el siguiente paso del proceso, estos hidrocarburos de cadena corta se combinan para formar hidrocarburos con una longitud de cadena de entre 8 y 16 carbonos, que corresponde a la cadena deseada para el queroseno. En un proceso de hidrogenación subsiguiente, los dobles enlaces restantes se saturan completamente mediante la adición de hidrógeno (hidrogenación). Aunque se conocen todos y cada uno de los pasos del proceso, la combinación y optimización de la producción de combustible de aviación a base de metanol aún puede plantear dificultades y requiere más investigación antes de su aplicación a gran escala. En consecuencia, la certificación ASTM para combustible de aviación a través de la ruta del metanol aún está pendiente, y todavía no hay ninguna planta de producción comercial de combustible de aviación a partir de metanol en funcionamiento.

41 Bube et al. (2024).

4 | Producción de e-SAF sostenible

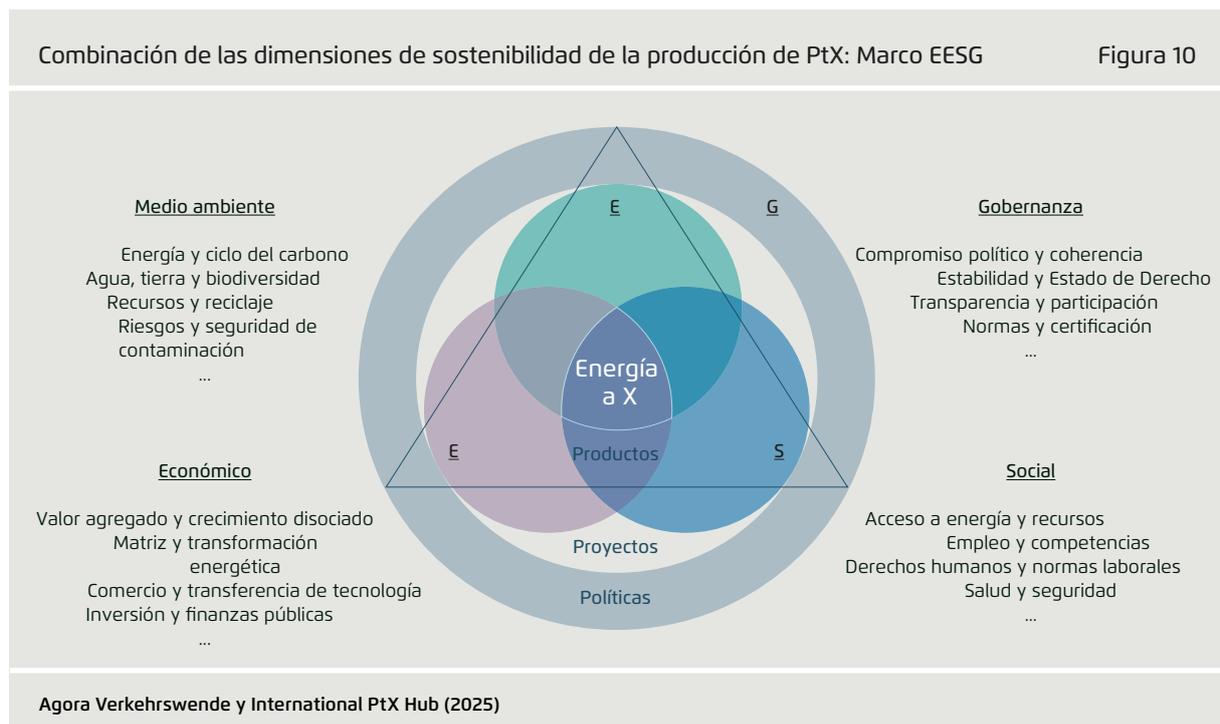
Se han establecido medidas políticas destinadas a reducir las emisiones, que se están desarrollando a escala nacional e internacional. Para demostrar el cumplimiento de los mandatos de reducción de emisiones, es esencial disponer de sistemas que controlen y documenten el uso de e-SAF. En este contexto, no basta con considerar las emisiones directamente atribuibles a la producción y el uso de e-SAF. En concreto, existe una clara necesidad de adoptar marcos (ya sean obligatorios o voluntarios) que tengan en cuenta las distintas dimensiones de la sostenibilidad, incluidos los aspectos medioambientales, económicos, sociales y de gobernanza (EESG). En este sentido, es necesario desarrollar sistemas de certificación de combustibles que puedan utilizarse para verificar el cumplimiento de los criterios de sostenibilidad. Por último, pero no por ello menos importante, es necesario implementar sistemas que permitan registrar de forma fiable dichas certificaciones de sostenibilidad.

4.1 Dimensiones de la sostenibilidad

En la actualidad, hay un debate activo acerca de los e-combustibles, principalmente en relación con su potencial para reducir las emisiones de CO₂ en el trans-

porte. Sin embargo, además de fomentar la protección del clima, el desarrollo de las capacidades de producción de e-combustibles tendrá diversas repercusiones sociales y económicas. Por esta razón, abogamos por una visión holística de la sostenibilidad de los e-combustibles basada en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. En este sentido, es necesario considerar las dimensiones ambientales, económicas, sociales y de gobernanza de la producción y el uso de los e-combustibles. Al mismo tiempo, las medidas de sostenibilidad deben desarrollarse siempre en colaboración con las comunidades locales y adaptarse a sus realidades de vida, en lugar de ser simplemente impuestas de manera vertical. La Figura 10 ofrece una visión general de estas dimensiones EESG (ASGE - Ambientales, Sociales, de Gobernanza y Económicas), tal como las describe el Internacional PtX Hub. A continuación, destacamos brevemente algunos aspectos importantes de este marco EESG y examinamos sus implicaciones para el sector de la aviación y la producción de e-SAF.

La dimensión medioambiental: El uso sostenible de las materias primas, la tierra y los materiales Nueva capacidad de energías renovables („adicionalidad“): La producción de hidrógeno mediante electrólisis



sis es responsable de una gran parte de la electricidad necesaria para fabricar e-SAF. Para que las emisiones de gases de efecto invernadero de la producción de hidrógeno sean lo más bajas posible, la electricidad necesaria en el proceso de producción de e-SAF debe proceder de fuentes renovables. Sin embargo, depender simplemente de la electricidad suministrada por la red eléctrica existente resulta problemático en muchas localidades, debido a la elevada proporción de generación a partir de combustibles fósiles. Además, como la energía renovable sigue siendo escasa, debe utilizarse directamente y de la manera más eficiente posible para evitar pérdidas de conversión y minimizar la demanda de energía de origen fósil. En consecuencia, es necesario desarrollar capacidades de generación de electricidad renovable adicionales que se dediquen a la producción de hidrógeno (cumpliendo así el criterio de „adicionalidad“). De este modo se evitará que la producción de hidrógeno compita con la expansión de las energías renovables en la red existente.⁴²

Ciclo de CO₂ cerrado: Además de hidrógeno, la síntesis de e-SAF casi climáticamente neutro requiere CO₂ de un ciclo de vida cerrado. Esto significa que solo se debe utilizar carbono de DAC o de fuentes biogénicas, preferiblemente residuos. La captura directa de aire (DAC) es una tecnología independiente de la ubicación y promete obtener CO₂ directamente de la atmósfera para la síntesis de e-SAF. Sin embargo, tiene importantes requisitos de espacio y energía, debido a la baja concentración de CO₂ en la atmósfera, y aún no es desplegable a escala. En consecuencia, actualmente solo se dispone de una cantidad limitada de CO₂ utilizando DAC, y como método sigue siendo muy costoso.

Por el contrario, el CO₂ biogénico (por ejemplo, de plantas de biogás o bioetanol) está disponible hoy en día y es relativamente económico. Sin embargo, existen diversos riesgos para su despliegue sostenible a escala, debido a la competencia por el uso de la tierra con la industria alimentaria y los cambios indirectos en el uso del suelo. En general, la disponibilidad de CO₂ biogénico sostenible a escala es muy limitada.⁴³

Desalinización ecológica del agua de mar: Un litro de e-SAF requiere unos 3,6 litros de agua, principalmente para la electrólisis del hidrógeno. Geográficamente hay

pocos lugares que ofrezcan buenas condiciones para la producción de energías renovables y volúmenes suficientes de agua dulce. Aunque muchas regiones pueden inicialmente parecer atractivas para la producción de e-combustibles debido a su elevado potencial de energía solar, dichas regiones suelen carecer de suficientes recursos hídricos (excedentes). La desalinización de agua de mar a gran escala representa una posible solución de cara al futuro. Según estudios recientes, más del 85% de los proyectos de hidrógeno verde previstos actualmente podrían requerir agua procedente de la desalinización.⁴⁴ Sin embargo, la energía necesaria para hacer funcionar esas plantas de desalinización debe proceder de energías renovables, a fin de mantener el balance positivo de CO₂ de los e-combustibles. Además, la desalinización genera salmuera (es decir, agua hipersalina), cuyo vertido debe regularse.⁴⁵

Evitar la competencia por el uso de la tierra: La producción de e-combustibles requiere menos superficie que la producción de biocombustibles basados en cultivos energéticos como la soja, el maíz o la canola. Sin embargo, los requisitos de uso de la tierra para todos los sistemas asociados (incluidas las plantas DAC, los sistemas fotovoltaicos y las turbinas eólicas) son significativos. Es posible minimizar estos requisitos de uso de la tierra a través de diversas estrategias, como la colocación de turbinas eólicas en pastizales, o el aprovechamiento dual de la tierra para la producción de energía solar y la agricultura („agrofotovoltaica“). En cuanto a las posibles implicaciones de la producción de e-SAF para la biodiversidad, los procedimientos de evaluación y permisos ambientales deben garantizar que la producción de combustible y energías renovables no se realice en las proximidades de paisajes naturales de alto valor ecológico o áreas protegidas.⁴⁶

Uso circular de materias primas: Dependiendo de las tecnologías aplicadas, se requieren varios metales, incluidos platino e iridio, para las tecnologías de producción de e-SAF (por ejemplo, como catalizadores en el proceso de síntesis, y para fabricar electrodos para la electrólisis). El platino y el iridio son metales raros y actualmente solo se extraen en unos pocos lugares del mundo. Por esta razón, se hace imperativo realizar investigaciones

42 Agora Energiewende; Agora Industrie (2022).

43 Viebahn et al. (2019); ifeu (2019).

44 IRENA (2022).

45 BHL; LBST (2022); WIRED (2019); IRENA (2022)

46 Jeswani et al. (2020); Fraunhofer ISE (2022); PtX Hub (2022).

adicionales destinadas a reducir el volumen de metales requeridos desde una óptica técnica, sino también para desarrollar alternativas de sustitución y reciclaje, que actualmente tienen una aplicación restringida limitada.⁴⁷

La dimensión económica: Creación de valor local y casos de uso del e-SAF

Desarrollo económico a largo plazo: Para garantizar que los beneficios de los futuros proyectos de e-SAF no se limiten a una mayor recaudación fiscal o flujos de ganancias adicionales para el Estado, se deben fomentar los vínculos sólidos con las estructuras económicas locales. En la medida en que los actores económicos locales puedan integrarse con éxito en la cadena de creación de valor del e-SAF (tanto aguas arriba como aguas abajo), tal integración promete crear impulsos positivos para la formación de nuevas empresas, así como para la inversión y la innovación. Esto, a su vez, puede apoyar el desarrollo económico sostenible y la creación de puestos de trabajo de alta calidad a largo plazo.⁴⁸

47 Fraunhofer ISE, E4tech, Fraunhofer IPA (2018); Bahadur et al. (2018).

48 Altenburg et al. (2023).

Encadenamiento hacia adelante y hacia atrás

La producción de e-SAF (y de productos intermedios como el hidrógeno verde y el metanol) presenta diversas oportunidades para crear vínculos hacia adelante y hacia atrás con la economía nacional y, por lo tanto, para contribuir al desarrollo socioeconómico sostenible. En la etapa inicial de la cadena de suministro (aguas arriba), los proveedores locales pueden proporcionar sistemas completos, componentes y otros insumos a las plantas de e-SAF (por ejemplo, paneles solares, turbinas eólicas, electrolizadores y otros servicios y tecnologías necesarios). En la medida en que falten capacidades de producción locales, se podrían promover inversiones específicas y medidas de desarrollo de capacidades (véase más adelante). Además, se pueden crear sinergias entre la producción de e-SAF y el sector agrícola (en el que se produce CO₂ a partir de biomasa). En algunos lugares áridos, la sombra proporcionada por los paneles solares, combinada con medidas inteligentes de riego y fertilización, podría potencialmente

crear nuevas tierras fértiles. En la etapa final de la cadena de suministro (aguas abajo), el e-SAF producido tiene un valor comercial más alto que el hidrógeno y puede generar ingresos de exportación significativos. Sin embargo, el e-SAF también ofrece importantes oportunidades para la desfossilización de la aviación a nivel nacional, lo que podría generar una demanda local considerable (véase más adelante). Además, cuando corresponda, los productos intermedios, como hidrógeno y metanol verde, podrían contribuir a la adopción de prácticas ecológicas por parte de las industrias locales -como el transporte marítimo, la minería, la industria química y la siderurgia. En lugares donde estas industrias aún no existen, las condiciones de producción beneficiosas para los portadores de energía verde podrían atraer a industrias de uso intensivo de energía (como la producción de acero), con efectos beneficiosos de generación de empleo y de valor agregado local (un fenómeno conocido como el „efecto de atracción de las energías renovables“). Por último, la inversión extranjera directa en la producción de e-SAF y sus capacidades renovables asociadas beneficiará indirectamente a otras industrias. A través de acuerdos estratégicos previos entre las autoridades de la política nacional y las empresas inversoras, se podría establecer la obligación de desarrollar capacidad renovable adicional; lo que beneficiaría a las empresas locales y a la población en general. De esta manera, la producción de e-SAF puede fomentar una transición energética justa con beneficios de amplio alcance para el desarrollo económico, la innovación, la creación de empleo y la formación de capital humano.

La transición energética nacional: En muchos países con condiciones óptimas para la producción de e-combustibles, el suministro eléctrico aún es precario. Además, las centrales eléctricas de combustibles fósiles operan con baja eficiencia en numerosos lugares. Esto plantea un doble riesgo: por un lado, la concentración en la producción de e-combustibles podría obstaculizar el desarrollo eficiente de energías renovables nacionales o la descarbonización del mix energético, especialmente en zonas con condiciones excepcionales para las energías renovables. Por otro lado, la mejora de la infraestructura eléctrica implica costos elevados, difíciles de asumir, sobre todo en países de bajos ingresos. Las inversiones en proyectos de e-combustibles para generar energía adici-

onal podrían ser una oportunidad para impulsar el desarrollo de infraestructuras que satisfagan las necesidades locales, más allá de las del proyecto en sí. Por lo tanto, los proyectos de e-combustibles deben considerar la ampliación de la capacidad de la infraestructura, incluso la de la red eléctrica, en los países donde se implementen.⁴⁹

Fortalecimiento de los casos de uso en la aviación: El uso cercano a la producción disminuye el costo del transporte de e-SAF y, por tanto, genera ventajas de costos, lo que puede atraer a las aerolíneas a comprar estos combustibles. Esto podría fortalecer los centros de tráfico aéreo en los países productores de SAF y crear puestos de trabajo en las cadenas de suministro asociadas (por ejemplo, para el suministro, funcionamiento y mantenimiento de las infraestructuras locales de transporte y abastecimiento de combustible). Además, pueden obtenerse beneficios medioambientales al aumentar el consumo local de e-SAF y acortar las rutas de transporte de combustible.

La dimensión social: Apuntalar una transición justa

Formación profesional: La aceleración de la producción de e-SAF puede tener importantes repercusiones en el mercado laboral. Por ejemplo, si se pierden puestos de trabajo en la extracción de combustibles fósiles o si partes de la economía emigran a regiones con mejores condiciones para las energías renovables, esto puede crear dislocaciones socioeconómicas. Los programas de formación profesional, incluidos los programas de reconversión laboral, son por tanto esenciales para minimizar los impactos negativos en la fuerza laboral. La cooperación entre países en el ámbito de la transferencia de tecnología puede fortalecer las capacidades económicas locales. Una cuestión relacionada, pero no menos importante, es garantizar que los funcionarios nacionales tengan los conocimientos necesarios para formular y promulgar políticas regulatorias e industriales eficaces.

Acceso de la población a la electricidad y al agua potable:

La producción de e-SAF genera una importante demanda de electricidad y agua potable que puede amenazar potencialmente la seguridad de abastecimiento de las poblaciones locales, especialmente en regiones precarias. Por lo tanto, la producción de e-SAF podría desencadenar o intensificar los conflictos por los recursos. La construcción de capacidades adicionales de generación renovable

y desalinización puede mitigar este riesgo y contribuir a garantizar el acceso de las poblaciones locales al agua y la electricidad.⁵⁰ Un posible modelo consiste en llevar a cabo esas inversiones adicionales recurriendo a asociaciones público-privadas estructuradas de modo que produzcan beneficios tanto para las comunidades locales como para los inversores.

Derechos de uso de la tierra: Los proyectos a gran escala en el sector energético requieren considerables cantidades de tierra e históricamente tales proyectos han dado lugar en ocasiones a violaciones de los derechos de uso de la tierra. Para garantizar el respeto de tales derechos, se deben incorporar procedimientos de gobernanza en los mismos principios del proyecto (tanto públicos como privados) que permitan una auténtica participación de la población local. Esto debería incluir la creación de plataformas para recabar la opinión de la sociedad civil. Además, deben establecerse mecanismos transparentes de reclamación (por ejemplo, basados en el principio de consentimiento libre, previo e informado, o CLPI).⁵¹

Derechos humanos y normas laborales: Es importante garantizar que los operadores de las plantas de e-SAF cumplan con las normas laborales y de derechos humanos pertinentes, incluidas las establecidas en los Principios Rectores de la ONU sobre las Empresas y los Derechos Humanos (UNGP), las Normas Fundamentales del Trabajo de la OIT y las Directrices de la OCDE para Empresas Multinacionales, incluida la Guía de Debida Diligencia de la OCDE. Estos requisitos y normas incluyen la prohibición del trabajo infantil forzado y de la discriminación contra las mujeres. También se necesitan mecanismos de monitoreo para garantizar el cumplimiento de las normas de salud y seguridad.⁵²

La dimensión de la gobernanza: Estructuras de dirección para un desarrollo sostenible del e-SAF

Como ya se ha mencionado, el desarrollo de la producción de e-SAF puede tener consecuencias negativas para las personas, la economía y el medio ambiente, aunque también puede presentar numerosas oportunidades. Los aspectos de gobernanza son cruciales para garantizar la sostenibilidad en las tres primeras dimensiones. Más

49 Afful-Dadzie et al. (2020); Naciones Unidas (2023).

50 Instituto del Pacífico (2023).

51 Backhouse (2019); International PtX Hub (2024a).

52 OCDE (2018).

concretamente, los responsables de la formulación de políticas tienen la responsabilidad de desarrollar marcos normativos integrales que garanticen el cumplimiento de las otras dimensiones de sostenibilidad. Esto requiere, en primer lugar, normas y certificaciones internacionales integrales que ofrezcan claridad y orientación a las partes interesadas, incluidos los actores del sector aéreo. Las normas y los sistemas de certificación de SAF son el tema central de la siguiente sección. No cabe duda de que su implementación será una compleja tarea y dependerá del compromiso político de cada país. Sin embargo, para evitar la fragmentación del mercado, la transformación de la industria de la aviación debe abordarse desde un enfoque global e integral. La cooperación internacional estrecha y basada en la confianza será esencial para avanzar en estas cuestiones. Además, la decisión de participar en asociaciones bilaterales o multilaterales de e-SAF entre países dependerá de la estabilidad política y del compromiso con el estado de derecho. Los proyectos de e-SAF dependerán fundamentalmente de la transparencia y la aceptación de las partes interesadas respaldada por normas, certificaciones y otros marcos de gobernanza. Especialmente cuando la inversión en un país determinado esté expuesta a elevados riesgos de corrupción, los gestores de los proyectos internacionales de e-SAF tendrán que llevar a cabo un proceso de debida diligencia adecuado e insistir en establecer procedimientos de supervisión sólidos que garanticen el cumplimiento del proyecto con las normas pertinentes.

4.2 Normas y criterios de sostenibilidad para la aviación

A partir de las dimensiones de sostenibilidad descritas en la sección anterior, cabe preguntarse ¿qué pasos tangibles son necesarios para garantizar que el e-SAF se produzca de forma sostenible? Un primer requisito previo es la adopción de normas reconocidas internacionalmente. Luego, se deben establecer mecanismos de certificación que garanticen el cumplimiento de las normas.

A este respecto, es importante distinguir entre „certificación“ y „norma“, ya que estos dos términos suelen utilizarse indistintamente. Una „certificación“ es un „sello de aprobación“ otorgado por una institución de auditoría independiente que verifica la conformidad de un producto o proceso. El término „norma“, por el contrario, se refiere

a los requisitos y especificaciones que deben cumplirse, ya sea en relación con aspectos técnicos (por ejemplo, para garantizar la seguridad) o de sostenibilidad (por ejemplo, para garantizar la protección del medio ambiente).

Ejemplo 1: Normas técnicas

La ASTM (American Society for Testing and Materials) desempeña un papel fundamental en la definición de normas técnicas para los combustibles de aviación. En este sentido, la norma mundial para el SAF en aviación es la ASTM D7566.

Ejemplo 2: Normas de sostenibilidad

En el sector de la aviación, la norma internacional de sostenibilidad más relevante aplicada hasta la fecha es CORSIA (Sistema de Compensación y Reducción de Emisiones de Carbono en la Aviación). CORSIA ha sido adoptado por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) como sistema mundial de compensación para garantizar la reducción de las emisiones de carbono en la aviación internacional.⁵³ El cumplimiento de CORSIA puede lograrse por diversos medios, incluido el uso de SAF. Los criterios de sostenibilidad correspondientes se exponen en el documento titulado „Criterios de sostenibilidad de CORSIA para combustibles elegibles según CORSIA.“⁵⁴ La tabla 2 resume los principales requisitos de sostenibilidad que deben cumplir los SAF para ser reconocidos bajo este marco.

Además de CORSIA, existen otras normas nacionales e internacionales. Por ejemplo, la UE ha establecido una norma reglamentaria que prevé que el hidrógeno y los combustibles derivados del hidrógeno, como el e-SAF, sean reconocidos como „combustibles renovables de origen no biológico“ (RFNBO).⁵⁵ Sin embargo, aún no se ha adoptado un sistema de certificación que verifique el cumplimiento de esta norma.⁵⁶

53 Para más información sobre el marco CORSIA y sus efectos en las compañías aéreas, véase Polo Sur (2023).

54 Estos criterios se incluyen oficialmente en el sistema CORSIA a través del Anexo 16, Volumen IV del Convenio sobre Aviación Civil Internacional; véase OACI (2022 a).

55 Esta norma se estableció con la revisión de 2022 de la RED II, en combinación con los Actos Delegados de los artículos 27 y 28, que entraron en vigor en julio de 2023; véase Comisión Europea (2023 a).

56 Para más información sobre este marco normativo, véase International PtX Hub (2023 a).

Principales requisitos de sostenibilidad de los SAF para ser elegibles bajo el marco CORSIA

Tabla 2

Tema	Principio
Gases de efecto invernadero (GEI)	Se deberían generar menos emisiones de carbono a lo largo de su ciclo de vida.
Reserva de carbono	No se debe producir a partir de biomasa obtenida de sistemas terrestres/acuáticos con reservas de carbono biogénico.
Permanencia en la reducción de GEI	Debería conducir a una reducción permanente de las emisiones.
Agua	Se debe mantener o mejorar la calidad y disponibilidad del agua.
Suelo	Se debe mantener o mejorar la integridad del suelo.
Aire	Se deben minimizar los efectos negativos sobre la calidad del aire.
Conservación	Se debe mantener la biodiversidad, el valor de conservación y los servicios ecosistémicos.
Residuos y productos químicos	Se debe promover la gestión responsable de residuos y el uso de productos químicos.
Derechos humanos y laborales	Se deben respetar los derechos humanos y derechos laborales.
Derechos sobre uso la tierra y uso de la tierra	Se deben respetar los derechos sobre la tierra y los derechos de uso de la tierra, incluidos los derechos de los pueblos indígenas y/o los derechos consuetudinarios.
Derechos de uso del agua	Se deben respetar los derechos de uso del agua formales o consuetudinarios existentes.
Desarrollo local y social	Se debe contribuir al desarrollo social y económico de las regiones pobres.
Seguridad alimentaria	Se debe promover la seguridad alimentaria en regiones de inseguridad alimentaria.

Agora Verkehrswende (2025) | Fuente: OACI (2022a).

La UE también ha introducido cuotas de mezcla obligatorias para el SAF con su legislación ReFuelEU Aviation, que entró en vigor en octubre de 2023. Los Estados miembros de la UE están obligados a garantizar que los proveedores de combustible cumplan con estas cuotas. Esta legislación persigue dos objetivos: En primer lugar, los estados miembros ahora deben informar sobre los objetivos establecidos por la UE; y en segundo lugar, los proveedores de combustible ahora tienen la obligación de introducir RFNBO en el mercado de la UE.

4.3 Certificación de sostenibilidad

La certificación es una herramienta utilizada para verificar el cumplimiento de normas reconocidas. El otorgamiento de la certificación depende de un proceso de evaluación claro y objetivo (por ejemplo, para evaluar la sostenibilidad de un producto determinado, como el e-SAF).⁵⁷ La certificación garantiza a los participantes en

el mercado que el hidrógeno, el e-queroseno o el e-SAF que compran, venden o utilizan cumple con unos criterios específicos. Normalmente, el proceso de certificación incluye una auditoría realizada por un organismo independiente para verificar el cumplimiento.

La certificación también es relevante para la concepción y ejecución de proyectos de inversión en e-SAF. Dependiendo del mercado "off-take" en cuestión (por ejemplo, mercado de consumo de UE, EE.UU., mundial), pueden exigirse determinadas certificaciones para vender el producto. Por consiguiente, antes de tomar una decisión de inversión, las partes interesadas pueden exigir la confirmación de que el desarrollador de un proyecto posee o puede obtener las certificaciones pertinentes.

Procesos de certificación

Los criterios que se evalúan en un proceso de certificación pueden variar. Los criterios CORSIA enumerados anteriormente son sólo un ejemplo. Un sistema de certificación también puede tener varios niveles de certificación (con algunos productos que cumplen los criterios para la certificación de nivel „plus“ u „oro“).

57 Véase International PtX Hub (2023b).

Un ecosistema de certificación más amplio

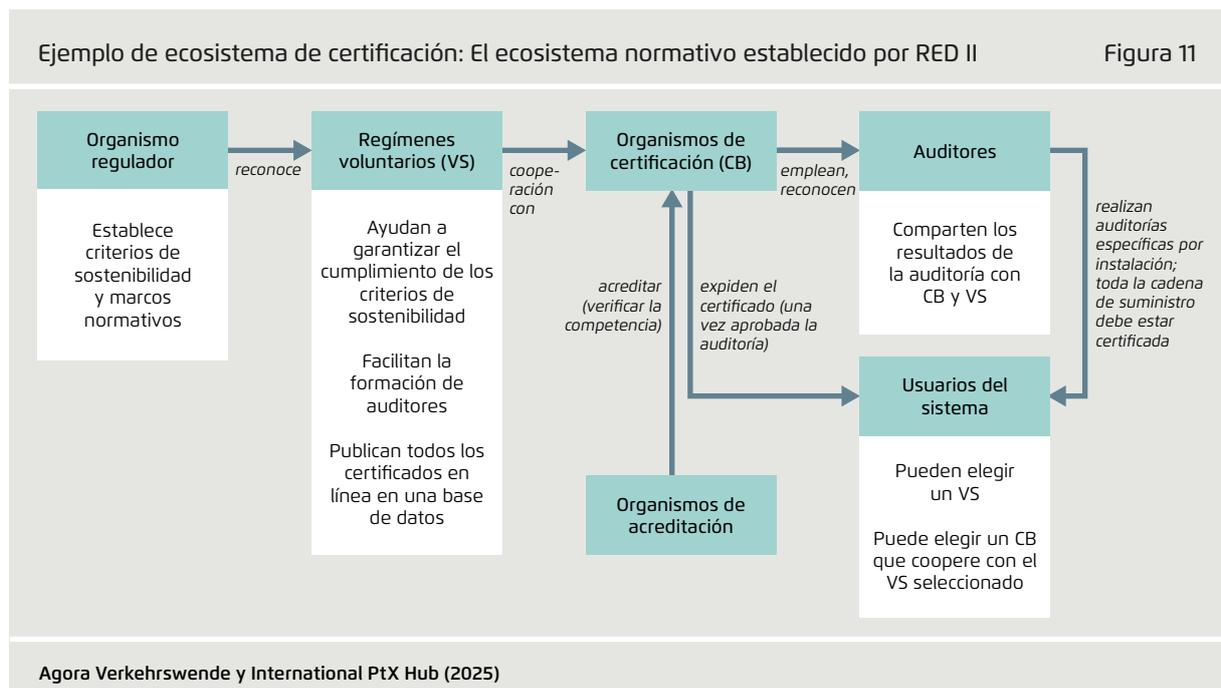
El ecosistema de certificación más amplio está formado por diversos actores y sistemas, como la OACI, los organismos reguladores de la UE, los mecanismos de certificación promovidos por la industria y auditores independientes externos y los „usuarios del sistema“ (es decir, las empresas). (Figura 11). Aunque el ecosistema descrito a continuación es propio de la UE, todos los ecosistemas de este tipo suelen tener una parte interesada reguladora y auditores externos.

Los distintos sistemas o regímenes de certificación verifican el cumplimiento de los criterios establecidos por una norma concreta. A modo de ejemplo, de acuerdo con el Marco de Elegibilidad CORSIA y los Requisitos para los Sistemas de Certificación de Sostenibilidad, se han aprobado dos sistemas de certificación: ISCC (Certificación Internacional de Sostenibilidad y Carbono) y RSB (Mesa Redonda sobre Biomateriales Sostenibles). Cada uno de estos sistemas cuenta con orientaciones específicas sobre cómo certificar los combustibles que cumplen los requisitos CORSIA (y establecer la certificación „ISCC CORSIA“ o „RSB CORSIA“). Se han aprobado sistemas similares en el marco de la Directiva sobre Energías Renovables de la EU) (EU-RED) para la certificación de bio-SAF. Estos combustibles pueden reconocerse bajo

el Régimen Comunitario de Comercio de Derechos de Emisión (RCCDE) o EU-RED. Sin embargo, hasta la fecha, ni CORSIA ni la UE han reconocido oficialmente ningún sistema de certificación de e-SAF. En el caso de CORSIA, los criterios de sostenibilidad del e-SAF aún están por definirse. En la UE, en cambio, los criterios para e-SAF han sido adoptados recientemente; la aprobación de los mecanismos de certificación asociados sigue pendiente.⁵⁸

Además de la certificación oficial con arreglo a marcos normativos vinculantes, también existe el mercado voluntario. Los regímenes voluntarios son especialmente pertinentes en el ámbito de los combustibles de aviación, ya que han surgido numerosas asociaciones cuyo objetivo es reducir la huella de carbono con los SAF. En este sentido, la certificación es importante, ya que permite a las empresas demostrar la reducción de las emisiones de GEI u otros beneficios en materia de sostenibilidad. A menudo, las iniciativas de cooperación son voluntarias, lo que significa que no se basan en normativas o políticas gubernamentales, sino en el propio compromiso de la empresa con la sostenibilidad. Algunos de los sistemas de certificación mencionados además ofrecen soluciones de certificación para el mercado voluntario.

58 Comisión Europea (2024).



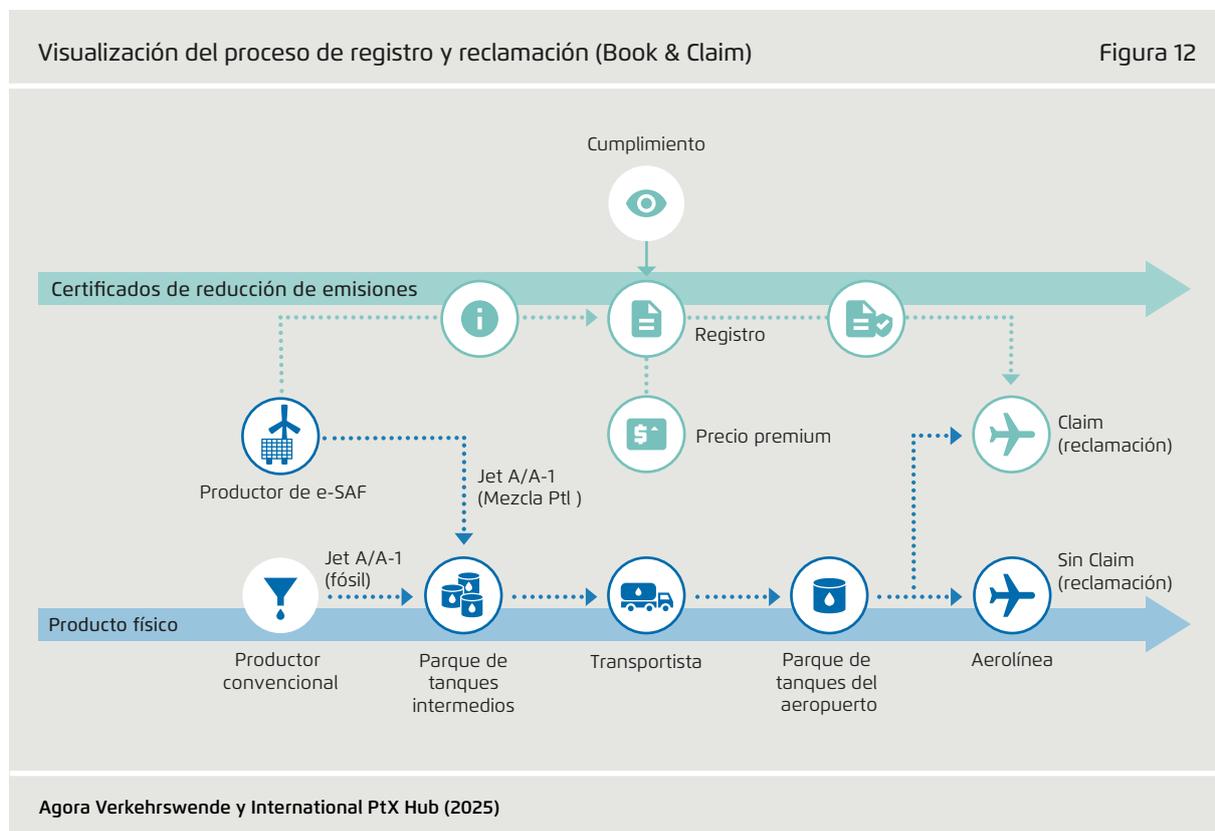
4.4 Contabilización: el enfoque de “Book and Claim” (registro y reclamación)

En el futuro, las aerolíneas deberán demostrar el cumplimiento de las cuotas de SAF y/o reclamar su uso de SAF en el marco de los sistemas de comercio de emisiones (ETS). Para realizar la rendición asociada a la prueba de sostenibilidad (PdS), existen varios modelos denominados „cadena de custodia”; los más comunes son: (i) separación física, (ii) balance de masas; y (iii) Book and Claim. Cada uno de estos enfoques tiene ventajas y desventajas específicas. Bajo los modelos de separación física y balance de masas, la certificación y la presentación de informes están vinculadas al combustible físico y su migración a través de la cadena de valor. Por el contrario, el modelo de Book and Claim es un sistema de comercio puramente virtual. En términos de contabilidad de SAF, el enfoque de Book and Claim se considera el más prometedor para garantizar que el SAF pueda ser suministrado y acreditado de manera altamente distribuida. Bajo este modelo, las cantidades de SAF que se producen

y consumen se informan a una entidad central, lo que garantiza una verificación transparente y centralizada (véase Figura 12). La adopción de este modelo podría potencialmente proporcionar un impulso significativo al desarrollo y uso futuro del SAF.⁵⁹

Sin embargo, este tipo de planteamiento requiere una definición precisa de los límites del sistema, incluida la concesión de licencias a los actores autorizados a participar en la negociación de certificados y la representación exacta del significado de un certificado. En este sentido, deben establecerse mecanismos que garanticen la asignación efectiva de responsabilidades a las partes implicadas. Esto incluye la necesidad de establecer un registro central de SAF, así como un sistema cerrado para su transporte físico, a fin de evitar los problemas de doble contabilidad y garantizar un mercado transparente y fiable. En general, los mecanismos que impiden el fraude y garantizan la integridad son aspectos esenciales de un sistema de este tipo.

59 Pechstein et al. (2020).



El sistema de Book and Claim se basa en certificados transferibles que verifican las características de sostenibilidad de una cantidad determinada de SAF. El organismo emisor otorga estos certificados a los fabricantes de combustible. Los certificados indican la cantidad de SAF añadida al sistema de suministro de combustible, tras mezclarse con el combustible de aviación convencional. Los fabricantes de SAF son responsables de producir una cantidad específica de SAF y de informarla al registro central. Al mismo tiempo, el sistema debe estar diseñado para garantizar que el SAF se introduzca en un sistema cerrado para evitar la doble contabilización. Una opción para ello es utilizar un sistema de abastecimiento de combustible cerrado, que esté controlado por las autoridades aduaneras nacionales (como el que ya existe para gestionar las exenciones fiscales del combustible de aviación). La reducción de las emisiones puede calcularse a partir de las cantidades de SAF declaradas.

Un sistema de 'Book and Claim' reconocido mundialmente es una solución prometedora para el cumplimiento de las futuras cuotas de SAF y para su implementación en los mecanismos de reducción de emisiones. Una ventaja distintiva del modelo de 'Book and Claim' es que separa los certificados del producto físico, permitiendo actividades de abastecimiento de combustible altamente distribuidas. Esto impulsaría un mercado global para las reducciones de emisiones y aceleraría notablemente la producción y el uso de SAF. Sin embargo, la eficacia del sistema dependería fundamentalmente de que el sistema cuente con límites bien definidos, un monitoreo eficaz, la concesión de licencias a participantes autorizados y la creación de un registro centralizado. Todos estos componentes deberían estar diseñados de manera robusta para garantizar la transparencia y prevenir el fraude. Además, el sistema tendría que ser compatible con la legislación nacional y supranacional existente sobre SAF.

Por último, cabe destacar que un modelo de 'Book and Claim' sería particularmente adecuado dada la producción de e-SAF en regiones con abundantes recursos de energía renovable, como Brasil, Sudáfrica, Kenia y Chile, debido a la separación de los certificados del producto físico. Esto eliminaría la necesidad de transportar el SAF a largas distancias hacia aeropuertos de todo el mundo. En su lugar, el combustible podría utilizarse cerca de los centros de producción. Cualquier aerolínea podría reclamar el beneficio climático de reducción de emisiones del

SAF asumiendo la diferencia de precio entre el combustible de aviación estándar y el e-SAF, y realizando el pago correspondiente al productor o usuario del combustible físico. De esta manera, el e-SAF podría suministrarse a cualquier aeronave cerca del centro de producción, mientras que la aerolínea que paga la diferencia de costo recibiría el crédito climático.

5 | Costos de producción del e-SAF

¿Cuánto costarán en el futuro los e-combustibles, tanto para los usuarios individuales como para la economía en su conjunto? Aunque la respuesta a esta pregunta está sujeta a numerosas incertidumbres, es posible elaborar algunas estimaciones preliminares. Los costos de producción de los e-combustibles dependen, en general, de tres categorías de costos:

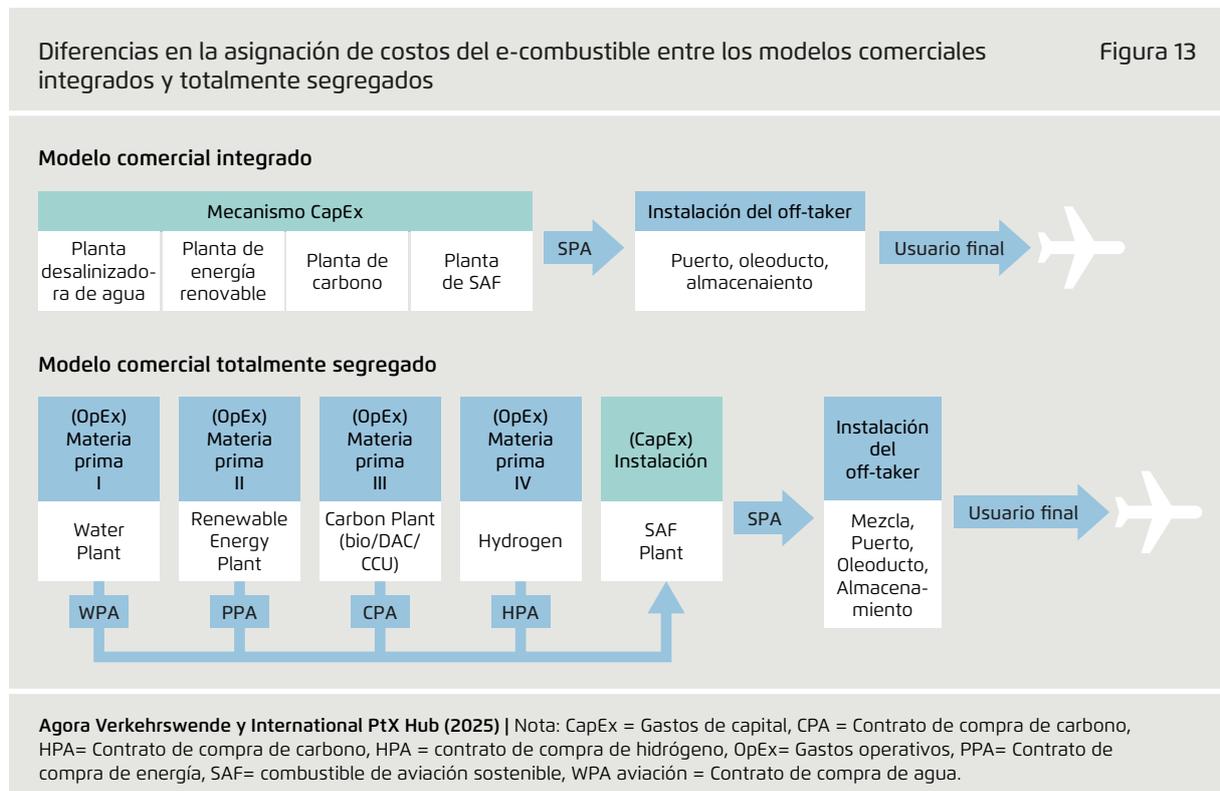
- **Gastos operativos (OpEx):**
Describen todos los costos asociados al funcionamiento de la instalación de producción.
- **Gastos de capital (CapEx):**
Describen el capital necesario para construir la planta de producción.
- **Gastos financieros (FinEx):**
Describen el costo del capital, incluidos los costos devengados para pagar la deuda y distribuir los dividendos.

El peso relativo de cada una de estas categorías de costos variará de un proyecto a otro. El hecho de que los gastos adopten principalmente la forma de OpEx o CapEx dependerá del modelo comercial específico utilizado. A este respecto, podemos distinguir entre un modelo comercial „integrado“ y uno „segregado“ (Figura 13).

En un modelo comercial integrado, los costos asociados a la producción de todas las materias primas (electricidad, CO₂, agua, etc.) están integrados en el proyecto y, por tanto, forman parte de los gastos de capital. En un modelo comercial totalmente segregado, en cambio, el operador no genera sus propias materias primas y por consiguiente suscribe acuerdos de compra para el suministro de materias primas. En este caso, entonces, los costos de adquisición de materias primas se incluyen en los gastos operativos. Sin embargo, también son posibles variantes mixtas de estos dos modelos. El siguiente ejemplo ilustra las principales diferencias entre el modelo comercial integrado y el modelo comercial segregado.

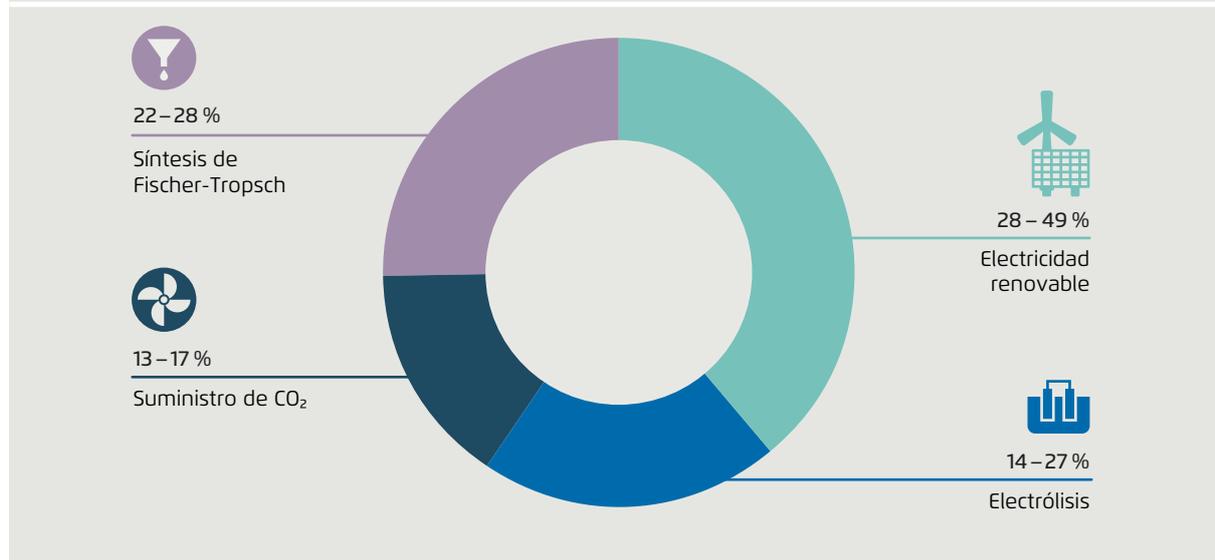
El siguiente gráfico (Figura 14) muestra los componentes del gasto de capital (CapEx) para un modelo comercial integrado. Según estudios pertinentes, en este modelo la electrólisis y la generación de energía renovable representan más del 50 % de los costos de producción del e-combustible.

Los costos de electricidad representan entre el 28 % y el 49 % de los costos totales de producción de e-combustible. El extremo inferior de este rango de costos de



Gastos de capital y costos operativos como porcentaje promedio de los costos de producción de e-combustible

Figura 14



Agora Verkehrswende y International PtX Hub (2025) | Nota: Los rangos de costos surgen de diferentes centros de producción (asumidos). Fuente: dena (2022).

electricidad refleja la producción en puntos geográficos óptimos con condiciones climáticas favorables. Muchas de estos lugares se encuentran en el hemisferio sur. Sin embargo, en estas regiones, las fuentes puntuales de CO₂ sostenibles para la producción de e-combustibles a gran escala son escasas, lo que hace inevitable la captura directa de aire (DAC) en volúmenes significativos. Además, según un estudio reciente, es probable que el suministro de CO₂ a través de DAC cueste significativamente más de lo estimado en estudios anteriores, que eran más optimistas.⁶⁰

Los gastos financieros (FinEx) también tienen un impacto significativo en los costos de producción. El elevado costo de capital en los países en desarrollo puede contrarrestar con creces las ventajas de producción asociadas a unas condiciones eólicas y solares favorables. El riesgo de crédito específico de cada país es uno de los principales componentes del costo de capital; la calificación es, por tanto, un fuerte indicador del costo de capital diferencial frente a proyectos similares en países desarrollados (Tabla 3). Las agencias calificadoras de riesgo tendrán

en cuenta una serie de factores a la hora de asignar la calificación crediticia soberana a un país.⁶¹ La obtención de una buena calificación crediticia soberana suele ser esencial para que los países en desarrollo puedan acceder a financiación en los mercados internacionales de bonos. La siguiente tabla muestra la calificación actual de algunos países específicos, incluido el diferencial en puntos básicos con los bonos del Estado alemán, también conocidos como „bunds“.

Si bien la mayoría de los proyectos de e-SAF se financian en moneda fuerte (euros o dólares estadounidenses), la prima de riesgo para financiar un proyecto en un país en desarrollo puede ser significativa. Se han explorado varios mecanismos para mitigar esta desventaja del costo de capital y permitir la inversión verde en países en desarrollo, entre ellos, garantías, subvenciones y préstamos en condiciones favorables proporcionados por bancos multilaterales de desarrollo (BMD) e instituciones financieras de desarrollo (IFD).

60 Sievert et al. (2024).

61 Dos de las tres mayores agencias de calificación (S&P y Fitch) asignan calificaciones de AAA a D (donde D indica „incumplimiento“). Moody’s, la tercera agencia de calificación reconocida, tiene una escala similar que va de Aaa a C.

Calificación de los países seleccionados y diferencial de crédito negociado con los "bunds" alemanes en agosto de 2023 Tabla 3

País	Calificación (S&P, 23/08)	Diferencial en puntos básicos con los bunds alemanes (23/08)
Kenia	B-	1.398
Nigeria	B-	1.180
Sudáfrica	BB-	772
Brasil	BB-	870
India	BBB-	457

Agora Verkehrswende (2025) | Fuente: TradingEconomics (2023); Investing (2023).

Dado que aún no hay plantas de producción comercial de e-combustibles en funcionamiento, tampoco hay cifras fiables para los precios de mercado o los costos futuros. En los últimos años, varios estudios han tratado de estimar los costos de mercado de los e-combustibles. Estos estudios generalmente concluyen que los e-combustibles son de cuatro a ocho veces más caros que los combustibles convencionales comparables. Sin embargo, como ocurre siempre con las proyecciones, estas estimaciones están sujetas a considerables incertidumbres.

La siguiente tabla destaca los resultados de varios estudios sobre el costo actual y futuro de la producción de e-SAF utilizando la síntesis de Fischer-Tropsch. Las proyecciones varían ampliamente dependiendo de hipótesis tales como, ubicación de la planta, costo de la electricidad renovable y eficiencia de la planta. En promedio, las estimaciones prevén costos de producción actuales de unos 4.240 euros por tonelada. Sin embargo, estudios anteriores han arrojado estimaciones muy divergentes que oscilan entre 2.440 y 5.660 euros por tonelada. En el extremo inferior de este rango de costos encontramos los estudios que asumen un suministro renovable económico con altas horas de plena carga, como la energía hidroeléctrica, en combinación con CO₂ de fuentes puntuales. Sin embargo, en el mundo real, pocos lugares pueden satisfacer ambos factores, lo que significa que estas estimaciones no reflejan las condiciones que regirían la producción a gran escala. Los costos de rango medio se derivan de combinar energía de bajo costo con altas horas de plena carga y una fuente de CO₂ costosa como DAC o, alternativamente, de la generación de energía de baja carga completa en regiones menos favorables con una fuente

puntual de CO₂ menos costosa. Los costos son muy altos cuando la producción tiene lugar en regiones con bajo potencial renovable en combinación con CO₂ proveniente de plantas DAC.

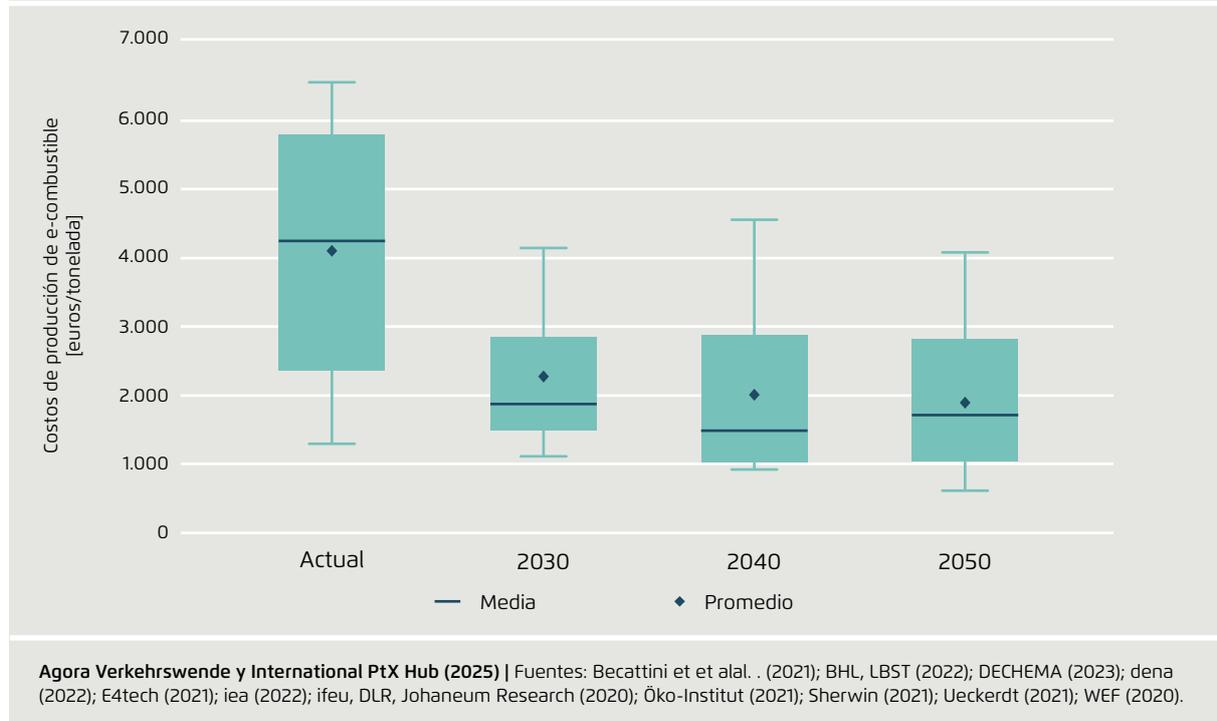
De cara al futuro, se estima que los costos de producción caerán a entre 1.090 y 2.620 euros por tonelada para 2050, dado el despliegue robusto del mercado y los efectos de la curva de aprendizaje y las economías de escala asociadas. En promedio, los costos de fabricación en 2050 se estiman en 1.935 euros por tonelada. Sin embargo, tales estudios generalmente solo consideran los costos de producción „mínimos“. Específicamente, no contemplan los costos adicionales de transporte de combustible, certificación, impuestos y gravámenes, o ganancias comerciales. En cualquier caso, es probable que los precios minoristas pagados por las aerolíneas sean significativamente más altos que los costos de producción de e-SAF.

Aunque las previsiones y estimaciones de los costos de producción de e-SAF varían ampliamente, los costos macroeconómicos adicionales que resultarán de su uso se pueden estimar considerando los volúmenes de combustible que se requerirán, por ejemplo, para cumplir con la subcuota de RFNBO indicada en ReFuelEU Aviation.⁶² Según los estudios mencionados anteriormente sobre los costos de producción de e-combustibles, el e-SAF se puede producir a un costo de aproximadamente 1.900 euros por tonelada en 2030. Asumiendo los

62 Para información adicional sobre esta cuota, consultar la siguiente sección sobre políticas de e-combustibles.

Costos de producción de e-combustibles a base de hidrocarburos. Rangos proyectados incluidos valores medios

Figura 15



precios actuales del combustible jet A-1 de origen fósil de alrededor de 850 euros por tonelada, esto resultaría en costos adicionales de al menos 1.000 euros por tonelada para el e-SAF. Por lo tanto, para suministrar las aproximadamente 570.000 toneladas métricas de e-queroseno necesarias para cumplir con la cuota del 1,2% para 2030, se incurriría en costos adicionales de más de 570 millones de euros. Sin embargo, en comparación con el costo total del suministro de combustible de aviación de aproximadamente 40 mil millones de euros en la UE, esta es una cantidad comparativamente pequeña.

Como regla general, los costos calculados aumentan con la complejidad del proceso de producción y las materias primas requeridas además del hidrógeno. Por lo tanto, el e-metanol promete ser la opción más económica en cuanto a la facilidad de producción para obtener e-SAF. La ruta de Fischer-Tropsch podría conducir a costos ligeramente más altos, pero también es una opción técnica muy convincente, ya que actualmente representa la única vía certificada para producir e-SAF. Además, sus subproductos se pueden vender, lo que mejora su

rentabilidad. Sin embargo, esto también es cierto para el e-metanol como producto intermedio al seguir la vía de convertir metanol en combustible de aviación sostenible (MtJ). De hecho, se espera que los costos de producción de e-SAF disminuyan considerablemente en los próximos años debido a las economías de escala, la estandarización y los efectos de la curva de aprendizaje.

En última instancia, es importante subrayar que no se dispone de datos concretos sobre los costos que resultarán de la producción de e-combustibles. Los costos unitarios alcanzados por las plantas piloto no son representativos de los costos alcanzables en un despliegue a gran escala. Por lo tanto, las predicciones de costos unitarios a corto plazo no deberían ser el factor decisivo para las inversiones de vanguardia que buscan seguir desarrollando la tecnología de los e-combustibles, dadas las eficiencias de costo que resultarán naturalmente durante una aceleración de la producción a gran escala.

6 | Instrumentos de política existentes y ambición

Se han adoptado diversas regulaciones a nivel nacional e internacional con el objetivo de aumentar la participación de las energías renovables en el transporte. Dentro de la UE, uno de los principales instrumentos para promover los combustibles PtX es RED. Además, se están finalizando o ya se han adoptado diversas medidas como parte del paquete „Fit for 55“, que tiene como objetivo fortalecer el Pacto Verde Europeo. Este paquete incluye regulaciones específicas para respaldar la aceleración de los e-combustibles, particularmente en la aviación (ReFuelEU Aviation) y en el transporte marítimo (FuelEU Maritime). Sin embargo, más allá de las fronteras de Europa, varias naciones han estado adoptando estrategias y políticas que prevén una dependencia de los combustibles PtX. En consecuencia, como parte de nuestra investigación, hemos examinado las propuestas internacionales en el área de políticas diseñadas para fomentar la producción y el uso de e-SAF. Específicamente, además de considerar las actividades llevadas a cabo por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) de la ONU, analizamos los propuestas de políticas en dos jurisdicciones con alta demanda de combustibles fósiles (EE. UU. y la UE); en tres países con ambiciones anunciadas de convertirse en importantes centros de demanda de e-combustibles (Alemania, Japón y el Reino Unido); y en tres países con un consumo de combustible en rápido aumento y condiciones beneficiosas para la producción de e-SAF (Brasil, India y Sudáfrica).⁶³

6.1 Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) de las Naciones Unidas

El Marco global de la OACI para SAF, LCAF, y otras energías limpias para la aviación

A finales de 2023, la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) adoptó un marco global para promover la producción y la adopción de SAF (Combustible de

Aviación Sostenible). El objetivo de este marco es lograr una reducción del 5 % en la intensidad de carbono de los combustibles de aviación para 2030, en parte mediante la dependencia de SAF. Reconoce que ciertos estados tienen la capacidad de avanzar a un ritmo más rápido que otros. Además, alienta a los estados a armonizar los marcos regulatorios, apoyar las iniciativas SAF y mejorar el acceso a la financiación para la producción de SAF, todo ello „sin dejar a ningún país atrás“⁶⁴ El marco de la OACI marca un paso importante en el esfuerzo por aumentar la producción de SAF, ya que es el primer acuerdo global de este tipo.

Compensación y reducción de las emisiones de carbono en la aviación internacional (CORSIA)

En 2016, la OACI adoptó CORSIA (Esquema de Compensación y Reducción de las Emisiones de Carbono en la Aviación Internacional), un mecanismo de mercado diseñado para reducir las emisiones de la aviación. El objetivo declarado de CORSIA es estabilizar las emisiones netas de la aviación internacional en los niveles de 2020. En consecuencia, su principal propósito es compensar las emisiones generadas por la aviación internacional que superen los niveles de 2019. En el contexto de CORSIA, esta compensación puede lograrse mediante el pago de un actor a otro para que reduzca sus emisiones. Desde una perspectiva de la ciencia del clima, tales compensaciones se consideran un instrumento muy débil para la reducción de emisiones, dada la dificultad para verificar su eficacia real.⁶⁵ CORSIA también permite a las compañías aéreas alcanzar los objetivos de reducción de emisiones mediante el uso de combustibles alternativos. Sin embargo, como estos combustibles son significativamente más costosos que los certificados de CO₂ de las medidas de compensación, CORSIA no se considera en general un instrumento con un gran potencial para apoyar la aceleración del mercado de SAF. En términos generales, los expertos han planteado dudas sobre la eficacia de CORSIA, debido a la ambigüedad de sus objetivos y a su enfoque en las compensaciones.

63 La información de políticas aquí presentada se fundamenta en una investigación documental, que examinó bases de datos de políticas públicas de la IEA (2023a) y el New Climate Institute (2024), recursos primarios de sitios web gubernamentales y fuentes secundarias de noticias. Para verificar y ampliar los datos obtenidos, también llevamos a cabo entrevistas con expertos de centros de estudios nacionales y empresas privadas.

64 ICAO (2023)

65 T&E (2022 c).

6.2 Unión Europea

Régimen Comunitario de Comercio de Derechos de Emisión (RCCDE)

El sector de la aviación se integró parcialmente en el Régimen Comunitario de Comercio de Derechos de Emisión (RCCDE/EU ETS) en 2012. Desde entonces, las aerolíneas están obligadas a adquirir certificados de emisión para todos los vuelos dentro del Espacio Económico Europeo (EEE), así como desde el EEE a Suiza o el Reino Unido. En mayo de 2023, las normas en este sentido se prorrogaron hasta 2027; los vuelos internacionales fuera del EEE sólo estarán cubiertos por CORSIA, y no por RCCDE.⁶⁶ En 2026, sin embargo, la Comisión revisará si CORSIA es un dispositivo suficiente para cumplir con los objetivos del Acuerdo de París. En caso de una decisión negativa, la Comisión podrá ampliar el RCCDE para incluir los vuelos internacionales. Hasta la fecha, a las compañías aéreas se les ha asignado una

gran proporción de derechos de emisión gratuitos. Sin embargo, la asignación de derechos gratuitos se reducirá gradualmente entre 2024 y 2026. Además, a partir de 2025, las compañías aéreas deberán registrar e informar los efectos no relacionados con el CO₂, que representan alrededor de dos tercios del impacto climático total de la aviación. Esto representa un cambio importante. Además, para 2028 los legisladores elaborarán un proyecto de ley sobre la fijación de precios de estas emisiones en el RCCDE.⁶⁷ En lugar de compensar las emisiones mediante la compra de permisos adicionales, las aerolíneas tendrán la opción de aumentar su dependencia de SAF, ya que el RCCDE considera que el SAF es neutro en carbono. Por consiguiente, los precios futuros del carbono en combinación con la exención de SAF podrían ser un importante impulsor de su producción y uso.⁶⁸

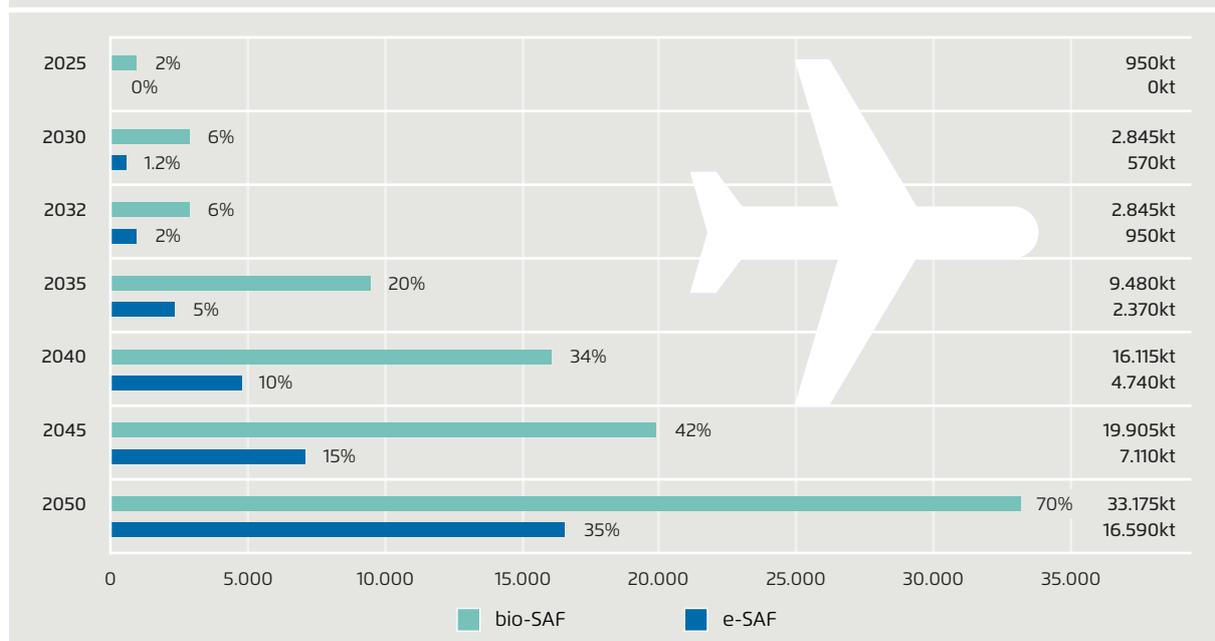
66 Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea (2023 a).

67 Euractiv (2023).

68 Para más información sobre la interrelación entre RCCDE y RefuelEU Aviation, véase Öko-Institut (2024).

Desarrollo de la cuota obligatoria de RefuelEU Aviation para combustibles de aviación sostenibles (SAF)

Figura 16



Agora Verkehrswende y International PtX Hub (2025) | Nota: Basado en un consumo de queroseno en 2019 de aproximadamente 47,4 Mil. t en la UE; LHV (poder calorífico inferior asumido): 43 MJ/kg. Fuente: Consumo de queroseno basado en IEA (2024).

ReFuelEU Aviation

Otra medida importante en el paquete "Fit for 55" de la Comisión es la directiva ReFuelEU Aviation, cuyo objetivo es reducir las emisiones en la aviación.⁶⁹ La directiva, que entró en vigor en octubre de 2023, prescribe cuotas de mezcla específicas para los combustibles de aviación sostenibles (SAF) y subcuotas para el „combustible de aviación sintético“, incluidos los RFNBO (es decir, e-SAF e hidrógeno). La proporción de estos combustibles en el sector de la aviación aumentará de 2 % en 2025 a 70 % en 2050 (véase Figura 16). La subcuota de RFNBO comenzará en un 1,2 % en 2030, aumentará al 2 % en 2032 y alcanzará el 35 % en 2050.

La directiva exigirá que los vuelos que salgan de aeropuertos de la UE se abastezcan de combustible sostenible, para evitar el reabastecimiento estratégico fuera de la UE (lo que se conoce como „tankering“). En concreto, la directiva exige que la cantidad anual de combustible de aviación cargada en un determinado aeropuerto de la UE sea como mínimo el 90 % del combustible de aviación anual necesario. A largo plazo, las cuotas se aplicarán a todos los aeropuertos de la UE. Sin embargo, durante un periodo de transición hasta 2034, los proveedores de combustible podrán cumplir con el mandato de mezcla como un promedio ponderado dentro de la UE (es decir, de forma que a algunos aeropuertos reciban mayores cantidades de SAF, mientras que a otros reciben cantidades menores). Las recientes aclaraciones proporcionadas por la Comisión Europea indican que este mecanismo de flexibilidad se aplicará a nivel de Estado miembro, lo que implica que la cuota debe cumplirse como un promedio ponderado en los aeropuertos de la UE dentro de cada Estado miembro.

Cuota alemana de PtL-SAF

Antes del debate sobre una cuota de SAF a nivel europeo como parte de la iniciativa ReFuelEU Aviation, Alemania introdujo una subcuota para combustibles basados en electricidad en la aviación (e-queroseno). Esta cuota establece una participación de e-queroseno del 0,5 % en las ventas totales de queroseno en Alemania a partir de 2026 (lo que corresponde a un volumen de mercado de aproximadamente 50.000 toneladas), y está previsto que aumente hasta el 2,0 % en 2030. Este mandato de

e-queroseno sólo impone obligaciones a los distribuidores de queroseno y, por tanto, es independiente de la cuota general de reducción de GEI en Alemania (que se basa en la implementación nacional de la RED de la UE).⁷⁰

En consecuencia, la cuota alemana de PtL es más ambiciosa que los objetivos de ReFuelEU Aviation. A partir de abril de 2024, la conciliación de estos objetivos aún debe aclararse.

6.3 Estados Unidos de América

En 2021, los Departamentos de Energía, Transporte y Agricultura de EE. UU. lanzaron el "SAF Grand Challenge", basado en el Plan Climático de Aviación de 2021 de EE.UU., cuyo objetivo es lograr emisiones netas cero en la aviación estadounidense en 2050.⁷¹ El SAF Grand Challenge (Gran Desafío SAF) busca aumentar la producción y la utilización de SAF, al tiempo que reduce los costos y mejora la sostenibilidad. La hoja de ruta asociada, que exige que SAF reduzca las emisiones en al menos un 50 % durante su ciclo de vida en comparación con el combustible de aviación convencional, prevé una producción anual de 11.300 millones de litros (3 mil millones de galones) de SAF para 2030. La producción aumentará a 132.400 millones de litros (35.000 millones de galones) en 2050, cumpliendo así el 100 % de la demanda de combustible de aviación en ese año.

La política estadounidense se basa actualmente en incentivos económicos. La Ley de Reducción de la Inflación (IRA) prevé subvenciones por valor de unos 244,5 millones de dólares para proyectos de inversión dedicados a la producción, transporte, mezcla o almacenamiento de SAF hasta septiembre de 2026.⁷² Para calificar, el SAF debe alcanzar el mencionado umbral de reducción de emisiones de GEI del 50 % y proceder de biomasa, flujos de residuos, energías renovables u óxidos de carbono gaseosos. Además, EE. UU. ha establecido créditos fiscales que comienzan en 1,25 dólares por galón hasta un máximo de 1,75 dólares por galón (\$ 0,33 por litro) de SAF y aumentan progresivamente por cada punto porcentual de mejora en el rendimiento de las emisiones del ciclo

69 Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea (2023 b).

70 Bundesministerium für Digitales und Verkehr (2021).

71 Departamento de Energía de Estados Unidos (2022).

72 La Casa Blanca (2023).

de vida hasta un máximo de 1,75 dólares por galón (0,46 dólares por litro).⁷³

La Norma de Combustibles Renovables de EE. UU. exige que el combustible de transporte vendido en el país contenga un determinado volumen mínimo de „combustible renovable”.⁷⁴ La hoja de ruta del Gran Desafío SAF destaca la necesidad de interrelacionar la Norma de Combustibles Renovables con IRA. Sin embargo, hasta enero de 2024, no se habían anunciado planes para mandatos de mezcla específicos de SAF o e-SAF.

6.4 Reino Unido

En abril de 2024, el gobierno del Reino Unido publicó los detalles de su mandato para SAF, que entrará en vigor en 2025 y exigirá que al menos el 10 % del combustible de aviación se produzca a partir de materias primas sostenibles en 2030 (como parte del objetivo más amplio de lograr una aviación climáticamente neutra para 2050).⁷⁵ En particular, el mandato para SAF funcionará de forma independiente de la Obligación de Combustible Renovable para el Transporte (RTFO), que exige a los proveedores de combustible suministrar un determinado porcentaje de combustible renovable.⁷⁶ En la actualidad, los proveedores de SAF pueden recibir compensaciones en virtud del régimen RTFO, ya que el SAF se considera „combustible de desarrollo” (es decir, RFNBO o de base biológica a partir de desechos o residuos). El mandato para SAF anunciado incorporará certificados negociables para los productores, que se otorgarán en proporción a los ahorros en GEI alcanzados, incentivando así la producción de combustibles más limpios. Entre los combustibles elegibles se encuentran los biocombustibles derivados de residuos y desechos, los combustibles de carbono reciclado (RCF) y los combustibles „Power-to-Liquid (PtL). En virtud de este mandato, los SAF deben lograr una reducción mínima del 40 % de las emisiones de gases de

efecto invernadero en comparación con el combustible fósil (53,4 g de CO₂e/MJ o 2,3 kg de CO₂e/kg de combustible de aviación). Este umbral puede ajustarse aún más estrictamente en futuras revisiones de la política. Además, se establecerá un tope para el SAF derivado de HEFA y se introducirá una obligación de „PtL” para los „combustibles de aviación de bajas emisiones de carbono”. El tope de HEFA tiene por objetivo incentivar el uso de una gama más amplia de materias primas, en particular el hidrógeno. Se reconoce que es necesario un submandato de PtL para garantizar una aceleración de esta tecnología, ya que promete grandes ahorros de GEI, a pesar del bajo riesgo de cambios en el uso de la tierra. El mandato de PtL comenzará con un 0,2 % en 2028 y aumentará hasta el 3,5 % en 2040. El proyecto de ley aún tiene que ser aprobado por el Parlamento británico.

El Régimen de Comercio de Derechos de Emisión del Reino Unido (UK ETS) cubre la aviación de cabotaje, los vuelos entre el Reino Unido y Gibraltar y los vuelos con origen en el Reino Unido y destino en el Espacio Económico Europeo.⁷⁷ El régimen UK ETS, al igual que el EU ETS, tiene por objeto tratar las emisiones de gases de efecto invernadero mediante la aplicación de un sistema de comercio de derechos de emisión con fijación previa de límites o topes máximos. A partir del 1 de enero de 2021, el límite para la Fase 1 del UK ETS se estableció en un 5 % por debajo de la asignación teórica prevista para la Fase IV del EU ETS (2021-2030). Este límite se mantuvo hasta la conclusión de la fase 1 en 2023, tras lo cual se implementó un nuevo „tope de cero neto”. En julio de 2023, la Autoridad del UK ETS del Reino Unido declaró su intención de suspender las asignaciones gratuitas para la aviación en 2026. En su lugar, las compañías de aviación deberán adquirir derechos de emisión por cada tonelada de carbono emitida dentro del régimen. Para garantizar que los operadores de aeronaves puedan prepararse para el próximo cambio, el derecho de asignación gratuita para la aviación seguirá reduciéndose a la tasa fija establecida del 2,2 % anual en 2024 y 2025, hasta llegar a la subasta completa en 2026. Además, la autoridad afirma que se formulará una propuesta sobre cómo tratar el SAF basándose en los criterios de mandato de SAF recientemente establecidos dentro del UK ETS y sobre cómo se pueden incluir los impactos no relacionados con el CO₂.

⁷³ Agencia Tributaria (2023)

⁷⁴ Término que por ahora sólo incluye los biocarburantes convencionales, y los biocarburantes avanzados (por ejemplo, a partir de caña de azúcar), y el diésel a base de biomasa (por ejemplo, a partir de aceites usados); véase Agencia de Protección del Medio Ambiente (2022).

⁷⁵ Ministerio de Transportes (2024).

⁷⁶ Ministerio de Transportes (2023).

⁷⁷ Departamento de Seguridad Energética y Red Cero del Reino Unido (2023).

6.5 Japón

La Estrategia Básica de Hidrógeno de Japón tiene varios objetivos: durante la década 2030, Japón pretende desarrollar aeronaves de demostración; mostrar tecnología de fabricación de combustibles de aviación sostenibles (SAF), incluido el combustible sintético (e-fuel); expandir la utilización con tecnologías de bajo consumo de combustible y materiales avanzados en la aviación; y mejorar las operaciones de vuelo.⁷⁸ La revisión de 2023 de la Estrategia Básica del Hidrógeno incluye el objetivo de 2030 de sustituir por SAF el 10 % del combustible de aviación vendido por los distribuidores de combustible en los vuelos internacionales. Previamente, en 2022, el Gobierno revisó la Ley de Aeronáutica Civil, encomendando al Ministerio de Tierra, Infraestructura, Transporte y Turismo el desarrollo de una Política Básica para Promover la Descarbonización en la Aviación. La propuesta concreta, presentada en octubre de 2022, incluye un objetivo de reducción del CO₂ del 16 % para 2030 para vuelos nacionales y también prevé la neutralidad climática para 2050, tanto para vuelos nacionales como internacionales.⁷⁹ Para alcanzar estos objetivos, el SAF se cita como una opción de mitigación crucial. La Estrategia Básica del Hidrógeno establece la intención de ultimar la Política Básica para Promover la Descarbonización de la Aviación. Sin embargo, y considerando lo crucial de esto, una definición regulatoria de SAF aún sigue pendiente.

Japón anunció recientemente planes para introducir un impuesto sobre el carbono a los importadores de combustibles fósiles a partir de 2028, inicialmente a un nivel asequible, pero aumentando gradualmente cada año. Además, se introducirá paulatinamente un Régimen de Comercio de Derechos de Emisión (GX ETS) para los sectores de altas emisiones, empezando por el comercio voluntario entre la Liga GX (un grupo de empresas japonesas). A partir de 2033 se subastarán derechos de emisión a las empresas eléctricas para acelerar la descarbonización del sector energético. Es probable que el sector de la aviación de Japón se vea afectado por el impuesto al combustible de carbono.⁸⁰

78 Ministerio de Economía, Comercio e Industria (2023).

79 Ministerio de Territorios, Infraestructuras, Transporte y Turismo (2022).

80 Agencia de Recursos Naturales y Energía (2023)

6.6 Brasil

En Brasil, el Programa Combustible del Futuro, que se presentó en septiembre de 2023, prevé la introducción de objetivos de reducción de CO₂ para las aerolíneas en sus operaciones nacionales, en lugar de mandatos de mezcla; y los vuelos internacionales estarán exentos.⁸¹ Las obligaciones de reducción comenzarán en 1 % en 2027 y aumentarán progresivamente hasta el 10 % en 2037. No se menciona específicamente el año de referencia para las emisiones, pero dada la orientación de la política hacia el régimen CORSIA, es probable que las emisiones promedio de 2019-20 sean la línea base. Las obligaciones deben cumplirse mediante el consumo de SAF, y no a través de mejoras tecnológicas u operativas. Se incluye un marco legal para el SAF en el proyecto de ley y se complementa con especificaciones relativas al „bioqueroseno de aviación“. Aquí, el término „bio“ no significa „limitado a biogénico“, sino que denota „alternativa al fósil“. Esto se hace evidente en los detalles del proyecto de ley, que establece que todas las rutas tecnológicas para la producción de SAF están permitidas siempre que estén aprobadas por la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM) (allanando así el camino para el cumplimiento de e-SAF con producción basada en la síntesis Fischer-Tropsch).

6.7 India

En la Misión Nacional de Hidrógeno Verde de la India, se menciona la aviación como un sector en el que se emprenderán proyectos piloto a medio plazo (Fase II, 2026-2030).⁸² En noviembre de 2023, India anunció el objetivo de alcanzar una proporción de mezcla de SAF del 1 % para el combustible de aviación en 2027, y del 2 % en 2028. Inicialmente, estos objetivos se aplicarán a los vuelos internacionales.⁸³ Sin embargo, hasta diciembre de 2023 no se había publicado ningún marco normativo para la aplicación obligatoria de SAF en el sector de la aviación. Cabe suponer que esta cuota tratará inicialmente de introducir los biocombustibles en la aviación, sobre todo teniendo en cuenta la falta de una definición reglamentaria de los combustibles derivados del hidrógeno.

81 Ministerio de Minas y Energía (2023).

82 Ministerio de Energías Nuevas y Renovables (2023).

83 Reuters (2023).

6.8 Sudáfrica

La Estrategia de Comercialización del Hidrógeno Verde de Sudáfrica prevé acelerar la inversión privada en proyectos de combustible de aviación, metanol verde y amoníaco verde como vehículo para apoyar la creación de valor local.⁸⁴ Se aplica un impuesto al combustible de carbono a los proveedores de combustible. Está previsto que el importe del impuesto aumente progresivamente cada año, desde \$20/t en 2025 hasta un mínimo de \$30/t en 2030.⁸⁵ Además, a partir de 2026, se prevé que el impuesto sobre el carbono experimente aumentos anuales más sustanciales. Un aumento aún mayor del gravamen sobre los combustibles de carbono, como propone la Estrategia de Comercialización del Hidrógeno Verde, podría incentivar la introducción de combustibles menos intensivos en carbono, como e-SAF. Sin embargo, hasta diciembre de 2023, no se había publicado ningún

marco normativo para el SAF (esto es un requisito previo para que quede clara la exención del impuesto sobre el carbono). Además, no hay planes oficiales para establecer mandatos de mezcla de SAF en Sudáfrica.

84 Ministerio de Comercio, Industria y Competencia (2023).

85 Tesoro Nacional (2010).

Resumen general de las políticas vigentes relevantes para la aceleración del e-SAF en el sector del transporte en las jurisdicciones seleccionadas

Tabla 4

	Marco para la producción sostenible de e-SAF	Mandato de mezcla de e-SAF aplicable a los proveedores de combustible	Mecanismo de fijación de precios del carbono, que incluye la aviación	Obligaciones vinculantes de reducción de emisiones de CO ₂ para operadores aéreos
OACI			a	
Unión Europea				
Alemania				
EE.UU.				
REINO UNIDO				
Japón				
Brasil				
India				
Sudáfrica				

Verde: En vigor | Amarillo: Planificado | Gris: Aún no tratado

a A diferencia de otros mecanismos de fijación de precios, como EU ETS, el sistema CORSIA de la OACI se centra en la compensación de los certificados que deben adquirir los operadores de aeronaves por sus emisiones, en lugar de los derechos de emisión (limitados) de CO₂ (para más información, véase la sección 6.1).

Agora Verkehrswende (2025) | Fuente: Documentos gubernamentales de los países enumerados. Información actualizada hasta junio de 2024).

7 | Demanda y disponibilidad de e-SAF

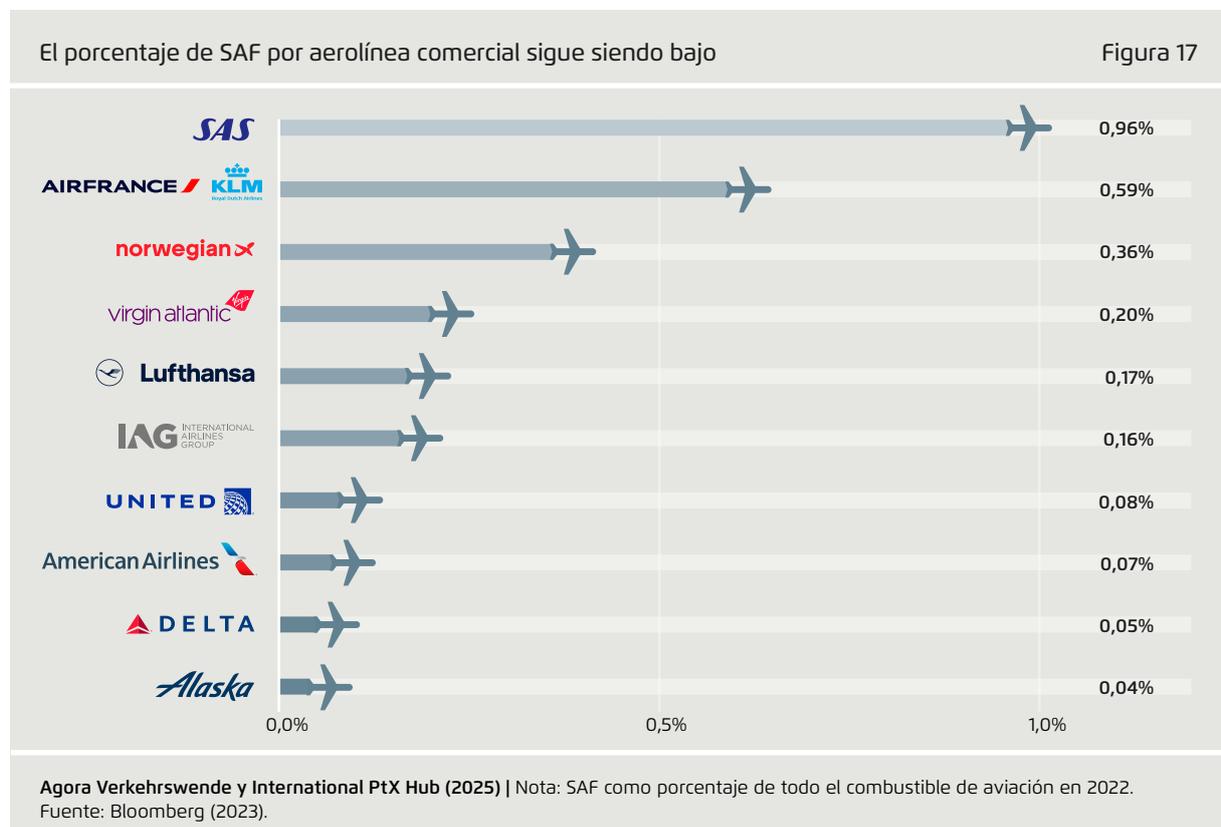
Los niveles de producción de e-SAF en los próximos años son difíciles de prever. En relación con el consumo mundial actual de combustible de aviación fósil (370 millones de toneladas al año⁸⁶), el consumo real de SAF se sitúa en el rango de partes por mil (véase Figura 17), y está cubierto por el bio-SAF en gran medida. En la actualidad, sólo unas pocas plantas producen e-combustibles, y el número de nuevas instalaciones en construcción es muy bajo. Aunque se han anunciado varios proyectos con grandes capacidades de producción, la mayoría de ellos se encuentran en una fase temprana (por ejemplo, estudio general de factibilidad; ingeniería básica; decisión final de la inversión). No obstante, existen varias medidas regulatorias para garantizar el crecimiento del mercado de los e-combustibles, especialmente en el lado de la demanda, con el fin de alcanzar los objetivos de protección del clima. En concreto, como se ha comentado en la sección anterior, la UE ha adoptado obligaciones de cuotas para el uso de e-combustibles en el transporte aéreo y marítimo.

Además, numerosos países han promulgado obligaciones de reducción de CO₂ para proveedores y fabricantes de combustible, así como medidas de mercado, como los sistemas de fijación de precios del carbono. Por último, pero no por ello menos importante, varias jurisdicciones han implementado los incentivos para favorecer el desarrollo del mercado de los e-combustibles (como las exenciones fiscales y las subvenciones previstas en la IRA).

A pesar de las incertidumbres que conlleva, los niveles de producción de e-combustible hasta 2030 pueden estimarse a grandes rasgos en función de los anuncios de proyectos actuales y otros datos públicos. Se necesitan entre tres y cuatro años para el diseño, la obtención de permisos y la construcción de una planta de e-combustible.⁸⁷ En consecuencia, hasta la fecha sólo se han anunciado unos pocos proyectos que anticipen su finalización después de 2030.

86 Datos originales: 7.971 miles de bbl/d; densidad supuesta del combustible de aviación: 0,8 kg/l; véase BP (2022).

87 Esto puede llevar incluso más tiempo en el caso de proyectos pioneros, sobre todo en lo que respecta a los procesos de ingeniería y aprobación.



A continuación, se analizará la demanda y disponibilidad futura de e-SAF. Consideramos las previsiones de diversos estudios para la consecución de los objetivos de neutralidad climática, así como la demanda derivada de las obligaciones de cuotas existentes. Luego comparamos esta demanda con los proyectos anunciados para producir e-SAF por la ruta de Fischer-Tropsch y metanol, y estimamos la superficie de tierra y la demanda energética necesarias para producir suficiente e-SAF para sustituir completamente la demanda actual de combustible de aviación.

7.1 Previsión de la demanda futura de e-SAF

El cuadro siguiente presenta las previsiones relativas a la futura demanda de e-SAF en la Unión Europea y a nivel mundial. Como se desprende del cuadro, estas previsiones divergen considerablemente. En los estudios presentados para la Unión Europea, las cifras para 2030 pueden subdividirse en dos grupos: dos estudios prevén una demanda muy baja (muy por debajo de 1 millón de toneladas), mientras que tres estudios prevén niveles

Resumen de estudios seleccionados que prevén la demanda de e-SAF en función de distintos escenarios de protección del clima y del mercado Tabla 5

	2030			2050		
	Millones de toneladas	Miles de millones de litros	PJ	Millones de toneladas	Miles de millones de litros	PJ
Unión Europea						
AESA ¹	0.3	0.4	12.9	12.7	15.9	546.1
ICCT ²	0.2	0.2	6.5	/		
Öko-Institut/T&E ³	1.9	2.3	80.0	39.2	49.0	1,685.6
Ricardo/T&E ⁴	1.4	1.8	61.6	28	35	1,206.9
T&E ⁵	1.3	1.7	57.6	24.7	30.9	1,062.1
Global						
BP ⁶	0.6	0.8	25.8	67.7	84.6	2,911.1
dena ⁷	63.8	79.8	2,743.4	303.3	379.2	13,043.2
OACI ⁸	5.0	6.3	215.0	54.9	68.2	1,685.6
AIE ⁹	3.5	4.4	150.5	129.1	161.4	5,551.3

- 1 Neutralidad climática en toda la UE para 2050; aplicación de las cuotas de e-combustibles de ReFuelEU Aviation (mostradas aquí); EASA (2022).
- 2 Disponibilidad de materias primas sostenibles para la producción de SAF en la Unión Europea; la cuota de e-fuels se muestra aquí; ICCT (2021).
- 3 Desfossilización de la aviación en Europa para 2050; aquí se muestra la cuota de e-combustibles; Öko-Institut (2021).
- 4 Descarbonización del transporte europeo en 2050 con una mayor proporción de e-combustibles (mostrado aquí). Datos basados en la electricidad necesaria expresados en TWh (2030: 38 TWh; 2050: 745 TWh). Supuestos para la conversión a e-SAF: Factor de eficiencia para la producción de e-SAF por la ruta FT: 45%; kWh/kg SAF = 11,94 (LHV); kWh/SAF = 9,56 (LHV); Ricardo (2020).
- 5 Aviación climáticamente neutra en Europa para 2050; aquí se muestra la cuota de e-combustibles; T&E (2022 a).
- 6 Escenario Net Zero, cuota de derivados del combustible de hidrógeno para la aviación, basado en proyecciones de hidrógeno bajo en carbono; BP (2023)
- 7 97% de la demanda de combustible de aviación cubierta por e-SAF; dena (2022).
- 8 Demanda total de combustible de aviación cubierta con SAF; aquí se muestra la cuota de e-SAF con DAC y alto volumen de tráfico; OACI (2022 b).
- 9 Escenario para alcanzar el objetivo de 1,5 °C, incluye todos los combustibles sintéticos a base de hidrógeno; IEA (2023 a).

de consumo muy superiores. La previsión del ICCT es un dato notorio, ya que estima la producción de e-combustible en apenas 0,2 millones de toneladas (considerando únicamente el potencial de producción dentro de la UE). Un estudio realizado por la Agencia de Seguridad Aérea de la Unión Europea (EASA), que presupone el cumplimiento de las cuotas de RefuelEU Aviation, proyecta una demanda ligeramente superior de 0,3 millones de toneladas. Por el contrario, los escenarios más optimistas prevén una demanda mayor, entre 1,3 y 1,9 millones de toneladas, lo que representaría del 3 % al 4 % de la demanda total de combustible en 2019 (cuando la demanda se situó en 47 millones de toneladas). Si bien estas cifras más elevadas para 2030 parecen bastante optimistas, las cifras de los escenarios para 2050 son aún más divergentes: algunos escenarios prevén que entre el 65 % y 95 % de la demanda esté cubierta por e-SAF (entre 31 y 45 millones de toneladas), mientras que otros prevén una cuota de demanda de entre el 27 % y el 53 % (correspondientes a 13 y 25 millones de toneladas, respectivamente). Ningún escenario prevé la cobertura completa de la demanda de combustible de aviación en 2050 con e-SAF.

Desde una perspectiva más amplia, la Agencia Alemana de Energía (dena) ha estimado las cantidades de e-SAF que serían necesarias para cubrir casi toda la demanda mundial de combustible de aviación, llegando a una cifra de 300 millones de toneladas para 2050. Por su parte, la OACI prevé que la cuota de e-SAF producido con CO₂ procedente de la captura directa de aire (DAC) en un escenario que presume un alto volumen de tráfico aéreo rondará los 55 millones de toneladas en 2050. Los biocombustibles desempeñan un papel más importante en este escenario. BP prevé una producción de fuentes de energía basadas en hidrógeno de unos 68 millones de toneladas en 2050 en su escenario „Net Zero“. En cambio, un escenario reciente de la IEA para alcanzar el objetivo de 1,5 °C ha estimado la producción mundial de e-SAF en 2050 en 129 millones de toneladas (esta cifra se sitúa aproximadamente en el punto medio del rango establecido por las estimaciones de dena y la OACI).

7.2 Producción anunciada de e-SAF

Casi todas las plantas con sistema Fischer-Tropsch para la producción de e-combustibles (anunciadas o en funcionamiento) están orientadas a la producción de combustible de aviación sostenible y, por lo tanto, a maximizar el rendimiento del e-queroseno. La e-nafta (gasolina cruda) y el e-diesel todavía se producen como productos secundarios. Si el procesamiento posterior tiene lugar directamente en la planta de e-combustible, el contenido de e-queroseno puede estar entre el 50 % y el 70 % – y se espera que aumente hasta un 80 % en el futuro con mejoras en el diseño del proceso, las condiciones de operación y los catalizadores.⁸⁸

Aunque en la actualidad no existen capacidades de producción significativa de e-SAF, las plantas industriales a gran escala se encuentran en diversas fases de planificación. Hasta la fecha, sólo se han construido tres pequeñas plantas de demostración: En Werlte (Alemania), Atmosfair opera una planta que produce principalmente e-queroseno para su posterior coprocesamiento en combustible de aviación, y en Hamburgo (Alemania), P2X Europe opera una planta que produce principalmente e-diésel y e-ceras para la industria química. Cada una de estas plantas tiene una capacidad de producción de unas 350 toneladas anuales. Por último, a principios de 2024 entró en funcionamiento en Texas una planta de e-SAF construida y operada por Infinium. Está previsto que las primeras plantas industriales entren en funcionamiento entre 2025 y 2027 y se están desarrollando principalmente en Europa (véase Figura 18).

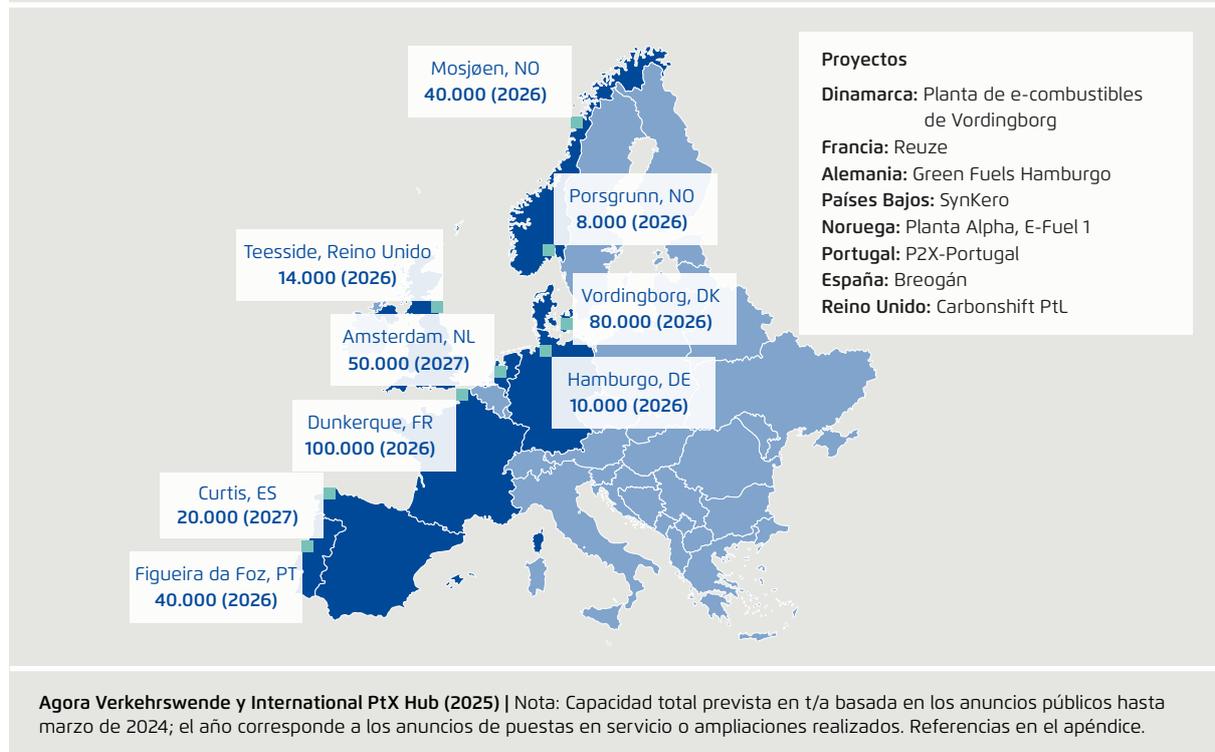
Sin embargo, debido principalmente a las incertidumbres en torno a las disposiciones reglamentarias de la UE, incluidos los criterios de sostenibilidad para el hidrógeno verde contenidos en RED II (actos delegados sobre los artículos 27 y 28), las decisiones finales de inversión para estas plantas están aún en gran medida pendientes.⁸⁹ Las primeras cantidades significativas de e-SAF podrían producirse ya en 2026 si las plantas anunciadas se concretan según el calendario previsto (véase Figura 19). La capacidad de producción mundial acumulada ascendería entonces a unas 200.000 toneladas anuales. En los años siguientes, otras plantas podrían entrar en funciona-

88 Schär (2022).

89 T&E (2024); Ueckerdt, Odenweller (2023).

Descripción de los proyectos industriales de e-SAF con puesta en marcha prevista en 2027

Figura 18



miento con una capacidad de producción adicional de unas 270.000 por año, seguidas de otras grandes plantas cuya entrada en funcionamiento está prevista para 2030. Esto podría llevar a una capacidad máxima de producción de e-SAF esperada de alrededor de 1.360.000 toneladas anuales. Dependiendo del diseño final del proceso y del espectro de productos asociado, se pueden producir cantidades adicionales de nafta y diesel, que podrían utilizarse como materia prima en la industria química o como combustible para el transporte (por ejemplo, en el transporte marítimo). Sin embargo, dado que casi ninguno de estos proyectos está actualmente en construcción, es poco probable que se pongan en marcha antes de 2030 para contribuir a las obligaciones de cuota de la UE.

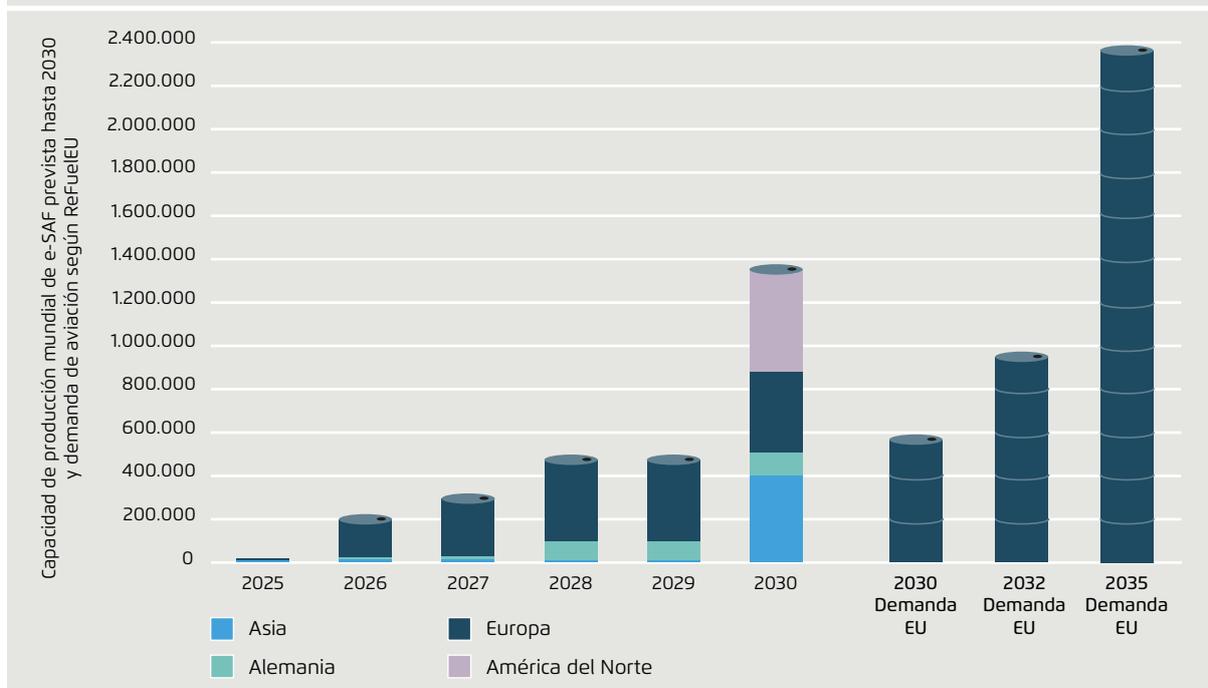
En comparación con el e-SAF, ya se han anunciado capacidades de producción considerablemente mayores para el e-metanol. Esto se debe en parte a la mayor facilidad de la gestión de los procesos, principalmente debido a la reducción y simplificación de los pasos de conversión, y a la amplia gama de aplicaciones del metanol. En las condiciones actuales del mercado, el

metanol puede utilizarse de forma flexible como materia prima en la industria química; como aditivo o sustituto de combustible (por ejemplo, en el transporte marítimo); o puede transformarse posteriormente en combustibles de sustitución directa como la e-gasolina (MtG, proceso de metanol a gasolina) o el e-SAF (MtJ, proceso de metanol a combustible de aviación). De acuerdo con los recientes anuncios, varias plantas con capacidades de producción variable (de 10.000 a 1 millón de toneladas anuales) están programadas para entrar en funcionamiento en los próximos años. Como muestra la Figura 20, estas plantas deberían producir en conjunto unos 2,7 millones de toneladas de e-metanol para 2027. Algo más de la mitad de esta capacidad procederá de una única planta proyectada por HIF global en EE.UU., con una producción prevista de 1,4 millones de toneladas en 2027.⁹⁰ Al menos una parte del metanol producido por estas plantas podría transformarse directamente in situ en combustible para aviones. Como el proceso de certificación del e-SAF producido a partir de metanol aún está pendiente, sólo unos pocos

90 Cision PR Newswire (2022b).

Capacidad de producción mundial de e-SAF prevista hasta 2030 y demanda de aviación según ReFuelEU

Figura 19



Agora Verkehrswende y International PtX Hub (2025) | Nota: Proyección de los autores basada en anuncios públicos, datos en el apéndice; cuando no se disponía de cifras de producción de queroseno, se tomó una proporción de productos del 60 % para los proyectos Fischer-Tropsch.

proyectos anunciaron el uso de esta ruta de producción. Sin embargo, entre ellos figuran dos de las mayores plantas de producción de e-SAF anunciadas hasta la fecha, con una capacidad de producción combinada de casi 1 millón de toneladas en 2030.

7.3 Demanda europea de e-SAF

La subcuota europea de RFNBO establecida en el reglamento ReFuelEU Aviation creará por sí sola una demanda que consumirá la mayor parte de la producción mundial previsible de e-SAF. Ya en 2030, el cumplimiento de la obligación de la UE generará una demanda de unas 570.000 toneladas de e-SAF, (el 1,2% de la demanda de combustible de aviación de la UE), casi la mitad de la capacidad de producción mundial anunciada (es decir, solo combustible producido mediante la síntesis de Fischer-Tropsch, hasta que el e-SAF producido a partir de metanol no esté aprobado para aplicaciones comerciales). Esta demanda aumentará a 950.000 toneladas

métricas en 2032 y ascenderá a 2,4 millones de toneladas métricas en 2035 (lo que representa el 2% y el 5% de la demanda de combustible de aviación de la UE, respectivamente). La capacidad de producción necesaria sólo se alcanzará si el e-SAF procedente de rutas MtJ se incluye para entonces en las respectivas normas ASTM. Sólo para Europa, esto requeriría capacidades de producción significativamente mayores que las previstas actualmente. En comparación, el consumo de combustible de aviación de la UE representa sólo un 14% del consumo mundial.⁹¹ Por lo tanto, es necesario un aumento aún más ambicioso del mercado de e-SAF. Estos cálculos aproximados muestran que las cuotas ambiciosas no han sido suficientes para desencadenar un aumento de la producción lo suficientemente grande. En consecuencia, existe una clara necesidad de medidas complementarias del lado de la oferta.

91 Consumo de queroseno en 2019 (niveles prepandémicos) - UE: 47,39 millones de toneladas, en todo el mundo: 331,56 toneladas (U.S. Energy Information Administration, 2023).

Satisfacer las futuras necesidades de demanda de e-SAF basadas en cuotas requerirá no sólo la construcción de plantas de síntesis, sino también un amplio suministro de electricidad renovable, fuentes sostenibles de carbono y electrolizadores para la producción de hidrógeno. Dado que la electricidad renovable será un recurso escaso en las próximas décadas, a medida que los responsables políticos avancen en la descarbonización de todos los sectores de la economía, la electricidad necesaria para la producción de e-combustible debería proceder de una capacidad renovable instalada adicional que se construya expresamente para cubrir las necesidades energéticas de la producción de e-combustibles.

En concreto, esto significa que si los volúmenes necesarios para cumplir con la subcuota de ReFuelEU Aviation se produjeran en la UE, se necesitarían capacidades adicionales de electrólisis de 2.5 a 5.1 gigavatios (véase Figura 21). Además, para cumplir la cuota de 2035 se

necesitarían entre 10.5 y 21.1 gigavatios.⁹² En comparación, la capacidad de electrólisis instalada globalmente era de aproximadamente 0.7 gigavatios a finales de 2022 y se preveía que se triplicaría hasta alcanzar los 2 gigavatios a finales de 2023.⁹³ Aunque se espera un rápido aumento de la capacidad de electrólisis, los proyectos anunciados tienen como principal objetivo descarbonizar industrias (por ejemplo, la siderúrgica y la química, incluidos los fertilizantes). La estrategia de hidrógeno de la UE, cuyo objetivo es instalar 40 GW de capacidad de electrólisis para 2030, también se centra en estos ámbitos de aplicación.⁹⁴

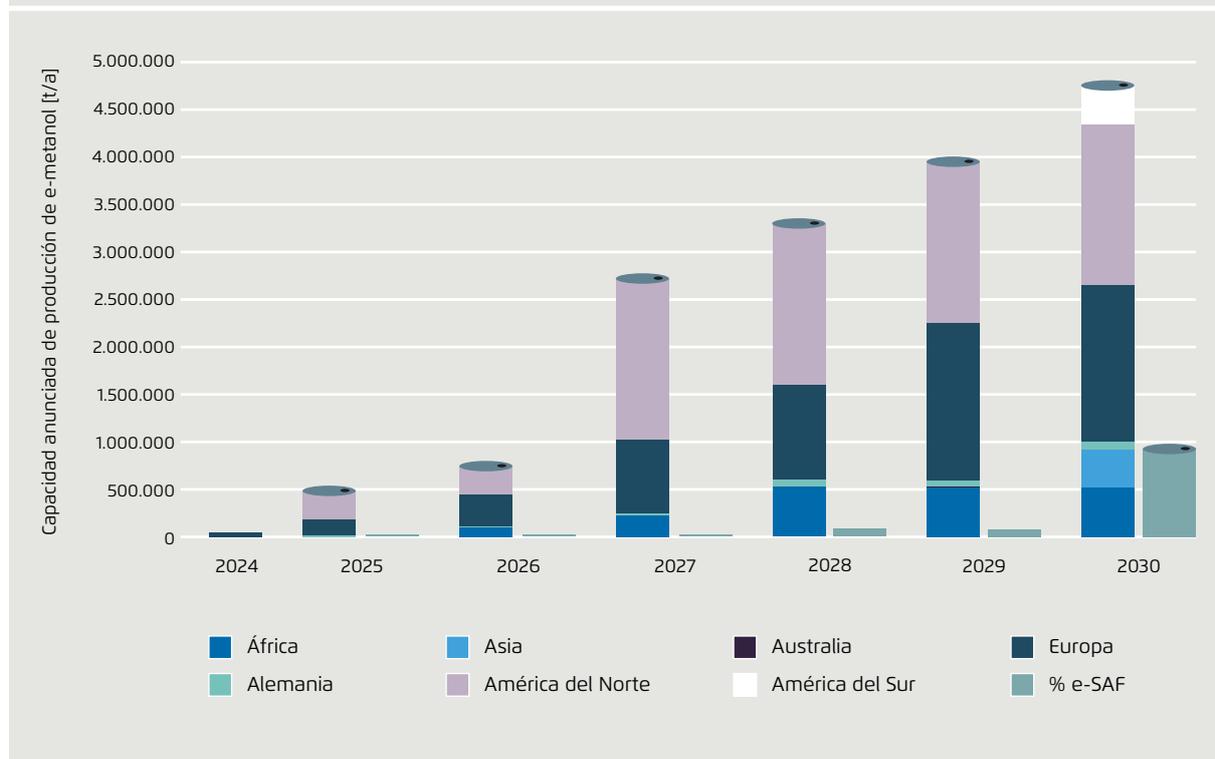
92 El rango resulta de las supuestas horas de plena carga de los electrolizadores (de 4.000 a 8.000 horas al año); no se tuvieron en cuenta las capacidades de almacenamiento necesarias, ya que éstas se reflejarían principalmente en los costos de producción.

93 AIE (2023 b).

94 Comisión Europea (2020).

Capacidad de producción mundial de e-metanol prevista hasta 2030 y porcentaje de e-SAF producido a partir de metanol

Figura 20



Agora Verkehrswende y International PtX Hub (2025) | Nota: Proyección de los autores basada en anuncios públicos, datos en apéndice.

Se necesitaría un total aproximado de 21 teravatios hora de electricidad renovable para producir suficiente e-SAF. Si la electricidad renovable necesaria se generara exclusivamente mediante sistemas fotovoltaicos en Europa Central, habría que instalar unos 16.6 gigavatios de capacidad adicional. Esto corresponde aproximadamente al diez por ciento de la capacidad fotovoltaica agregada existente en Europa. La instalación de esta capacidad requeriría unos recursos de tierra bastante importantes; para la energía fotovoltaica montada en tierra, se necesitarían unos 384 kilómetros cuadrados (150 millas cuadradas), aproximadamente la superficie del lago de Garda.

Otra posibilidad es generar la electricidad necesaria con turbinas eólicas terrestres. En este caso, habría que construir nuevas turbinas eólicas con una capacidad de unos 10 gigavatios. Esto corresponde aproximadamente al 2% del objetivo de la UE para la capacidad de energía eólica instalada en 2030. La superficie terrestre necesaria para estas turbinas sería sólo de 12 kilómetros cuadrados (si

las turbinas se construyeran una al lado de la otra). Sin embargo, para evitar los efectos de la estela del viento, las turbinas deben distribuirse en una superficie considerable. Las turbinas con una potencia combinada de 10 GW tendrían que estar distribuidas en unos 1.200 kilómetros cuadrados (460 millas cuadradas), lo que equivale aproximadamente a la superficie de la ciudad de Nueva York.

La capacidad adicional de energía fotovoltaica o eólica necesaria para producir un volumen determinado de e-combustibles sería, en consecuencia, menor en las regiones „óptimas“ con un elevado número de horas de carga completa. Sin embargo, incluso si la capacidad de producción de e-combustibles se desarrollara en regiones favorables fuera de Europa, con el objetivo de producir e-combustibles para su importación a la UE, se necesitarían enormes capacidades de generación renovable y de producción de combustible.



Además de un amplio suministro de electricidad renovable, que, como ya se ha comentado, supone una demanda de recursos de tierra, se requiere CO₂ sostenible como materia prima. Para cumplir con la cuota RFNBO mencionada anteriormente en 2030 con e-SAF, se necesitarían alrededor de tres millones de toneladas de CO₂ por año, que tendrían que proceder del aire o de fuentes biogénicas para realizar un ciclo cerrado de CO₂. En comparación, la planta DAC más grande en operación a nivel mundial tiene una capacidad de captura de hasta 36.000 toneladas de CO₂ al año, funcionando a máxima capacidad. Por lo tanto, si todas las plantas tuvieran esta capacidad, se requerirían más de 80 de estas instalaciones para el año 2030.⁹⁵

El CO₂ fósil procedente de fuentes industriales puede utilizarse hasta 2035 (y en algunos casos hasta 2040) sin dejar de cumplir los requisitos de sostenibilidad de la Directiva EU RED.⁹⁶ De este modo, se podría lograr una aceleración a corto plazo de la capacidad de producción de la planta con CO₂ de bajo costo. Sin embargo, se seguiría emitiendo CO₂ fósil adicional cuando se utilicen los e-combustibles. Para asegurar que estos planes puedan producir e-combustibles neutros en CO₂ en el futuro, se debe tener en cuenta la disponibilidad para la conversión a captura directa de aire durante la fase de diseño de la planta.

Además de los combustibles de aviación, el proceso de síntesis produce e-diésel y e-nafta (también conocida como gasolina cruda), una materia prima importante en la industria química y un precursor de la gasolina. Así, dependiendo del diseño específico de la refinería con síntesis de Fischer-Tropsch, además de las 570.000 toneladas métricas de e-queroseno necesarias para cumplir con la cuota RFNBO de ReFuelEU, se producirían unas 100.000 toneladas métricas de e-nafta (correspondientes a aproximadamente el 0,5% de las ventas de gasolina de Alemania en 2019) y 275.000 toneladas métricas de e-diésel (alrededor del 0,8% de las ventas de

diésel alemanas en 2019). Estos productos secundarios, que también son neutros en términos de emisiones de CO₂, podrían utilizarse para contribuir a la desfosilización de la industria química o de otros segmentos del sector del transporte difíciles de descarbonizar, como el transporte marítimo. También se podrían utilizar para reducir el impacto climático del parque automotor y de camiones existente durante su transición a los vehículos eléctricos.

95 La planta más grande en la actualidad (Mammoth) es explotada por Climeworks en Islandia y entró en funcionamiento en 2024. Climeworks (2024).

96 Esto es obligatorio para los e-combustibles producidos para contabilizar el cumplimiento con las obligaciones de cuota de la UE, incluso si los combustibles se producen fuera de la UE.

8 | La misión de desfosilizar la aviación

Como se desprende de lo anterior, el volumen de e-SAF necesario para desfosilizar la aviación es enorme. De hecho, para cubrir tan sólo una pequeña fracción de la demanda (por ejemplo, para cumplir con las cuotas inicialmente bajas de la UE; véase la sección 6) será necesario aumentar extraordinariamente la producción de e-SAF. Sin embargo, una producción nacional a la escala necesaria es poco factible en muchos países, incluidas en particular las naciones industrializadas con importantes centros de aviación que ya dependen de las importaciones de energía. En consecuencia, estas naciones tendrán que importar e-SAF de regiones „óptimas“ que tengan excelentes condiciones meteorológicas para las energías renovables, así como suficientes recursos hídricos sostenibles.

Sin embargo, el desarrollo de e-SAF a gran escala planteará numerosos desafíos, incluso en las regiones más atractivas u óptimas. Además de la posible presión sobre los recursos hídricos, la producción de e-SAF exigirá una expansión a gran escala de las energías renovables, lo que conllevará enormes necesidades de uso del suelo. Garantizar el acceso a volúmenes suficientes de CO₂ sostenible es otro obstáculo para el desarrollo de e-SAF. Dadas las esperanzas que a menudo se depositan en el e-SAF como solución para una aviación climáticamente neutra, surge naturalmente la siguiente pregunta: ¿Qué supondría para las regiones más favorecidas (óptimas) si la producción de e-SAF se ampliara lo suficiente como para desfosilizar por completo el sector de la aviación?

La aviación consumió unos 370 millones de toneladas de combustible de aviación en 2019.⁹⁷ El consumo mundial de combustible de aviación se redujo significativamente debido a la pandemia de Covid, pero desde entonces ha vuelto a los niveles anteriores a la pandemia. Por consiguiente, las cifras de 2019 equivalen aproximadamente al consumo actual. Aunque se espera que la demanda de combustible global disminuya significativamente debido a diversos factores –entre ellos, el aumento de la proporción de vehículos eléctricos de batería; el cambio más amplio hacia formas de transporte más sostenibles („cambio modal“); y las medidas para reducir la demanda en el sector de la aviación–, cabe esperar que la demanda de combustible se mantenga elevada. Si bien la mayoría

de los expertos prevén un aumento del tráfico aéreo, también es probable que mejore la eficiencia. Por ello, las siguientes estimaciones se basan en la hipótesis de que la demanda de combustible se mantendrá estable en el futuro.

Según las estimaciones de nuestro escenario, la generación anual de electricidad necesaria para la producción de e-SAF con síntesis Fischer-Tropsch a una escala suficiente para sustituir totalmente al combustible de aviación fósil sería de más de 13,6 petavatios hora.⁹⁸ Esto equivale aproximadamente a la mitad de la producción mundial de electricidad actual (que en petavatios-hora era de 28,8 en 2022).⁹⁹ Si esta electricidad se produjera mediante sistemas fotovoltaicos instalados en lugares muy favorables, habría que desarrollar unos 5,9 teravatios de capacidad de potencia nominal. Esto es aproximadamente cinco veces la capacidad fotovoltaica instalada actualmente en todo el mundo (ubicada en aproximadamente 1,2 teravatios en 2022).¹⁰⁰ La superficie de tierra necesaria para estos sistemas fotovoltaicos equivaldría a unos 137.710 kilómetros cuadrados. Para ponerlo en perspectiva: Chile se considera un país particularmente apto para producir e-combustibles, debido a sus condiciones solares y eólicas favorables. Si todo el e-SAF se produjera con electricidad procedente de sistemas fotovoltaicos en Chile, se necesitaría casi el doble del tamaño de una de las regiones más extensas y poco pobladas de Chile: Atacama.

La capacidad total necesaria sería menor si se utilizaran turbinas eólicas terrestres (o aerogeneradores terrestres) debido a sus mayores horas de carga completa en comparación con la fotovoltaica. No obstante, se necesitarían unos 2,6 teravatios de capacidad terrestre, lo que triplicaría la capacidad mundial actual (que era de 0,84 teravatios en 2022).¹⁰¹ La superficie requerida para las turbinas eólicas terrestres es significativamente mayor que la de los sistemas fotovoltaicos debido a la distancia

97 Datos originales: 7.971 miles de bbl/d; densidad supuesta del combustible de aviación: 0,8 kg/l; BP (2022).

98 La demanda de electricidad calculada aquí incluye la producción de hidrógeno, DAC y la síntesis del e-SAF. Las condiciones límite asumidas para calcular la superficie y las necesidades energéticas pueden consultarse en el apéndice de datos.

99 IEA (2023c).

100 Statista (2024 a).

101 Statista (2024 b).

mínima requerida entre cada turbina. En consecuencia, se necesitarían unos 315.310 kilómetros cuadrados (121.742 millas cuadradas) para la instalación de esta capacidad eólica terrestre. Esto es aproximadamente la mitad de la superficie de Chile (756.102 kilómetros cuadrados o 291.933 millas cuadradas). Sin embargo, el espacio no utilizado entre las turbinas puede destinarse a otros fines, por lo que el requisito de superficie neta –es decir, el área necesaria únicamente para las turbinas y las carreteras de acceso– es significativamente menor, totalizando 3.155 kilómetros cuadrados (1.218 millas cuadradas).

Es muy poco probable que las enormes capacidades de producción necesarias para desfosilizar la aviación se concentren en una sola región del mundo. Sin embargo, hay numerosas regiones desérticas que ofrecen condiciones muy atractivas para la producción de energías renovables, entre otras cosas porque están escasamente pobladas. En África, Australia y Sudamérica, varios desiertos, como el Desierto Oriental, el Gran Desierto Victoria y el Desierto de Atacama, tienen potencial para

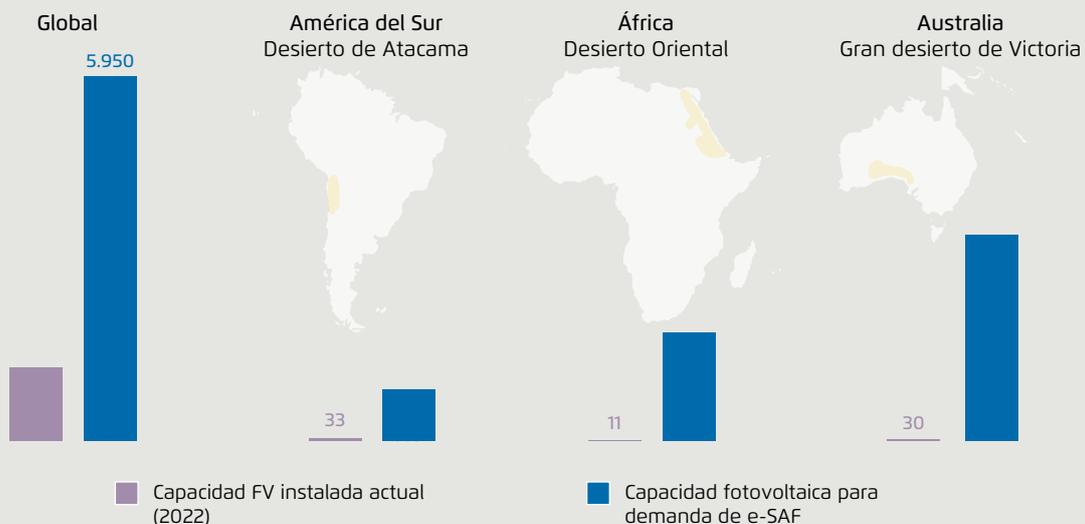
producir grandes cantidades de electricidad renovable. En teoría, la demanda total de combustible del G20 podría satisfacerse con la capacidad de las energías renovables en estas tres regiones. La Figura 22 muestra la capacidad fotovoltaica resultante que habría que instalar adicionalmente en estas regiones en relación con su superficie terrestre, así como la capacidad instalada actualmente en cada región. Como muestra la figura, los 5,9 teravatios necesarios para cubrir la producción de e-SAF superan por sí solos la capacidad actual con creces. Aunque la capacidad fotovoltaica instalada en todo el mundo ha aumentado considerablemente en la última década en una tendencia que es muy probable que continúe, la instalación de capacidad fotovoltaica adicional que sería necesaria para producir suficiente e-SAF requiere un esfuerzo conjunto a escala mundial.

Estas estimaciones demuestran que la misión de eliminar los combustibles fósiles de la aviación es extremadamente difícil y es muy probable que no se consiga sólo con e-SAF, al menos en las próximas décadas, incluso

Capacidad FV necesaria para sustituir totalmente la demanda de combustible de aviación por e-SAF

Figura 22

En GW, en comparación con la capacidad fotovoltaica actual, a nivel mundial y dividida entre los continentes con regiones óptimas (indicadas aquí por los desiertos seleccionados), porcentaje de la capacidad necesaria en proporción al porcentaje de superficie terrestre mundial.



Agora Verkehrswende y International PtX Hub (2025) | Nota: Proyección de los autores, datos en apéndice. Fuente: Capacidad fotovoltaica instalada según IRENA (2023).

si se centra la atención en la importación desde las regiones más atractivas u óptimas. Para superar este desafío, todas las opciones viables y escalables de forma sostenible disponibles deberán ser explotadas y desarrolladas. En los próximos años, el bio-SAF producido a partir de aceites y grasas residuales mediante el proceso HEFA representa la opción más prometedora desde una perspectiva económica. Puede complementarse con bioalcoholes procedentes de procesos AtJ. Sin embargo, como los recursos biogénicos sostenibles son limitados, es imperativo aumentar paralelamente la producción de e-SAF.

Teniendo cuenta que los lugares muy favorables para la producción de energías renovables son relativamente escasos desde una perspectiva global, se deben aprovechar de forma sensata y sostenible. A medida que otros sectores de la economía se electrifiquen como parte de la transición energética generalizada, la demanda de electricidad renovable seguirá aumentando. Al mismo tiempo, en muchas regiones con condiciones de producción favorables para e-SAF, las energías renovables siguen estando poco desarrolladas y, en algunos casos, las poblaciones locales no tienen acceso a ningún tipo de electricidad.

Aunque esta sección se ha centrado exclusivamente en la estimación de la demanda de electricidad, la producción de hidrógeno asociada también requeriría grandes cantidades de agua depurada. Particularmente en las regiones soleadas, esto requerirá importantes capacidades de desalinización de agua de mar, lo que aumentaría aún más las necesidades de tierra, la demanda de energía y la presión sobre los recursos naturales. Otra cuestión relacionada es la necesidad de tener en cuenta los derechos e intereses de las comunidades locales en zonas escasamente pobladas.

Un desafío adicional y no menos importante se refiere al suministro de dióxido de carbono sostenible. Como las fuentes puntuales sostenibles son escasas, se necesitarán instalaciones DAC gigantescas. Para sustituir la demanda mundial de combustible de aviación de 370 millones de toneladas por año por e-SAF, se requerirán unas 1.925 millones de toneladas de CO₂ al año. Si se suministra mediante DAC, se necesitarán más de 50.000 de las plantas DAC más grandes actualmente en funcionamiento, que cubrirán una superficie adicional de más de

190 kilómetros cuadrados. Sin embargo, estos requisitos adicionales de uso de la tierra son menores en comparación con la superficie de tierra que debe dedicarse a la generación renovable. Un factor adicional es que el costo real de la captura directa de aire puede ser mayor de lo previsto en el pasado (algunos estudios anteriores han pronosticado costos DAC inferiores a 100 euros por tonelada de dióxido de carbono para mediados de siglo).¹⁰²

Y aunque el CO₂ biogénico es otra fuente adecuada para los e-combustibles neutros en carbono, normalmente se suministra de forma descentralizada -cuando está disponible-, lo que a la larga exigiría considerables gastos logísticos. De este modo, las regiones más favorables (óptimas) para la electricidad renovable distan mucho de ser una panacea para superar los retos que plantea la producción de e-combustibles a gran escala. Una cosa está clara: para afrontar estos retos será necesaria una estrategia global que tenga en cuenta todas las dimensiones importantes de la producción de e-combustibles, incluido el suministro de electricidad renovable, las fuentes de carbono sostenibles y las soluciones de financiación asociadas.

102 Sievert et al. (2024).

9 | Conclusión

Es seguro que el e-SAF desempeñará un papel esencial en los próximos años como sustituto de los combustibles de aviación fósiles en la aviación, reduciendo así el impacto climático de este sector. Al mismo tiempo, es probable que el e-SAF siga siendo costoso y sólo esté disponible en cantidades muy limitadas durante las próximas décadas. Por ello, deben realizarse esfuerzos concertados para escalar la producción mundial de e-SAF y aprovechar las economías de escala. Sin embargo, otros sectores difíciles de descarbonizar, como el transporte marítimo y partes de la industria química, también dependerán de los e-combustibles, entrando así en competencia de demanda con el sector de la aviación.

Dado el enorme potencial mundial de generación de energías renovables, alcanzar elevadas cifras de producción de e-SAF parecería fácilmente alcanzable a primera vista. Sin embargo, es necesario un aumento de producción ambicioso para reducir los costos y permitir el despliegue a gran escala. De hecho, se necesitan grandes volúmenes de inversión no sólo para desarrollar instalaciones de producción de e-combustible, sino también para ampliar la generación renovable y lograr avances técnicos en el área de la captura directa de aire (DAC). Desde el principio, debe prestarse especial atención a la producción de SAF para el transporte aéreo y marítimo, ya que los e-combustibles son la única opción de protección climática a largo plazo para reducir la demanda de energía residual en estos subsectores. De este modo, las instalaciones de producción deberían adaptar su gama de productos a las necesidades de la aviación y el transporte marítimo. Los productos secundarios (como la e-nafta) inherentes al proceso de producción pueden utilizarse después para desfosilizar otros modos de transporte en el recorrido hacia un sector de transporte totalmente electrificado. Además, estos productos secundarios pueden utilizarse para desfosilizar los subsectores de la industria química que siguen dependiendo de materias primas basadas en el carbono.

Teniendo en cuenta la escasa capacidad de producción prevista actualmente y el hecho de que en la mayoría de los mercados aún están deliberando los marcos normativos, los volúmenes de producción mundial previstos hasta 2030 son muy bajos, incluso si se produce un aumento ambicioso. En consecuencia, las cantidades de e-combustible que puedan producirse en los próximos años deben reservarse para su uso en sectores difíciles

de descarbonizar, como la aviación. De hecho, desde el punto de vista de la política ambiental y económica, sólo será sensato que el actual parque de vehículos terrestres empiece a utilizar e-combustibles una vez que se produzcan cantidades suficientes de e-combustibles para satisfacer plenamente las necesidades de los sectores difíciles de descarbonizar. E incluso con hipótesis muy optimistas, esto no ocurrirá antes de 2035.

A la hora de desarrollar centros de producción de e-SAF en todo el mundo, habrá que tener en cuenta de forma equitativa los intereses de todos los países y regiones afectados. En particular, se deben reservar cantidades suficientes de energía renovable para el consumo interno en los países que servirán como exportadores de e-SAF. Además, habrá que aunar esfuerzos para apoyar la creación de valor interno en los países que vayan a recibir inversiones extranjeras directas en infraestructuras de producción de e-SAF. Por lo tanto, se deben fortalecer o establecer nuevos vínculos con las estructuras económicas existentes. Si una economía global de e-SAF explotara y perpetuara las relaciones de poder desiguales existentes - como ocurre, por ejemplo, en el comercio del petróleo -, ello podría provocar acontecimientos indeseables, como tensiones geopolíticas a nivel macroeconómico o la marginación de grupos vulnerables a nivel microeconómico.

Como se ha analizado en este documento, cada vez son más los países que introducen medidas políticas para fomentar el desarrollo y el uso del e-SAF. Estas medidas (incluidas las cuotas de mezcla, los mecanismos de subvención y los criterios de sostenibilidad) deberían fortalecerse y ampliarse aún más. Sin embargo, una de las principales conclusiones de nuestro análisis es que los marcos normativos integrales para la producción y el uso sostenibles de e-SAF se encuentran en su mayor parte en una fase temprana de desarrollo y, en algunos casos, se centran únicamente en el hidrógeno. En general, el riesgo de fragmentación del mercado y de fuga de carbono disminuirá a medida que aumente el número de países que introduzcan medidas políticas integrales. Al mismo tiempo, los países están sujetos a condiciones políticas y económicas muy divergentes que deben tenerse en cuenta a la hora de diseñar medidas para apoyar y regular la expansión del mercado de e-SAF. Todos los actores implicados, incluidos los gobiernos nacionales, las empresas y las organizaciones internacionales, deberían

centrarse en fomentar la rápida expansión de la producción de e-SAF, y al mismo tiempo esforzarse por reducir los costos de producción. En este sentido, deberían desarrollarse medidas de I+D específicas para optimizar aún más los procesos de producción de e-SAF y hacer que las fuentes sostenibles de CO₂ estén disponibles, especialmente a través de la captura directa de aire.

Lograr un sector de transporte climáticamente neutro en consonancia con los objetivos del Acuerdo de París es un desafío enorme, especialmente en sectores difíciles de descarbonizar, como la aviación. Sin duda, el e-SAF desempeñará un papel crucial en la desfossilización del sector de la aviación. Sin embargo, el fomento de la eficiencia energética seguirá siendo importante para mantener las cantidades de producción de e-SAF lo más bajas posible. Además de las mejoras de eficiencia basadas en la tecnología, existen otras medidas importantes de reducción de la demanda, como fomentar el cambio modal, la electrificación directa y el uso de hidrógeno, cuando sea posible. No obstante, dada la enorme demanda de e-SAF que se producirá como parte del cambio hacia la neutralidad climática, no bastará con centrarse únicamente en el desarrollo de capacidades de producción en las regiones más atractivas (óptimas). De hecho, es necesaria una nueva estrategia global para el suministro de e-SAF neutros en carbono que aborde todos los aspectos importantes para su producción, incluido el suministro de energía renovable, los insumos de carbono sostenibles y las necesidades de financiación asociadas, pero sin perder de vista el imperativo de apoyar el desarrollo económico inclusivo y una transición justa.

Bibliografía

Afful-Dadzie, A.; Mallett, A.; Afful-Dadzie, E. (2020): *The challenge of energy transition in the Global South: The case of electricity generation planning in Ghana.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 126. DOI: 10.1016/j.rser.2020.109830.

Agora Energiewende; Agora Industrie (2022): *12 Thesen zu Wasserstoff.* URL: <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/12-thesen-zu-wasserstoff-publikation/>. Last accessed: 03/27/2024.

Airbus (2021): *Airbus begins assembly of first future 'eco-wing' prototype.* URL: <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2021-09-airbus-begins-assembly-of-first-future-eco-wing-prototype>. Last accessed: 05/08/2024.

Airbus (2023a): *Contrail-chasing Blue Condor makes Airbus' first full hydrogen-powered flight.* URL: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2023-11-contrail-chasing-blue-condor-makes-airbus-first-full-hydrogen-powered>. Last accessed: 05/08/2024.

Airbus (2023b): *Airbus' most popular aircraft takes to the skies with 100% sustainable aviation fuel.* URL: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2023-03-airbus-most-popular-aircraft-takes-to-the-skies-with-100-sustainable>. Last accessed: 05/08/2024.

Aireg (2020): *Roadmap for the Development and Introduction of Sustainable Aviation Fuels.* URL: <https://aireg.de/2020/04/18/roadmap-for-the-development-and-introduction-of-sustainable-aviation-fuels/>. Last accessed: 05/27/2024.

Altenburg, T.; Stamm, A.; Strohmaier, R. (2023): *Green hydrogen – support for the just transition?* URL: <https://www.idos-research.de/en/the-current-column/article/green-hydrogen-support-for-the-just-transition/>. Last accessed: 03/27/2024.

Arcadia eFuels (2022): *Arcadia eFuels announces its first eFuels plant location in Vordingborg, Denmark.* URL: <https://arcadiaefuels.com/sunclass-airlines-intends-topurchase-synthetic-jet-fuel-ekerosene-from-arcadiaefuels-3/>. Last accessed: 03/27/2024.

argusmedia.com (2022): *Repsol, Aramco develop e-fuels plant in Spain.* URL: <https://www.argusmedia.com/en/news/2335341-repsol-aramco-develop-efuels-plant-in-spain>. Last accessed: 03/27/2024.

ASCENT (2023): *ASTDM D4054 Clearinghouse.* URL: <https://ascent.aero/publication/astm-d4054-clearinghouse/>. Last accessed: 05/08/2024.

Asghari et al. (2022): *Advances, opportunities, and challenges of hydrogen and oxygen production from seawater electrolysis: An electrocatalysis perspective.* Current Opinion in Electrochemistry, 31. DOI: 10.1016/j.coelec.2021.100879.

ASTM (2023): *Standardization News: Fueling the Future of Aviation.* URL: <https://sn.astm.org/features/fueling-future-aviation-ja23.html>. Last accessed: 05/08/2024.

ATAG (2021): *Waypoint 2050. An Air Transport Action Group Project.* Report, Second Edition. URL: <https://aviationbenefits.org/downloads/waypoint-2050/>.

Atmosfair (2023): *Anlage.* URL: <https://fairfuel.atmosfair.de/de/anlage-techn-details/>. Last accessed: 03/27/2024.

Backhouse, M. (2019): *Green Grabbing.* In: Brunner, Jan; Dobelmann, Anna; Kirst, Sarah; Prause Louisa (2021): *Wörterbuch Land- und Ressourcenkonflikte.* Bielefeld: BPB, S. 122–126.

Bahadur, A.; Leifker, M.; Lincoln, S. (2018): *Edles Metall – Unwürdiger Abbau,* Berlin: Brot für die Welt.

BDLI (2020): *Nachhaltige und klimaneutrale Luftfahrt aus Deutschland für die Energiewende am Himmel.* Technologiestrategie der deutschen Luftfahrtindustrie. Aktualisierte und erweiterte Ausgabe. URL: https://www.bdl.de/sites/default/files/2020-09/TechStrategie_2020_2.pdf.

Becattini, V.; Gabrielli, P.; Mazzotti, M. (2021): *Role of Carbon Capture, Storage, and Utilization to Enable a Net-Zero-CO₂-Emissions Aviation Sector.* Industrial & Engineering Chemistry Research, 60 (18), S. 6848–6862. DOI: 10.1021/acs.iecr.0c05392.

BHL; LBST (2022): *Power-to-Liquids – A scalable and sustainable fuel supply perspective for aviation.* Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA).

Biofuels Central (2023a): *Nacero is Developing a World Scale Methanol to Jet Fuel Complex with TOPSOE Support using their MTJet Technology for Sustainable Aviation Fuel.* URL: <https://biofuelscentral.com/nacero-developing-world-scale-methanol-to-jet-fuel-complex-with-topsoe-support-using-their-mtjet-technology-for-sustainable-aviation-fuel/>. Last accessed: 03/27/2024.

Biofuels Central (2023b): *Honeywell Introduces Uop Efining™ Technology for New Class of Sustainable Aviation Fuel.* URL: <https://biofuelscentral.com/honeywell-introduces-uop-efining-technology-for-new-class-of-sustainable-aviation-fuel/>. Last accessed: 03/27/2024.

Bloomberg (2023): *How United and Other US Airlines Lost Momentum on Sustainable Jet Fuel.* URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-10-05/how-us-airlines-fell-behind-europe-on-sustainable-jet-fuel>. Last accessed: 05/14/2024.

Boeing (2023): *Latest Boeing EcoDemonstrator Studies Tackle SAF's Contrail Effects.* URL: <https://www.ainonline.com/aviation-news/air-transport/2023-11-05/latest-boeing-ecodemonstrator-studies-tackle-safs-contrail>. Last accessed: 05/08/2024.

Bogdanov, D.; Breyer, C. (2016): *North-East Asian Super Grid for 100% renewable energy supply: optimal mix of energy technologies for electricity, gas and heat supply options.* Energy Conversion and Management, 112, S. 176–190. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.01.019.

Bolinger, M.; Bolinger, G. (2022): *Land Requirements for Utility-Scale PV: An Empirical Update on Power and Energy Density.* IEEE Journal of Photovoltaics, 12(2). DOI: 10.1109/JPHOTOV.2021.3136805.

BP (2022): *bp to lead and operate one of the world's largest renewables and green hydrogen energy hubs based in western Australia.* URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/press-releases/bp-to-lead-and-operate-one-of-the-worlds-largest-renewables-and-green-hydrogen-energy-hubs-based-in-western-australia.html>. Last accessed: 03/27/2024.

BP (2023): *BP Energy Outlook 2023 Edition.* URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook/hydrogen.html>.

Bube, S.; Bullerdiel, N.; Voß, S.; Kaltschmitt, M. (2024): *Kerosene production from power-based syngas – A technical comparison of the Fischer-Tropsch and methanol pathway.* Fuel, 366. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.131269.

Businesswire (2023): *Brenmiller's bGen™ Selected as Preferred Solution for Spain-Based Cadiz Project Designed to Produce 29,000 Tons of Green e-Methanol Annually.* URL: <https://www.businesswire.com/news/home/20231213547802/en/Brenmiller%E2%80%99s-bGen%E2%84%A2-Selected-as-Preferred-Solution-for-Spain-Based-Cadiz-Project-Designed-to-Produce-29000-Tons-of-Green-e-Methanol-Annually>. Last accessed: 03/27/2024.

C2X (2023): *C2X takes important step towards large scale green methanol production in Spain.* URL: <https://www.c2xglobal.com/news/c2x-takes-important-step-towards-large-scale-green-methanol-production-in-spain/>. Last accessed: 03/27/2024.

CAAFI (2024): *Fuel Qualification.* URL: https://www.caafi.org/focus_areas/fuel_qualification.html. Last accessed: 05/08/2024.

Carbon Recycling International (2023a): *George Olah Renewable Methanol Plant: First Production of Fuel From CO₂ at Industrial Scale.* URL: <https://www.carbonrecycling.is/project-goplant>. Last accessed: 03/27/2024.

Carbon Recycling International (2023b): *Commercial scale e-methanol production in Norway.* URL: <https://www.carbonrecycling.is/projects#finnfjord-emethanol>. Last accessed: 03/27/2024.

Cision PR Newswire (2022a): *Fulcrum BioEnergy Successfully Produces First Ever Low-Carbon Fuel from Landfill Waste at its Sierra BioFuels Plant.* URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/fulcrum-bioenergy-successfully-produces-first-ever-low-carbon-fuel-from-landfill-waste-at-its-sierra-biofuelsplant-301707331.html>. Last accessed: 03/27/2024.

Cision PR Newswire (2022b): *HIF Global Engages Bechtel, Siemens Energy, and Topsoe for eFuels Project in USA.* URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/hif-global-beteiligt-bechtel-siemens-energy-undtopsoe-an-efuels-projekt-in-den-usa-301697411.html>. Last accessed: 03/27/2024.

Climaviation (2024): *Climaviation. Action de recherche sur Aviation et Climat.* URL: <https://climaviation.fr/en/>. Last accessed: 05/08/2024.

Climeworks (2024): *Climeworks switches on world's largest direct air capture plant.* URL: <https://climeworks.com/press-release/climeworks-switches-on-worlds-largest-direct-air-capture-plant-mammoth>. Last accessed: 05/10/2024.

Concrete Chemicals (2023): *Project.* URL: <https://www.concrete-chemicals.eu/>. Last accessed: 03/27/2024.

DECHEMA (2021): 3. Roadmap des Kopernikus-Projektes „P2X“: Phase II – Technischer Anhang.

DECHEMA (2023): 4. Roadmap des Kopernikus-Projektes P2X Phase II – Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X Technologien.

De Klerk, Arno (2011): *Fischer-Tropsch Refining.* 1st edition. Wiley-VCH, Weinheim and Hoboken. ISBN: 9783527326051.

Delta (2023): *Tugs, tractors and belt loaders nearly all electric at two Delta hubs.* URL: <https://news.delta.com/tugs-tractors-and-belt-loaders-nearly-all-electric-two-delta-hubs>. Last accessed: 05/08/2024.

dena (2022): *E-Kerosene for Commercial Aviation, From Green Hydrogen and CO₂ from Direct Air Capture – Volumes, Cost, Area Demand and Renewable Energy Competition in the United States and Europe from 2030 to 2050.* URL: <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/studie-e-kerosene-for-commercial-aviation/>. Last accessed: 03/27/2024.

DLR (2020): *DEPA 2050 – Development Pathways for Aviation up to 2050.* Final Report. URL: https://elib.dlr.de/142185/1/DEPA2050_StudyReport.pdf.

DLR (2021): *First in-flight 100 percent sustainable-fuels emissions study of passenger jet shows early promise.* URL: https://www.dlr.de/en/latest/news/2021/04/20211129_100-percent-sustainable-fuels-emissions-study-shows-early-promise. Last accessed: 05/08/2024.

DLR (2024): *The climate impact of air transport: One-third attributed to CO₂ emissions and two-thirds to non-CO₂ effects.* URL: <https://www.dlr.de/en/research-and-transfer/featured-topics/climate-compatible-aviation/climate-impact-air-transport>. Last accessed: 05/08/2024.

DLR; TUHH; JBV (2021): *Konzeptionelle und technische Ausgestaltung einer Entwicklungsplattform für Power-to-Liquid-Kraftstoffe – Abschlussbericht.* Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).

E4Tech (2021): *Decarbonisation potential of synthetic kerosene. Study on behalf of Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.* URL: <https://open.overheid.nl/repository/ronl-bde5b558-6ba9-40b5-a428c04d43e18d2a/1/pdf/bijlage-1-onderzoek-decarbonisation-potential-of-synthetic-kerosene.pdf>. Last accessed: 03/27/2024.

Earth & Wire (2021): *On The Wire.* URL: <https://earthandwire.com/blog/consortium-unveils-plans-for-zero-emission-eastern-cape-e-methanol-plant>. Last accessed: 03/27/2024.

Elyse Energy (2023): *Our Projects.* eM-Rhône. URL: <https://elyse.energy/en/our-projects/em-france>. Last accessed: 03/27/2024.

Engie (2023): *Engie joins forces with CMA CGM and Air France-KLM to accelerate the decarbonization of sea and air transport by launching the first industrial-scale renewable and low-carbon fuel platform in Le Havre.* URL: <https://en.newsroom.engie.com/news/engie-joins-forces-with-cma-cgm-and-air-france-klm-to-accelerate-the-decarbonization-of-sea-and-air-transport-by-launching-the-first-industrial-scale-renewable-and-low-carbon-fuel-platform-in-le-havre-a9f2-314df.html>. Last accessed: 03/27/2024.

European Commission (2020): *A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe.* URL: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-07/hydrogen_strategy_0.pdf. Last accessed: 05/27/2024.

European Commission (2021): *2020 Annual Report from the European Commission on CO₂ Emissions from Maritime Transport.* URL: https://climate.ec.europa.eu/news-your-voice/news/commission-publishes-first-annual-eu-report-co2-emissions-maritime-transport-2020-05-25_en. Last accessed: 03/27/2024.

European Commission (2023a): *Commission delegated regulation (EU) supplementing Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council by establishing a Union methodology setting out detailed rules for the production of renewable liquid and gaseous transport fuels of non-biological origin.* URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023R1184>. Last accessed: 05/27/2024.

European Commission (2023b): *Projects selected for grant preparation.* URL: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund/calls-proposals/large-scale-calls/projects-selected-grant-preparation_en. Last accessed: 03/27/2024.

European Energy (2023): *Mitsui will acquire stake in Northern Europe's largest solar plant and the world's largest e-methanol facility.* URL: <https://europeanenergy.com/2023/07/06/mitsui-will-acquire-stake-in-northern-europes-largest-solar-plant-and-the-worlds-largest-e-methanol-facility/>. Last accessed: 03/27/2024.

European Commission (2024): *Voluntary Schemes.* URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/bioenergy/voluntary-schemes_en. Last accessed: 03/27/2024.

European Union Aviation Safety Agency (2022): *European Aviation Environmental Report 2022.* URL: <https://www.easa.europa.eu/eeco/eaer/downloads>. Letzter Zugriff am: 05/13/2024.

European Parliament (2024): *Revision of the EU Emissions Trading System for aviation, as part of the European Green Deal.* URL: <https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/package-fit-for-55/file-revision-of-the-eu-emission-trading-system-for-aviation>. Last accessed: 05/13/2024.

Fasihi, M., Efimova, O., & Breyer, C. (2019): *Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants.* Journal of Cleaner Production, 224, S. 957–980. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.03.086.

FastCompany (2023): *This new U.S. factory plans to turn captured CO₂ into a million gallons of jet fuel annually.* URL: <https://www.fastcompany.com/90921721/twelve-factory-captured-co2-1-million-gallons-of-jet-fuel-sustainable-aviation-fuel>. Last accessed: 03/27/2024.

Fortescue (2023): *Production of Sustainable Aviation Fuel at Marsden Point progresses to the next phase.* URL: <https://fortescue.com/news-and-media/news/2023/07/20/production-of-sustainable-aviation-fuel-at-marsden-point-progresses-to-the-next-phase>. Last accessed: 03/27/2024.

Fraunhofer ISE (2022): *Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende.* URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/agri-photovoltaik-chance-fuer-landwirtschaft-und-energiewende.html>. Last accessed: 03/27/2024.

Fraunhofer ISE; E4tech; Fraunhofer IPA (2018): *Studie IndWEde. Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme.* URL: <https://www.ipa.fraunhofer.de/de/Publikationen/studien/studie-indWEde.html>. Last accessed: 03/27/2024.

Fuel Cell Works (2022): ENERTRAG Plans Green Hydrogen Project in the Tacuarembó Region of Uruguay. URL: <https://fuelcellworks.com/news/enertrag-plans-green-hydrogen-project-in-the-tacuarembó-region-of-uruguay/>. Last accessed: 03/27/2024.

Green Fuels Hamburg (2023): Das Projekt. URL: <https://www.arcadiaefuels.com/arcadia-efuels-receives-investment-for-ptx-facility-from-swen>. Last accessed: 03/27/2024.

Heyne et al (2021): Sustainable aviation fuel pre-screening tools and procedures. *Fuel*, 290. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.120004.

HH2E (2023): DHL Group, HH2E, and Sasol Collaborate to Propel Germany as a Leader in Decarbonized Aviation. URL: <https://www.hh2e.de/en/news/dhl-group-hh2e-and-sasol-collaborate-to-propel-germany-as-a-leader-in-decarbonized-aviation/>. Last accessed: 03/27/2024.

HIF (2022): HIF Global and its partners celebrate the first liters of synthetic fuels from Haru Oni, Chile. URL: <https://hifglobal.com/wp-content/uploads/2022/12/HIFGlobal-and-its-partners-celebrate-the-first-liters-of-synthetic-fuels-from-Haru-Oni-Chile.pdf>. Last accessed: 03/27/2024.

HIF (2023a): HIF Cabo Negro eFuels facility. URL: <https://hifglobal.com/region/hif-chile/>. Last accessed: 03/27/2024.

HIF (2023b): HIF Global continues expansion and announces new eFuels project in Paysandú, Uruguay. URL: <https://hifglobal.com/wp-content/uploads/2023/06/2023.06-HIF-Global-continues-expansion-with-new-project-in-Uruguay.pdf>. Last accessed: 03/27/2024.

HIF (2024a): HIF Global selects Techint E&C to conduct engineering of first large scale eFuels facility in Chile. URL: https://hifglobal.com/docs/default-source/documentos-noticias/chile/hif-techint-eng-v-04032023.pdf?sfvrsn=d092477a_1. Last accessed: 03/27/2024.

HIF (2024b): HIF Asia Pacific. URL: <https://hifglobal.com/region/hif-asia-pacific>. Last accessed: 03/27/2024.

Hy2gen (2023a): JANGADA. URL: <https://www.hy2gen.com/jangada>. Last accessed: 03/27/2024.

Hy2gen (2023b): NAUTILUS. URL: <https://www.hy2gen.com/nautilus>. Last accessed: 03/27/2024.

Hydrogen Insight (2023a): Hydrogen to marine fuel | Maersk-backed producer inks deal to develop \$3bn green methanol plant in Egypt. URL: <https://www.hydrogeninsight.com/production/hydrogen-to-marine-fuel-maersk-backed-producer-inks-deal-to-develop-3bn-green-methanol-plant-in-egypt/2-1-1529593>. Last accessed: 03/27/2024.

Hydrogen Insight (2023b): Indian state approves green hydrogen-based ammonia and methanol plants worth \$5bn. URL: <https://www.hydrogeninsight.com/production/indian-state-approves-green-hydrogen-based-ammonia-and-methanol-plants-worth-5bn/2-1-1561168?s=09>. Last accessed: 03/27/2024.

Hydrogen Insight (2023c): State-owned power giant unveils China's first gigawatt-scale green hydrogen and synthetic aviation fuel project. URL: <https://www.hydrogeninsight.com/production/state-owned-power-giant-unveils-china-s-first-gigawatt-scale-green-hydrogen-and-synthetic-aviation-fuel-project/2-1-1569087>. Last accessed: 03/27/2024.

HyShift (2023): HyShift. Making Sustainable Aviation happen. Together. URL: <https://www.hyshift.org/>. Last accessed: 03/27/2024.

IATA (2019): Technology Roadmap for Environmental Improvement – Fact sheet. URL: https://downloads.regulations.gov/EPA-HQ-OAR-2018-0276-0184/attachment_10.pdf.

IATA (2023): IATA Net Zero Roadmaps – Aircraft Technologies. URL: <https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/aircraft-technology-net-zero-roadmap.pdf>.

Iberdrola (2022): *Iberdrola and Foresa advance in their alliance to lead green methanol production in Spain.* URL: <https://www.iberdrola.com/press-room/news/detail/iberdrola-and-foresa-advance-in-their-alliance-to-lead-green-methanol-production-in-spain>. Last accessed: 03/27/2024.

ICAO (2022a): *CORSIA Sustainability Criteria For CORSIA Eligible Fuels.* URL: https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_Eligible_Fuels/ICA0%20document%2005%20-%20Sustainability%20Criteria%20-%20November%202022.pdf. Last accessed: 05/29/2024.

ICAO (2022b): *Report on the feasibility of a long-term aspirational goal (LTAG) for international civil aviation CO₂ emission reductions.* URL: https://www.icao.int/environmental-protection/LTAG/Documents/REPORT%20ON%20THE%20FEASIBILITY%20OF%20A%20LONG-TERM%20ASPIRATIONAL%20GOAL_en.pdf.

ICCT (2021): *Estimating Sustainable Aviation Fuel Feedstock Availability to Meet Growing European Union Demand.* URL: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/Sustainable-aviation-fuel-feedstock-eu-mar2021.pdf>.

idunnH2 (2024): *Fueling Iceland's future with sustainable aviation fuel from green hydrogen.* URL: <https://idunnh2.com/saf/>. Last accessed: 03/27/2024.

IEA (2021): *Global Hydrogen Review: Assumptions annex.* URL: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>. Last accessed: 03/27/2024.

IEA (2022): *Global Hydrogen Review 2022.* URL: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>. Last accessed: 03/27/2024.

IEA (2023a): *Energy Statistics Data Browser.* URL: <https://www.iea.org/energy-system/transport>. Last accessed: 03/27/2024.

IEA (2023b): *Global Hydrogen Review 2023.* URL: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>. Last accessed: 03/27/2024.

IEA (2023c): *Electricity Market Report 2023.* URL: <https://www.iea.org/reports/electricity-market-report-2023>. Last accessed: 03/27/2024.

ifeu (2019): *CO₂-Quellen für die PtX-Herstellung in Deutschland – Technologien, Umweltwirkung, Verfügbarkeit.* URL: <https://www.ifeu.de/publikation/co2-quellen-fuer-die-ptx-herstellung-in-deutschland-technologien-umweltwirkung-verfuegbarkeit/>. Last accessed: 03/27/2024.

ifeu; DLR; Joanneum Research (2020): *Systemvergleich speicherbarer Energieträger aus erneuerbaren Energien. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA).* URL: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/systemvergleich-speicherbarer-energietraeger-aus>. Last accessed: 03/27/2024.

Ineratec (2022): *E-Fuel Pionieranlage in Deutschland.* URL: <https://www.ineratec.de/de/news/e-fuel-pionieranlage-deutschland>. Last accessed: 03/27/2024.

Ineratec (2023): *Ineratec and Zenith Energy Terminals work on commercial scale e-fuel plant in the port of Amsterdam.* URL: <https://www.ineratec.de/en/news/ineratec-and-zenith-work-commercial-scale-e-fuel-plant-port-amsterdam>. Last accessed: 03/27/2024.

Infinium (2022): *Infinium™ Enters into Strategic Alliance with Denbury for Ultra-Low Carbon Fuels Projects in Texas, Continuing Development Momentum.* URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/infinium-enters-into-strategic-alliance-with-denbury-for-ultra-low-carbon-fuels-projects-in-texas-continuing-development-momentum-301489124.html>. Last accessed: 03/27/2024.

Infinium (2024a): *Infinium and Mo Industrial Park Announce Collaboration to Develop Commercial eFuels Project in Northern Norway.* URL: <https://www.infiniumco.com/news/nbspmo-industrial-park-and-infinium-announce-collaboration-to-develop-commercial-efuels-project-in-northern-norway>. Last accessed: 03/27/2024.

Infinium (2024b): *PROJECT PATHFINDER – The world's first eFuels facility.* URL: <https://www.infiniumco.com/pathfinder>. Last accessed: 03/27/2024.

International PtX Hub (2022): *PtX. Sustainability: Dimensions and Concerns*. URL: <https://ptx-hub.org/ptx-sustainability/>. Last accessed: 03/27/2024.

International PtX Hub (2023a): *Policy brief on EU requirements for renewable hydrogen and its derivatives*. URL: https://ptx-hub.org/wp-content/uploads/2023/04/International-PtX-Hub_EU-Requirements-for-green-hydrogen-and-PtX.pdf.

International PtX Hub (2023b): *Briefing on certification for green hydrogen and Power-to-X*. URL: https://ptx-hub.org/wp-content/uploads/2023/05/International-PtX-Hub_202305_Certification-for-green-hydrogen-and-PtX.pdf.

International PtX Hub (2024a): *Stakeholder Participation in the context of PtX*. URL: <https://ptx-hub.org/de/publication/sustainability-briefing-6-stakeholder-participation-in-the-context-of-ptx/>. Last accessed: 03/27/2024.

International PtX Hub (2024b): *Legal considerations of global trade in green hydrogen & Power-to-X*. URL: https://ptx-hub.org/wp-content/uploads/2024/02/International-PtX-Hub_202402_Legal-considerations-of-global-trade-in-green-hydrogen-and-PtX.pdf.

International PtX Hub (2024c): *Visualization of the book & claim process*.

Investing (2023): *Credit Default Swap Rates (CDS)*. URL: <https://www.investing.com/rates-bonds/world-cds>. Last accessed: 03/27/2024.

IRENA (2022): *Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2023): *Renewable energy statistics 2023*. URL: <https://www.irena.org/Publications/2023/Jul/Renewable-energy-statistics-2023>. Last accessed: 05/27/2023.

Jeswani, H. K.; Chilvers, A.; Azapagic, A. (2020): *Environmental sustainability of biofuels: a review*. Proceedings of the Royal Society A, 476. DOI: 10.1098/rspa.2020.0351.

Jones, E.; Qadir, M.; van Vliet, M.T.H; Smakhtin, V.; Kang, S.M. (2019): *The state of desalination and brine production: A global outlook*. Science of The Total Environment, 657, S. 1343-1356. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.076.

Jones, S.; Zhu, Y. (2009): *Techno-economic Analysis for the Conversion of Lignocellulosic Biomass to Gasoline via the Methanol-to-Gasoline (MTG) Process*. URL: <https://www.osti.gov/biblio/962846>. Last accessed: 03/27/2024.

KEROSyN100 (2023): *KEROSyN100: Die Defossilisierung der Luftfahrt*. URL: <https://www.kerosyn100.de/>. Last accessed: 03/27/2024.

König, D.H.; Baucks, N.; Dietrich, R.U.; Wörner, A. (2015): *Simulation and evaluation of a process concept for the generation of synthetic fuel from CO₂ and H₂*. Energy, 91. DOI: 10.1016/j.energy.2015.08.099.

Kuckshinrichs, W.; Ketelaer, T.; Koj, J. C. (2017): *Economic Analysis of Improved Alkaline Water Electrolysis*. Frontiers in Energy Research, 5. DOI:10.3389/fenrg.2017.00001.

Lee et al. (2021): *The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018*. Atmospheric Environment, 244. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.117834.

Liquid Wind (2023): *L2022 Annual Report*. URL: https://www.liquidwind.se/s/Liquid-Wind_Annual-Report-2022_Digital.pdf. Last accessed: 03/27/2024.

Lonis, F.; Tola, V.; Cau, G. (2021): *Assessment of integrated energy systems for the production and use of renewable methanol by water electrolysis and CO₂ hydrogenation*. Fuel, 285. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119160.

Mabanaft (2024): *Mabanaft is granted EUR 12.4 million in funding for the construction of a new solar methanol plant in Australia*. URL: <https://www.mabanaft.com/en/news-info/current-news-and-press-releases/news-detail/mabanaft-is-granted-eur-124-million-in-funding-for-the-construction-of-a-new-solar-methanol-plant-in-australia/>. Last accessed: 03/27/2024.

Madoqua Ventures (2023): *Projects*. URL: <https://madoqua Ventures.com/projects/>. Last accessed: 03/27/2024.

Mexico Business News (2023): *IFC, Transition Industries Invest In ESG-Driven Methanol Project*. URL: <https://mexicobusiness.news/infrastructure/news/ifc-transition-industries-invest-esg-driven-methanol-project?tag=infrastructure>. Last accessed: 03/27/2024.

Murchison Green Hydrogen (2024): *Our Project*. URL: <https://www.murchisonrenewables.com.au/our-project/murchison-green-hydrogen/>. Last accessed: 03/27/2024.

Neom (2023): *NEOM Green Hydrogen Company completes financial close at a total investment value of USD 8.4 billion in the world's largest carbon-free green hydrogen plant*. URL: <https://www.neom.com/en-us/newsroom/neom-green-hydrogen-investment>. Last accessed: 03/27/2024.

New Climate Institute (2024): *Climate Policy Database*. URL: https://climatepolicydatabase.org/policies?decision_date=&high_impact=All§or%5B937%5D=937&keywords=. Last accessed: 03/27/2024.

Nikkei Asia (2023): *Japan to require overseas flights use 10% sustainable fuel*. URL: <https://asia.nikkei.com/Business/Transportation/Japan-to-require-overseas-flights-use-10-sustainable-fuel>. Last accessed: 03/27/2024.

Norsk E-Fuel (2024): *Projects – Scaling production to make aviation sustainable*. URL: <https://www.norsk-e-fuel.com/projects>. Last accessed: 03/27/2024.

NRW.Energy4Climate (2023): *Nachhaltiger Einsatz von Biomasse – Die Rolle von Biomasse in der Energiewende und in einer klimaneutralen Industrie*. URL: <https://www.energy4climate.nrw/fileadmin/Industrie-Produktion/Der-nachhaltige-Einsatz-von-Biomasse-cr-nrwenergy4climate.pdf>. Last accessed: 03/27/2024.

OECD (2018): *OECD Due Diligence Guidance for Responsible Business Conduct*. URL: <https://mneguidelines.oecd.org/OECD-Due-Diligence-Guidance-for-Responsible-Business-Conduct.pdf>. Last accessed: 03/27/2024.

Offshore Energy (2023a): *Técnicas Reunidas unites with Cetaer for development of e-methanol plant*. URL: <https://www.offshore-energy.biz/tecnicas-reunidas-unites-with-cetaer-for-development-of-e-methanol-plant/>. Last accessed: 03/27/2024.

Öko-Institut (2021): *E-fuels versus DACCS*. Study on behalf of Transport & Environment (T&E). URL: https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/08/2021_08_TE_study_efuels_DACCS.pdf. Last accessed: 03/27/2024.

Öko-Institut (2024): *Aviation in the EU climate policy. Key issues for the EU 2040 and 2050 target*. URL: <https://www.oeko.de/en/publications/policy-brief-aviation-in-the-eu-climate-policy/>. Last accessed: 05/29/2024.

Ørsted (2022): *Green Fuels for Denmark receives IPCEI status*. URL: <https://orsted.com/en/media/newsroom/news/2022/07/20220715544411>. Last accessed: 03/27/2024.

Ørsted (2023a): *Ørsted opens a new era in green shipping by breaking ground on Europe's largest e-methanol project*. URL: <https://orsted.com/en/media/newsroom/news/2023/05/13682622>. Last accessed: 03/27/2024.

Ørsted (2023b): *Ørsted and Maersk sign landmark green fuels agreement, as Ørsted enters the U.S. Power-to-X market*. URL: <https://us.orsted.com/news-archive/2022/03/orsted-and-maersk-sign-landmarkgreen-fuels-agreement>. Last accessed: 03/27/2024.

Oxford Business Group (2023): *GTL production ramps up in Qatar*. URL: <https://oxfordbusinessgroup.com/reports/qatar/2015-report/economy/gtl-production-ramps-up-in-qatar>. Last accessed: 03/27/2024.

P2X Europe (2022): *New Power-to-Liquid plant at H&R's Hamburg site produces alternatives to fossil raw materials*. URL: <https://www.p2x-europe.com/news/detail/new-power-to-liquid-plant-at-hrs-hamburg-site-produces-alternatives-to-fossil-raw-materials/>. Last accessed: 03/27/2024.

P2X Europe (2023): *Another step forward on the European eSAF market: P2X-Europe and Nordic Electrofuel reach next milestone in collaboration for production of sustainable fuels in Scandinavia.* URL: <https://www.p2x-europe.com/news/detail/another-step-forward-on-the-european-esaf-market-p2x-europe-and-nordic-electrofuel-reach-next-milestone-in-collaboration-for-production-of-sustainable-fuels-in-scandinavia/>. Last accessed: 03/27/2024.

P2X Europe (2024): *The Breogan project, promoted by P2X-Europe and Greenalia, declared a Priority Business Initiative (PBI) by the Xunta de Galicia.* URL: <https://www.p2x-europe.com/news/detail/the-breogan-project-promoted-by-p2x-europe-and-greenalia-declared-a-priority-business-initiative-pbi-by-the-xunta-de-galicia/>. Last accessed: 03/27/2024.

Pacific Institute (2023): *World Water Conflict Map.* URL: <https://www.worldwater.org/conflict/map/>. Last accessed: 03/27/2024.

Pechstein, J.; Bullerdiel, N.; Kaltschmitt, M. (2020): *A "book and Claim" – Approach to account for sustainable aviation fuels in the EU-ETS – Development of a basic concept.* Energy Policy, 136. DOI: 10.1016/j.enpol.2019.111014.

Quante et al. (2023): *Renewable fuel options for aviation – A System-Wide comparison of Drop-In and non Drop-In fuel options.* Fuel, 333 (1). DOI: 10.1016/j.fuel.2022.126269.

Renewables Ninja (2022a): *Solar PV.* URL: <https://www.renewables.ninja/downloads>. Last accessed: 03/27/2024.

Renewables Ninja (2022b): *Wind.* URL: <https://www.renewables.ninja/downloads>. Last accessed: 03/27/2024.

Renewables Now (2023): *Total Eren, Aliceco to develop e-fuels project in Kokkola, Finland.* URL: <https://renewablesnow.com/news/total-eren-aliceco-to-develop-e-fuels-project-in-kokkola-finland-829016/>. Last accessed: 03/27/2024.

Reuters (2022): *Egypt to work with UAE's Masdar to make green hydrogen.* URL: <https://www.reuters.com/world/middle-east/egypt-work-with-uaes-masdar-make-green-hydrogen-2022-04-24/>. Last accessed: 03/27/2024.

Reuters (2023): *India eyes nationwide use of 1% sustainable aviation fuel by 2025.* URL: <https://www.reuters.com/sustainability/india-eyes-nationwide-use-1-saf-by-2025-oil-minister-2023-05-19/>. Last accessed: 03/27/2024.

Reuze (2023): *What is Reuze?* URL: <https://www.reuze.eu/>. Last accessed: 03/27/2024.

Ricardo (2020): *Renewable electricity requirements to decarbonise transport in Europe with electric vehicles, hydrogen and electrofuels. Investigating supply-side constraints to decarbonising the transport sector in the European Union to 2050.* Study on behalf of Transport & Environment (T&E). URL: https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/2020_Report_RES_to_decarbonise_transport_in_EU.pdf.

Rolls Royce (2023): *Rolls-Royce successfully completes 100% Sustainable Aviation Fuel test programme.* URL: <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2023/13-11-2023-poweroftrent-rr-successfully-completes-100-sustainable-aviation-fuel-test-programme.aspx>. Last accessed: 05/08/2024.

Royal NLR, SEO Amsterdam Economics (2021): *Destination 2050 – A route to net zero European aviation.* URL: https://www.destination2050.eu/wp-content/uploads/2021/03/Destination2050_Report.pdf.

Rumizen (2021): *Qualification of Alternative Jet Fuels.* Frontiers in Energy Research, 9. DOI: 10.3389/fenrg.2021.760713.

Safran (2019): *What does the future hold in store for the Open Rotor?* URL: <https://www.safran-group.com/news/what-does-future-hold-store-open-rotor-2019-03-28>. Last accessed: 05/08/2024.

Schär, D. (2022): *Katalysatoren für nachhaltige Flugzeugtreibstoffe*. URL: <https://www.chemanager-online.com/news/katalysatoren-fuer-nachhaltige-flugzeugtreibstoffe>. Last accessed: 03/27/2024.

Sherwin, E.D. (2021): *Electrofuel Synthesis from Variable Renewable Electricity: An Optimization-Based Techno-Economic Analysis*. *Environmental Science & Technology*, 55 (11), S. 7583–7594. DOI: 10.1021/acs.est.0c07955.

Sievert, K.; Schmidt, T.; Steffen, B (2024): *Considering technology characteristics to project future costs of direct air capture*. *Joule*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.02.005>.

South Pole (2023): *What is CORSIA and how does it affect your airline?* URL: <https://www.southpole.com/blog/what-is-corsia-how-does-it-affect-your-airline>. Last accessed: 03/27/2024.

Spiegel (2023): *Deutsche Mittelständler planen erste große Fabrik für E-Benzin*. URL: https://www.spiegel.de/auto/e-fuels-erste-grosse-fabrik-fuer-synthetisches-benzin-in-niedersachsen-geplant-a-5c298512-4b8b-43c0-8f9c-8bafa9712ef1?sara_ref=re-em-em-sh. Last accessed: 03/27/2024.

Statista (2024a): *Cumulative installed solar PV capacity worldwide from 2000 to 2022*. URL: <https://www.statista.com/statistics/280220/global-cumulative-installed-solar-pv-capacity/>. Last accessed: 03/27/2024.

Statista (2024b): *Cumulative installed wind power capacity worldwide from 2001 to 2022*. URL: <https://www.statista.com/statistics/268363/installed-wind-power-capacity-worldwide/>. Last accessed: 03/27/2024.

Sweco (2023): *Sweco to conduct the pre-design for St1's Power-to-Methanol Lappeenranta project*. URL: <https://www.sweco.fi/en/insight/press-releases/sweco-to-conduct-the-pre-design-for-st1s-power-to-methanol-lappeenranta-project/>. Last accessed: 03/27/2024.

Synkero (2023): *Synkero develops a synthetic kerosene facility in the Port of Amsterdam*. URL: <https://synkero.com/#about-us>. Last accessed: 03/27/2024.

T&E (2022a): *Roadmap to climate neutral aviation in Europe*. URL: <https://te-cdn.ams3.digitaloceanspaces.com/files/TE-aviation-decarbonisation-roadmap-FINAL.pdf>.

T&E (2022b): *Non-CO₂ effects of aviation: Time to finally address aviation's full climate impact*. URL: <https://transport-environment.vercel.app/articles/non-co2-effects-of-aviation-time-to-finally-address-aviations-full-climate-impact>. Last accessed: 05/08/2024.

T&E (2022c): *UN body ICAO hails empty goal and cheap offsetting scheme to 'green' aviation*. <https://www.transportenvironment.org/articles/un-body-icao-hails-empty-goal-and-cheap-offsetting-scheme-to-green-aviation>. Last accessed: 05/13/2024.

T&E (2024): *E-fuels for planes: with 45 projects, is the EU on track to meet its targets?* URL: <https://www.transportenvironment.org/discover/e-fuels-for-planes-with-45-projects-is-the-eu-on-track-to-meet-its-targets/>. Last accessed: 03/27/2024.

Tarafert (2024): *Projects*. URL: <https://www.tarafertproject.com/projects>. Last accessed: 03/27/2024.

The Navigator Company (2022): *The Navigator Company and P2X Europe have signed a Memorandum of Understanding to create a unique Joint Venture in Portugal to produce green, non-fossil synthetic eFuels*. URL: <https://renewable-carbon.eu/news/the-navigator-companyand-p2x-europe-have-signed-a-memorandum-of-understanding-to-create-a-unique-joint-venture-in-portugal-to-produce-green-non-fossil-synthetic-efuels/>. Last accessed: 03/27/2024.

TradingEconomics (2023): *Credit Rating*. URL: <https://tradingeconomics.com/country-list/rating>. Last accessed: 03/27/2024.

U.S. Energy Information Administration (2023):

Petroleum and other liquids. URL: <https://www.eia.gov/international/data/world/petroleum-and-other-liquids/monthly-petroleum-and-other-liquids-production?pd=5&p=0000000014&u=1&f=A&v=column&a=-&i=none&vo=value&t=G&g=00000000000000000000000000000000000000&l=170-0268001c153kg614808a24sg40e1000>. Last accessed: 03/27/2024.

Ueckerdt, F., Odenweller, A. (2023): *E-Fuels – Aktueller Stand und Projektionen.* URL: <https://www.pik-potsdam.de/de/aktuelles/nachrichten/e-fuels-wahrscheinlich-noch-lange-knapp-pik-analyse-papier>. Last accessed: 03/27/2024.

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, S. 384–393. DOI: 10.1038/s41558021-01032-7.

United Nations (2023): *The Energy Progress Report: Tracking SDG 7.* URL: <https://trackingsdg7.esmap.org/downloads>. Last accessed: 03/27/2024.

Velocys (2022): *Award of £2.5m grant for new e-fuels project.* URL: <https://velocys.com/2022/12/12/award-of-2-5m-grant-for-new-e-fuels-project/>. Last accessed: 03/27/2024.

Viebahn, P.; Scholz, A.; Zelt, O. (2019): *The Potential Role of Direct Air Capture in the German Energy Research Program – Results from a Multi-Dimensional Analysis.* Energies, 12 (18). DOI: 10.3390/en12183443.

Wacker (2024): *WACKER Suspends Work on the RHYME Bavaria Project.* URL: <https://www.wacker.com/cms/en-de/about-wacker/press-and-media/press/press-releases/2024/detail-228416.html>. Last accessed: 03/27/2024.

WEF (2020): *Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation.* URL: <https://www.weforum.org/reports/clean-skies-for-tomorrow-sustainable-aviation-fuels-as-a-pathway-to-net-zero-aviation/>. Last accessed: 03/27/2024.

WIRED (2019): *Desalination Is Booming. But What About All That Toxic Brine?* URL: <https://www.wired.com/story/desalination-is-booming-but-what-about-all-that-toxic-brine/>. Last accessed: 03/27/2024.

WLFC (2023): *Willis Sustainable Fuels (UK) Limited Awarded £4.721M Grant in UK's Advanced Fuels Fund (AFF) Competition.* URL: <https://www.wlfc.global/hubfs/Willis%20Release%20Grant%2011-15-23%20FINAL%20.pdf?hsLang=en>. Last accessed: 03/27/2024.

Zenid (2023): *Sustainable aviation fuel made from air. Fully circular.* URL: <https://skynrg.com/consortium-launches-zenid-sustainable-aviation-fuel-from-air/>. Last accessed: 03/27/2024.

Zero (2023): *Zero and Global E&C sign pioneering agreement.* URL: <https://www.zero.co/news-media/zero-and-global-e-and-c-sign-pioneering-agreement>. Last accessed: 03/27/2024.

Documentos gubernamentales mencionados en el capítulo seis:

Naciones Unidas OACI

ICAO (2023): *ICAO Global Framework for SAF, LCAF and other Aviation Cleaner Energies*. URL: <https://www.icao.int/Meetings/CAAF3/Pages/Documentation.aspx>. Last accessed: 05/13/2024.

Brasil

Ministry of Mines and Energy (2023): *Fuel of the Future Program (in English)*. URL: <https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2023/09/governo-entrega-projeto-de-lei-do-combustivel-do-futuro-ao-congresso>. Last accessed: 03/27/2024.

Unión Europea

European Parliament and Council of the European Union (2023a): *Directive (EU) 2023/959 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 amending Directive 2003/87/EC establishing a system for greenhouse gas emission allowance trading within the Union and Decision (EU) 2015/1814 concerning the establishment and operation of a market stability reserve for the Union greenhouse gas emission trading system (Text with EEA relevance)*. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/959/oj>. Last accessed: 03/27/2024.

European Parliament and Council of the European Union (2023b): *Regulation (EU) 2023/2405 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 on ensuring a level playing field for sustainable air transport (ReFuelEU Aviation)*. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023R2405&qid=1706886462420>. Last accessed: 03/27/2024.

Alemania

Bundesministerium für Digitales und Verkehr (2021): *PtL Roadmap*. URL: <https://ptl-roadmap.de/roadmap/>. Last accessed: 03/27/2024.

India

Ministry of New and Renewable Energy (2023): *National Green Hydrogen Mission*. URL: <https://mnre.gov.in/national-green-hydrogen-mission/>. Last accessed: 03/27/2024.

Japón

Ministry of Economy, Trade and Industry (2023): *Basic Hydrogen Strategy*. URL: https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/suiso_seisaku/pdf/20230606_3.pdf. Last accessed: 03/27/2024.

Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (2022): *Civil Aeronautics Law*. URL: <https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/hourei/data/caa.pdf>. Last accessed: 05/13/2024.

Agency for Natural Resources and Energy (2023): *Japan's energy policy toward achieving GX (Part 2) Policy package toward simultaneously realizing decarbonization and economic growth (in English)*. URL: https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/special/article/detail_179.html. Last accessed: 03/27/2024.

Sudáfrica

Department of Trade, Industry and Competition (2023): *South African Green Hydrogen Commercialization Strategy*. URL: <http://www.thedtic.gov.za/green-hydrogen-commercialisation-strategy/>. Last accessed: 05/13/2024.

National Treasury (2010): *CO₂ vehicle emissions tax*. URL: https://www.treasury.gov.za/comm_media/press/2010/2010082601.pdf. Last accessed: 03/27/2024.

Reino Unido

United Kingdom Department for Energy Security and Net Zero (2023): *Review of the UK Emissions Trading Scheme*. URL: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/657c79201c0c2a001318ce63/uk-ets-2023-review.pdf>. Last accessed: 03/27/2024.

Department for Transport (2023): *Renewable Transport Fuel Obligation (RTFO): compliance, reporting and verification.* URL: <https://www.gov.uk/government/publications/renewable-transport-fuel-obligation-rtfo-compliance-reporting-and-verification>. Last accessed: 03/27/2024.

Department for Transport (2024): *Pathway to net zero aviation: developing the UK sustainable aviation fuel mandate.* URL: <https://www.gov.uk/government/consultations/pathway-to-net-zero-aviation-developing-the-uk-sustainable-aviation-fuel-mandate>. Last accessed: 03/27/2024.

Estados Unidos

United States Department of Energy (2022): *Sustainable Aviation Fuel Grand Challenge Roadmap: Flight Plan for Sustainable Aviation Fuel Report.* URL: <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/articles/sustainable-aviation-fuel-grand-challenge-roadmap-flight-plan-sustainable>. Last accessed: 03/27/2024.

The White House (2023): *Fueling Aviations Sustainable Transition through Sustainable Aviation Fuels.* URL: <https://www.whitehouse.gov/cleanenergy/inflation-reduction-act-guidebook/>. Last accessed: 05/13/2024.

Internal Revenue Service (2023): *Treasury, IRS issue guidance on Sustainable Aviation Fuel Credit.* URL: <https://www.irs.gov/newsroom/treasury-irs-issue-guidance-on-sustainable-aviation-fuel-credit#:~:text=The%20SAF%20credit%20is%20%241.25,in%20lifecycle%20greenhouse%20gas%20emissions>. Last accessed: 06/12/2024.

Environmental Protection Agency (2022): *Renewable Fuels Standard.* URL: <https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program/renewable-fuel-annual-standards>. Last accessed: 05/13/2024.

Lista de abreviaturas

Las abreviaturas utilizadas corresponden a sus acrónimos en inglés, salvo que se indique lo contrario.

AEL	Electrólisis alcalina (<i>Alkaline Electrolysis</i>)
ATJ	Conversión de alcohol en combustible de aviación (<i>Alcohol-to-Jet</i>)
Avgas	Gasolina de aviación (<i>Aviation gasoline</i>)
BtL	Conversión de biomasa en líquidos (<i>Biomass-to-Liquids</i>)
CapEx	Gastos de capital (<i>Capital Expenditures</i>)
CORSIA	Sistema de compensación y reducción de las emisiones de carbono de la aviación internacional (<i>Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation</i>)
CB	Organismos de certificación (<i>Certification Bodies</i>)
CtL	Licuefacción del carbón (<i>Coal-to-Liquids</i>)
CH	Hidrotermólisis catalítica (<i>Catalytic Hydrothermolysis</i>)
COP	Conferencia de las Partes (<i>Conference of the Parties</i>)
CPA	Acuerdo de compra de carbono (<i>Carbon Purchase Agreement</i>)
DAC	Captura directa de aire (<i>Direct Air Capture</i>)
IFD (DFI)	Instituciones Financieras de Desarrollo (<i>Development Finance Institutions</i>)
EEE (EEA)	Espacio Económico Europeo (<i>European Economic Area</i>)
EESG	Medio ambiente, economía, sociedad y gobernanza (<i>Environmental, Economic, Social, and Governanc</i>)
RCCDE (EU ETS)	Régimen Comunitario de Comercio de Derechos de Emisión (<i>European Union Emission Trading System</i>)
FC	Celda de combustible (<i>Fuel Cel</i>)
FinEx	Gastos financieros (<i>Financial Expenditures</i>)
CLPI (FPIC)	Consentimiento libre, previo e informado (<i>Free, Prior, and Informed Consent</i>)
FTS	Síntesis Fischer-Tropsch (<i>Fischer-Tropsch Synthesis</i>)
FT-SPK	Queroseno parafínico sintético de Fischer-Tropsch (<i>Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene</i>)
GtL	Licuefacción del gas (<i>Gas-to-Liquids</i>)
GEI	Emisiones de gases de efecto invernadero (<i>Greenhouse Gas Emissions</i>)
HC	Hidrocarburos (<i>Hydrocarbons</i>)
HEFA	Ésteres y ácidos grasos hidroprocesados (<i>Hydroprocessed Esters and Fatty Acids</i>)
HFS	Azúcares fermentados hidroprocesados (<i>Hydroprocessed Fermented Sugars</i>)
HPA	Acuerdo de compra de hidrógeno (<i>Hydrogen Purchase Agreement</i>)
IRA	Ley de Reducción de la Inflación (<i>Inflation Reduction Act</i>)
LC	Lignocelulosa (<i>Lignocellulose</i>)
ACV (LCA)	Análisis del ciclo de vida (<i>Life-Cycle Analysis</i>)
LH2	Hidrógeno líquido (<i>Liquid Hydrogen</i>)
BMD (MDB)	Bancos Multilaterales de Desarrollo (<i>Multilateral Development Banks</i>)
MtG	Conversión de metanol a gasolina (<i>Methanol-to-Gasoline</i>)
MtJ	Conversión de metanol a combustible de aviación (<i>Methanol-to-Jet</i>)
MtX	Conversión de metanol a X (<i>Methanol-to-X</i>)
OpEx	Gastos operativos (<i>Operational Expenditures</i>)
PEMEL	Electrólisis de membrana electrolítica polimérica (<i>Polymer Electrolyte Membrane Electrolysis</i>)

PdS (PoS)	Prueba de sostenibilidad (<i>Proof of Sustainability</i>)
PPA	Acuerdo de compra de energía (<i>Power Purchase Agreement</i>)
PtG	Conversión de electricidad en gas (<i>Power-to-Gas</i>)
PtL	Conversión de electricidad en líquido (<i>Power-to-Liquid</i>)
PtX	Conversión de electricidad en X (<i>Power-to-X</i>)
FV	Fotovoltaica (<i>Photovoltaic</i>)
RCF	Combustible de carbono reciclado (<i>Recycled Carbon Fuel</i>)
RED	Directiva sobre energías renovables (<i>Renewable Energy Directive</i>)
RFNBO	Combustibles renovables de origen no biológico (<i>Renewable Fuels of Non-Biological Origin</i>)
RTFO	Obligación de utilizar combustibles renovables en el transporte (<i>Renewable Transport Fuel Obligation</i>)
RWGS	Reacción inversa de desplazamiento del gas de agua (<i>Reverse Water Gas Shift</i>)
SOEL	Electrólisis de óxidos sólidos (<i>Solid Oxide Electrolysis</i>)
SAF	Combustibles de aviación sostenibles (<i>Sustainable Aviation Fuels</i>)
SBC	Componente sintético de mezcla (<i>Synthetic Blending Component</i>)
ODS (SDG)	Objetivos de Desarrollo Sostenible (<i>Sustainable Development Goals</i>)
SIP	Isoparafinas sintéticas (<i>Synthetic Isoparaffins</i>)
SK	Queroseno sintetizado (<i>Synthesized Kerosene</i>)
SKA	Queroseno sintetizado con aromáticos (<i>Synthesized Kerosene with Aromatics</i>)
SPK	Queroseno parafínico sintético (<i>Synthetic Paraffinic Kerosene</i>)
UNGP	Principios rectores de las Naciones Unidas sobre las empresas y los derechos humanos (<i>United Nations Guiding Principles on Business and Human Rights</i>)
UCO	Aceite de cocina usado (<i>Used Cooking Oil</i>)
VS	Régimen voluntario (<i>Voluntary Scheme</i>)
CME (WEC)	Convertidor de energía eólica (<i>Wind Energy Converter</i>)
WPA	Acuerdo de compra de agua (<i>Water Purchase Agreement</i>)
WtL	Conversión de residuos en líquidos (<i>Waste-to-Liquids</i>)

Anexo

Lista de proyectos anunciados para la producción de e-combustibles por la vía Fischer-Tropsch (no exhaustiva)

Tabla 6a

Proyecto	Partes involucradas ^a	Capacidad anunciada (t/a) ^b	Estado ^c	Fuentes
–	Infraestructura de canales, Fortescue Future Industries	48.000 (n.s.)	Planificado	Fortescue (2023)
–	Ineratec	3.500 (2024)	En construcción	Ineratec (2022)
–	Ineratec. Zenith Terminals	35.000 (2027)	Planificado	Ineratec (2023)
–	Infinium. Mo Industrial Park	No especificado	Planificado	Infinium (2024 a)
–	P2X-Europe. The Navigator Company	40.000 (2026)	Planificado	La empresa Navigator (2022)
Alpha Plant	Climeworks. Lux-Airport. Norsk E-Fuel. Paul Worth SMS Group. Sunfire. Valinor	40.000 (2026)	Planificado	Norsk E-Fuel (2024)
Bilbao Decarbonization Hub	Enagas. Repsol. EVE	2.100 (2024)	Planificado	argusmedia.com (2022)
Brazoria electro-fuels	Denbury. Infinium	No especificado	Planificado	Infinium (2022)
Breogán Project	Greenalia. P2X Europe	20.000 (2027)	Planificado	P2X Europa (2024)
Carbonshift PtL	Willis Sustainable Fuels	14.000 (2026)	Planificado	WLFC (2023)
Concrete Chemicals	Cemex. Enertrag. Sasol	7.600 ^d (2027) 30.500 ^d (2030)	Planificado	Productos químicos para el hormigón (2023)
e-Alto	Clariant Catalysts. Technip Energies. Velocys	No especificado	Planificado	Velocys (2022)
E-Fuel 1	Nordic Electrofuel. P2X-Europa	8.000 (2026)	Planificado	P2X Europa (2023)
Fairfuel	Atmosfair	350 (2022)	En funcionamiento	Atmosfair (2023)
Green Fuels Hamburg	Airbus. Uniper. Siemens Energía	10.000 ^d (2026)	Planificado	Combustibles ecológicos Hamburgo (2023)
HyShiFT	Enertrag. Hydregen. Linde. Sasol	No especificado	Planificado	HyShift (2023)
IðunnH2	IðunnH2	45.000 ^d (2028)	Planificado	IðunnH2 (2024)
KerEAUzen	Air France-KLM. Engie	70.000 (2028)	Planificado	Engie (2023)
Moses Lake E-Jet Plant	Doce	121 ^d (2024)	En construcción	FastCompany (2023)
NetZeroLEJ	Airbus. DHL. HH2E. Sasol	200.000 (n.s.)	Planificado	HH2E (2023)
NextGate	H&R Group. Mabanaft. P2X Europe	350 (2022)	En funcionamiento	P2X Europa (2022)
Pathfinder	Amazon. Howard Energy Partners. Infinium. NextEra Energy	No especificado	En funcionamiento	Infinium (2024 b)
Plant Zero.1	Global E&C. Zero	No especificado	En construcción	Cero (2023)
Reuze	Engie. Infinium	100.000 (2026)	Planificado	Reuze (2023)

Lista de proyectos anunciados para la producción de e-combustibles por la vía Fischer-Tropsch (no exhaustiva)

Tabla 6 b

Proyecto	Partes involucradas ^a	Capacidad anunciada (t/a) ^b	Estado ^c	Fuentes
SynKero	Ciudad de Ámsterdam. KLM. Puerto de Ámsterdam, Royal Schiphol Group. SkyNRG. SynKero	50.000 ^d (n. s.)	Planificado	Synkero (2023)
Vordingborg eFuels plant	Arcadia eFuels. Sasol. Topsoe	80.000 (2026)	Planificado	Arcadia eFuels (2022)
Zenid One	Climeworks. SkyNRG. Uniper. Zenid	No especificado	Planificado	Zenid (2023)

- a Por orden alfabético; las empresas que cotizan en bolsa fueron nombradas en comunicaciones públicas en relación con los proyectos; esto no implica una participación financiera en el proyecto necesariamente.
- b Capacidad total prevista en cada caso según lo anunciado; el año corresponde a la puesta en servicio o ampliación anunciada.
- c Según comunicados públicos a marzo de 2024; "Planificado" incluye todas las fases del proyecto, desde los estudios de factibilidad hasta la ingeniería concreta.
- d Los datos se refieren únicamente al e-queroseno.

Agora Verkehrswende (2025)

Lista de proyectos anunciados para la producción de e-combustibles por la vía del metanol (no exhaustiva)

Tabla 7a

Proyecto	Partes involucradas ^a	Capacidad anunciada (t/a) ^b	Estado ^c	Fuentes
–	AP Moller Holding, C2X, Maersk	300.000 (2028)	Planificado	Perspectiva del hidrógeno 2023a)
–	AP Moller Holding, C2X, Maersk	1.000.000 (n.s.)	Planificado	C2X (2023)
–	eFuel Steyerberg GmbH	52.500 ^d (2026)	Planificado	Spiegel (2023)
–	ReNew E-fuels Private Limited	500.000 (n.s.)	Planificado	Perspectiva del hidrógeno 2023b
–	ReNew E-fuels Private Limited	300.000 (n.s.)	Planificado	Perspectiva del hidrógeno 2023b
–	State Power Investment Corp	10.000e (2025)	Planned	Hydrogen Insight (2023c)
400.000 (2030)	European Energy, Mitsu	42.000 (2024)	Under construction	European Energy (2023)
400.000e (2030)	Planificado	Perspectiva del hidrógeno 2023c	Planned	Enlit (2022)
Aabenraa / Kassø	European Energy, Mitsu	42.000 (2024)	En construcción	Energía europea (2023)
Antofagasta Mining Energy Renewable (AMER)	Air Liquide	60.000 (2025)	Planificado	Enlit (2022)
eM-Rhône	Elyse Energy, GIE Osiris	150.000 (2028)	Planificado	Elyse Energy (2023)
Finfjord e-methanol plant	Carbon Recycling International, Finnfjord, Statkraftl	100.000 (n.s.)	Planificado	Carbon Recycling International (2023a)
FlagshipONE	Liquid Wind AB, Orsted	50.000 (2025)	En construcción	Ørsted (2023a)
FlagshipTWO	Liquid Wind AB, Sundsvall Energi	100.000 (2026)	Planificado	Liquid Wind (2023)
FlagshipTHREE	Liquid Wind AB, Umeå Energi	100.000 (2027)	Planificado	Liquid Wind (2023)
George Olah	Carbon Recycling International	4.000 (2012)	En funcionamiento	Carbon Recycling International (2023b)
Green Fuels for Denmark Phase 2a/2b	Everfuel, Haldor Topsøe, Nel, Orsted	50.000 (2025) 100.000 (2027)	Planificado	Ørsted (2022)
Green Meiga	Cientes, Iberdrola	100.000 (2027)	Planificado	Comisión Europea (2023b)
Green UMI	Foresa, Iberdrola	2.900 (2025)	Planificado	Iberdrola (2022)
Haru Oni	Empresas Gasco, ENAP, enel, ExxonMobil, HIF, Porsche, Siemens Energy	350 (2022) 100 ^d (2022)	En funcionamiento	HIF (2022)
HIF Cabo Negro eFuels facility	HIF	173.000 (n.s.) 70.000 ^d (n.s.)	Planificado	HIF (2023a) HIF (2024a)
HIF Matagorda eFuels facility	Bechtel Energy, Siemens Energy, Topsoe	1.400.000 (2027) 562.500 ^d (2027) 475.700 ^e (2030)	Planificado	Cision PR Newswire (2022b) Central de (2023b) biocombustibles

List of announced projects for e-fuels production via the methanol route
(not exhaustive)

Table 7b

Proyecto	Partes involucradas ^a	Capacidad anunciada (t/a) ^b	Estado ^c	Fuentes
HIF Paysandu	HIF	700.000d (n. s.) 250.000d (n. s.)	Planificado	HIF (2023 b)
HIF Tasmania eFuel facility	HIF, Technip Energies	210.000 (2028) 56.250 ^d (2028)	Planificado	HIF (2024 b)
Humansdorp	Earth and Wire, Enertrag, 24 Solutions	120.000 (2027)	Planificado	Tierra y cable (2021)
HyGATE Demonstrator	Mabanaft, Vast	7.500 (2027)	Planificado	Mabanaft (2024)
IRIS	Motor Oil Hellas	No especificado	Planificado	Comisión Europea (2023 b)
Jangada	energy4future, Hy2gen	64.000 (2028)	Planificado	Hy2gen (2023 a)
KeroSyn100	Raffinerie Heide, CAC	No especificado	Planificado	KEROSYN100 (2023)
Madoqua Synfuels	Madoqua Ventures	No especificado	Planificado	Madoqua Ventures (2023)
Masdar Hassan Allam Utilities E-Methanol	Hassan Allam Utilities, Masdar	100.000 (2026)	Planificado	Reuters (2022)
Nascar	Cetaer, Técnicas Reunidas	37.000 (2026)	Planificado	Energía marítima (2023 a)
Nautilus	EWE Netz, Hy2gen, revis bioenergy	60.000 (2027)	Planificado	Hy2gen (2023 b)
Pacífico Mexinol	International Finance Corporation, Transition Industries	400.000 (2030)	Planificado	Noticias de negocios de México (2023)
Power-to-Methanol Lappeenranta project	AP Moller Holding, C2X, Maersk	25.000 (2026)	Planificado	Sweco (2023)
Power-to-X project in the Gulf Coast	AP Moller Holding, C2X, Maersk	300.000 (2025)	Planificado	Ørsted (2023 b)
RHYME Bavaria	eFuel Steyerberg GmbH	15.000 (2025)	Suspendido	Wacker (2024)
SolWinHy	ReNew E-fuels Private Limited	29.000 (n. s.)	Planificado	Businesswire (2023)
Tambor Green Hydrogen Hub	ReNew E-fuels Private Limited	No especificado	Planificado	Trabajos con pilas de combustible (2022)
Triskelion	State Power Investment Corp	40.000 (n. s.)	Planificado	Comisión Europea (2023 b)
Vanadis Fuels Project	European Energy, Mitsui	400.000 (2029)	Planificado	Renovables ya (2023)

- a Por orden alfabético; las empresas que cotizan en bolsa fueron nombradas en comunicaciones públicas en relación con los proyectos; esto no implica ninguna participación financiera en el proyecto necesariamente.
- b Capacidad total prevista en cada caso según lo anunciado; el año corresponde a la puesta en servicio o ampliación anunciada.
- c Según comunicados públicos a marzo de 2024; "Planificado" incluye todas las fases del proyecto, desde los estudios de factibilidad hasta la ingeniería concreta.
- d Porcentaje de e-gasolina.
- e Porcentaje de queroseno electrónico.

Supuestos para calcular las necesidades de suelo y energía para la producción de e-SAF por la ruta Fischer-Tropsch, e-metanol y e-gasolina por la ruta metanol-gasolina (año de referencia 2030 sujeto a disponibilidad de los datos correspondientes). Tabla 8

Etapa del proceso	Parámetro	Unidad	Valor	Fuente
Síntesis Fischer-Tropsch	Demanda de H ₂	kg_H ₂ /kg_e-queroseno	0.74	DLR; TUHH; JBV (2021)
	Demanda de CO ₂	kg_CO ₂ /kg_e-queroseno	5.20	DLR; TUHH; JBV (2021)
	Demanda de electricidad	kWh_el/kg_productos FT	0.035	DECHEMA (2021)
	Coproducción de nafta	kg_nafta/kg_queroseno	0.17	DLR; TUHH; JBV (2021)
	Coproducción de diesel	kg_diesel/kg_queroseno	0.49	DLR; TUHH; JBV (2021)
Síntesis de metanol	Demanda de H ₂	kg_H ₂ /kg_e-metanol	0.20	Lonis et al. (2021)
	Demanda de CO ₂	kg_CO ₂ /kg_e-metanol	1.42	Lonis et al. (2021)
	Demanda de electricidad	kWh_el/kg_e-metanol	0.252	Lonis et al. (2021)
Electrólisis	Demanda de electricidad	kWh_el/kg_H ₂	48.3	IEA (2022)
	Demanda de agua	kg_agua/kg_H ₂	10.11	Kuckshinrichs et al. (2017)
	Demanda de electricidad	kWh_el/t_CO ₂	225	Fasihi et. al (2019)
DAC	Demanda de suelo	m ² /(t_CO ₂ a)	0.1	Viebahn et al. (2019)
	Horas a plena carga	h/a	1260	Renewables Ninja (2022 a)
Sistemas fotovoltaicos (eje único, Ø Europa)	Rendimiento específico por zona	MW/km ²	108	Bolinger & Bolinger (2022)
	Horas a plena carga	h/a	2,287	Renewables Ninja (2022 a)
Sistemas fotovoltaicos (eje único, Puntos óptimos)	Rendimiento específico por zona	MW/km ²	43.2	Bolinger & Bolinger (2022)
	Horas a plena carga	h/a	2,086	Renewables Ninja (2022 b)
CME terrestre (Ø Europa)	Rendimiento específico por superficie a	MW/km ²	840	Bogdanov; Breyer (2016)
	Horas a plena carga	h/a	5,137	Renewables Ninja (2022 b)
CME terrestre (regiones óptimas)	Rendimiento específico por superficie ^a	MW/km ²	840	Bogdanov & Breyer (2016)
	Rendimiento específico por superficie ^b	MW/km ²	8.4	Bogdanov & Breyer (2016)
WEA Offshore (Mar del Norte alemán)	Horas a plena carga	h/a	3,606	Renewables Ninja (2022 b)

- a Superficie neta necesaria para la turbina eólica, los cimientos y la carretera de acceso. En el caso de la energía fotovoltaica, se incluyen solo los requisitos de superficie de los módulos.
- b Superficie bruta necesaria para la turbina eólica; también se tiene en cuenta la distancia entre las turbinas para evitar efectos de sombreado. En el caso de la energía fotovoltaica, también se tiene en cuenta la distancia entre los módulos y los servicios públicos.

Agora Verkehrswende es un centro de pensamiento con sede en Berlín que promueve una movilidad climáticamente neutra. Como organización apártidista y sin fines de lucro, trabaja en conjunto con actores del ámbito político, empresarial, académico y de la sociedad civil para descarbonizar el sector del transporte. Para ello, su equipo desarrolla análisis, estrategias y recomendaciones de política basadas en evidencia científica.

Agora Verkehrswende

Anna-Louisa-Karsch-Str. 2 | 10178 Berlin | Alemania
www.agora-verkehrswende.org
info@agora-verkehrswende.de

