

2028



www.fundacionrenovables.org

E-SAF

—
Descarbonizar la aviación sin
hipotecar la transición energética



FUNDACIÓN
RENOVABLES

Documento elaborado por la **Fundación Renovables**.

Equipo que lo ha desarrollado:

María Manzano, Ismael Morales. Raquel Paule y Maribel Núñez.

Maquetación: Alexandra Llave.

Comunicación: Alejandro Tena y Andrés Actis.

La **Fundación Renovables** también agradece la colaboración del Patronato y de sus amigos y amigas.

PATRONATO DE LA FUNDACIÓN RENOVABLES

Presidente: Fernando Ferrando.

Vicepresidentes: Llanos Mora, Juan Castro-Gil y Mariano Sidrach de Cardona.

Patronos: José Luis García Ortega, Assumpta Farran, Daniel Pérez, Javier García Breva, Sara Pizzinato, María José Márquez y Manel Ferri.

FUNDACIÓN RENOVABLES

(Declarada de utilidad pública)

Calle Santa Engracia 108, 5º Int. Izda.

28003 Madrid

www.fundacionrenovables.org



Esta publicación está bajo licencia Creative Commons. Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual (CC BY-NC-SA). Usted puede usar, copiar y difundir este documento o parte de este siempre y cuando se mencione su origen, no se use de forma comercial y no se modifique su licencia.



Tabla de **CONTENIDO**

Bases técnicas	4
Retos actuales	14
Propuestas y conclusiones	26

BASES TÉCNICAS

El transporte es uno de los principales sectores emisores de gases de efecto invernadero (GEI) de origen antropogénico. Según el Sexto Informe de Evaluación del IPCC, genera alrededor de **8.900 Mt de CO₂ equivalentes al año**, lo que representa, aproximadamente, una cuarta parte del consumo energético final mundial.

Por el peso que tiene, resulta prioritario reducir sus emisiones. Para ello, al igual que en el resto de los sectores, las principales estrategias pasan por reducir el consumo energético y avanzar en la electrificación de los usos que lo permitan, asegurando que la electricidad utilizada proceda progresivamente de fuentes renovables.

Esta solución ya está disponible tecnológicamente para muchas variantes del transporte terrestre, que es el responsable de la mayor parte de las emisiones. Sin embargo, no existe para el sector de la aviación.



En el caso de la aviación, la solución actual técnicamente viable se basa en sintetizar combustibles con características similares a las del queroseno, pero producidos a través de otro tipo de fuentes, ya sean biocombustibles producidos a partir de materia orgánica o electrocombustibles.

¿Qué son los e-fuels?



Los electrocombustibles son combustibles sintéticos producidos utilizando electricidad como fuente de energía.

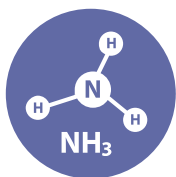
A diferencia de las baterías, que almacenan la electricidad y permiten utilizarla directamente mediante una reacción electroquímica reversible, los electrocombustibles emplean la electricidad para sintetizar una materia prima que posteriormente se quema para ser utilizada como combustible. Por ello, su eficiencia energética es considerablemente inferior a la de las baterías.

Entonces, ¿qué interés tienen los electrocombustibles?



Densidad energética mayor que en el caso de las baterías.

Según la hoja de ruta de la aviación de IMOTHEP, el objetivo es alcanzar un nivel de madurez TRL 6. Actualmente la batería ion-litio típica tiene una densidad energética de 250 Wh/kg aproximadamente¹, mientras que el queroseno convencional y los combustibles alternativos alcanza los 12.000 Wh/kg, es decir, 48 veces superior. Esta diferencia resulta especialmente relevante en aviación porque el peso es un factor crítico.



Mayor densidad energética que otros combustibles alternativos, como el amoníaco.

El poder calorífico inferior (PCI) del amoníaco es de aproximadamente 22 MJ/kg, frente a los 43 MJ/kg² del queroseno, tanto convencional como sintético (e-queroseno) o de origen biológico (bioqueroseno). Además de su menor densidad energética, la utilización del amoníaco en aviación plantea importantes retos relacionados con la adaptación y compatibilidad con los motores de combustión actuales.

¹ https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ENVReport2022_Art31.pdf.

² Ambos valores según la Directiva (UE) 2023/2413.



Ventajas frente al hidrógeno en términos de almacenamiento y logística.

Aunque el hidrógeno presenta un contenido energético muy superior, de aproximadamente 120 MJ/kg, su utilización en aviación plantea importantes desafíos relacionados con su almacenamiento y gestión. Requiere almacenarse como gas a alta presión o en estado líquido a temperaturas extremadamente bajas y presenta una elevada difusividad y fugacidad, además de importantes retos de seguridad debido a su alta inflamabilidad. Asimismo, su utilización puede plantear problemas de compatibilidad y fragilización de determinados materiales. Estos desafíos se intensifican en una aplicación móvil como la aviación, en la que las limitaciones de peso, volumen y seguridad son especialmente exigentes.



Tecnología madura y compatible con la infraestructura existente.

Los electrocombustibles presentan características casi idénticas a las del queroseno convencional, lo que permite aprovechar, con las adaptaciones necesarias, la infraestructura existente de almacenamiento, distribución y repostaje, así como los motores y aeronaves actuales.

¿Cómo se obtienen los electrocombustibles?

Dióxido de carbono

MATERIAS PRIMAS

Hidrógeno

PtL
Power to Liquid



Materias primas



Dióxido de carbono

El carbono es uno de los elementos fundamentales para la producción de los hidrocarburos que componen los combustibles de aviación ya que es necesario para que se dé la combustión. Para obtenerlo, hay que disponer de una fuente de CO₂ que posteriormente pueda transformarse y combinarse con hidrógeno para sintetizar las cadenas de hidrocarburos.

Existen diferentes alternativas para obtener el CO₂ necesario que pueden clasificarse en función de su **fuentes de origen**:

1

El método **DAC (captura directa del aire)**. Consiste en extraer el CO₂ directamente de la atmósfera. En este caso, el principal reto es que el CO₂ se encuentra presente en una concentración relativamente baja, lo que hace que su captura requiera una cantidad significativa de energía.

2

El método **BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage)** consiste en capturar el CO₂ generado durante procesos de producción de energía o combustibles a partir de biomasa.

3

Por último, el CO₂ puede capturarse directamente de emisiones industriales, por ejemplo, en instalaciones que utilizan combustibles fósiles. Aunque esta opción permite reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera respecto a las del queroseno convencional, no supone una retirada de CO₂ de la atmósfera ni genera emisiones negativas.

Estas son las vías de obtención de CO₂ reconocidas por la Comisión Europea. No obstante, es necesario profundizar en cada una de ellas para determinar cuáles son las más adecuadas para la producción de e-SAF y evaluar sus implicaciones en términos de sostenibilidad.

El segundo caso, BECCS, presenta una de las principales dificultades asociadas a los electrocombustibles: la necesidad de disponer de una fuente de carbono. En este caso, el CO₂ procede de procesos asociados al uso de biomasa. Sin embargo, su utilización para producir **e-SAF puede generar competencia con otros usos de la biomasa, especialmente con la producción de biocombustibles**, dado que ambos procesos requieren disponer de carbono biogénico.

En el último caso, el CO₂ procede de emisiones industriales que están asociadas generalmente al uso de combustibles fósiles o a procesos industriales no renovables. Un ejemplo es la producción de cemento, en la que la calcinación de la materia prima libera CO₂ como parte del propio proceso. En este caso, estamos liberando dióxido de carbono procedente de combustibles fósiles.



Por este motivo, la **captura directa de CO₂ del aire (DAC)** se presenta como la alternativa más adecuada para garantizar una fuente de carbono independiente de los procesos de combustión de biomasa o combustibles fósiles. Al extraer directamente el CO₂ de la atmósfera, permite cerrar el ciclo del carbono sin liberar nuevo CO₂ y evita generar emisiones adicionales con el objetivo de obtener el CO₂ necesario para producir e-SAF.

Como hemos comentado, el CO₂ ya se encuentra en la atmósfera, por lo que no es necesario hacerlo reaccionar con nada para obtenerlo, simplemente hay que separarlo físicamente a través de tecnologías ya consolidadas como la absorción, adsorción o separación por membrana³. Existen otros métodos, además de estos, con menos madurez tecnológica.

Una vez obtenido el CO₂, se debe proceder a su **transporte**.

Si se ha obtenido a través de métodos físicos de separación, se puede almacenar y transportar en los materiales usados para su separación. En estado gaseoso, se puede transportar de forma similar a como se hace actualmente con el metano. Se prioriza el transporte por gaseoducto, pero en función de la distancia del punto de obtención a las

instalaciones para su procesado, también se puede hacer a través de camiones o barcos.

Este transporte tendrá unas consecuencias ambientales que se deben tener en cuenta. Por lo tanto, será **más sostenible** el combustible si la obtención del CO₂ y del resto de las materias primas, así como el proceso final para la fabricación del combustible se realiza **in situ**.



³ About CCUS.



Hidrógeno

Entendiendo que el queroseno se compone fundamentalmente de cadenas formadas por átomos de carbono, obtenido a partir de CO_2 e hidrógeno, faltaría encontrar la fuente del segundo componente. La solución es que provenga de fuentes renovables como el hidrógeno proveniente del agua y obtenido a través de electrólisis.

La electrólisis tiene el funcionamiento inverso al de una batería. En este caso, se aplica electricidad para que se produzca una reacción que no es espontánea, es decir, vamos a favorecer que se dé la reacción contraria a la natural, que es que dos moléculas de hidrógeno se junten con una de oxígeno para obtener agua. Esto significa que hay que aplicar energía.

Existen varias formas de realizar la electrólisis en función de los electrolizadores que se utilicen, la temperatura a la que se produzca la reacción, etc. En el documento Proyectos de H_2 : ¿El tamaño importa?, explorábamos hace dos años soluciones atendiendo a tres tipos de electrolizadores: PEM, alcalina y SOEC. Tienen una eficiencia actualmente de 58, 61 y 81 % respectivamente. Con los catalizadores disponibles hoy en día se necesitan entre **40,4 y 56,3 kWh/kg de hidrógeno**.

Para la electrólisis será necesario el consumo de agua y garantizamos que se obtiene 1 kg de hidrógeno por cada 9 kg de agua, en caso de que hubiera una eficiencia del 100 %. En los casos reales son necesarios entre 10 y 20 kg de agua para obtener 1 kg de H_2 .

EFICIENCIA DE
ELECTROLIZADORES

PEM: 58 %
ALCALINA: 61 %
SOEC: 81 %

CON LOS CATALIZADORES
DISPONIBLES:

40,4 Y 56,3
KWH/KG
DE HIDRÓGENO
NECESARIO

10 Y 20 KG
DE AGUA
PARA OBTENER 1
KG DE H_2





El transporte del H_2 resulta aún más complicado que el del CO_2 o el CH_4 , debido, especialmente, a su pequeño tamaño, lo que hace que la fugacidad sea mayor. Es decir, es más fácil que haya pérdidas a través de las juntas de la infraestructura o que el material sufra fatiga por la inserción del gas en su estructura. Estas pérdidas no solo suponen un problema por el **coste energético y económico**, sino que son determinantes por el **enorme potencial de cambio climático que el H_2 tiene, siendo su GWP100 estimado (por sus siglas en inglés, potencial de cambio climático en 100 años) de 11. Esto significa que es 11 veces más perjudicial que el CO_2 en la atmósfera.**

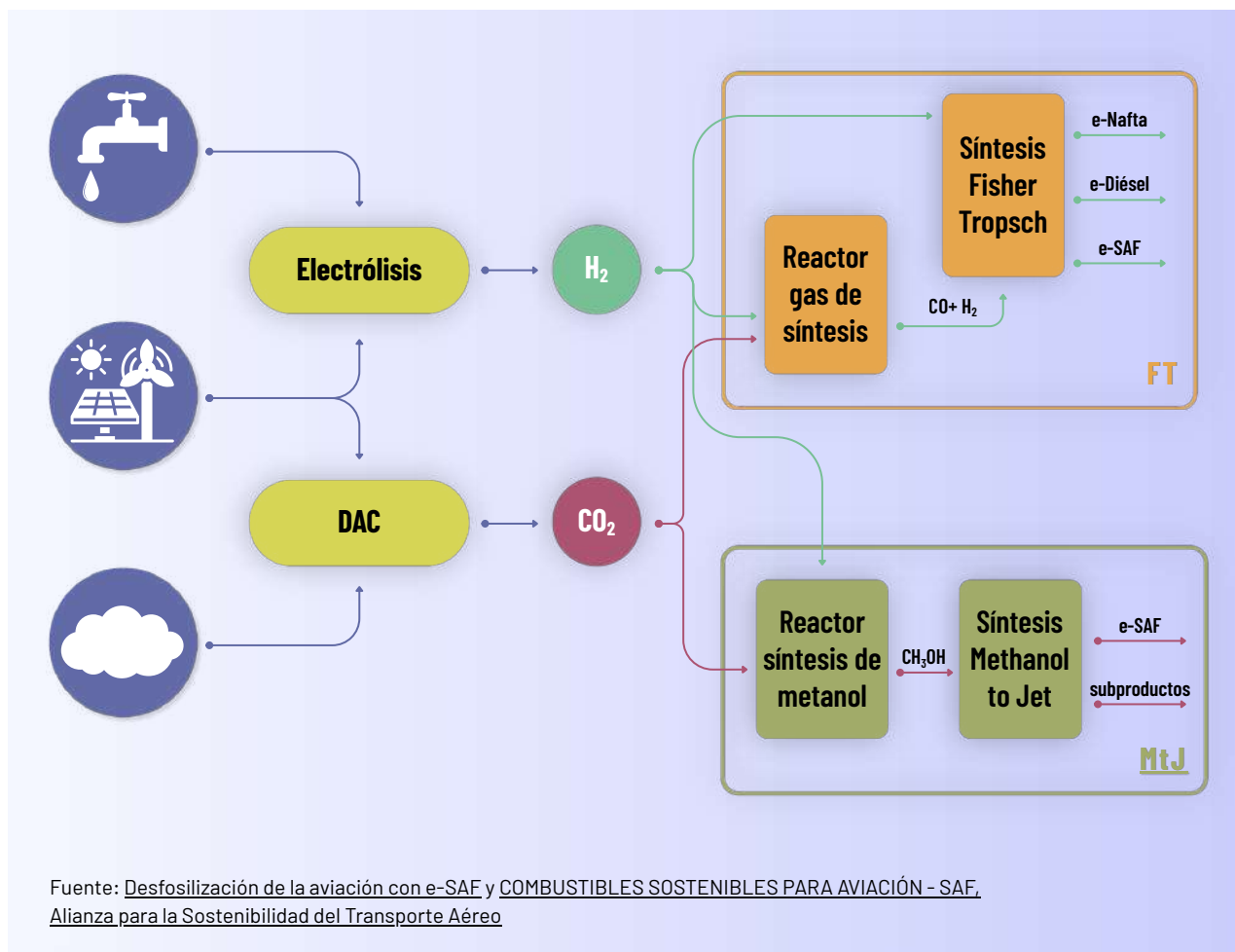


Por otra parte, la bajísima temperatura de licuefacción que requiere, que es de $-253^{\circ}C$ a presión ambiental, supone un **gran gasto de energía para criogenizarlo o almacenarlo a alta presión** y evitar los inconvenientes que supone su estado gaseoso.

Por último, es importante tener en cuenta que, como se ha comentado antes, de forma **espontánea el H_2 reacciona con el O_2 para dar agua**, por lo tanto, es más complicado mantenerlo en esta forma sin que se produzca agua, ya que ambos son reactivos a temperatura ambiente.

El método PtL (*Power to Liquid*)

PtL o Power to Liquid es la denominación del proceso de obtener combustibles sintéticos a partir de electricidad. Un biocombustible no puede ser PtL porque las materias primas se obtienen de procesos biológicos o a partir de residuos. Es decir, esto incluye la electrólisis⁴.



Las materias primas obtenidas anteriormente (H_2 y CO_2) se hacen reaccionar para obtener gas de síntesis ($CO + H_2O$). La obtención de este gas ya es bastante habitual en la actualidad, la diferencia es que el origen del hidrógeno y el carbono suele ser fósil.

⁴ *Power-to-Liquids - A scalable and sustainable fuel supply perspective for aviation.*

Una vez obtenido CO, lo más habitual es hacerlo reaccionar con hidrógeno, según la síntesis de *Fisher Tropsch*, proceso que ya se utilizaba en el siglo XX para obtener cadenas de hidrocarburos más largas y pesadas, proceso previo al de refinado. El resultado es un combustible sintético con las mismas propiedades que los demás, pero con un mayor gasto energético, no solo por las materias primas sino también por los pasos intermedios que requiere. Las ventajas claramente son la independencia energética que proporcionan y la sostenibilidad a largo plazo.

Otra forma de obtenerlos es a través del e-metanol, en el proceso conocido como Methanol to Jet (MtJ), en el que se obtienen cadenas de carbono que reaccionan entre sí para alargarse, adicionándose unas a otras. Esta ruta está en proceso de cualificación y todavía no está incluida en la norma que establece las especificaciones técnicas de los combustibles de aviación sostenibles.



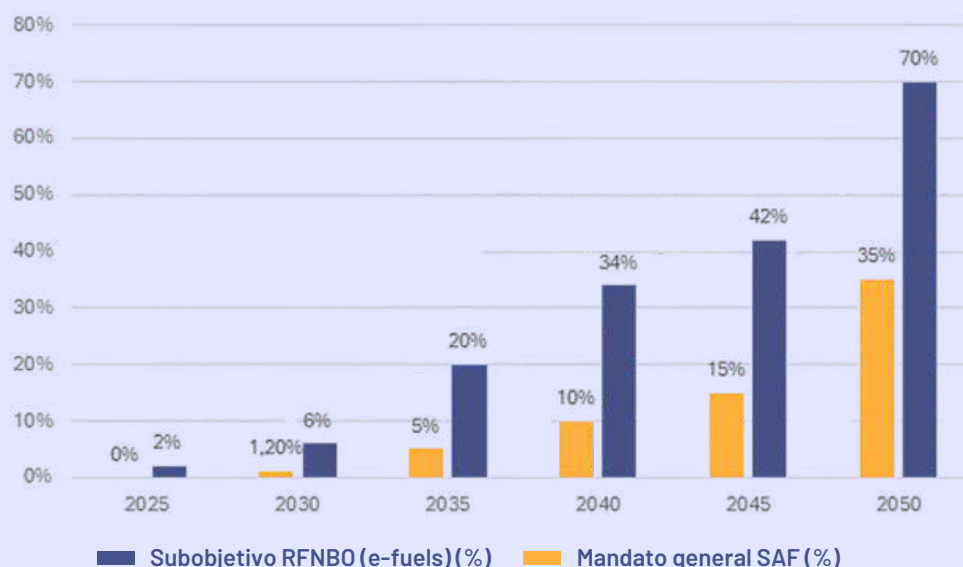
Normativa



A nivel normativo, el principal instrumento europeo es el Reglamento (UE) 2023/2405 (*ReFuelEU Aviation*), integrado en el paquete legislativo *Fit for 55*. Su finalidad es **impulsar la producción y el consumo de combustibles sostenibles de aviación mediante la imposición de porcentajes mínimos crecientes de SAF** que deberán suministrar los proveedores de combustible en los aeropuertos europeos.

El Reglamento resulta de aplicación a los aeropuertos que registren un tráfico anual superior a 800.000 pasajeros o 100.000 toneladas de mercancías. En España, según los últimos datos de AENA, estos requisitos se cumplen en 28 de los 48 aeropuertos gestionados por la compañía, que concentran, aproximadamente, el 99 % del tráfico de pasajeros y el 95 % del de mercancías. Dado que prácticamente la totalidad del combustible de aviación se suministra en estas instalaciones, en este estudio se considera que el Reglamento afecta al conjunto del consumo nacional de combustible de aviación.

OBJETIVOS DE SAF Y SUBOBJETIVOS DE E-FUELS DE ACUERDO CON LO ESTABLECIDO EN EL REGLAMENTO REFUEL AVIATION EU



Fuente: [Reglamento \(UE\) 2023/2405 \(ReFuel Aviation\)](#)



Cabe resaltar que, al tratarse de un reglamento europeo, es directamente aplicable en todos los Estados miembros y no es necesario realizar una transposición al ordenamiento jurídico nacional.

RETOS ACTUALES

Producción, escalabilidad y costes

Los SAF (tanto e-SAF como bioSAF), son conocidos como combustibles drop in. Significa que los aviones actuales pueden repostar directamente utilizando este combustible. Esto conlleva una gran ventaja: se puede mantener la actual flota de aviones, ya que es válido para sus motores. También, se puede aprovechar la infraestructura actual de repostaje, transporte y almacenamiento.

El repostaje directo responde a que los e-SAF tienen características fisicoquímicas muy similares a las de los combustibles de aviación convencionales. Sin embargo, esto no es suficiente para considerarlos combustibles de aviación. Las propiedades de los e-SAF tienen que ser verificadas y cumplir con unos requisitos de seguridad. Una vez son aceptados por la norma ASTM

D1655, se autoriza la ruta de obtención.

Esta norma no sólo valida las rutas de obtención en función de las propiedades del combustible obtenido, sino que también establece límites de mezcla de estos combustibles. Es decir, actualmente, una vez sintetizado un combustible sintético, este tiene que mezclarse con combustible convencional para ser utilizado en los motores. Esto se debe a que los motores ya están adaptados al combustible convencional y aunque las propiedades de ambos sean muy similares, los querosenos convencionales tienen algunas características diferentes que no se han logrado salvaguardar a través de las rutas actuales de e-SAF (por ejemplo, una proporción más alta de compuestos aromáticos).





50 %

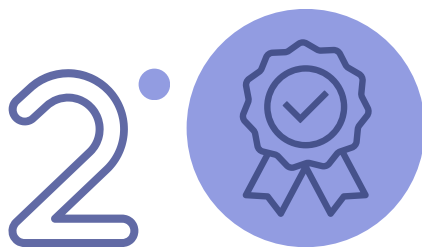
PROPORCIÓN MÁXIMA DE
MEZCLA CON
COMBUSTIBLES
CONVENCIONALES

Actualmente la única ruta de obtención validada para e-SAF es la ruta Fisher-Tropsch, por lo que será la que consideremos en el futuro para realizar estimaciones. En este caso, la proporción máxima de mezcla con combustibles convencionales es de un 50 %.

Esto tiene una serie de implicaciones:



En primer lugar, verifica que **los SAF** (ya que los bioSAF también tienen estas limitaciones) no pueden suponer, **con la tecnología actual** y por si solos, una solución total para el sector de la aviación ya que **siguen dependiendo de combustibles fósiles**.



En segundo lugar, es importante tener en cuenta que cuando se exigen unos mínimos de e-SAF, lo que **debe ser certificable es el combustible 100 % puro, previo a ser mezclado con el combustible convencional (y fósil)**. Esto es especialmente delicado porque los requisitos mínimos se encuentran en el consumo y no en la producción.

Disponibilidad de energía limpia y agua

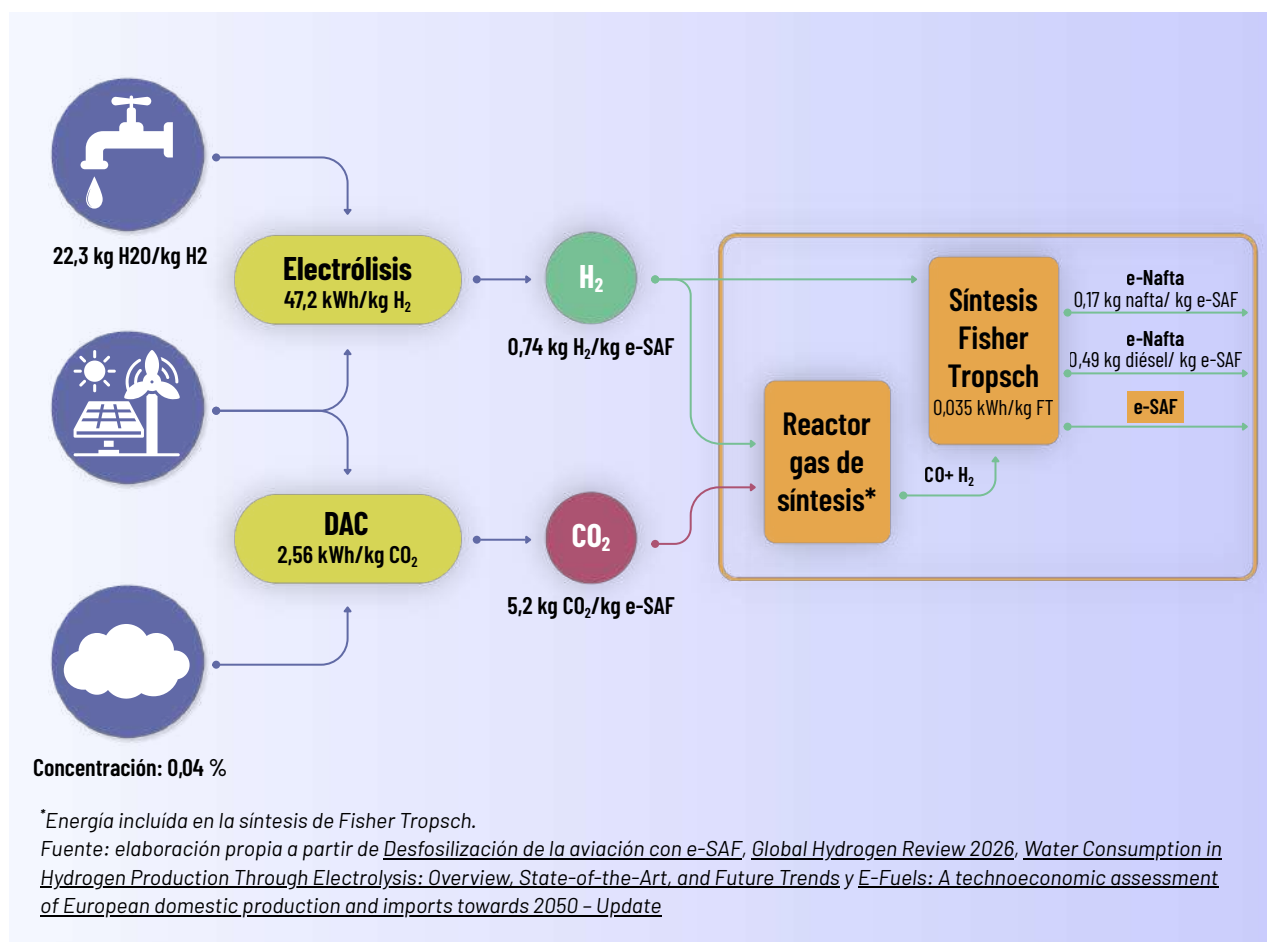
Fabricar e-SAF requiere enormes cantidades de hidrógeno renovable y electricidad limpia, lo que encarece sustancialmente el coste por litro respecto al combustible fósil convencional.

Para estimar la demanda futura de SAF se ha partido del consumo nacional en 2025, que ascendió a 7,74 Mt. Asimismo, se ha supuesto un crecimiento anual del tráfico aéreo del 1,2 % y una mejora acumulada de la eficiencia de las aeronaves del 20 %, en línea con las previsiones de EUROCONTROL. De esta forma el incremento del consumo de combustible resulta sensiblemente inferior al crecimiento del número de vuelos.

Año	Combustible total (Mt)	Objetivo SAF	Objetivo SAF	Objetivo E-SAF	Demanda E-SAF (Mt)
2025	7,74	2%	0,155	0%	0
2030	7,86	6%	0,472	1,20%	0,094
2035	7,98	20%	1,596	5%	0,399
2040	8,1	34%	2,754	10%	0,810
2045	8,22	42%	3,452	15%	1,233
2050	8,34	70%	5,838	35%	2,919

Tabla 1: Estimación del biocombustible necesario a partir de EUROCONTROL <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2024-12/eurocontrol-aviation-long-term-outlook-flights-co2-forecast-2024-2050.pdf> y el Reglamento ReFuel Aviation.

A partir de esta previsión de demanda podremos estimar la energía y la materia prima necesaria para cumplir con los objetivos del reglamento ReFuel Aviation mediante la tecnología disponible actualmente para obtener el combustible necesario para cumplir con estos objetivos.



Producción E-SAF (t)	H ₂ necesario (t)	Agua (millones de litros)	CO ₂ capturado DAC (t)	Electricidad total (TWh)	Calor DAC (TWh)
94.000	69.560	1.550	488.800	3,49	1,05
399.000	295.260	6.580	2.074.800	14,79	4,47
810.000	599.400	13.370	4.212.000	30,02	9,08
1.233.000	912.420	20.350	6.411.600	45,70	13,78
2.919.000	2.160.060	48.170	15.178.800	108,19	32,72

Tabla 2: Materias primas necesarias para la producción estimada de E-SAF en España. Fuente: Elaboración propia a partir de fuentes especificadas en la figura anterior.

Aunque la tabla recoge las toneladas de CO₂ necesarias para producir el e-SAF y, por tanto, el CO₂ que se captura de la atmósfera mediante DAC, es importante matizar que este carbono no supone una retirada permanente de CO₂ atmosférico. El CO₂ capturado vuelve a liberarse a la atmósfera cuando el combustible es utilizado y se produce su combustión. Por tanto, la captura permite cerrar el ciclo del carbono y evitar la incorporación de carbono fósil adicional, pero no puede considerarse una retirada neta de CO₂ de la atmósfera.



LA PRODUCCIÓN
REQUERIDA DE E-SAF
ENTRE 2030 Y 2035

X4

LA PRODUCCIÓN
REQUERIDA DE E-SAF
PARA 2050

X31

3,49 TWH
DE E-SAF REQUERIDOS EN
2030

≈
CONSUMO ELÉCTRICO DE
700.000
HOGARES

108,19 TWH
DE E-SAF ESTIMADOS
PARA 2050

≈
GENERACIÓN RENOVABLE
ACTUAL DE ESPAÑA



EL CONSUMO DE AGUA EN
2050 SUPERA EL CONSUMO
ACTUAL EN TODOS LOS
HOGARES DE LA
COMUNIDAD AUTÓNOMA
DE EXTREMADURA

Por otra parte, las necesidades de recursos aumentan de forma muy significativa a medida que se incrementan los objetivos de producción. En apenas cinco años, entre 2030 y 2035, la producción requerida de e-SAF se multiplica por más de cuatro, mientras que en 2050 alcanza casi 31 veces el volumen previsto para 2030. Este crecimiento implica un rápido despliegue de capacidad de generación renovable y de producción de hidrógeno, así como de infraestructuras para garantizar el suministro de agua y la captura de CO₂. **En el caso del agua, a medida que aumente la escala de producción y se alcance el límite de disponibilidad de recursos hídricos locales, podría ser necesario recurrir a fuentes alternativas, como la desalación.** Las necesidades energéticas asociadas a la desalación no están incluidas en las estimaciones de la tabla y, por tanto, **supondrían una demanda energética adicional** en aquellos casos en los que fuese necesaria.

La magnitud de estas necesidades resulta especialmente significativa en el caso de la electricidad. Los **3,49 TWh requeridos en 2030 equivalen aproximadamente al consumo eléctrico anual de 700.000 hogares**, mientras que los 108,19 TWh estimados para 2050 representan una cantidad equivalente a una parte muy significativa de la **generación renovable actual de España**. Esto pone de manifiesto que el despliegue del e-SAF a gran escala tendría un impacto relevante sobre las necesidades futuras de generación eléctrica renovable. En cuanto al **agua**, su consumo en **2050 supera el consumo actual en todos los hogares de la comunidad autónoma de Extremadura**.

Los resultados demuestran que alcanzar los objetivos previstos para 2050 requeriría desplegar una infraestructura de generación renovable y de producción de hidrógeno de gran magnitud, además de desarrollar la capacidad de captura de CO₂ necesaria. Esto **refuerza la importancia de situar las plantas de producción en emplazamientos donde exista disponibilidad suficiente de electricidad renovable, agua y fuentes de CO₂, reduciendo además las necesidades de transporte de las materias primas.**

Coste de electrocombustibles

Para **2025**, la Agencia de la Unión Europea para la Seguridad Aérea (EASA) **estimaba un coste de producción** promedio para los e-fuels de **7.520 € por tonelada**. Esta cifra es aproximadamente **11,7 veces superior** al precio del combustible de aviación convencional (CAF), que se sitúa en 640 € por tonelada, según los índices reales de mercado.

Es importante destacar que **el coste de los combustibles sintéticos varía en función de la procedencia del CO₂**. Los producidos mediante captura directa de aire (DAC) son los más caros, con una estimación de 8.625 € por tonelada. Los basados en CO₂ biogénico o industrial tienen un coste estimado menor, de 7.520 € por tonelada y los combustibles sintéticos de bajo contenido en carbono promedian los 5.415 € por tonelada.

Para **2030**, con producción a escala industrial, se prevé que los **costes de producción y transporte** a Europa se sitúen en torno a los 2 € por litro de equivalente diésel. En **escenarios optimistas**, los e-SAF podrían alcanzar la **paridad de precios con el queroseno convencional hacia 2040**, especialmente **si se implementan impuestos al carbono** (por ejemplo, de 200 € por tonelada) que aceleren el punto de equilibrio entre 5 y 8 años. Si se establecen las condiciones adecuadas y se solventan algunos retos actuales, y a corto plazo, se espera que la producción a gran escala permita el reemplazo completo de los combustibles convencionales para 2050.



COSTE DE PRODUCCIÓN PROMEDIO DE LOS E-FUELS SEGÚN LA EASA

7.520 €/T



COSTE DE LOS E-FUELS PRODUCIDOS MEDIANTE DAC

8.625 €/T



COSTE DE LOS E-FUELS BASADOS EN CO₂ BIOGÉNICO O INDUSTRIAL

7.520 €/T



COSTE DE LOS LOS COMBUSTIBLES SINTÉTICOS DE BAJO CONTENIDO EN CARBONO

5.415 €/T



PRINCIPALES RETOS DEL ABARATAMIENTO



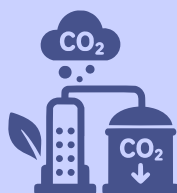
El coste del hidrógeno



La incertidumbre regulatoria
y de los mercados ETS



Los altos costes de inversión
industrial



La baja madurez tecnológica
de captura de CO₂



La falta de infraestructura en
la cadena de valor

Infraestructura de transporte de CO₂

La **Comisión Europea ha anunciado una propuesta** legislativa para el tercer trimestre de 2026 enfocada específicamente en el desarrollo del mercado y la infraestructura de transporte de CO₂. Inicialmente, el transporte se desarrollará a niveles locales, regionales o nacionales para satisfacer necesidades inmediatas. Con el tiempo, se expandirá para conectar fuentes de CO₂ con sitios de almacenamiento distantes, formando una **red trans-europea completa**.





El plan contempla la posibilidad de reconvertir infraestructuras existentes de hidrocarburos para el transporte de CO₂, siendo una de las principales ventajas para la generación de electrocombustibles.



No obstante, la incertidumbre técnica, regulatoria y económica es muy elevada. La infraestructura requiere una alta intensidad de capital. Se estima que los costes de despliegue podrían alcanzar hasta 23.100 millones de euros para 2050. Además, será necesario establecer mecanismos de financiación como tarifas de red y medidas de apoyo para reducir el riesgo de los "primeros promotores". El sistema debe escalar rápidamente de manejar volúmenes proyectados de 50 millones de toneladas al año en 2030 a 450 millones de toneladas para 2050.

Por tanto, este método de transporte para abaratar el recurso de CO₂, de cara a mejorar la competitividad de los electrocombustibles, no será una realidad a corto y medio plazo, por lo menos en cuanto a redes de media y larga distancia.



**LA INICIATIVA
FRANCO-ESPAÑOLA
PRETENDE ALCANZAR
2 000 000 t
DE HIDRÓGENO AL AÑO**

Como se ha comentado anteriormente, las características físicas de la molécula del hidrógeno suponen un problema para su almacenamiento y transporte. No obstante, en julio de 2024 la UE reconoció como **proyecto de interés comunitario** (PCI por sus siglas en inglés), un **hidroducto entre Barcelona y Marsella (BarMar) para el transporte de hidrógeno** desde España a otros puntos de la UE.

La iniciativa franco-española, con la aceptación de Portugal, a la que también se ha unido Alemania, pretende alcanzar una capacidad de flujo de **2 millones de toneladas de hidrógeno al año. Sólo para las interconexiones entre países la inversión sería de 2.000 millones de euros**. A esto se le sumaría el coste de la infraestructura gasista requerida dentro del propio país, estimado en, aproximadamente, 4.670 millones de euros⁵.

La infraestructura de H₂ pretendida para que este gas recorra largas distancias carece de interés pudiendo producirse in-situ en aquellos lugares donde resulte necesario, combinándolo con CO₂ y pudiendo transportarse como un combustible común con unas características de almacenamiento y transporte logístico ya conocidas y desarrolladas.



⁵ H2MED: Coartada para una falsa transición energética.

Escasez de oferta

La producción actual de SAF y, en concreto, de e-fuels apenas representa una fracción residual de la demanda global de queroseno. La Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA) señala que **la capacidad de producción necesita un escalado masivo para llegar a las metas de 2030.**

País	Situación	Producción	Puesta en marcha
Estados Unidos	Único país en el que se produce actualmente e-queroseno (Infinium Energy).	Desconocida	Desconocida
Holanda	El proyecto Synker de la compañía SkyNRG tiene el objetivo de alimentar todo su proceso con energía eólica y obtener el CO ₂ a partir de DAC.	50.000 t/a	2027
Noruega	Norsk e-Fuel – Mosjøen se encuentra actualmente en fase de Basic Engineering. El proyecto utilizará electricidad renovable, agua y CO ₂ reciclado/obtenido mediante DAC. (Norsk e-Fuel).	40 millones de litros anuales	Indefinida
Alemania	Era la mayor planta de e-fuel en ese momento y una de las primeras. Utiliza CO ₂ biogénico de una planta de biogás cercana. (Norsk e-Fuel).	3.500 m ³	2021
Suecia	Está previsto que consuma el 1 % de CO ₂ biogénico de Suecia (SkyKraft).	160.000 t/anuales	Desconocida

Tabla 3: Proyectos internacionales para la fabricación de e-SAF. Fuentes: artículos y enlaces a los proyectos presentes en la columna Situación.



España no cuenta con plantas de e-SAF operativas actualmente, pero sí con dos proyectos importantes:

PUERTO DE BILBAO⁶

Se prevé su puesta en marcha a principios de 2027 (Petronor y Repsol). El objetivo es la producción de una pequeña cantidad de electrocombustibles: 2.000 toneladas anuales, incluyendo no solo e-SAF, sino también e-nafta y e-diésel. Se trata de una prueba con enfoque experimental, en la que la filial vasca de Repsol quiere demostrar la viabilidad de esta tecnología para generar combustibles renovables a nivel industrial.

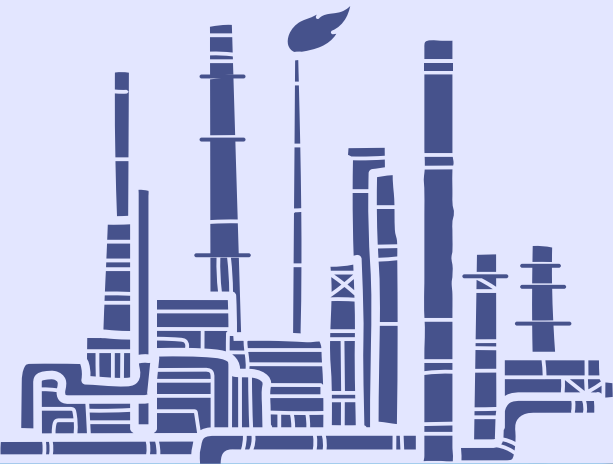


⁶ <https://www.eleconomista.es/energia/noticias/13757604/02/26/repsol-invertira-146-millones-en-su-planta-de-combustibles-sinteticos-de-petronor-en-el-puerto-de-bilbao.html>.

⁷ <https://www.eleconomista.es/branded-content/noticias/13837492/03/26/eco2fly-impulsa-la-descarbonizacion-de-las-industrias-del-cemento-y-la-aviacion.html>.

VILLALUENGA DE LA SAGRA, TOLEDO⁷

Puesta en marcha prevista en 2032 (Holcim, Eco2fly Power y Exolum). Junto a la planta de cemento Holcim, el origen de las emisiones de CO₂ capturadas provendrán de la propia planta de cemento, donde se prevén capturar 700.000 t/CO₂, con las que se producirán un total de 100.000 t/anuales, suficientes para cubrir la demanda completa requerida por ReFuel Aviation. **Al provenir de una fábrica de cemento no entraría en nuestra definición de e-fuels.**



CONCLUSIONES Y PROPUESTAS

La aviación se encuentra en un punto de inflexión. A diferencia de otros sectores del transporte, su descarbonización presenta importantes dificultades tecnológicas y materiales, debido tanto a las elevadas necesidades energéticas asociadas al transporte aéreo como a la de mantener unas características de densidad energética compatibles con las aeronaves actuales.

En este contexto, los resultados obtenidos permiten extraer las siguientes conclusiones.

1

LA DESCARBONIZACIÓN DE LA AVIACIÓN REQUIERE UNA ESTRATEGIA TECNOLÓGICA DIVERSIFICADA

Los electrocombustibles, y en particular los e-SAF, constituyen actualmente una de las alternativas más prometedoras para avanzar hacia una aviación con menor dependencia de los combustibles fósiles, ya que permiten utilizar la infraestructura de distribución y las aeronaves existentes sin requerir una transformación completa del sistema de transporte aéreo.

Sin embargo, considerarlos como una solución única presenta importantes limitaciones. La tecnología disponible todavía no permite producir e-SAF en cantidades suficientes para cubrir la demanda prevista y su producción requiere importantes cantidades de electricidad renovable, agua y otros recursos. Además, otras alternativas tecnológicas, como la electrificación mediante baterías o el desarrollo de bioSAF, pueden desempeñar un papel complementario en aquellos segmentos en los que resulten técnicamente viables.

PROPUESTA:

Establecer una estrategia de descarbonización basada en un **desarrollo tecnológico paralelo**, impulsando los e-SAF al mismo tiempo que la electrificación de las aeronaves y el desarrollo de bioSAF sostenibles. En el caso de los biocombustibles, debería priorizarse el desarrollo de materias primas que no dependan exclusivamente de residuos limitados ni compitan con usos alimentarios o con otros usos esenciales del territorio.

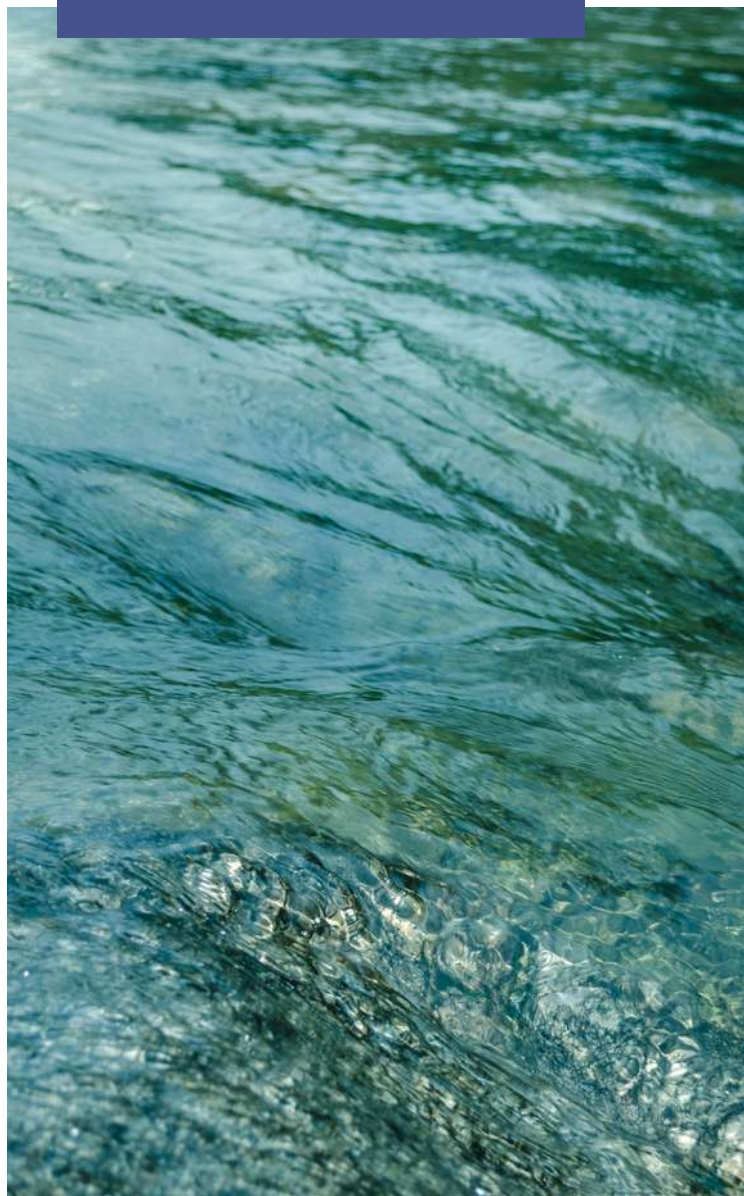
Los resultados obtenidos en el análisis sobre la disponibilidad de recursos ponen de manifiesto las importantes exigencias materiales y energéticas asociadas al cumplimiento de los objetivos de descarbonización de la aviación establecidos para el horizonte de 2050. En el escenario analizado, alcanzar los niveles de sustitución de combustible requeridos por la normativa implica una producción de e-SAF que demanda **cantidades muy elevadas de electricidad renovable y agua**.

Estas necesidades ponen de manifiesto, además, las posibles **tensiones territoriales y sectoriales** que podría generar el despliegue a gran escala de los electrocombustibles, especialmente en aquellos territorios donde la disponibilidad de recursos hídricos o de generación renovable sea limitada. Por tanto, el reto no se encuentra únicamente en desarrollar la capacidad tecnológica necesaria para producir e-SAF, sino también en disponer de los recursos físicos y energéticos que requiere su producción a la escala exigida.

Los resultados obtenidos muestran así que **el cumplimiento de los objetivos regulatorios previstos para 2050 mediante e-SAF supone una movilización de recursos de una magnitud significativa**, lo que plantea la necesidad de valorar su compatibilidad con otros usos de la electricidad renovable y del agua y, en última instancia, con la evolución prevista de la demanda de transporte aéreo.

PROPUESTA:

Incorporar la **disponibilidad de recursos energéticos e hídricos y su distribución territorial como variables fundamentales en la planificación** de la descarbonización de la aviación. El cumplimiento de los objetivos establecidos para 2050 debería abordarse mediante una combinación de tecnologías y medidas que permita reducir la presión sobre aquellos recursos especialmente limitados.



3

EL E-SAF ACTUAL NO ELIMINA COMPLETAMENTE LA DEPENDENCIA DEL QUEROSENO

Aunque los e-SAF permiten reducir la utilización de combustibles fósiles, la tecnología actualmente disponible continúa presentando limitaciones en cuanto a las características finales del combustible. En determinados procesos y vías de producción, el combustible obtenido no contiene por sí solo todos los componentes necesarios para reproducir las propiedades requeridas por la flota actual, lo que hace necesario su uso en mezcla con combustible de aviación convencional.

Por tanto, la transición hacia los e-SAF no implica necesariamente una eliminación inmediata de la dependencia del queroseno. Mientras las especificaciones técnicas de los combustibles y los procesos de producción no permitan obtener un combustible plenamente sustitutivo, seguirá existiendo una dependencia parcial del combustible fósil.

PROPUESTA:

Orientar una parte de los esfuerzos de I+D+i hacia el desarrollo de e-SAF capaces de alcanzar por sí mismos las características fisicoquímicas requeridas por las aeronaves actuales, reduciendo progresivamente la necesidad de mezclarlos con queroseno convencional y avanzando hacia combustibles verdaderamente sustitutivos.



4

EL COSTE DE LOS E-SAF REQUIERE UNA RESPUESTA FISCAL Y TECNOLÓGICA

Los resultados del análisis económico muestran que el precio actual de los e-SAF se sitúa significativamente por encima del coste del queroseno convencional. Aunque se espera una reducción progresiva de los costes como consecuencia del desarrollo tecnológico, de la maduración de las instalaciones y de las economías de escala, la competitividad de los e-SAF dependerá también en gran medida del **marco fiscal aplicado a los combustibles de aviación**.

Además, las estimaciones de costes están sujetas a una elevada incertidumbre. Factores externos, especialmente las contingencias geopolíticas y las alteraciones en los mercados energéticos, pueden modificar sustancialmente el precio del queroseno y, por tanto, la diferencia de costes entre ambas alternativas.

PROPUESTA:

Desarrollar un marco fiscal progresivo que internalice los costes ambientales del queroseno convencional, utilizando parte de los ingresos generados para financiar la investigación, el desarrollo y el despliegue de alternativas de bajas emisiones.

Paralelamente, deberían establecerse mecanismos de apoyo a la producción de e-SAF durante las primeras fases de su desarrollo, hasta que las economías de escala y la madurez tecnológica permitan reducir su coste.



El análisis de los recursos disponibles plantea una cuestión que trasciende la propia tecnología: **¿es viable y deseable satisfacer el crecimiento previsto de la demanda de transporte aéreo con combustibles sostenibles?**

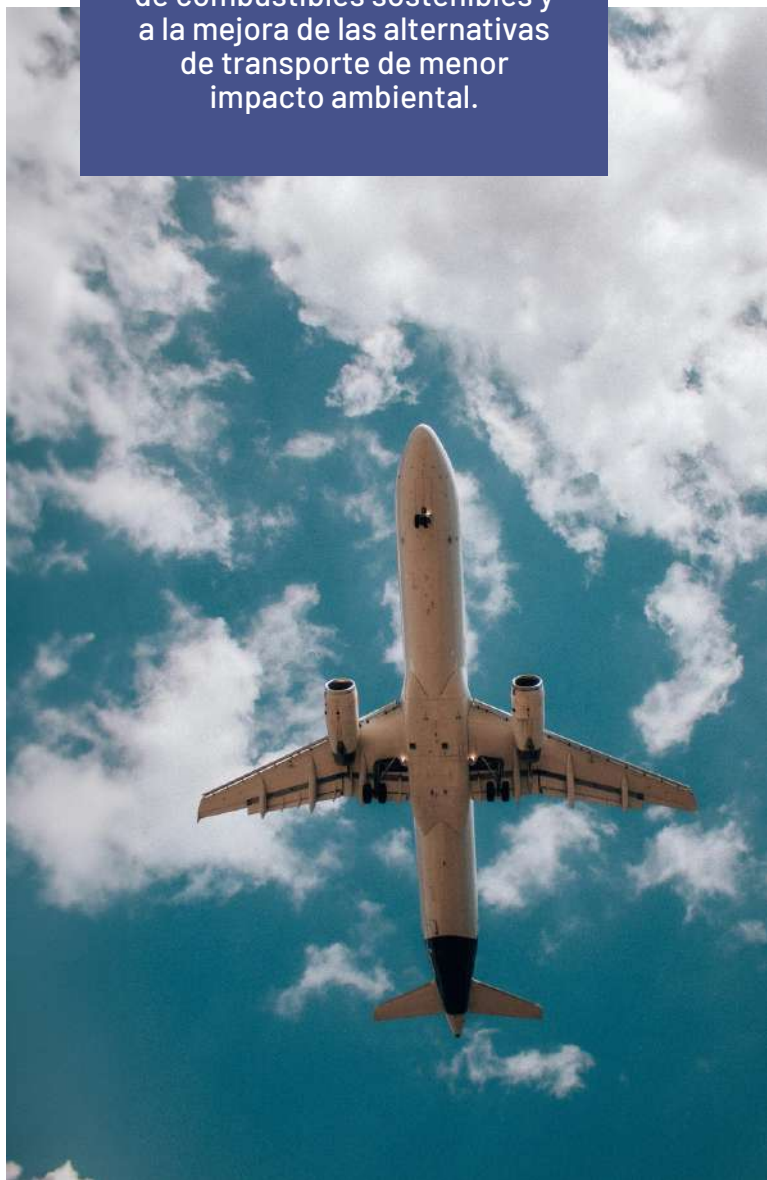
El incremento del coste de los combustibles puede trasladarse progresivamente al precio final de los billetes y, en consecuencia, modificar el comportamiento de los usuarios. El efecto, sin embargo, no será homogéneo. Los viajes de negocio presentan previsiblemente una demanda más inelástica, debido a que responden a necesidades profesionales que no siempre pueden sustituirse fácilmente. Aun así, parte de estos desplazamientos podría sustituirse por reuniones virtuales o por el ferrocarril cuando exista una alternativa adecuada.

Por el contrario, los viajes de ocio presentan una mayor sensibilidad al precio. Un incremento significativo del coste de los billetes puede favorecer la sustitución de determinados vuelos por el ferrocarril u otros medios de transporte, además de provocar una reducción del número total de desplazamientos realizados.

En consecuencia, una estrategia de descarbonización centrada exclusivamente en aumentar la oferta de combustibles sostenibles podría resultar insuficiente si la demanda de transporte aéreo continúa creciendo al ritmo previsto.

PROPUESTA:

Complementar las medidas de descarbonización tecnológica con políticas orientadas a gestionar la demanda de transporte aéreo. El incremento progresivo de la fiscalidad sobre los combustibles fósiles debería trasladarse parcialmente al precio final del transporte, especialmente en aquellos desplazamientos para los que existen alternativas ferroviarias o digitales. Los recursos obtenidos podrían destinarse a I+D+i, al desarrollo de combustibles sostenibles y a la mejora de las alternativas de transporte de menor impacto ambiental.



6

LOS E-SAF PUEDEN DESEMPEÑAR UN PAPEL ADICIONAL EN LA INTEGRACIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

Más allá de su función como combustible para la aviación, los e-SAF pueden constituir una herramienta para **almacenar y gestionar energía renovable**. La transformación de electricidad renovable en un combustible almacenable permite trasladar energía entre momentos y sectores, facilitando su utilización cuando la producción eléctrica no coincide con la demanda.

Este potencial resulta especialmente relevante en un sistema eléctrico con una elevada penetración de fuentes renovables variables, en el que la capacidad de almacenamiento y la gestión de los excedentes de generación adquieren una importancia creciente.

No obstante, este uso debe evaluarse frente a otras alternativas de almacenamiento y teniendo en cuenta las pérdidas energéticas asociadas a la transformación de electricidad en combustible.

PROPUESTA:

Considerar los e-SAF dentro de una estrategia más amplia de almacenamiento energético y acoplamiento entre sectores, priorizando su utilización en aquellos ámbitos en los que la electrificación directa no sea técnicamente viable y el almacenamiento químico de energía aporte un valor añadido.



Conclusión general

En definitiva, los resultados muestran que **la descarbonización de la aviación no puede resolverse únicamente sustituyendo queroseno por e-SAF**. Los electrocombustibles constituyen una pieza importante de la transición, pero su despliegue a gran escala está condicionado por su coste, la disponibilidad de electricidad renovable y agua, sus características técnicas y la capacidad real de producción.



Por ello, la estrategia debería apoyarse en tres líneas de actuación simultáneas:

- **Desarrollar nuevas tecnologías de propulsión y combustibles sostenibles**
- **Garantizar que los recursos destinados a su producción sean ambiental y territorialmente sostenibles**
- **Al mismo tiempo, abordar la evolución de la demanda de transporte aéreo**



La cuestión fundamental no es únicamente cómo conseguir combustible suficiente para mantener el crecimiento previsto de la aviación, sino **qué nivel de movilidad aérea resulta compatible con los recursos disponibles y con los objetivos de descarbonización**. Desde esta perspectiva, la transición energética del sector debe combinar innovación tecnológica, política fiscal, planificación territorial y gestión de la demanda.



**FUNDACIÓN
RENOVABLES**



E-SAF

**Descarbonizar la aviación
sin hipotecar la transición
energética**

2026

www.fundacionrenovables.org