

UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA
AEROESPACIAL**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**SUSTAINABLE AVIATION
FUEL: ESTRATEGIAS PARA LA
DESCARBONIZACIÓN DEL
TRANSPORTE AÉREO**

AUTORA: TERESA CASTILLO PÉREZ

TUTOR ACADÉMICO: ANTONIO DONOSO LÓPEZ

ABRIL 2025

Agradecimientos

Ante todo, quiero mostrar mi agradecimiento al tutor de este Trabajo de Fin de Máster, Antonio Donoso, por su implicación, su gran apoyo y sus enseñanzas académicas, profesionales y personales. Gracias por ser un ejemplo a seguir.

A mis padres y mi hermano, por apoyarme en todas las decisiones y animarme a realizar el máster. A mis amigos, por su confianza. Por último, a David, mi compañero de vida, por seguir aprendiendo juntos.

Resumen

El transporte aéreo es un sector clave en la transición hacia una economía descarbonizada, pero enfrenta grandes desafíos debido a su alta dependencia del queroseno fósil. En este trabajo se estudia la viabilidad del uso de combustibles sostenibles de aviación mediante el análisis de la situación actual de los principales actores de la industria aeronáutica y su postura frente al SAF.

Se analizarán las alternativas de combustibles sintéticos y e-fuels así como las barreras económicas, regulatorias y logísticas que dificultan la adopción del SAF a gran escala, junto con el papel de iniciativas como ReFuelEU en la promoción de su implementación. Estrategias clave, como el desarrollo de infraestructuras aeroportuarias adaptadas, la optimización de la cadena de suministro y la mejora en los procesos de producción del SAF serán el objeto de estudio de este informe.

Abstract

Air transport is a key sector in the transition to a decarbonized economy, but it faces major challenges due to its high dependence on fossil kerosene. This paper studies the feasibility of using sustainable aviation fuels by analyzing the current situation of the main players in the aviation industry and their stance towards SAF.

The alternatives of synthetic fuels and e-fuels will be analyzed as well as the economic, regulatory and logistical barriers to large-scale adoption of SAF, along with the role of initiatives such as ReFuelEU in promoting its implementation. Key strategies, such as the development of adapted airport infrastructures, supply chain optimization and improvement in the production processes of SAF will be the focus of this report.

Índice general

Resumen	v
Abstract	vii
1. Introducción	1
1.1. Contexto global de la aviación sostenible	1
1.2. Objetivos y motivaciones del trabajo	2
1.3. Metodología de la investigación	3
2. Panorama actual de la Aviación y Sostenibilidad	5
2.1. Emisiones de carbono en la industria aeronáutica	5
2.2. Medidas globales para la descarbonización de la aviación	7
A. Desarrollo tecnológico en aeronaves	7
B. Mejoras Operativas	8
C. El uso de Sustainable Aviation Fuels (SAF)	10
D. Financiamiento de emisiones: CORSIA	10
2.3. Acuerdos internacionales: Acuerdo de París y ReFuelEU	12
3. Combustibles de Aviación Sostenibles (SAF)	13
3.1. Definición y tipos de SAF	13
3.2. Proceso de producción de SAF y principales tecnologías	15
3.3. Impacto ambiental y ciclo de vida del SAF	19
4. Estrategias para la Implementación del SAF en Europa	23
4.1. Directiva de RefuelEU y su impacto en la aviación	23
4.2. Rol de los aeropuertos en la implementación del SAF	26
4.3. Desafíos y oportunidades para los aeropuertos en la transición al SAF	29
A. Desafíos en la Implementación del SAF	29
B. Oportunidades en la Implementación del SAF	30

5. Innovación y Desarrollo Tecnológico en la Industria	33
5.1. Innovación en la cadena de suministro del SAF	33
5.2. Tecnologías emergentes y potencial de SAF de nueva generación	36
A. Power-to-liquid (PtL)	37
B. Sun-to-liquid (StL)	39
5.3. Nuevos modelos de colaboración entre aerolíneas, proveedores, aeropuertos y gobiernos	43
6. Beneficios y Retos para los Actores de la Industria Aeronáutica	47
6.1. Beneficios económicos, sociales y ambientales de la adopción del SAF	47
6.2. Desafíos regulatorios y tecnológicos en la expansión del SAF	50
7. Consultas y entrevistas a los principales Stakeholders	53
7.1. Entidad Reguladora AESA/DGAC	53
7.2. Proveedor: Repsol	55
7.3. Aerolínea: Iberia	57
8. Casos de Estudio y Mejores Prácticas	61
8.1. Aeropuertos líderes en la adopción del SAF en Europa	61
8.2. Consorcios y alianzas estratégicas: TULIPS, STARGATE, ALIGHT, OL- GA y eNeuron	64
8.3. Medidas para la implementación del SAF en España	67
9. Propuesta de Estrategias para la Expansión del SAF en España	73
9.1. Análisis de la infraestructura aeronáutica en España	73
9.2. Medidas para incentivar el uso de SAF en la aeronáutica española	76
9.3. Lecciones aprendidas y recomendaciones para la industria	77
10. Conclusiones y Recomendaciones Finales	81
10.1. Resumen de los hallazgos	81
10.2. Futuras líneas de investigación	82
A. Entrevista AESA/DGAC	83

Índice general	XI
B. Entrevista Repsol	93
C. Entrevista Iberia	101

Índice de figuras

1.1. Contexto global de la aviación sostenible [54]	2
2.1. Emisiones de CO ₂ de la aviación (MtCO ₂ /año) para los distintos escenarios de emisiones de las aeronaves durante el periodo 1940-2050 [1]	6
2.2. Detalle del sharklet de un A321neo de Viva Aerobus[4]	8
2.3. Plan de la OACI para evitar el crecimiento de emisiones [6]	12
3.1. Proceso de producción del SAF [9]	20
4.1. Pacto Verde Europeo	24
4.2. Mapa de Descarbonización 2050 de la Aviación Europea	26
5.1. Cadena de suministro del SAF [13]	33
5.2. Tecnología Blockchain	36
5.3. Ciclo Fischer-Tropsch para la producción de PtL [17]	38
5.4. Espejos heliostáticos IMDEA [21]	40
5.5. Etapas de la transformación termoquímica [21]	41
5.6. Configuración del reactor solar [21]	42
6.1. Cadena de Valor de la producción del SAF [30]]	48
6.2. Beneficios sociales del programa RenovaBio [33]	49
8.1. Aeropuertos Gardenmoen (izquierda), Copenhagen (centro) y Schipol (derecha)	64
8.2. ROAD MAP Proyecto TULIPS	65
8.3. Objetivos de mezcla en los Union Airports (%) [61]	68
8.4. Ciclo de reporte de datos y monitoreo (%) [61]	69
8.5. Fuel Monitoring Tool [61]	69
8.6. Asignación de derechos de emisión [61]	70

9.1. Diagrama de flujo para integrar el modelo SAF LCA en el modelo de operaciones aéreas [12]	75
A.1. Captura de pantalla de la entrevista por Microsoft Teams entre Raúl Martín, Antonio Donoso y Teresa Castillo	92

Introducción

1.1. Contexto global de la aviación sostenible

Aproximadamente el 2% de las emisiones mundiales de dióxido de carbono (CO₂) vinculadas a las actividades humanas son originadas por el transporte aéreo. Cuando se toman en cuenta los impactos no vinculados al CO₂, su aporte al cambio climático puede ser duplicado. Considerando el crecimiento previsto del sector, es esencial la descarbonización de la aviación para atenuar el impacto en el medio ambiente. En la actualidad, el queroseno proveniente del petróleo continúa siendo el combustible más utilizado en la aviación, gracias a su elevada densidad energética y su compatibilidad con las tecnologías de propulsión actuales [2]. A pesar de que se han sugerido varias opciones, como la electrificación y el hidrógeno, estas tienen restricciones técnicas y logísticas considerables. Por ejemplo, el hidrógeno necesita modificaciones drásticas en el diseño de aeronaves e infraestructuras aeroportuarias, estableciéndose como una solución a largo plazo.

En estas circunstancias, los combustibles sostenibles para la aviación (SAF) han emergido como una alternativa factible a corto y medio periodo. Los SAF de tipo "drop-in" tienen una similitud química con el queroseno tradicional, lo que facilita su aplicación en flotas y sistemas ya existentes sin requerir alteraciones notables. Estos combustibles pueden ser elaborados utilizando una diversidad de materias primas, tales como desechos forestales, aceites utilizados y procesos de captura de carbono. Además, los SAF poseen la capacidad de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero hasta en un 80% en relación a los combustibles fósiles [2] [54].

El siguiente esquema resalta varias fuentes de energía y tecnologías de transformación. Tecnologías como la fabricación Fischer-Tropsch (FT-SPK), el procesamiento hidrodinámico de aceites y ácidos grasos (HEFA-SPK) y los métodos Power-to-Liquid

(PtL) facilitan la obtención de SAF con un gran potencial de descarbonización [54]. El hidrógeno y la electrificación también se ilustran en el esquema, pese a que demandan avances tecnológicos más sofisticados y una infraestructura totalmente renovada.

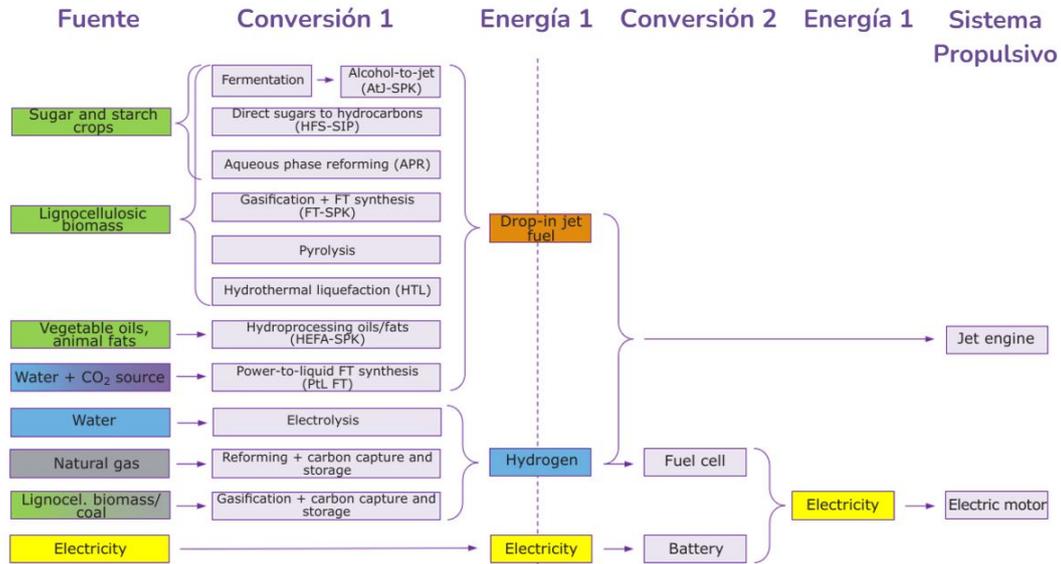


Figura 1.1: Contexto global de la aviación sostenible [54]

En Europa, la implementación de regulaciones para la combinación de SAF se ha transformado en una táctica esencial para promover su adopción. Por ejemplo, la normativa de ReFuelEU Aviation impone tasas progresivas para la utilización de SAF a partir del año 2025. Sin embargo, la escasez de materias primas y el elevado coste de producción continúan siendo desafíos significativos para su puesta en marcha. La demanda de soluciones rápidas y escalables sitúa a los SAF como un instrumento crucial para la descarbonización del transporte aéreo a corto y medio plazo, mientras se sigue explorando y creando alternativas a largo plazo como el hidrógeno.

1.2. Objetivos y motivaciones del trabajo

Entre las razones destaca la necesidad de atender las crecientes exigencias de sostenibilidad en el sector aeronáutico, además de la urgente necesidad de descubrir opciones que sean compatibles con las tecnologías actuales de propulsión aérea.

Este estudio tiene como objetivo aportar a la comprensión de cómo se pueden aplicar los SAF a corto plazo, superando obstáculos tecnológicos, económicos y regulatorios. Además, busca proporcionar una perspectiva completa acerca de las tecnologías de producción y los beneficios ambientales y operativos vinculados a su implementación.

1.3. Metodología de la investigación

El estudio de este trabajo adopta una metodología estructurada basada en el análisis de documentos y en conversaciones con protagonistas esenciales del sector aeronáutico. A continuación se describen las etapas fundamentales del procedimiento:

- Revisión bibliográfica: Se llevó a cabo un análisis detallado de fuentes académicas, reportes industriales y publicaciones científicas pertinentes acerca de la sostenibilidad en la aviación, poniendo especial atención en los combustibles de aviación sostenibles (SAF).
- Evaluación del contexto actual: Se realizaron evaluaciones de las tecnologías existentes para la fabricación de SAF, su adecuación a las infraestructuras existentes y su efecto en la disminución de emisiones. Este estudio contempló técnicas como el hidroprocesado de aceites y ácidos grasos (HEFA-SPK), la síntesis Fischer-Tropsch (FT-SPK) y los métodos de captura de carbono.
- Entrevistas y consultas: Se realizaron entrevistas con representantes de aerolíneas, proveedores de combustibles y entidades reguladoras con el objetivo de obtener puntos de vista acerca de los retos y posibilidades en la implementación del SAF.
- Reconocimiento de obstáculos y oportunidades: Se reconocieron los principales impedimentos para la implementación a gran escala de SAF, junto con posibles tácticas para superarlos.

Panorama actual de la Aviación y Sostenibilidad

2.1. Emisiones de carbono en la industria aeronáutica

El principal gas emitido por los motores de las aeronaves, el dióxido de carbono (CO₂), es uno de los principales factores que contribuyen a las emisiones globales de gases de efecto invernadero. Las emisiones de CO₂ generadas por el sector alcanzaron aproximadamente 859 millones de toneladas en 2019, lo que representa aproximadamente el 2-3 % de las emisiones antropogénicas de CO₂ a nivel global. A nivel europeo el porcentaje asciende al 4 %, y es por ello por lo que las regulaciones son más restrictivas en territorio europeo [1]. Estas emisiones no solo tienen un impacto directo en el clima, sino que también contribuyen acumulativamente debido a la larga permanencia del CO₂ en la atmósfera, que puede superar los 100 años [2]. La demanda de transporte aéreo está creciendo rápidamente, con tasas anuales de aumento del tráfico que se sitúan en torno al 4.6 % hasta 2050, lo que indica que sin medidas de mitigación, las emisiones de CO₂ de la aviación podrían aumentar significativamente, alcanzando entre 1.7 y 2.3 gigatoneladas anuales en los próximos 30 años [1]. Este escenario es particularmente preocupante porque la descarbonización del sector es un desafío, ya que las tecnologías actuales no permiten una sustitución directa y eficiente del queroseno como combustible aeronáutico debido a su alta densidad energética y propiedades operativas [2]. La atmósfera se ve afectada acumulativamente por las emisiones de CO₂ de la aviación. De acuerdo con las estimaciones del modelo compacto OSCARv2.2, un instrumento creado para simular el ciclo del carbono y el efecto climático de diversas industrias, las emisiones provenientes de la aviación civil podrían aportar entre un 1,4 % y un 2 % del calentamiento global

total provocado por las actividades humanas para el año 2050, en función del escenario de mitigación escogido. El modelo OSCARv2.2 (Oceanic and Atmospheric Carbon Cycle Response Model) facilita la evaluación de cómo las emisiones de gases de efecto invernadero, en este caso de la aviación, inciden en el clima a través del tiempo, considerando factores como la capacidad de los océanos para absorber CO₂ y la atmósfera. Esto lo hace un instrumento esencial para calcular la futura aportación de la aviación al calentamiento global. El impacto acumulado de la aviación en el clima seguirá siendo significativo, incluso en un escenario ambicioso de reducción, como el "Factor 2", donde las emisiones de la aviación se reducen a la mitad de los niveles de 2005 para 2050.

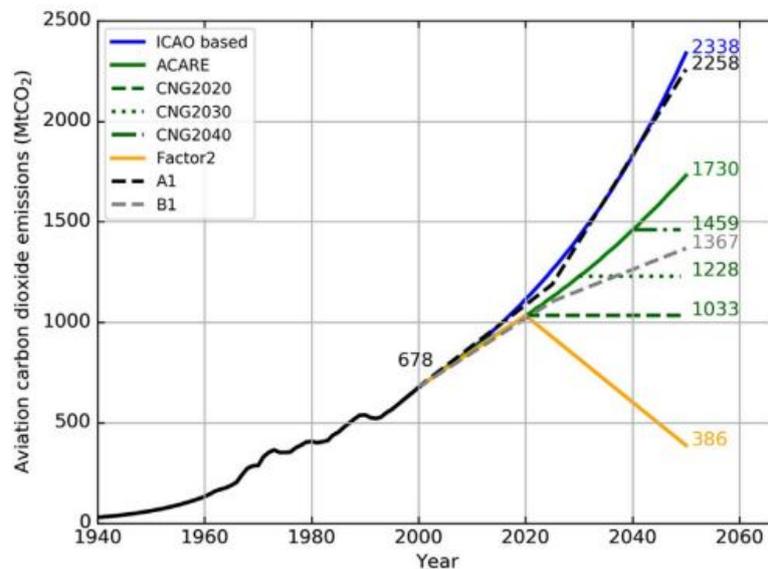


Figura 2.1: Emisiones de CO₂ de la aviación (MtCO₂/año) para los distintos escenarios de emisiones de las aeronaves durante el periodo 1940-2050 [1]

Además, las emisiones de la aviación no se limitan al CO₂. Los óxidos de nitrógeno (NO_x), las estelas de condensación (contrails) y los aerosoles son otros compuestos que contribuyen al forzamiento radiativo de la atmósfera, lo que amplifica el efecto climático de la aviación. Estos factores climáticos de corta duración pueden representar hasta el 64 % del impacto radiativo total del sector, con el CO₂ contribuyendo entre el 36 % y el 51 % del impacto total. El impacto del sector en el calentamiento global se ve incrementado por este fenómeno, lo que tiene consecuencias a corto y largo plazo [1].

2.2. Medidas globales para la descarbonización de la aviación

Si no se toman medidas correctivas, las emisiones de CO₂ de la aviación aumentarán, ya que el transporte aéreo sigue creciendo. Para lograr la descarbonización del sector, la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), junto con la Unión Europea y otras organizaciones internacionales, ha desarrollado estrategias basadas en cuatro pilares clave: desarrollo tecnológico en aeronaves, mejoras operativas, uso de combustibles de aviación sostenibles y programas de financiamiento de emisiones [3].

A. Desarrollo tecnológico en aeronaves

El desarrollo de materiales compuestos más ligeros y motores más eficientes en las últimas décadas ha aumentado significativamente la eficiencia de las aeronaves. Los motores de última generación, como los del Airbus A321neo (PW1100 de Pratt and Whitney o CFM LEAP - 1A de CFM International) y del Boeing 787 Dreamliner (Trent 1000 de Rolls Royce o GEnx de General Electric), han reducido el consumo de combustible entre un 15 % y un 20 % en comparación con modelos anteriores. Estas mejoras incluyen la adopción de materiales compuestos avanzados que reducen el peso estructural y optimizaciones aerodinámicas como la incorporación de sharklets o winglets, que reducen la resistencia al avance. Sin embargo, las mejoras adicionales en esta área parecen acercarse a un límite tecnológico, lo que implica que los futuros avances más importantes vendrán de tecnologías radicales, como motores híbridos o eléctricos. La transición hacia motores híbridos-eléctricos sigue siendo difícil, especialmente en el desarrollo de baterías con densidades energéticas suficientes para aplicaciones de largo alcance. El objetivo de tener aeronaves comerciales totalmente eléctricas para la década de 2030 se centra en tecnologías de baterías de hidrógeno o en sistemas de pila de combustible de hidrógeno y aluminio.



Figura 2.2: Detalle del sharklet de un A321neo de Viva Aerobus[4]

B. Mejoras Operativas

Una estrategia de corto plazo para reducir las emisiones es mejorar la gestión de la navegación y del tráfico aéreo y las operaciones de vuelo. Incluyen:

- La navegación basada en el desempeño (PBN): es un avance tecnológico que mejora la eficiencia y la seguridad de las rutas aéreas. PBN emplea información satelital de navegación por GPS y otros sistemas de posicionamiento mundial para posibilitar que los aviones operen en rutas más directas y exactas, en vez de confiar en las rutas convencionales preestablecidas por radiofaros. Esta exactitud posibilita:
 - Rutas más cortas: PBN, al posibilitar que los aviones tracen rutas más directas entre el origen y el destino, disminuye el tiempo de vuelo, lo que implica un consumo reducido de combustible y una reducción en las emisiones de CO₂.
 - Optimización del espacio aéreo: Gracias a la exactitud de PBN, los aviones pueden volar más próximos unos a otros de forma segura, lo que incrementa la capacidad del espacio aéreo sin poner en riesgo la seguridad. Esto resulta especialmente beneficioso en zonas de gran tráfico aéreo, donde pueden surgir atascos y esperas en el aire que incrementan la demanda de combustible.

Adicionalmente, la PBN está promoviendo la optimización de los métodos de aproximación continua (CDA), que posibilitan que las aeronaves desciendan desde su

altitud de cruce hasta el aterrizaje con menor grado de potencia en los motores, previniendo periodos extensos de nivelación en el aire y maximizando la utilización de combustible. Además de disminuir el consumo, este método disminuye el ruido y las emisiones en las proximidades de los aeropuertos.

- Optimización de las rutas de vuelo: Se trata de modificar las rutas de vuelo para optimizar el uso de las condiciones atmosféricas, tales como vientos beneficiosos a alta altitud, que pueden disminuir el esfuerzo de los motores y, en consecuencia, reducir el consumo de combustible. Adicionalmente, se evitan áreas de gran resistencia atmosférica, como áreas con corrientes de contra o turbulencias intensas, que forzarían a las aeronaves a utilizar más combustible para conservar su velocidad y altitud ideales. Este tipo de optimización demanda una cooperación entre las aerolíneas, los controladores aéreos y los sistemas avanzados de administración de tráfico aéreo, que facilitan una organización más eficaz y dinámica de las rutas aéreas.
- Reduciendo el peso: El peso del avión es uno de los elementos que mayormente afecta el uso de combustible. Conforme aumenta el peso, se requiere más combustible para mantener la aeronave en vuelo. Para disminuir el peso, las compañías aéreas aplican diversas tácticas, tales como:
 - Modificar la cantidad de combustible: Mediante una programación más exacta del vuelo y la implementación de sistemas de predicción climática sofisticados, las compañías aéreas pueden cargar únicamente la cantidad de combustible requerida para cada viaje, disminuyendo el peso superfluo y optimizando la eficiencia.
 - Uso de materiales ligeros: Cada vez se están empleando más materiales de vanguardia como las fibras de carbono y los materiales compuestos. Estos son considerablemente más ligeros que los convencionales (como el aluminio) y posibilitan una disminución notable del peso sin afectar la resistencia estructural. Además, en el interior de las aeronaves, se están reconfigurando las cabinas para incluir asientos, mobiliario y complementos más livianos, lo que favorece una eficiencia superior en el uso de combustible.

- Equipaje y carga optimizada: La compañía aérea también tiene la capacidad de optimizar la carga que transporta en cada vuelo, desde el equipaje de los pasajeros hasta los bienes llevados, empleando tecnologías de reparto de peso que reducen el efecto en el desempeño del vuelo.

Estas estrategias de operación pueden reducir las emisiones de CO₂ hasta en un 10 % sin la necesidad de modificar significativamente las aeronaves o los combustibles utilizados [3.2].

C. El uso de Sustainable Aviation Fuels (SAF)

Se cree que los combustibles de aviación sostenibles (SAF) son la solución más efectiva para reducir las emisiones tanto a corto como a largo plazo. Los combustibles de biomasa, desechos agrícolas y forestales, aceites de cocina usados y grasas animales, electrocombustibles y combustibles sintéticos son algunos de los SAF. Estos combustibles pueden reducir las emisiones de carbono en comparación con los combustibles fósiles tradicionales entre el 50 % y el 80 % [3]. Se encuentran cinco tecnologías de producción de SAF aprobadas actualmente según la especificación ASTM D7566: Fischer–Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene (FT-SPK), Hydrotreated Esters and Fatt, Acids (HEFA-SPK), Synthesized Iso-Paraffinic (SIP), Alcohol-to-Jet Synthetic Paraffini, Kerosene (ATJ-SPK) y Fischer–Tropsch Synthetic Kerosene with Aromatics (FT-SKA). El HEFA-SPK, que se obtiene de aceites vegetales e industriales, es el más utilizado en la actualidad porque no requiere cambios significativos en la infraestructura de repostaje o en los motores de las aeronaves. Sin embargo, la adopción generalizada del SAF enfrenta desafíos importantes, como los elevados costes de producción y la escasez de materias primas.

D. Financiamiento de emisiones: CORSIA

Uno de los mecanismos más importantes para la compensación de emisiones en la aviación es el programa CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation), que se implementa por la OACI. A partir de 2021, las aerolíneas deben comprar créditos de carbono para compensar las emisiones que excedan los niveles de

2020. La participación será opcional hasta 2027, cuando todos los países signatarios serán obligados a participar [5].

Con el objetivo de equilibrar su huella de carbono, CORSIA establece un marco para que las aerolíneas inviertan en proyectos de reducción de emisiones, como la reforestación o la generación de energía renovable. Adicionalmente, la Unión Europea ha puesto en marcha el plan en su marco normativo, complementándolo con su propio sistema de comercio de emisiones, el EU-ETS (Sistema Europeo de Comercio de Emisiones).

El Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea, conocido como el EU-ETS, es el primer y más grande mercado de carbono a nivel global, concebido para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de forma lucrativa. El EU-ETS, establecido en 2005, fija un límite máximo de emisiones para áreas industriales y energéticas altamente contaminantes, tales como la producción de electricidad, el transporte aéreo y la producción industrial. Este sistema opera bajo la regla de "cap and trade", lo que implica que se define un límite máximo (cap) en las emisiones de gases de efecto invernadero autorizadas para las compañías. Cada una recibe o subasta una cantidad restringida de derechos de emisión (también denominados permisos o cuotas). Las compañías que emiten menos que su porcentaje asignado tienen la posibilidad de vender sus permisos sobrantes a las que requieren más, generando de esta manera un estímulo económico para disminuir las emisiones. Si una compañía excede su límite de emisiones sin las autorizaciones pertinentes, se enfrenta a sanciones significativas [11]. En 2012, el sector aeronáutico se unió al EU-ETS, forzando a las compañías aéreas a obtener derechos de emisión para cubrir las emisiones de los vuelos que salen o aterrizan en aeropuertos del Espacio Económico Europeo (EEE). Esto implica que las compañías aéreas deben compensar sus emisiones adquiriendo autorizaciones en el mercado de carbono, generando así una presión económica para disminuir sus emisiones de operación y optar por tecnologías más ecológicas, como la utilización de combustibles de aviación sostenibles (SAF).

El EU-ETS es un elemento esencial en las políticas de la Unión Europea para lograr la neutralidad climática en 2050 y disminuir al menos un 55 % las emisiones de gases de efecto invernadero para 2030, acorde a las metas del Pacto Verde Europa.



Figura 2.3: Plan de la OACI para evitar el crecimiento de emisiones [6]

2.3. Acuerdos internacionales: Acuerdo de París y ReFuelEU

El programa ReFuelEU Aviation (que será expuesto con más detalle en el siguiente apartado) de la Unión Europea ha establecido regulaciones rigurosas para la reducción de las emisiones de carbono en la aviación, lo que obliga a las aerolíneas a emplear porcentajes más altos de SAF en sus vuelos dentro de la UE. Las aerolíneas deben incorporar al menos un 2% de SAF en sus operaciones a partir de 2025, con un aumento gradual hasta el 63% para 2050 [5]. Además, este reglamento limita el uso de biocombustibles derivados de cultivos alimentarios y fomenta el uso de desechos y otros recursos no competitivos en la cadena alimentaria. Las compañías aéreas tendrán que seguir regulaciones rigurosas para evitar prácticas anticompetitivas como el sobrerrepostaje en aeropuertos fuera de la UE [6]. Por otro lado, el Acuerdo de París, que fue aprobado en diciembre de 2015 y firmado por 195 países en 2016, representa un hito en la lucha global contra el cambio climático en el marco de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC). Este acuerdo establece un plan de acción global para limitar el calentamiento global a menos de 2 grados Celsius por encima de los niveles preindustriales. El objetivo es limitar el aumento de la temperatura a 1.5 grados Celsius. Para lograr esto, cada nación debe presentar las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC) para reducir sus emisiones de carbono, que deben ser evaluadas y revisadas cada cinco años.

Combustibles de Aviación Sostenibles (SAF)

3.1. Definición y tipos de SAF

El Combustible de Aviación Sostenible (SAF) representa una opción frente a los combustibles fósiles tradicionales empleados en la aviación, concebido para disminuir de manera notable las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Se refiere a un combustible generado a partir de recursos renovables o materias primas biológicas no fósiles que pueden ser procesadas químicamente para satisfacer las normas de rendimiento de los combustibles tradicionales para la aviación. Lo que distingue al SAF es que, en contraposición a otros biocombustibles, puede ser empleado en motores de aeronaves ya existentes sin requerir modificaciones, lo que lo categoriza como un combustible "drop-in"[7].

La implementación de SAF es esencial para que la industria aeronáutica logre los objetivos de descarbonización, posibilitando una disminución de las emisiones netas de carbono de hasta un 80 % en relación a los combustibles convencionales, en función del tipo de SAF y del ciclo de vida del proceso de producción, que se verá más detalladamente en el apartado 3.3 [8]. Cuando se utiliza SAF y combustible fósil para aviones, se generan cantidades idénticas de CO₂. No obstante, la utilización de SAF genera un ciclo de CO₂: en la fabricación se emplean desechos biogénicos (por ejemplo, aceite de cocina usado) que han obtenido CO₂ previamente de la atmósfera. Así, el SAF produce aproximadamente un 80 % menos de emisiones de CO₂ en relación a los combustibles fósiles durante todo el ciclo de vida. Los procesos de producción y distribución todavía producen aproximadamente el 20 % del CO₂. Para neutralizar completamente las emisiones de CO₂ de un vuelo, es necesario incorporar una proporción de SAF que sea correspondientemente superior

a su funcionamiento. Hay seis métodos de fabricación de SAF certificados por ASTM D7566, cada uno empleando distintas materias primas y procedimientos tecnológicos. Estos incluyen:

- Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene (FT-SPK): Emplea desechos de biomasa o materiales carbonados para transformarlos en gas sintético, que posteriormente se convierte en hidrocarburos líquidos mediante la producción de Fischer-Tropsch [9].
- Esters y Ácidos Grasos Hidroprocesados (HEFA): Este procedimiento convierte aceites vegetales, grasas animales y residuos a través de un proceso de hidrotratamiento, generando combustibles que satisfacen los criterios de queroseno
- Alcohol-to-Jet Synthetic Paraffinic Kerosene (ATJ-SPK): Mediante reacciones de deshidratación y oligomerización, esta tecnología transforma alcoholes como el etanol y el butanol en combustibles líquidos
- Hidroprocesamiento de Azúcares Fermentados - Iso-Paraffins sintéticos (HFS-SIP): Emplea azúcares fermentados que son procesados químicamente para producir hidrocarburos líquidos
- Co-procesamiento con petróleo crudo convencional: En este procedimiento, se procesan las materias primas renovables en refinerías tradicionales para generar combustibles de aviación sostenibles
- Hydrotreated Depolymerized Cellulosic Jet (HDCJ): Un camino en ascenso que emplea biomasa lignocelulósica para la fabricación de biocombustibles a través de despolimerización

Cada uno de estos tipos de SAF tiene distintos beneficios y restricciones en cuanto a materias primas, gastos de producción y huella de carbono, factores que influyen en su viabilidad financiera y su posible adopción, y que se detallarán en mayor profundidad en el siguiente apartado. Por otro lado, se está prestando especial atención a las innovadoras

tecnologías Power-to-Liquid (PtL) y Sun-to-Liquid (StL), que utilizan electricidad generada de forma renovable o calor térmico solar como portadores de energía. Los combustibles eléctricos, también conocidos como combustibles Power-to-Liquid (PtL) o eFuels, también forman parte de la categoría de combustibles de aviación sostenibles. Esta futura generación de SAF conlleva la producción de petróleo sintético crudo a partir de energía renovable, agua y CO₂ (de la atmósfera), que posteriormente puede ser transformado en combustible para aviones [8]. La fabricación industrial de combustibles para aviación PtL aún está en proceso de desarrollo, pero se percibe como un avance significativo para alcanzar vuelos a largo plazo neutros en carbono. La tecnología Sun-to-Liquid (StL) consiste en generar un gas artificial a partir de las elevadas temperaturas provocadas por el calor solar, el agua y el CO₂ (del aire), a partir del cual se puede obtener combustible líquido en un proceso industrial normalizado. Un combustible StL de este tipo finaliza el ciclo de CO₂ dado que, al arder, solo emite tanto CO₂ como el que se empleó anteriormente para su fabricación.

3.2. Proceso de producción de SAF y principales tecnologías

La fabricación de Combustibles de Aviación Sostenibles (SAF) requiere la aplicación de varias tecnologías de vanguardia que convierten materias primas renovables en combustibles líquidos, acordes con las especificaciones técnicas de los combustibles de aviación tradicionales. Estas tecnologías se pueden categorizar en dos grupos fundamentales: procesos termoquímicos y procesos bioquímicos, en función del tipo de materia prima y el procedimiento empleado. El procedimiento generalizado de fabricación de SAF comprende las fases siguientes:

1. Transformación de la biomasa: Los recursos, que pueden ser biomasa lignocelulósica, aceites vegetales, grasas animales, desechos o incluso gases, son procesados para crear precursores químicos idóneos para la producción de combustibles.
2. Reacción química o bioquímica: Los precursores adquiridos son objeto de una serie

de reacciones químicas o bioquímicas, en función del procedimiento tecnológico empleado. Estos pueden abarcar procedimientos como la gasificación, el tratamiento de agua, la fermentación o la deshidratación.

3. Desarrollo del combustible: Los productos intermedios, tales como gases de síntesis (CO y H₂) o ácidos grasos, se procesan a través de catalizadores para formar moléculas de hidrocarburos líquidos, en particular queroseno.
4. Refinación y purificación: Se realiza una refinación y purificación del producto final para garantizar que satisface las normas de calidad y rendimiento requeridas para los combustibles de aviación.

A continuación, se describen las tecnologías más relevantes empleadas en la fabricación de SAF:

- Rutas Termoquímicas:

- Fischer-Tropsch (FT-SPK): El procedimiento Fischer-Tropsch (FT) se inicia con el gaseo de biomasa a elevadas temperaturas, produciendo gas de síntesis (CO y H₂). Este gas se purifica con el fin de eliminar impurezas que podrían perjudicar los catalizadores. Durante la fase de síntesis Fischer-Tropsch, el gas originado se transforma en hidrocarburos líquidos con distintas longitudes de cadena (C₅ a C₂₀), que se refinan más adelante para generar queroseno [8]. Este procedimiento es muy alentador para la fabricación a gran escala de SAF, aunque plantea retos en cuanto a costes y eficiencia.

- Beneficios: El método Fischer-Tropsch (FT) es sumamente adaptable, pues puede emplear una extensa gama de materias primas, tales como biomasa lignocelulósica, desechos agrícolas, desechos municipales e incluso gases residuales industriales. Esto lo posiciona como una alternativa con gran potencial para la fabricación de SAF a gran escala, dado que utiliza fuentes de carbono abundantes y no comestibles, lo que disminuye la competencia con la producción de alimentos. Además, el gas de síntesis producido es sumamente limpio y tiene la capacidad de generar un combustible con un

contenido extremadamente reducido en azufre y sustancias aromáticas, lo que conduce a una reducción en las emisiones contaminantes durante su combustión.

- Restricciones: No obstante, el proceso Fischer-Tropsch conlleva un elevado gasto inicial de inversión, debido a la demanda de instalaciones de gasificación y síntesis complejas. Además, el procedimiento es energéticamente exhaustivo, lo que disminuye un poco su eficacia en relación a otros procedimientos. Pese a su capacidad para aprovechar desechos y biomasa, su eficiencia en cuanto a la transformación a combustible puede ser inferior, lo que conlleva un incremento en los volúmenes de materias primas y en los costes operativos [10] [11].
- Esters y Ácidos Fatty Acidos Hidroprocesados (HEFA): El método HEFA es el más empleado en el sector comercial para la fabricación de SAF. Transforma aceites vegetales, grasas animales y residuos en queroseno a través de una serie de procesos de hidrogenación y craqueo. Este procedimiento se inicia con la hidrogenación catalítica, la cual desvincula los enlaces dobles de los ácidos grasos no saturados, generando así ácidos grasos saturados. Luego, estos son sometidos a isomerización e hidrocraqueo para conseguir queroseno [8]. Una de las principales fortalezas del HEFA es su habilidad para emplear una variedad extensa de materias primas, incluyendo las que no son comestibles, como el aceite de cocina utilizado.
 - Beneficios: El método HEFA es el más avanzado y comercialmente factible para la fabricación de SAF hoy en día. Emplea como materia prima aceites vegetales, grasas animales y residuos, lo que facilita el uso de subproductos provenientes de otras industrias. Este procedimiento tiene el beneficio de que puede ser incorporado con facilidad en refinerías ya existentes, lo que disminuye los gastos de infraestructura. El HEFA también posee una elevada eficiencia de conversión en comparación con otros procedimientos, y puede generar combustible de excelente calidad con características muy parecidas al queroseno tradicional [10].

- Restricciones: No obstante, una restricción fundamental del HEFA es la presencia de materias primas. La utilización de aceites vegetales, tales como el de palma o soja, suscita inquietudes respecto a la competencia con cultivos de alimentos y la utilización de tierras agrícolas, lo que podría provocar problemas de sostenibilidad e incrementos en los costes de los alimentos. Además, a pesar de ser recursos valiosos, las grasas animales y los aceites residuales no se encuentran disponibles en cantidades suficientes para cubrir la demanda prevista a largo plazo. Esto podría restringir su crecimiento y provocar variaciones en los costes [11].
- Rutas Bioquímicas:
 - Alcohol-to-Jet (ATJ-SPK): El procedimiento ATJ transforma alcoholes, tales como etanol o butanol, en queroseno a través de la deshidratación, oligomerización y craqueación. Los alcoholes se deshidratan para generar olefinas, que posteriormente se fusionan para crear hidrocarburos de mayor longitud, idóneos para su aplicación en la aviación [8]. Este procedimiento resulta interesante gracias a la amplia disponibilidad de etanol y su infraestructura de producción ya consolidada.
 - Beneficios: El procedimiento ATJ posee la ventaja de emplear alcoholes como el etanol y el butanol, que se generan eficazmente a partir de una amplia gama de fuentes de biomasa, incluyendo desechos agrícolas y cultivos energéticos no alimentarios. Esto lo hace una alternativa versátil, con un abastecimiento de materias primas relativamente extenso y menos polémico que los aceites de origen vegetal. Adicionalmente, la utilización de alcoholes como consumo ya está consolidada en otras industrias, lo que simplifica su incorporación en la fabricación de SAF [11].
 - Restricciones: Sin embargo, el procedimiento ATJ presenta una eficiencia energética bastante reducida en comparación con otras tecnologías, a causa de la necesidad de múltiples fases de transformación (deshidratación, oligomerización, etc.), lo que incrementa los gastos de producción. Además,

a pesar de que la producción de alcoholes es común, los procedimientos extra para transformarlos en combustibles para aviación son complicados y costosos, lo que restringe su competitividad ante técnicas como HEFA [10].

- Hidroprocesados Azúcares Fermentados (HFS-SIP): Este procedimiento bioquímico emplea azúcares fermentados, que se transforman en hidrocarburos líquidos a través de hidrólisis y fermentación. A pesar de su menor desarrollo que el proceso HEFA, el HFS-SIP posee la capacidad de utilizar desechos agrícolas y otras materias primas no alimentarias.
 - Beneficios: Este procedimiento emplea azúcares fermentados, lo que lo convierte en particularmente atractivo para el uso de desechos agrícolas o biomasa que, de otra forma, no tendrían un alto valor comercial. El HFS-SIP posee la capacidad de generar combustibles aéreos con una baja huella de carbono, dado que utiliza recursos renovables y puede utilizar residuos biológicos de forma eficaz [11].
 - Restricciones: El reto principal del HFS-SIP radica en su menor desarrollo en comparación con otros procesos como HEFA o ATJ. Adicionalmente, la eficacia en la transformación de azúcares fermentados en combustibles líquidos es bastante baja, lo que significa que se necesitan grandes volúmenes de materia prima para lograr volúmenes comerciales de SAF. Este procedimiento igualmente tiene restricciones tecnológicas y todavía necesita más estudio para potenciar su factibilidad económica y técnica [10].

3.3. Impacto ambiental y ciclo de vida del SAF

Para entender de manera más efectiva el impacto ecológico de los combustibles de aviación sostenibles, resulta crucial examinar su ciclo de vida completo, denominado Life Cycle Assessment (LCA), una metodología que evalúa los efectos ambientales desde la fabricación de la materia prima hasta la combustión final en el vuelo. El LCA del SAF abarca todas las fases del procedimiento de producción y utilización del biocombustible,

desde la obtención de biomasa o la recolección de residuos hasta su refinado, transporte y finalmente su combustión en los motores de aeronaves. Este ciclo abarca tanto los efectos directos como los indirectos, donde los primeros están vinculados con la energía empleada en cada fase de la cadena, mientras que los segundos abarcan modificaciones en la utilización de la tierra o el traslado de biomasa [12].

El enfoque del LCA segmenta el ciclo de vida en etapas fundamentales, y puede verse ilustrado en la figura donde se destaca la liberación y reabsorción de CO₂ en cada etapa del proceso:



Figura 3.1: Proceso de producción del SAF [9]

1. Obtención de biomasa: Esta etapa puede abarcar la recolección de cultivos energéticos (tales como maíz, jatrofa o camelina) o la recolección de desechos orgánicos (tales como aceites de cocina empleados). En este punto, el principal efecto ambiental es la liberación de CO₂ y otros gases a causa del empleo de maquinaria agrícola y fertilizantes. Además, es importante considerar la variación en la utilización del suelo, que podría tener consecuencias a largo plazo en la captura de carbono y la biodiversidad.
2. Transporte: Desde su procedencia hasta las instalaciones de refinado, y posteriormente, el traslado del combustible refinado a los aeropuertos, contribuye a la generación de emisiones de gases de efecto invernadero. En esta fase, las distancias y los

medios de transporte tienen un rol crucial. La implementación de transportes más eficientes en términos energéticos, así como el traslado local de la biomasa y el SAF, podrían reducir estas emisiones.

3. Aplicación en vuelo: Esta etapa se refiere a la combustión en los motores de los aviones. A pesar de que el SAF continúa emitiendo CO₂ al ser quemado, la huella neta de carbono es considerablemente inferior a la de los combustibles fósiles, dado que el carbono liberado fue previamente retenido durante el desarrollo de la biomasa (neutralidad de carbono). No obstante, su utilización en el aire también está vinculada con otros contaminantes, como el óxido de nitrógeno (NO_x), que puede aportar a la creación de ozono troposférico y al calentamiento global.
4. Reabsorción de carbono: En contraposición a los combustibles fósiles que liberan CO₂ y este se acumula en la atmósfera, los biocombustibles facilitan una reabsorción parcial del CO₂ durante la formación de la próxima generación de cultivos energéticos (biomasa). Esta reabsorción de carbono favorece una huella neta reducida en comparación con los combustibles fósiles convencionales.

La repercusión ambiental del SAF no está restringida únicamente a las emisiones de carbono. El LCA también debe tener en cuenta otros factores como la utilización del agua, la toxicidad y la eutrofización del suelo.

- Uso del agua: La elaboración de cultivos para biocombustibles demanda un consumo significativo de agua, particularmente si se emplean cultivos energéticos especializados. Este efecto puede ser atenuado mediante el uso de materias primas lignocelulósicas o residuos, que demandan menos agua.
- Toxicidad: La aplicación de pesticidas y fertilizantes en los cultivos puede provocar una toxicidad en los terrenos y en los cuerpos acuáticos adyacentes. En este contexto, resulta esencial elaborar tácticas de agricultura sostenible que reduzcan estos impactos.
- Eutrofización: La acumulación de nutrientes, en especial nitrógeno y fósforo, en cuerpos acuáticos a causa del uso intensivo de fertilizantes puede causar la eutrofi-

zación, un proceso que disminuye la cantidad de oxígeno en el agua y perjudica la biodiversidad acuática.

- **Emisiones indirectas:** La transformación en la utilización de la tierra es una inquietud esencial en el cultivo de biocombustibles. Si se transforman zonas forestales o pastizales en terrenos de cultivo, el efecto neto de carbono podría resultar adverso, ya que se disminuye una significativa habilidad para capturar carbono natural. Por lo tanto, la elección de materias primas y la utilización de desechos agrícolas o industriales son fundamentales para prevenir estos efectos adversos.
- **Sostenibilidad a largo plazo:** La viabilidad del SAF también está sujeta a su capacidad de escalado. Para que los biocombustibles sean una opción factible a escala mundial, es necesario establecer políticas que promuevan la investigación y desarrollo en tecnologías de segunda y tercera generación, como los biocombustibles sofisticados derivados de desechos o el uso de algas.

Es crucial subrayar que la disminución total de emisiones se basa en elementos como la eficiencia energética del proceso productivo y la clase de energía empleada en la cadena de suministro. Así pues, es necesario fomentar acciones que reduzcan el impacto ecológico en cada fase del ciclo de vida del SAF, desde la recolección de biomasa hasta la mejora de su uso final en las aeronaves.

Estrategias para la Implementación del SAF en Europa

4.1. Directiva de RefuelEU y su impacto en la aviación

La Directiva ReFuelEU es un componente del Pacto Verde Europeo, una estrategia global implementada por la Unión Europea con el objetivo de lograr la neutralidad climática para el año 2050. Este acuerdo tiene como objetivo disminuir en un 55 % las emisiones de gases de efecto invernadero para 2030 (en comparación con los niveles de 1990), e incluye todos los sectores económicos, incluyendo el transporte [10]. En este contexto, se ha reconocido a la aviación como uno de los sectores esenciales en la transición hacia un modelo de transporte más sostenible, gracias a su considerable aporte a las emisiones mundiales de CO₂ [11].



Figura 4.1: Pacto Verde Europeo

El SAF desempeña un papel vital en la realización de estas metas. El propósito de la Directiva ReFuelEU es agilizar la implementación y fabricación de SAF en Europa, estableciendo responsabilidades a las aerolíneas y a los proveedores de combustible para lograr una mezcla mínima de SAF en el combustible empleado. Se proyecta un aumento de millones de toneladas anuales en el uso de SAF para 2030, con la posibilidad de incrementar a más de 30 millones de toneladas para 2050 [10]. La influencia de esta normativa no se restringe a la disminución de las emisiones de CO₂. Además, contribuye a crear un mercado más competitivo para los biocombustibles actuales, incentivando la inversión en tecnologías de producción de SAF, con el objetivo de hacerlos económicamente viables en el largo plazo. Los estímulos económicos y las subvenciones para la investigación y desarrollo de SAF facilitan un aumento gradual en la producción, reduciendo los gastos de estos combustibles en relación al queroseno convencional. Pese a estos intentos, la Directiva ReFuelEU todavía se topa con obstáculos en su puesta en marcha, como los obstáculos logísticos para su distribución, y la resistencia inicial de ciertas aerolíneas ante el incremento en los costes operativos [3]. No obstante, con el respaldo de la legislación, se espera que el SAF se transforme en un elemento crucial del combustible de aviación en los años venideros. Este reglamento establece también requisitos para que los proveedores

de combustible de aviación aumenten gradualmente la proporción de SAF mezclado en el combustible de aviación convencional suministrado en los aeropuertos de la UE. Además de sus efectos sobre el cambio climático, los combustibles de aviación convencionales también repercuten negativamente en la calidad del aire. Una mayor utilización de los combustibles de aviación sostenibles puede contribuir a mejorar la calidad del aire.

La implementación exitosa del Reglamento ReFuelEU Aviation requiere la colaboración de todas las partes en la cadena de suministro, en particular los proveedores de combustible de aviación, los aeropuertos de la UE y las aerolíneas. Más del 95 % del transporte aéreo que sale de los aeropuertos de la UE estará cubierto por este nuevo Reglamento.

En la actualidad, la legislación requiere que los aeropuertos garanticen la infraestructura requerida y la aplicación segura del SAF en sus sistemas. No obstante, numerosos aeropuertos no poseen ni gestionan su infraestructura de combustible. En realidad, la propiedad y el funcionamiento de esta infraestructura difieren considerablemente entre los distintos aeropuertos. En ciertas situaciones, la infraestructura es propiedad de un consorcio de aerolíneas y proveedores de combustible; en otras, es exclusiva de los proveedores o está totalmente administrada por entidades externas. Pese a que los aeropuertos pueden suministrar el suelo o la infraestructura, su funcionamiento puede no estar bajo el control directo del mismo. Además, la legislación vigente no proporciona información suficiente acerca de cómo enfrentar este reto o qué medidas adicionales deberían adoptar los aeropuertos para respaldar la implementación del SAF. El efecto que experimentará la infraestructura al implementar el uso total de e-fuels o SAF, aún está por establecer. Adicionalmente, existe una inseguridad entre los participantes del sector acerca de cómo se realizará la transición de la flota de aviones (los que pueden utilizar SAF al 100 % en contraposición a los que no) y cómo se estructurarán tanto operativa como logísticamente en relación a la infraestructura requerida.

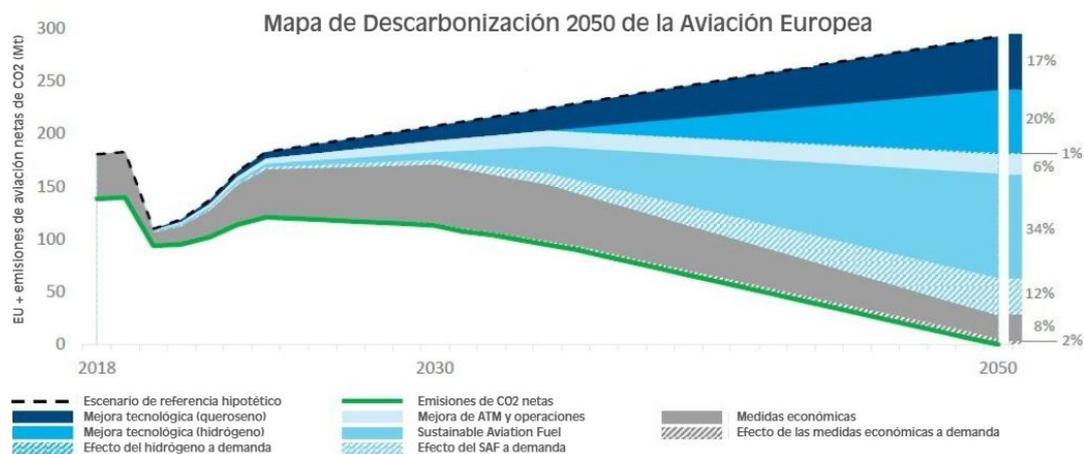


Figura 4.2: Mapa de Descarbonización 2050 de la Aviación Europea

4.2. Rol de los aeropuertos en la implementación del SAF

Los aeropuertos, que funcionan como enlaces entre los proveedores de combustible y las aerolíneas, juegan un rol crucial en la puesta en marcha del SAF, ya que funcionan como centros logísticos en la cadena de suministro. Este principio hace referencia a la función de los aeropuertos como lugares donde se guarda, reparte y administra el flujo de combustibles, asegurando que las aerolíneas puedan suministrarse de SAF de forma eficaz [11]. Los aeropuertos no solo simplifican la logística de almacenaje y reparto de combustible, sino que también pueden fomentar la transición hacia un suministro más sostenible a través de la implementación de tecnologías de vanguardia y la mejora de sus infraestructuras. Para simplificar este proceso de transición, diversos aeropuertos europeos han establecido consorcios, como TULIPS, STARGATE y ALIGHT, que se detallarán más adelante, que reciben financiación del programa Horizon 2020 de la Unión Europea. Estos consorcios buscan impulsar la cooperación entre aeropuertos, proveedores de combustible, aerolíneas y gobiernos, con la finalidad de crear infraestructuras más sostenibles, intercambiar conocimientos y fomentar la adopción de tecnologías ecológicas. Cada uno de estos consorcios juega un papel vital en el desarrollo de proyectos piloto, el estudio de mejores prácticas, y la creación de soluciones factibles para la distribución y aplicación

de SAF en aeropuertos.

- **Sistemas de Almacenamiento y Distribución:** los sistemas de almacenaje y reparto de SAF en los aeropuertos son un elemento esencial para una implementación exitosa de este combustible. En contraposición al queroseno convencional, el SAF debe satisfacer requerimientos de mezcla específicos, lo que conlleva la exigencia de instalaciones de almacenaje específicas y depósitos distintos para los distintos tipos de combustibles. En este contexto, los aeropuertos deben modernizar sus infraestructuras para incorporar sistemas adicionales de control de calidad, supervisión de las mezclas y dispositivos de mezcla automática que faciliten lograr las proporciones ideales de SAF y combustible fósil.
- **Colaboración entre Proveedores y Autoridades Regulatorias:** la colaboración garantiza que los aeropuertos se ajusten a los criterios de seguridad, calidad y sostenibilidad. También es necesario que los proveedores colaboren con las autoridades aeroportuarias para asegurar que los sistemas de almacenamiento y distribución se adhieran a las regulaciones locales e internacionales, reduciendo así los riesgos operativos y medioambientales. Este monitoreo implica la elaboración de planes de contingencia, procedimientos de seguridad y auditorías periódicas para garantizar la integridad del proceso de mezcla y distribución. Además, es responsabilidad de los proveedores asegurar que los aeropuertos dispongan del equipo requerido para el manejo seguro del SAF, lo que abarca desde personal formado hasta infraestructura diseñada para la recepción, almacenaje y distribución del combustible.

La función que los aeropuertos opten por desempeñar puede fluctuar e influir de manera distinta en las estrategias que apliquen. Principalmente, resalta la función de los aeropuertos como facilitadores o habilitadores. La relevancia de los facilitadores en equipos innovadores, demostrando que su presencia es fundamental para el triunfo de nuevas soluciones. Los aeropuertos, al desempeñar roles de facilitadores o habilitadores, pueden tener una implicación más proactiva en la cadena de suministro, respaldando y cooperando con otros participantes de la industria. Por su ubicación estratégica, los aeropuertos vinculan a los proveedores de combustible con las aerolíneas, ofreciendo las infraestructu-

ras y el espacio requeridos para que estos participantes se relacionen. Este rol activo tiene el potencial de agilizar la puesta en marcha del SAF en sus instalaciones. Además, los aeropuertos tienen la capacidad de brindar respaldo indirecto fomentando el SAF en sus terminales, instruyendo a los pasajeros acerca del SAF y procedimientos como el book & claim o el balance de masas, vinculando estos esfuerzos con sus metas de sostenibilidad y descarbonización. Ya que los viajeros suelen dedicar un periodo significativo en los aeropuertos, estos lugares pueden emplearse para exhibir recursos didácticos sobre el SAF o asuntos vinculados a la sostenibilidad en general. En cambio, los aeropuertos podrían adoptar funciones más dinámicas, tales como el lobbying y la protección de los intereses de la industria. El lobbying hace referencia a la acción de incidir en las decisiones políticas y regulatorias a través de la interacción directa con autoridades y legisladores, con la finalidad de impulsar regulaciones beneficiosas para el sector industrial. En el marco del SAF, esto conlleva la colaboración activa de los aeropuertos con las autoridades locales y nacionales para promover políticas que promuevan la implementación de combustibles sostenibles y otras innovaciones, como el hidrógeno y la electrificación. Además, la defensa conlleva salvaguardar y fomentar los intereses del sector mediante la cooperación con entidades gubernamentales y participantes esenciales, garantizando que las políticas públicas representen las necesidades y retos del sector aeronáutico en términos de sostenibilidad. Al asumir una actitud proactiva en estos puestos, los aeropuertos pueden incidir en la formulación de estímulos o políticas extra que apoyan a la industria y promuevan la puesta en marcha del SAF.

Mediante el lobbying y la defensa, los aeropuertos tienen la capacidad de no solo incidir en la elaboración de nuevas normativas, sino también posicionarse estratégicamente para agilizar la puesta en marcha de estrategias vinculadas al SAF en toda la industria, aportando de forma determinante a las metas de descarbonización del sector [10].

4.3. Desafíos y oportunidades para los aeropuertos en la transición al SAF

En la actualidad, la industria aeronáutica se encuentra con dudas e inquietudes respecto a la puesta en marcha del mandato ReFuelEU, con varios aspectos todavía sin resolver. Resaltan varios retos vinculados con el mandato, como la ausencia de claridad en los mecanismos de sostenibilidad que apoyan su puesta en marcha, incluyendo los sistemas de reclamación y equilibrio de masas. Estos sistemas no poseen un sistema centralizado que asegure la no duplicación de las emisiones o garantice una contabilidad apropiada de la disminución de las emisiones. Además, no se sabe si los aeropuertos desempeñarán un rol en la expedición de certificados de SAF o si esta responsabilidad será asumida por otras entidades, lo que incrementa la incertidumbre en el proceso de supervisión y certificación [10].

A. Desafíos en la Implementación del SAF

El paso hacia la puesta en marcha del SAF plantea múltiples retos para los aeropuertos, comenzando por la desigualdad entre la producción y el suministro. A pesar de que la necesidad de SAF continúa creciendo, su producción todavía es restringida, lo que suscita interrogantes acerca de su disponibilidad a largo plazo y la estabilidad de su abastecimiento. Esta circunstancia se intensifica debido a los altos costes de producción del SAF, que surgen de los procesos de conversión sofisticados y la utilización de materias primas específicas. Por lo tanto, el SAF tiene problemas para competir económicamente con el queroseno tradicional. Otro desafío importante es la exigencia de cambios en las infraestructuras aeroportuarias. Los sistemas de almacenamiento y distribución existentes necesitan ser modificados para administrar de forma segura el SAF, lo que podría implicar inversiones significativas en nuevas infraestructuras, tanques, bombas, sistemas de vigilancia y la formación del personal. Además, resulta fundamental incorporar tecnologías actuales para asegurar que las proporciones de SAF se adecuen a las regulaciones actuales. No solo son costosas estas modificaciones, sino que también demandan un tiempo y una planificación meticulosa. Por otro lado, otro reto significativo es la logística de distribu-

ción del SAF. La presencia geográfica de los productores de biocombustibles y la ausencia de una red de distribución robusta obstaculizan el traslado del SAF. Para los aeropuertos aislados de las redes de oleoductos, los gastos de transporte pueden ser considerablemente más elevados, generando obstáculos adicionales para su implementación. Las modificaciones en la infraestructura cuando se empleen al completo los combustibles electrónicos o SAF implicarán alteraciones significativas en los sistemas de almacenaje y distribución, lo que podría implicar inversiones considerables en infraestructura. Igualmente, hay dudas acerca de la transición de la flota aérea, dado que no todos los aviones cuentan con la capacidad de usar SAF al máximo, lo que genera retos organizativos y operativos para los aeropuertos.

B. Oportunidades en la Implementación del SAF

Pese a estos retos, el paso hacia el SAF ofrece posibilidades importantes para los aeropuertos que adopten una actitud proactiva. Los aeropuertos que se establezcan como referentes en sostenibilidad podrían aprovechar una mejora en su reputación pública, captando tanto a compañías aéreas dedicadas a disminuir su huella de carbono como a viajeros sensibilizados con la sostenibilidad. Este enfoque no solo fortalece la imagen empresarial del aeropuerto, sino que también les proporciona beneficios competitivos a largo plazo al ser reconocidos como precursores en la aplicación de tecnologías ecológicas. Además, la puesta en marcha del SAF proporciona a los aeropuertos una mayor adaptabilidad en sus operaciones. Al diversificar su abastecimiento de combustible y disminuir su dependencia de los combustibles fósiles, los aeropuertos tienen la capacidad de reducir los peligros vinculados a la inestabilidad de los precios del petróleo. Esta variedad también les facilita el cumplimiento con regulaciones ambientales cada vez más rigurosas, eludiendo posibles penalizaciones y aprovechando estímulos gubernamentales dirigidos a promover la sostenibilidad. Otra posibilidad significativa para los aeropuertos es su capacidad para transformarse en núcleos de energía del futuro. El SAF puede funcionar como una etapa intermedia para la implementación de otras tecnologías ecológicas, como el hidrógeno o los vuelos eléctricos. Al expandir su infraestructura y ajustarse a estos combustibles sostenibles, los aeropuertos no solo favorecen la descarbonización de la industria, sino

4.3. Desafíos y oportunidades para los aeropuertos en la transición al SAF31

que además se establecen como núcleos fundamentales en el ecosistema energético del transporte aéreo.

Innovación y Desarrollo Tecnológico en la Industria

5.1. Innovación en la cadena de suministro del SAF

La cadena de abastecimiento del Combustible para Aviación Sostenible (SAF) ha experimentado grandes innovaciones para enfrentar los desafíos técnicos, logísticos y medioambientales vinculados a su escalabilidad y eficacia. El SAF posee la capacidad de disminuir considerablemente las emisiones de carbono en la aviación, sin embargo, para su implementación a gran escala, resulta crucial perfeccionar todas las etapas de la cadena de suministro, desde la generación de materias primas hasta su distribución en los aeropuertos. En este escenario, se están creando nuevas tecnologías y métodos para potenciar la sostenibilidad, disminuir gastos y potenciar la competitividad del SAF frente a los combustibles fósiles.

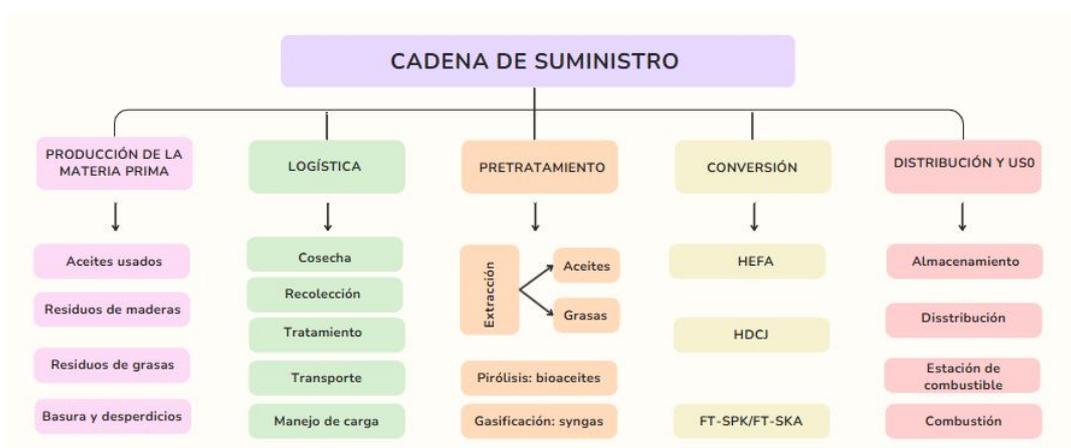


Figura 5.1: Cadena de suministro del SAF [13]

En cuanto a la producción de materias primas, se trata de la fase inicial de la cadena de abastecimiento del SAF, un sector que ha sido el epicentro de múltiples innovaciones. En la actualidad, se emplean aceites usados de cocina y otras grasas residuales mediante el proceso de hidroprocesamiento de ésteres y ácidos grasos (HEFA). No obstante, la escasa disponibilidad de estas materias primas ha motivado el estudio de fuentes alternativas, tales como los desechos lignocelulósicos y las microalgas.

- Residuos lignocelulósicos: Su origen en madera, desechos agrícolas y forestales los hace una alternativa atractiva por su abundancia y coste reducido. Además, la utilización de desechos lignocelulósicos previene la competencia con los cultivos de alimentos, lo que favorece una mayor sostenibilidad y posibilita un uso más eficaz de los recursos disponibles [14].
- Microalgas: Han cobrado importancia debido a su habilidad para absorber dióxido de carbono (CO₂) y su elevada productividad. Las microalgas poseen el beneficio de poder ser cultivadas en zonas no idóneas para la agricultura, como suelos marginales o incluso aguas residuales, lo que suprime la competencia por áreas de gran valor agrícola. Además, el avance en estas nuevas fuentes de biomasa no solo disminuye la necesidad de las materias primas convencionales, sino que también puede incrementar la eficacia en la captura de CO₂, fortaleciendo así la sostenibilidad de la producción de SAF [15].

En cuanto a las tecnologías de conversión de biomasa a combustibles líquidos son un área crítica de innovación dentro de la cadena de suministro del SAF. Actualmente, existen seis rutas de producción certificadas bajo la norma ASTM D7566, como ya se especificaron en apartados anteriores. Por otro lado, se deben recalcar las innovaciones en las conversiones. Las últimas innovaciones en reactores sofisticados y catalizadores han posibilitado incrementar la eficacia de los procesos de transformación de biomasa a SAF, lo que ha disminuido considerablemente los gastos operacionales y ha potenciado la sostenibilidad. La incorporación de materias primas renovables en refinerías convencionales también representa una innovación crucial que facilita la disminución de las inversiones en infraestructura específica para SAF. Otro progreso significativo es la implementación

de procesos termoquímicos sofisticados, que facilitan la transformación del CO₂ y el agua en combustibles a través de energía solar o energía renovable, lo que genera nuevas oportunidades para la fabricación de SAF sin requerir grandes cantidades de biomasa [15].

Además, el almacenamiento y distribución juegan un papel muy importante en la cadena de suministro del SAF. Son etapas cruciales en la cadena de abastecimiento del SAF, dado que el combustible debe estar accesible en los aeropuertos y adherirse a estrictas regulaciones de calidad antes de ser utilizado en vuelos comerciales. Uno de los mayores beneficios del SAF es su capacidad como combustible "drop-in", lo que implica que puede combinarse con queroseno tradicional y emplearse en la infraestructura de almacenamiento y distribución ya existente, sin requerir ajustes [14].

- Infraestructuras descentralizadas: Los avances en el almacenamiento abarcan la creación de infraestructuras descentralizadas, que facilitan el almacenamiento de SAF en lugares estratégicos próximos a los aeropuertos, mejorando las rutas de distribución y disminuyendo los gastos logísticos. Además, se están estudiando sistemas avanzados de almacenamiento y sistemas inteligentes que aseguran la calidad del combustible durante su traslado.
- Distribución eficiente: Se puede incorporar la distribución del SAF en la infraestructura de oleoductos ya existentes para el traslado de combustibles fósiles, lo que facilita la disminución de costes y optimiza la logística. Esta táctica es particularmente factible en áreas con acceso restringido a las fábricas de producción de SAF, lo que promueve la expansión geográfica del combustible sostenible.

Por último, se debe comentar la transformación digital y la mejora logística. La digitalización y la implementación de tecnologías avanzadas, como blockchain, que proporciona una mayor confianza en los datos, evitando fraudes y asegurando la integridad de la información, están revolucionando la cadena de abastecimiento del SAF al incrementar la capacidad de seguimiento y asegurar la transparencia en cada fase del proceso. Esto garantiza el cumplimiento de los criterios de sostenibilidad y simplifica la comprobación de las disminuciones en las emisiones de carbono vinculadas al empleo de SAF. Además, la mejora logística a través de instrumentos digitales está contribuyendo a incrementar

la eficacia en la distribución, disminuyendo los plazos de entrega y los gastos operacionales. La incorporación de sistemas digitales para la administración de inventarios y el transporte favorece una coordinación más efectiva entre los participantes de la cadena de suministro, incrementando de esta manera la disponibilidad del SAF a escala mundial (X. costes).



Figura 5.2: Tecnología Blockchain

5.2. Tecnologías emergentes y potencial de SAF de nueva generación

El cambio hacia un sector aeronáutico más sostenible ha promovido el surgimiento de nuevas tecnologías que facilitan la fabricación de combustibles de aviación sostenibles (SAF) con una reducción significativa del impacto ambiental. Dentro de estas tecnologías en auge, sobresalen dos avances fundamentales que se están estudiando y creando para la fabricación de SAF: Power-to-Liquid (PtL) y Sun-to-Liquid (StL). Las dos tecnologías tienen el propósito común de emplear recursos energéticos renovables para la generación de combustibles líquidos sintéticos, aunque varían en los procedimientos de conversión y las fuentes de energía que se utilizan. El método Power-to-Liquid (PtL) se fundamenta en

la utilización de energía eléctrica, principalmente de fuentes renovables, para transformar el dióxido de carbono (CO₂) acumulado en combustibles líquidos. En contraposición, la tecnología Sun-to-Liquid (StL) investiga el potencial de la energía solar concentrada como principal recurso energético para la elaboración de combustibles. Estas dos tecnologías constituyen un avance revolucionario en la fabricación de SAF de nueva generación, proporcionando una opción factible frente a los combustibles fósiles y aportando de manera significativa a la descarbonización del sector aeronáutico [16].

A. Power-to-liquid (PtL)

La tecnología Power-to-Liquid (PtL) emerge como uno de los caminos más alentadores para la fabricación de combustibles de aviación sostenibles (SAF), especialmente en el marco de la transición energética y la exigencia de disminuir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el sector aeronáutico. El procedimiento de PtL fusiona el uso de energía renovable, CO₂ recolectado del aire y agua para la síntesis de combustibles líquidos capaces de reemplazar directamente al queroseno tradicional, evitando la necesidad de alterar los motores o la infraestructura existente. El principio básico del proceso PtL incluye tres fases fundamentales [17]:

1. Producción de hidrógeno: Mediante el uso de energía renovable (como la eólica o solar), el agua se degrada a través de un proceso de electrólisis para producir hidrógeno (H₂). Varios tipos de electrolizadores están disponibles para su uso, tales como el electrolizador alcalino (AEL), el electrolizador de membrana para el intercambio de protones (PEM) o el electrolizador de óxido sólido (SOEC). Este último resulta especialmente eficaz al fusionarse con el calor producido por las fases subsiguientes del proceso, disminuyendo el uso de energía [18].
2. Captura de CO₂: Se puede extraer directamente del aire el dióxido de carbono requerido para el procedimiento a través de tecnologías de captura directa de aire (DAC). Este CO₂ se transforma en un elemento esencial del gas de producción que, en combinación con el hidrógeno, constituye el fundamento para la generación de hidrocarburos. La captura directa de aire posibilita situar las plantas de PtL en sitios

donde no existen fuentes de CO₂, lo que incrementa la versatilidad del proceso [19].

- En esta fase, tanto el hidrógeno como el CO₂ se transforman en hidrocarburos a través de dos vías fundamentales: la síntesis Fischer-Tropsch (FT) y la vía de metanol a jet (MtJ) [20]. El método Fischer-Tropsch es el más sofisticado y ya cuenta con la certificación de ASTM para la fabricación de SAF, en cambio, el método MtJ todavía está en proceso de certificación. Ambos procedimientos posibilitan la producción de combustibles líquidos de calidad aeronáutica, aunque la síntesis FT resulta más eficaz en la generación de queroseno.

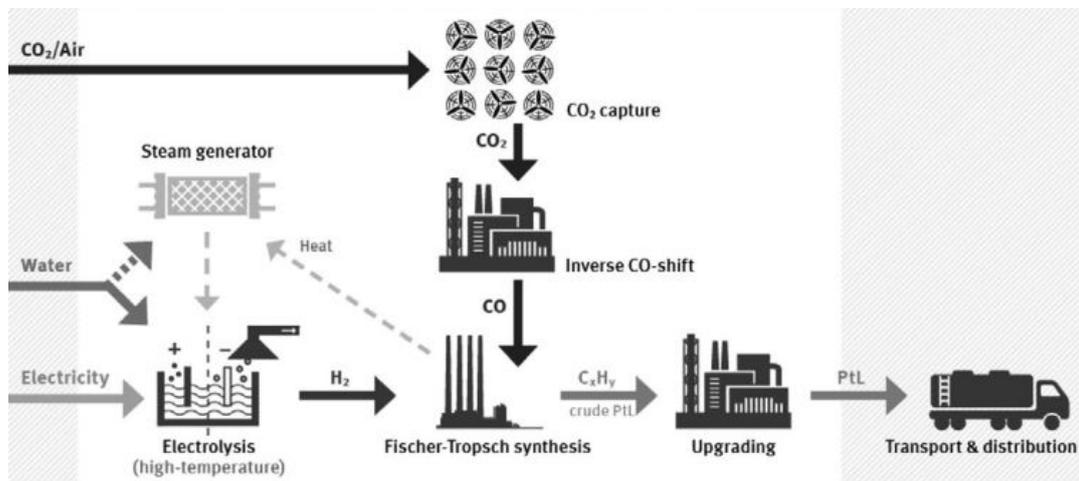


Figura 5.3: Ciclo Fischer-Tropsch para la producción de PtL [17]

La tecnología PtL se distingue por su habilidad para disminuir considerablemente las emisiones de CO₂ durante todo su ciclo de vida. Una investigación reciente indica que la capacidad para disminuir los GEI durante el ciclo de vida completo del SAF generado por PtL es significativamente mayor que la de otros combustibles basados en biomasa. Se calcula que los combustibles PtL tienen la capacidad de disminuir las emisiones hasta un 95 % respecto a los combustibles fósiles tradicionales, siempre y cuando se emplee electricidad renovable y CO₂ capturado [17]. Adicionalmente, uno de los mayores beneficios de PtL es su habilidad para incorporarse en el sistema de energía renovable. La tecnología tiene la capacidad de utilizar el sobrante de energía renovable en periodos de demanda reducida, funcionando como una alternativa de almacenamiento de energía mediante la

transformación de la electricidad en combustibles líquidos de alta densidad energética [18]. Pese a que el potencial de la tecnología PtL es enorme, todavía se topa con desafíos técnicos y financieros significativos. Uno de los retos más significativos es el elevado coste de producción del SAF a través de PtL, principalmente a causa de los altos costes energéticos vinculados a la electrólisis y la captura de CO₂. Las investigaciones calculan que el coste ponderado de producción de SAF a través de PtL es en la actualidad tres veces superior al de los combustibles fósiles convencionales [55]. No obstante, se anticipa que los gastos disminuirán considerablemente conforme se incremente la escala de producción y se mejoren las tecnologías, en particular los electrolizadores. Otro reto es la demanda de energía renovable en grandes volúmenes. Para la producción masiva de SAF, las plantas de PtL necesitan tener acceso a fuentes de energía renovable asequibles, como la energía eólica o solar.

Pese a los obstáculos, existen proyectos piloto en curso que intentan evidenciar la factibilidad comercial de la tecnología PtL [19]. En Europa, se han establecido estrategias para lograr una producción anual de 200.000 toneladas de SAF a través de PtL para 2030, lo que supone un avance significativo hacia la descarbonización del sector [20].

B. Sun-to-liquid (StL)

La tecnología Sun-to-Liquid (StL) representa una alternativa en auge que emplea la energía solar para generar combustibles de aviación sostenibles (SAF) a partir de agua y dióxido de carbono (CO₂). Este procedimiento fusiona la radiación solar concentrada con sofisticados ciclos termoquímicos para producir combustibles líquidos, tales como el queroseno, con una elevada eficiencia energética y una huella de carbono considerablemente inferior en relación a los combustibles fósiles. A diferencia de los biocombustibles, que dependen de la presencia de biomasa, la energía solar es escalable a largo plazo y puede cubrir una considerable proporción de la demanda mundial de combustibles sostenibles [17]. Debido a sus extensas vidas de diseño y funcionamiento, la aviación continuará dependiendo de hidrocarburos líquidos durante décadas. El empleo de energía solar para la producción de combustibles líquidos es una de las tecnologías más alentadoras para cubrir esa demanda a gran escala, particularmente en el contexto de la transición hacia un mo-

delo energético más sostenible [20]. El procedimiento Sun-to-Liquid incluye diversas fases, enfocadas en la transformación termoquímica de CO_2 y agua en gas de síntesis (syngas), que luego se transforma en combustibles líquidos a través de la síntesis Fischer-Tropsch (FT). A continuación, se detallan las fases clave de este procedimiento:

1. Concentración de la energía solar: Los rayos solares se concentran a través de un campo de heliostatos, que son espejos que rastrean la trayectoria del sol y redirigen los rayos solares hacia un reactor solar situado en la parte superior de una torre. Esta concentración posibilita llegar a temperaturas que superan los 1500°C , requeridas para llevar a cabo las reacciones químicas.



Figura 5.4: Espejos heliostáticos IMDEA [21]

2. Transformación termoquímica: En el reactor solar, se emplea un ciclo redox fundamentado en metales, como el óxido de cerio (CeO_2), para separar el agua (H_2O) y el dióxido de carbono (CO_2) en hidrógeno (H_2) y monóxido de carbono (CO). Este ciclo redox se compone de dos etapas fundamentales: la disminución del óxido metálico a altas temperaturas y su oxidación a través de la adición de H_2O y CO_2 ,

generando así gas de síntesis. Esta combinación de hidrógeno y monóxido de carbono constituye el fundamento para la generación de hidrocarburos en estado líquido [18].

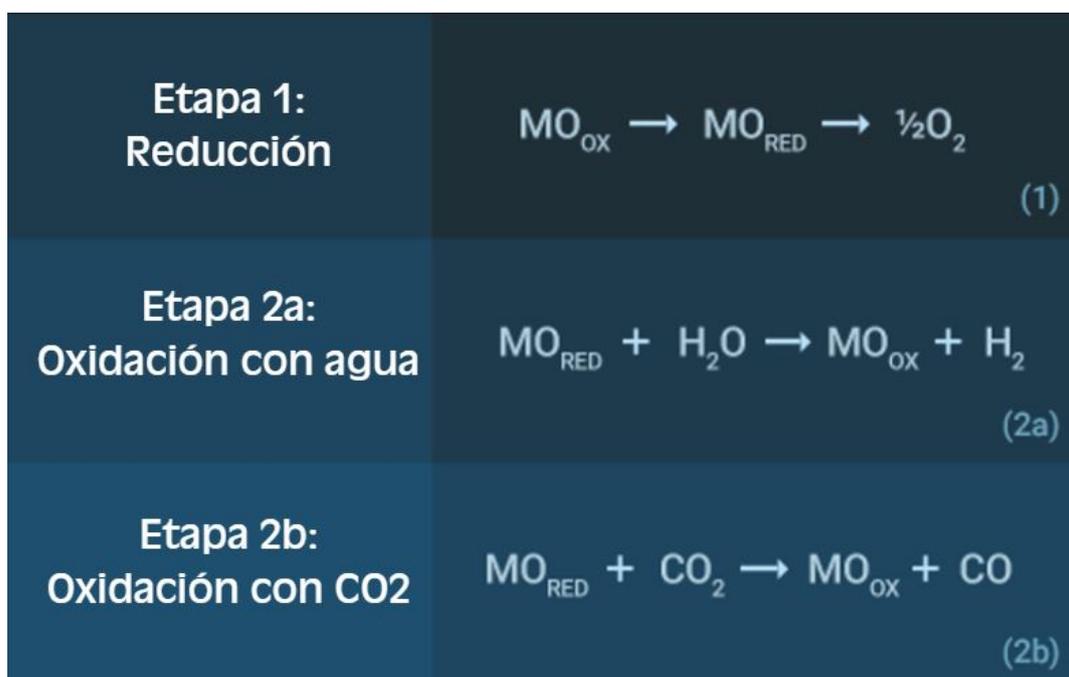


Figura 5.5: Etapas de la transformación termoquímica [21]

3. Síntesis Fischer-Tropsch: El gas producido a partir de la síntesis es comprimido y posteriormente procesado a través del método Fischer-Tropsch, que transforma el gas en hidrocarburos líquidos como queroseno, gasolina o diésel, ya acreditados para su empleo en la aviación. Este combustible generado es drop-in, lo que implica que puede emplearse en motores de aeronaves tradicionales sin requerir modificaciones.

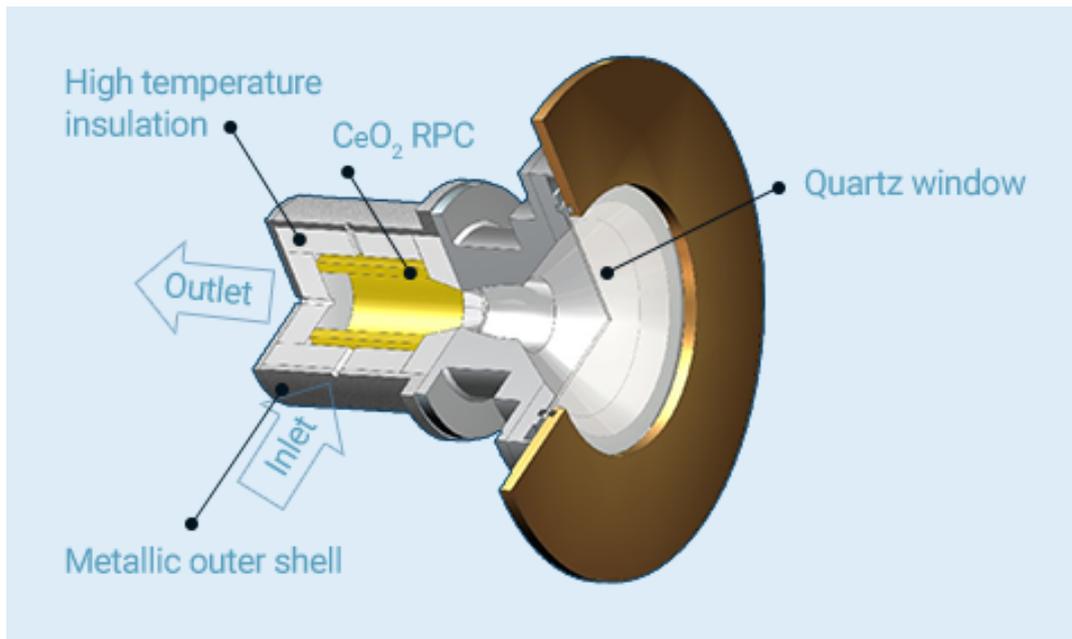


Figura 5.6: Configuración del reactor solar [21]

La tecnología Sun-to-Liquid proporciona múltiples avances esenciales que potencian su potencial como una de las rutas más alentadoras para la producción de SAF:

- Conversión elevada de solar a syngas: Uno de los éxitos más destacados de esta tecnología es la capacidad de lograr eficiencias de conversión que superen el 30% en la fase solar-termoquímica, debido a las condiciones propicias a altas temperaturas y al uso eficaz del espectro completo de la radiación solar. Esto sobrepasa significativamente las eficiencias de conversión detectadas en las tecnologías solares tradicionales.
- Materiales avanzados: El reactor solar emplea una estructura cerámica porosa fabricada con óxido de cerio (CeO_2), que funciona como elemento redox en el ciclo termoquímico. Este material ha evidenciado una elevada conductividad de iones de oxígeno, estabilidad en ciclos recurrentes y una magnífica capacidad para transmitir calor, lo que lo hace un elemento esencial para la eficiencia y factibilidad del proceso.
- Modularidad y escalabilidad: La estructura del sistema de concentración solar y el reactor termoquímico es modular, facilitando su capacidad de expansión desde

instalaciones piloto hasta grandes infraestructuras comerciales. Esta adaptabilidad es esencial para adaptar la capacidad productiva a la necesidad de combustibles sostenibles en diversas regiones y sectores.

Entre los desafíos se encuentran los costes iniciales y la intermitencia solar. El avance y puesta en marcha de esta tecnología de gran envergadura demanda significativas inversiones iniciales en infraestructuras de concentración solar y reactores. Pese a los progresos en eficiencia, los gastos de instalación y funcionamiento de las centrales solares de alta temperatura continúan siendo un obstáculo para la competitividad económica de los combustibles solares frente a los combustibles fósiles [56]. Además, dado que las plantas Sun-to-Liquid dependen de la radiación solar, la producción de combustibles se ve afectada por la intermitencia del recurso solar. Esto significa que, para garantizar un funcionamiento constante, se requiere fusionar esta tecnología con sistemas de almacenamiento de energía o plantas híbridas que incorporen otras fuentes de energía. El proyecto SUN-to-LIQUID, financiado por la Unión Europea y Suiza, ha logrado demostrar con éxito la producción de queroseno solar a partir de H₂O y CO₂ en condiciones de campo real. Se ha construido una planta solar experimental en el IMDEA Energy Institute en Madrid, que utiliza un campo de 169 heliostatos para concentrar la radiación solar en un reactor ubicado en una torre de 15 metros. Este proyecto representa un avance crucial hacia la industrialización de la producción de combustibles solares [57]. Además, la tecnología Sun-to-Liquid no compite con la producción de alimentos, ya que utiliza CO₂ y agua como materias primas, y tiene el potencial de reducir las emisiones netas de CO₂ en más del 90 % en comparación con los combustibles fósiles convencionales [17].

5.3. Nuevos modelos de colaboración entre aerolíneas, proveedores, aeropuertos y gobiernos

La puesta en marcha de Combustibles de Aviación Sostenible (SAF) demanda un enfoque cooperativo entre los protagonistas fundamentales de la industria aeronáutica: las aerolíneas, los aeropuertos y los gobiernos. Esta cooperación es crucial para vencer

los desafíos tecnológicos, normativos y económicos que restringen la implementación a gran escala del SAF. Para lograr las metas de descarbonización en el sector, es necesario que estos participantes colaboren en el desarrollo de infraestructura, la formulación de políticas y la financiación de tecnologías emergentes. Una de las áreas de colaboración más cruciales es la creación de políticas y normativas que fomenten la producción y el empleo de SAF. Los gobiernos desempeñan un rol vital al definir marcos regulatorios que requieran a las aerolíneas una adopción más amplia de combustibles sostenibles. Modelos de esto son iniciativas como la Iniciativa Europea de Refuel Aviation y el programa Clean Skies for Tomorrow del Foro Económico Mundial, que definen objetivos precisos para incrementar la utilización de SAF en la aviación comercial [23] [24] Estos programas no solo establecen objetivos obligatorios de mezcla de SAF, sino que también ofrecen estímulos económicos como subsidios, deducciones fiscales y préstamos de carbono para incentivar la participación de las aerolíneas y aeropuertos. Es fundamental el respaldo del gobierno, a través de préstamos fiscales y subvenciones, para incentivar la inversión en infraestructura de producción de SAF, dado que la producción en masa demanda instalaciones altamente especializadas con un coste inicial considerable [25]. Además, el papel de los gobiernos es vital al propiciar el establecimiento de un ambiente financiero propicio para la inversión en SAF a través de incentivos tributarios, subvenciones y préstamos comerciales que fomenten la edificación de instalaciones de producción de SAF. Por otro lado, las aerolíneas pueden obtener beneficios de préstamos y bonos ecológicos, lo que les facilitaría financiar proyectos de SAF y de esta manera alinearse con los objetivos de sostenibilidad requeridos a escala global.

La acción regulatoria también es esencial para la armonización de las regulaciones a escala mundial. La ausencia de un estándar mundial unificado para el SAF puede provocar dudas en el sector, y la cooperación entre las entidades de aviación civil, como la ICAO y la IATA, resulta crucial para definir normas técnicas y ambientales homogéneas que promuevan el comercio y empleo del SAF a nivel global [29].

Además, los aeropuertos desempeñan un papel crucial en la puesta en marcha de SAF, funcionando como centros logísticos esenciales para su almacenaje y distribución. Además de proporcionar la infraestructura necesaria para guardar y proveer SAF, los ae-

ropuertos promueven la cooperación entre los proveedores de combustible y las compañías aéreas. Esto implica la formación de asociaciones estratégicas que faciliten la distribución de los gastos de infraestructura y la disminución de los riesgos económicos. Es crucial desarrollar infraestructuras especializadas para el almacenamiento de SAF, con el fin de asegurar que el combustible satisfaga los estándares de calidad antes de ser empleado en vuelos comerciales. Los aeropuertos deben destinar recursos a tecnologías de almacenamiento de vanguardia, tales como tanques inteligentes que supervisen la calidad del SAF en tiempo real, y deben cooperar con los proveedores de combustible para asegurar un abastecimiento continuo y seguro. Se pueden apreciar ejemplos de estas innovaciones en aeropuertos como Oslo Gardermoen, que ha establecido una infraestructura de almacenaje y distribución que garantiza el abastecimiento constante de SAF [27]. La creación de alianzas público-privadas también emerge como una táctica efectiva para promover la implementación de SAF en los aeropuertos. Estos consorcios posibilitan la distribución de riesgos y ventajas entre los diferentes participantes y simplifican la financiación de infraestructuras compartidas. Un caso ilustrativo es la implementación de modelos de financiación innovadores, como el "Book-and-Claim", donde se autoriza a las aerolíneas a obtener SAF, sin importar si el aeropuerto en el que opera tiene la capacidad de suministrarlo, promoviendo de esta manera la adopción a escala mundial [28]. Por último, la innovación tecnológica en el sector de la aviación sostenible se basa en una estrecha cooperación entre la industria y las autoridades gubernamentales. Es esencial invertir en investigación y desarrollo (I+D) en tecnologías de vanguardia como el SAF de segunda generación, el hidrógeno y la aviación eléctrica para lograr las metas de cero emisiones netas. Es necesario que los gobiernos, las aerolíneas y los aeropuertos colaboren para financiar proyectos piloto que verifiquen la factibilidad técnica y financiera de estas tecnologías emergentes [25]. Un caso evidente de este modelo de cooperación es el programa European Union Horizon 2020, que ha invertido recursos considerables en la investigación de nuevas variantes de SAF y otros combustibles sostenibles. Este programa promueve la colaboración entre universidades, centros de estudio, corporaciones privadas y gobiernos para crear soluciones revolucionarias que sean viables para su implementación a gran escala [26].

Beneficios y Retos para los Actores de la Industria Aeronáutica

6.1. Beneficios económicos, sociales y ambientales de la adopción del SAF

La implementación del Combustible de Aviación Sostenible (SAF) constituye un cambio relevante en el sector aeronáutico, con repercusiones beneficiosas en diferentes aspectos económicos, sociales y medioambientales. El SAF no solo enfrenta los retos vinculados a la sostenibilidad de la aviación, sino que también crea oportunidades en áreas fundamentales, aportando a un modelo de desarrollo más justo y responsable.

En primer lugar, se deben comentar los beneficios económicos. El SAF proporciona significativas ventajas financieras, que alcanzan a toda la cadena de valor de la aviación y más allá. Una de las cualidades más sobresalientes es su habilidad para disminuir la dependencia de los combustibles fósiles foráneos, disminuyendo de esta manera la inestabilidad vinculada a los costes del petróleo en el mercado global. Por ejemplo, naciones como Estados Unidos y España están creando infraestructuras para la fabricación de SAF utilizando recursos locales, como desechos agrícolas y aceites utilizados, reforzando así su independencia energética [30]. El beneficio económico del SAF no se restringe a la industria aeronáutica; la fabricación y distribución de este combustible fomentan la generación de puestos de trabajo de alta calificación en campos como la investigación científica, la ingeniería química y el progreso en biotecnología. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA), la puesta en marcha mundial de SAF podría crear cientos de miles de puestos de trabajo, tanto directos como indirectos, para el año 2030. Compa-

ñías como Neste y Repsol han informado un incremento constante en su personal debido a la ampliación de sus operaciones de SAF [10]. Además, las naciones líderes en la implementación del SAF pueden aprovechar incentivos tributarios y subvenciones vinculadas a políticas climáticas, como las implementadas en el contexto del Acuerdo Verde Europeo. Estas acciones no solo potencian la competitividad del SAF en comparación con el queroseno tradicional, sino que también atraen inversiones internacionales en tecnologías ecológicas [31].



Figura 6.1: Cadena de Valor de la producción del SAF [30]

Por otro lado, la repercusión social del SAF es también relevante, particularmente en comunidades rurales y zonas de producción agraria. La utilización de materias primas como desechos agrícolas y forestales promueve el crecimiento económico en estas zonas al crear nuevas vías de ingresos para los agricultores. Por ejemplo, en Brasil, el programa RenovaBio promueve la utilización de desechos de caña de azúcar y otros residuos de la agricultura para la elaboración de biocombustibles, entre ellos el SAF [32]. No solo diversifica las fuentes de ingresos en la zona rural, sino que también disminuye la dependencia de monocultivos, fomentando una utilización más sostenible de la tierra. Otra ventaja social significativa es el incremento en la calidad del aire en las comunidades próximas a los aeropuertos. El SAF produce menos emisiones de partículas ultrafinas y óxidos de azufre en relación al queroseno tradicional, disminuyendo de esta manera los riesgos vin-

6.1. Beneficios económicos, sociales y ambientales de la adopción del SAF 49

culados a enfermedades respiratorias en grupos vulnerables. Por ejemplo, en el aeropuerto de Oslo Gardermoen, que ha instaurado la utilización constante de SAF, se ha registrado una reducción en los niveles de polución atmosférica en sus proximidades, lo que favorece una mejor calidad de vida para las comunidades aledañas [10]. El SAF también juega un rol fundamental en la concienciación de los consumidores acerca de un modelo de aviación más sostenible. Aerolíneas tales como KLM y Lufthansa han iniciado iniciativas para educar a sus pasajeros acerca de las ventajas del SAF y su efecto en la disminución de la huella de carbono de cada vuelo [32]. Estas acciones no solo instruyen a la audiencia, sino que también propician una transformación cultural que sitúa a la aviación como una industria dedicada a la sostenibilidad.

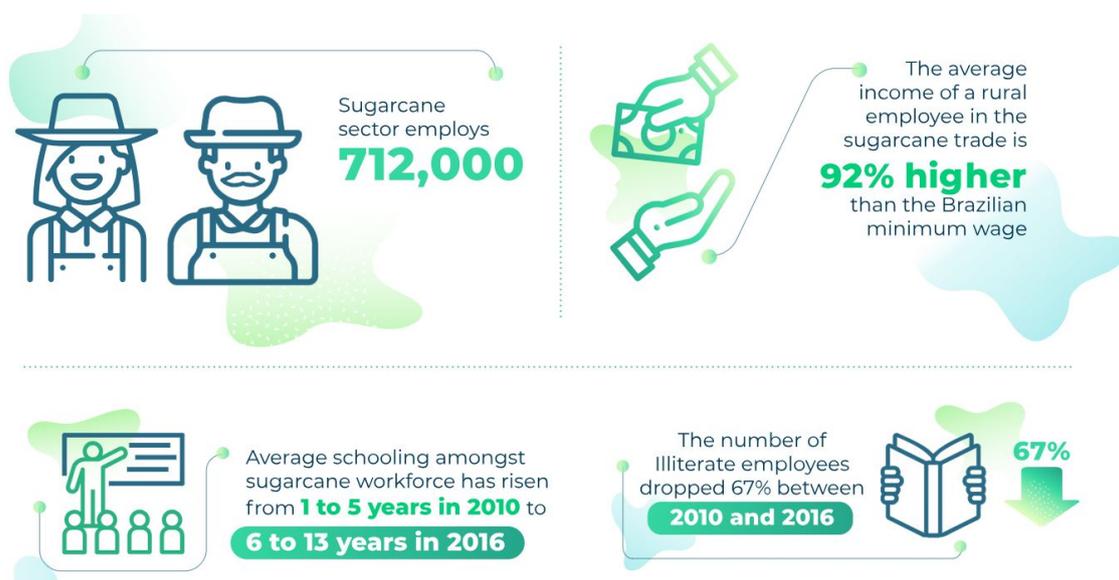


Figura 6.2: Beneficios sociales del programa RenovaBio [33]

Desde un punto de vista ecológico, el SAF se convierte en un instrumento crucial para atenuar el efecto de la aviación en el cambio climático. Según las materias primas y procedimientos empleados, el SAF tiene la capacidad de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 80 % durante todo su ciclo de vida, en comparación con los combustibles fósiles [30]. El SAF también favorece la economía circular al utilizar desechos y subproductos industriales que, de otra forma, serían eliminados. Tecnologías como Alcohol-to-Jet (ATJ) facilitan la transformación de desechos agrícolas en combustibles

de excelente calidad, en cambio, técnicas más sofisticadas como Power-to-Liquid (PtL) emplean CO₂ recolectado directamente de la atmósfera para la síntesis de combustibles renovables. Un caso ilustrativo es el proyecto Sun-to-Liquid, el cual ha evidenciado la factibilidad de fabricar SAF utilizando energía solar y CO₂, consiguiendo una disminución neta de emisiones cercana al 90 % [10]. Adicionalmente, la aplicación de materias primas sostenibles en la fabricación de SAF reduce el efecto en la biodiversidad. En contraposición a los biocombustibles convencionales, el SAF puede ser elaborado con materias primas no alimentarias, previniendo la transformación de ecosistemas naturales en terrenos de cultivo. Por ejemplo, la utilización de microalgas y desechos lignocelulósicos como recursos primordiales no solo resguarda los ecosistemas actuales, sino que también disminuye la competencia por los recursos necesarios para la producción alimentaria [31]. La implementación del SAF supone una ocasión inigualable para convertir la aviación en un modelo más sostenible y responsable. No solo sus ventajas económicas, sociales y medioambientales ayudan a mitigar el cambio climático, sino que también robustecen las comunidades locales y diversifican las economías. No obstante, para maximizar estos beneficios será imprescindible vencer obstáculos regulatorios y tecnológicos, aspecto que se examinará en la siguiente sección.

6.2. Desafíos regulatorios y tecnológicos en la expansión del SAF

El desarrollo de la utilización de Combustible de Aviación Sostenible (SAF) se topa con una serie de barreras regulatorias y tecnológicas que impactan a los participantes en su cadena de abastecimiento. Estos retos necesitan ser tratados de forma holística para facilitar una adopción escalable y eficaz en el sector aeronáutico a nivel español y mundial.

Uno de los desafíos regulatorios más significativos vinculados al SAF reside en la ausencia de armonización de las regulaciones a escala global. En la actualidad, distintos países establecen normas variadas en la definición de SAF, además de los criterios técnicos y de sostenibilidad para su fabricación y distribución. Esto complica la implementación masiva y genera obstáculos para las aerolíneas que operan en diversas jurisdicciones [52].

En Europa, proyectos como ReFuelEU Aviation aspiran a crear un esquema uniforme para la incorporación gradual de SAF en los combustibles empleados por las aeronaves. No obstante, la obligatoriedad de su utilización y los altos niveles de mezcla fijados hasta el 70 % en 2050 suscitan inquietudes acerca de la capacidad de abastecimiento de SAF y su repercusión económica en las operaciones. Además, las conversaciones con protagonistas de la industria muestran retos vinculados con la rastreabilidad del SAF y la confirmación de su procedencia sostenible [51]. La implementación de un sólido sistema de equilibrio de masas, que asegure que las propiedades de sostenibilidad del combustible que entra en el sistema de distribución se conserven en el lugar de uso, se destaca como una prioridad esencial para las autoridades reguladoras y las compañías.

En términos tecnológicos, uno de los desafíos más importantes es la capacidad de escalabilidad de las tecnologías de producción de SAF. Las rutas actuales, tales como Esters Hidroprocesados y Ácidos Grasos (HEFA), Fischer-Tropsch y Alcohol-to-Jet (ATJ), tienen restricciones en términos de su capacidad de producción y los costes vinculados. El abastecimiento de materias primas sostenibles también representa un reto. A pesar de que teóricamente hay varias fuentes, como desechos agrícolas, aceites utilizados y cultivos no alimentarios, la competencia con otros sectores por estas materias primas puede restringir la disponibilidad para la producción de SAF. Otro factor crucial es la adaptación de la infraestructura de los aeropuertos[51]. A pesar de que el SAF puede emplearse sin requerir alteraciones importantes en los motores de aviación o las redes de distribución, la implementación de tecnologías en auge como el hidrógeno o la tecnología Power-to-Liquid (PtL) podría demandar inversiones significativas en infraestructuras particulares. La factibilidad financiera del SAF es otro impedimento tecnológico resaltante. De acuerdo con los especialistas consultados, el coste del SAF continúa siendo considerablemente mayor al del queroseno fósil, lo que restringe su uso en gran escala. Este elemento está íntimamente vinculado con la curva de aprendizaje en la fabricación de SAF, la eficacia de los procedimientos y la presencia de estímulos financieros para impulsar su evolución [52].

Es esencial vencer los retos regulatorios y tecnológicos mencionados para fortalecer el SAF como una alternativa factible en la transición hacia una aviación más sosteni-

52 Capítulo 6. Beneficios y Retos para los Actores de la Industria Aeronáutica

ble. La colaboración entre gobiernos, la industria y la comunidad científica será esencial para establecer políticas conjuntas, optimizar las tecnologías productivas y garantizar la competitividad económica del SAF en el mercado mundial de energía.

Consultas y entrevistas a los principales Stakeholders

Dentro del marco de la sostenibilidad y la transición a modelos energéticos más responsables, el estudio de los stakeholders se transforma en un instrumento esencial para entender el entramado de participantes y su función en la puesta en marcha de políticas y tecnologías innovadoras, como la utilización de combustibles de aviación sostenibles (SAF). Esta visión no solo facilita la identificación de los actores principales, sino también la valoración de sus intereses, capacidad de influencia y capacidad para aportar o oponerse al cambio. Considerando la naturaleza multidimensional del SAF, que incluye elementos tecnológicos, económicos, regulatorios y ambientales, la cooperación eficaz entre los diferentes participantes es esencial para vencer los obstáculos presentes [58]. Este apartado se enfocará en examinar a estos protagonistas esenciales, su función en la promoción del SAF y las dinámicas de cooperación requeridas para impulsar su implementación. Mediante una perspectiva holística, se pretende entender cómo los intereses y aspiraciones de los interesados pueden armonizarse para agilizar la transición hacia una aviación más sostenible y competitiva, cimentando de esta manera una base firme para estrategias futuras que promuevan el crecimiento del sector.

7.1. Entidad Reguladora AESA/DGAC

La Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA), en alianza con SENASA, juega un rol esencial en la normativa y fomento de los combustibles de aviación sostenibles (SAF) en España, dentro de las políticas de sostenibilidad europeas. Uno de los instrumentos clave para la descarbonización del sector aéreo es la normativa ReFuelEU Aviation, la cual

define un incremento gradual en el abastecimiento de SAF. Desde 2025, los proveedores deben incluir un 2% de SAF en el abastecimiento total de combustible para aviones, un porcentaje que se incrementará hasta un 70% en 2050. El propósito de este marco regulatorio es asegurar un cambio organizado hacia combustibles más sostenibles y ya ha motivado a los proveedores a incrementar su capacidad de producción.

El Ministerio de Transportes es el ente encargado de vigilar el cumplimiento de las responsabilidades asociadas a los operadores de aeronaves y los administradores de aeropuertos. En cambio, el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico monitorea las responsabilidades de los proveedores de combustible. AESA participa en la valoración técnica de las ventajas vinculadas a la utilización de SAF, garantizando que estas se concedan de acuerdo a las regulaciones europeas, como la Directiva 2003/87 (EU-ETS), y a la legislación nacional pertinente.

Desde una perspectiva técnica, el SAF ofrece beneficios considerables al no necesitar alteraciones en las aeronaves ni en las infraestructuras de distribución ya existentes. Esto posibilita su incorporación directa a los sistemas existentes, simplificando su puesta en marcha en los aeropuertos. No obstante, el reto principal continúa siendo económico. Hay una disparidad significativa en los precios entre el SAF y el queroseno fósil, impactando directamente en la competitividad de este último. Pese a que el EU-ETS ofrece incentivos financieros, como la eliminación de las emisiones de carbono vinculadas al empleo de SAF, este contraste continúa siendo un obstáculo para su implementación a gran escala.

Respecto a la seguimiento y control del SAF, se emplea un sistema de equilibrio de masas en la red de oleoductos administrada por Exolum. Este sistema garantiza que la cantidad de SAF que entra en la red es igual a la que se extrae, aunque no facilita el seguimiento de cada molécula. En Europa, este método está autorizado y se ajusta a los estándares internacionales de sostenibilidad, como los establecidos por ISCC y RSB, además de la Directiva de Energías Renovables.

Otra disposición sobresaliente del reglamento ReFuelEU es la regulación antitanke-ring, creada para prevenir que las compañías aéreas llenen sus tanques en naciones no reguladas, afectando los objetivos de sostenibilidad europeos. Esta normativa obliga a los operadores aéreos a cargar al menos el 90% del combustible necesario para el vuelo en

aeropuertos de la Unión Europea.

España está en una situación ventajosa para encabezar la producción de SAF, gracias a la existencia de materias primas y condiciones meteorológicas propicias. No obstante, para aprovechar al máximo este potencial, se deben construir nuevas infraestructuras, como refinerías especializadas, y promover la inversión a través de mecanismos de financiación innovadores, que incluyan recursos nacionales e europeos.

Adicionalmente, se están investigando tácticas para asegurar la competitividad del SAF en el mercado internacional. Esto abarca tanto la disminución de los gastos de producción, a través de progresos tecnológicos y economías de escala, como un potencial incremento en los coste de los combustibles fósiles en Europa.

Finalmente, AESA y SENASA están trabajando en conjunto en proyectos internacionales con el objetivo de difundir buenas prácticas y promover la descarbonización del sector aeronáutico. Esto abarca la formación de espacios de conversación con actores de América Latina y el fomento de regulaciones conjuntas para simplificar la implementación de combustibles sostenibles a escala mundial.

En general, España ha jugado un rol proactivo en la puesta en marcha de iniciativas como ReFuelEU Aviation y el EU-ETS, cimentando una base firme para el desarrollo sostenible del sector aeronáutico. No obstante, el triunfo a largo plazo se basará en vencer los desafíos económicos y logísticos, además de promover una cooperación eficaz entre todos los participantes implicados.

7.2. Proveedor: Repsol

Repsol juega un rol esencial como suministrador en la promoción del SAF (Fuel Aviation Sustainable) en España. A partir de 2020, ha destinado recursos a la fábrica de biocombustibles de Cartagena, capaz de generar hasta 195.000 toneladas anuales de SAF utilizando desechos como el aceite de cocina utilizado. Este proyecto demuestra la dedicación de la empresa hacia la sostenibilidad y la conversión de sus infraestructuras industriales en procesos más respetuosos con el medio ambiente.

En cuanto a tecnologías emergentes, Repsol reconoce que la ruta HEFA (Hydropro-

cessed Esters and Fatty Acids) es actualmente la más madura y utilizada. Sin embargo, para mejorar la rentabilidad y diversificar las opciones, está explorando nuevas tecnologías como la gasificación seguida de Fischer-Tropsch, Alcohol-to-Jet y combustibles sintéticos (eFuels). Estas tecnologías requieren apoyo financiero y un marco regulatorio claro para alcanzar la madurez tecnológica y ser competitivas en coste. A partir de 2030, Repsol planea expandir su capacidad de producción mediante estas tecnologías emergentes, dependiendo de los avances en su desarrollo. Respecto a los retos en la cadena de abastecimiento de SAF, sobresalen:

- Acceso a materias primas: En la actualidad, la fabricación de SAF se restringe a rutas autorizadas, como HEFA. Para alcanzar las metas de ReFuelEU Aviation, es esencial expandir las rutas de producción calificadas y utilizar otros desechos no lipídicos.
- Logística optimizada: El sistema logístico español representa una ventaja competitiva, dado que facilita la distribución eficaz del SAF reduciendo así las emisiones de CO₂. La normativa ReFuelEU admite el equilibrio de masas como instrumento para simplificar dicha distribución.
- Sinergias con diferentes industrias: La fabricación de SAF no debería ser únicamente destinada a la aviación. Repsol subraya la relevancia de generar también combustibles renovables para uso terrestre y marítimo, mejorando de esta manera las capacidades de las instalaciones y reduciendo costes.

En cuanto a la repercusión de la demanda, la disminución gradual de los derechos de emisiones sin coste bajo el sistema EU-ETS ha elevado el interés en el SAF, dado que se ve como una solución para disminuir las emisiones de carbono. Esto ha motivado a las aerolíneas a trabajar en conjunto con Repsol, tal como se refleja en convenios con Vueling, Ryanair, Volotea e IAG. Respecto a la regulación, Repsol enfatiza la importancia de un marco equilibrado a escala europea y mundial. La complejidad de las regulaciones vigentes, que abarcan RED III, ReFuelEU Aviation y EU-ETS, presenta un reto para la toma de decisiones en proyectos de gran riesgo económico e innovador. Es crucial simplificar estas

regulaciones y asegurar señales de regulación uniformes para prevenir distorsiones en el mercado y la pérdida de competitividad. Finalmente, las acciones futuras de Repsol comprenden el funcionamiento de su fábrica en Cartagena, la creación de combustibles sintéticos en Bilbao y el estudio de tecnologías emergentes como Alcohol-to-Jet y eFuels a nivel industrial. Estas medidas tienen como objetivo asegurar una provisión constante de SAF, fortaleciendo a Repsol como referente en sostenibilidad en el sector energético.

7.3. Aerolínea: Iberia

Como miembro del Grupo IAG, Iberia juega un papel fundamental en el fomento de combustibles de aviación sostenibles (SAF) en España y Europa. Esta dedicación se manifiesta en su meta de lograr un 10% de vuelos propulsados por SAF para 2030, en consonancia con los objetivos de cero emisiones netas para 2050. Estas medidas se ubican en el contexto de iniciativas internacionales como el Pacto Verde Europeo, el programa RefueEU Aviation y el convenio CORSIA, que definen normativas y metas precisas para la disminución de emisiones en el sector aeronáutico. La estrategia de Iberia se enfoca en fomentar la utilización voluntaria del SAF, más allá de las exigencias regulatorias. La empresa invierte en iniciativas de innovación y creación de alianzas estratégicas, y ha modernizado su aviación con aeronaves más eficaces para disminuir el uso de combustible. Esto demuestra su dedicación hacia la sostenibilidad como un elemento crucial en la competitividad.

Uno de los desafíos más significativos a los que se enfrenta Iberia es la escasa disponibilidad del SAF en los aeropuertos que operan en Europa. Pese a que los proveedores deben asegurar un abastecimiento mínimo del 2% de SAF conforme a la regulación RefueEU, su distribución geográfica continúa siendo inequitativa. Iberia tiene que tratar con sus proveedores para garantizar la disponibilidad del SAF en todos los aeropuertos esenciales, lo que incrementa la complejidad en términos logísticos y operativos. El alto coste del SAF en comparación con el queroseno tradicional representa otro reto significativo. Este elemento influye directamente en los rendimientos financieros de la compañía aérea, dado que el desembolso en combustible constituye hasta el 40% de sus gastos de

operación.

Para atenuar este problema, Iberia busca impulsar la competitividad del SAF a través de la cooperación con gobiernos, la puesta en marcha de estímulos tributarios y la inversión en tecnologías de economía circular. En términos tecnológicos, Iberia garantiza que los motores de aviación actuales están diseñados para trabajar con mezclas de SAF y queroseno tradicional, acorde a los estándares de seguridad ASTM D7566. Pese a que en 2024 ya existía la certificación para funcionar con mezclas de hasta el 50 % de SAF, se anticipa que el progreso tecnológico posibilite el empleo de 100 % SAF en el futuro. Este avance demanda modificaciones mínimas en los sistemas de combustión y administración del flujo de combustible para ajustarse a las características físicas particulares del SAF, como su contenido reducido de azufre y su mayor estabilidad térmica.

La claridad en la rastreabilidad del SAF es esencial para asegurar su sostenibilidad y acatamiento de los estándares ambientales a nivel mundial, como la regulación RED III. Iberia se esfuerza en establecer mecanismos que garanticen la procedencia sostenible del SAF, el índice de disminución de CO₂ y otros indicadores esenciales, fortaleciendo así su lugar como líder en sostenibilidad. Adicionalmente, está analizando tácticas para transmitir estos esfuerzos a clientes y trabajadores, promoviendo un aumento en la sensibilización acerca de la relevancia del SAF en la batalla contra el cambio climático.

Iberia ha forjado alianzas fundamentales dentro del Grupo IAG, que en los últimos años ha invertido más de 400 millones de euros en proyectos de producción de SAF. Estas alianzas tienen como objetivo asegurar un abastecimiento constante de SAF y vencer retos vinculados a coste y distribución. El involucramiento en iniciativas como AVIATOR y la colaboración con aeropuertos para mejorar infraestructuras y procesos logísticos son muestras de su orientación estratégica. A futuro, Iberia tiene el objetivo de aumentar de manera notable el uso de SAF en sus operaciones y seguir encabezando la transición hacia una aviación sostenible. Dentro de sus próximas acciones se encuentran:

- Incrementar la cantidad de SAF empleada en sus vuelos.
- Potenciar las colaboraciones con proveedores, aeropuertos y entidades gubernamentales.

- Invertir en tecnologías en desarrollo para perfeccionar la producción y distribución de SAF.
- Investigar opciones como el hidrógeno y la electrificación aeroespacial.
- Fomentar una mayor sensibilización entre clientes y empleados acerca de la relevancia del SAF.

Iberia se destaca como un participante esencial en la transición hacia una aviación sostenible, evidenciando un compromiso sólido con la incorporación del SAF en sus operaciones. Mediante una estrategia que fusiona la innovación tecnológica, alianzas estratégicas y una perspectiva proactiva en sostenibilidad, la compañía aérea enfrenta los desafíos más significativos de la industria, tales como la escasa disponibilidad y el elevado precio del SAF. No obstante, su compromiso con la transparencia en la trazabilidad, la conformidad con los marcos normativos europeos y la implementación de iniciativas que fomentan una infraestructura eficaz sobresalen como elementos clave para vencer estos obstáculos. Con una perspectiva a largo plazo, Iberia no solo aspira a satisfacer las metas reglamentarias, sino a encabezar una transformación estructural en el sector aeronáutico, actuando como modelo para otras compañías aéreas y fortaleciendo su lugar en el mercado internacional. Su habilidad para balancear la sostenibilidad con la viabilidad financiera será clave para el triunfo de esta transición.

Casos de Estudio y Mejores Prácticas

8.1. Aeropuertos líderes en la adopción del SAF en Europa

La aplicación de combustibles de aviación sostenibles (SAF) en aeropuertos de Europa ha probado ser una táctica crucial para progresar en la descarbonización del sector aeronáutico. No solo desempeñan una función operacional los aeropuertos, sino que también funcionan como puntos de logística y núcleos de innovación tecnológica en la cadena de valor del SAF. En este escenario, ciertos aeropuertos han destacado por sus progresos en la implementación de SAF, principalmente debido a políticas locales y nacionales que promueven su implementación, la cooperación con entidades industriales y la creación de infraestructuras específicas que simplifican su distribución y empleo [34].

El marco regulatorio europeo, liderado por el reglamento ReFuelEU Aviation, es uno de los factores más determinantes para la incorporación del SAF en el sistema aeroportuario. Este reglamento define metas progresivas y vinculantes para los proveedores de combustible, demandando un mínimo de SAF en los combustibles para aviación a partir del año 2025. Estos objetivos aumentarán gradualmente hasta llegar al 70% en 2050.

Adicionalmente, instrumentos como el EU-ETS (Régimen de Comercio de Emisiones de la Unión Europea) proporcionan estímulos financieros a las aerolíneas que emplean SAF, dado que las emisiones vinculadas a estos combustibles no necesitan compensaciones extra bajo este sistema. Este marco europeo se complementa con acciones nacionales que, en ciertos casos, establecen normativas específicas de mezcla o financian proyectos piloto para agilizar la implementación del SAF en aeropuertos esenciales.

A continuación, se exponen las principales características de los aeropuertos líderes

Europeos y sus modelos de implementación. En 2016, el aeropuerto de Oslo Gardermoen se destacó como el primero a nivel mundial en proporcionar SAF a todas las aerolíneas que operan en sus instalaciones. Este éxito se logró mediante la cooperación entre Avinor, el operador de aeropuertos en Noruega, y las autoridades nacionales, quienes instauraron un mandato de mezcla del 0,5 % de SAF en todo el combustible de aviación distribuido en la nación [9].

El modelo de Oslo fusiona tres elementos fundamentales:

- Marco regulatorio sólido: Noruega ha definido un plan de acción para aumentar gradualmente el porcentaje de SAF en el combustible para aviación, con un objetivo audaz del 30 % para el año 2030.
- Partnerships estratégicas: El aeropuerto colabora con fabricantes como Neste y SkyNRG para asegurar un abastecimiento continuo de SAF, promoviendo convenios de largo alcance.
- Infraestructura flexible: Oslo Gardermoen ha incorporado SAF en su red de distribución sin requerir la alteración de la infraestructura actual, evidenciando la factibilidad operativa del SAF como combustible "drop-in".

Los hallazgos han sido notables, disminuyendo en un 15 % las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con el queroseno fósil. Este logro sitúa a Oslo como un referente a imitar en el camino hacia una aviación sostenible.

Por otro lado, el aeropuerto de Copenhague ha desempeñado un rol proactivo en el progreso de SAF a escala regional mediante su involucramiento en la Iniciativa Noruega para Aviones Sostenibles (NISA). Esta plataforma promueve la colaboración entre aeropuertos, empresas aéreas y fabricantes de combustibles para enfrentar los retos logísticos y financieros asociados a la implementación del SAF [34]. Copenhague se distingue por:

- Innovadores proyectos piloto: El aeropuerto ha establecido sistemas para verificar la incorporación de SAF en su cadena de suministro y valorar su efecto en las operaciones.

- Promoción de la sostenibilidad: Las compañías aéreas que trabajan con SAF obtienen ventajas financieras y operativas en el aeropuerto, motivando su adopción constante.
- Estrategia de infraestructura: Kastrup ha destinado recursos en tecnología para asegurar un manejo y almacenamiento eficaz del SAF, en consonancia con las necesidades futuras del sector.

Por último, como centro de innovación se encuentra el aeropuerto de Schiphol, en Países Bajos. Schiphol se ha establecido como un núcleo europeo líder en sostenibilidad aérea debido a su enfoque holístico en la promoción del SAF. El aeropuerto ha formado alianzas estratégicas con productores destacados, como SkyNRG, y es miembro de la Coalición Países Bajos para la Aviación Sostenible [9]. Entre sus logros destacan:

- Desarrollo local de SAF: Schiphol se involucra en proyectos destinados a construir instalaciones locales de producción de SAF, asegurando un abastecimiento sostenible a futuro.
- Concienciación y educación: El aeropuerto lleva a cabo campañas para educar a los viajeros acerca de las ventajas del SAF y su función en la disminución de las emisiones.
- Elaboración de infraestructura sofisticada: Schiphol ha modificado sus sistemas de logística para gestionar grandes cantidades de SAF, lo que permite su incorporación en las actividades cotidianas de las aerolíneas.

Los ejemplos de Oslo, Copenhague y Schiphol demuestran que los aeropuertos pueden jugar un rol revolucionario en la implementación del SAF. Estos aeropuertos no solo han disminuido considerablemente sus emisiones de carbono, sino que además han establecido ecosistemas de cooperación que incluyen a aerolíneas, fabricantes de combustibles y entidades gubernamentales.



Figura 8.1: Aeropuertos Gardenmoen (izquierda), Copenhague (centro) y Schiphol (derecha)

La vivencia de estos aeropuertos brinda enseñanzas útiles para otras naciones europeas que aspiran a aplicar el SAF a gran magnitud. La implementación de políticas de regulación claras, estímulos financieros y la cooperación entre el sector público y privado ha resultado fundamental para vencer los desafíos vinculados a la producción y distribución del SAF.

8.2. Consorcios y alianzas estratégicas: TULIPS, STARGATE, ALIGHT, OLGA y eNeuron

La transición hacia un sector aeronáutico más sostenible se topa con retos tecnológicos, financieros y logísticos. En este escenario, los consorcios internacionales y las iniciativas de colaboración financiadas por programas europeos como Horizon 2020 han jugado un rol crucial en la creación de soluciones innovadoras. Proyectos como TULIPS, STARGATE, ALIGHT, OLGA y eNeuron se han establecido como líderes, no únicamente por su habilidad para tratar problemas concretos, sino también por fomentar sinergias entre aeropuertos, aerolíneas, proveedores de combustibles sostenibles y entidades reguladoras. Estas acciones progresan hacia una aviación sin carbono a través de la aplicación de tecnologías de vanguardia, tácticas de administración de energía y la promoción del empleo de combustibles de aviación sostenibles (SAF) [35].

El proyecto TULIPS (Transitioning towards Sustainable Aviation) pone su atención en convertir aeropuertos en centros inteligentes de energía que fusionen diversas fuentes de energía renovable con sistemas de almacenamiento y distribución de SAF. Este proyecto,

dirigido por el aeropuerto de Ámsterdam Schiphol, incluye 17 demostraciones que van desde la automatización de las operaciones en el aeropuerto hasta la aplicación de SAF en vuelos de negocios [35]. TULIPS promueve la incorporación de paneles solares y aerogeneradores en las instalaciones aeroportuarias, promoviendo así su autogestión energética. Este método posibilita cubrir tanto las demandas operativas como las de los sistemas logísticos que necesitan los SAF. Una de sus principales innovaciones es la elaboración de modelos predictivos de demanda energética fundamentados en información histórica y climática, lo que mejora la utilización de recursos renovables y potencia la eficiencia en el abastecimiento de SAF [40].



Figura 8.2: ROAD MAP Proyecto TULIPS

STARGATE, bajo la dirección del aeropuerto de Bruselas, se enfoca en la sostenibilidad mediante soluciones tecnológicas y operacionales que mejoran la logística aeroportuaria y la cadena de suministro de SAF. Este proyecto sobresale por su enfoque en la digitalización, creando instrumentos de seguimiento en tiempo real que facilitan el seguimiento de las emisiones y la valoración del efecto de las operaciones en cuanto a sostenibilidad [36]. Adicionalmente, STARGATE se esfuerza por optimizar las rutas aéreas a través de algoritmos que disminuyen el uso de combustible y el tiempo en el aire. Simultáneamente, promueve la formación de los operadores de aeropuertos en la gestión de

SAF, asegurando una utilización segura y eficaz de estos combustibles en las actividades cotidianas [40].

El proyecto ALIGHT, llevado a cabo en el aeropuerto de Copenhague, se enfoca en la incorporación de sistemas energéticos de vanguardia para simplificar la implementación de SAF y disminuir la huella de carbono. Una de las mayores aportaciones de ALIGHT es la valoración del efecto ambiental y social de los SAF durante su ciclo de vida, lo que facilita la identificación de las vías más sostenibles y económicas para su fabricación y distribución [38]. ALIGHT asimismo explora tecnologías de almacenamiento de SAF que aseguren su disponibilidad constante, incluso en aeropuertos con restricciones de infraestructura. Este método comprende la utilización de sensores sofisticados para supervisar la calidad del combustible y la puesta en marcha de sistemas logísticos mejorados que disminuyen los gastos de transporte y almacenaje [35].

OLGA (Optimizing Logistics for Green Airports) se enfoca en mejorar la logística aeroportuaria con el objetivo de promover una movilidad sostenible. Este proyecto, que tiene como ejemplos aeropuertos como Milán-Malpensa y Lyon, trata la incorporación de SAF a través de la optimización de las redes de transporte y la reducción de las emisiones vinculadas a la distribución de combustibles [37]. Uno de los avances más sobresalientes de OLGA es la puesta en marcha de sistemas de administración de tráfico aéreo que disminuyen rutas ineficientes, reduciendo así el uso de combustible. Adicionalmente, el proyecto fomenta la cooperación entre autoridades locales y responsables de logística, garantizando que los aeropuertos sean capaces de ajustarse a las exigencias en aumento de SAF sin poner en riesgo su competitividad económica [40].

El proyecto eNeuron transforma la concepción tradicional de los aeropuertos, posicionándolos como centros energéticos integrados que maximizan el uso de fuentes renovables y SAF. A través del desarrollo de herramientas de modelado energético, eNeuron optimiza la planificación y operación de las infraestructuras aeroportuarias, adaptándose a las fluctuaciones de demanda y a las características climáticas de cada región [39]. El proyecto también introduce sistemas de generación y almacenamiento híbridos, que combinan baterías avanzadas con tecnologías de conversión de energía solar y eólica. Estas soluciones no solo reducen las emisiones de GEI, sino que también mejoran la resiliencia operativa

de los aeropuertos frente a cambios en la oferta de energía [35] [40].

Estos proyectos ilustran un modelo de colaboración que atiende las demandas de sostenibilidad del sector aeronáutico desde diversas perspectivas: integración energética, digitalización, logística y fomento del SAF. Estas alianzas no solo producen avances tecnológicos, sino que también promueven la creación de políticas y regulaciones que agilizan el cambio hacia una aviación más sostenible. La repercusión de estas iniciativas trasciende los aeropuertos involucrados, instaurando un esquema imitable en otras zonas de Europa y el mundo. Por lo tanto, los consorcios no solo favorecen la descarbonización de la industria, sino que también sitúan a Europa como referente mundial en la implementación de soluciones sostenibles para la aviación.

8.3. Medidas para la implementación del SAF en España

La puesta en marcha del Reglamento ReFuelEU Aviation en España, acorde al marco europeo para el transporte aéreo sostenible, impone una serie de responsabilidades y pautas para promover la utilización de combustibles sostenibles en el sector aeronáutico (SAF). Este reglamento tiene como objetivo asegurar condiciones de competencia justas y fomentar la descarbonización del sector aéreo a través de cuotas ascendentes de SAF y sistemas de registro y comprobación. Desde 2025, es responsabilidad de los proveedores de combustible en aeropuertos de la Unión Europea asegurar la disponibilidad de SAF, iniciando con un 2 % de mezcla y elevándose gradualmente hasta llegar al 70 % en 2050. Además, desde 2030, se requiere que al menos el 1,2 % del combustible proporcionado sea sintético, llegando al 35 % para 2050. Es responsabilidad de los operadores aéreos asegurar que el 90 % del combustible cargado en un aeropuerto de la Unión se ajuste a la demanda anual proyectada [61].



Figura 8.3: Objetivos de mezcla en los Union Airports (%) [61]

La aplicación del Reglamento exige que los operadores aéreos comuniquen cada año, antes del 31 de marzo, los datos del año previo mediante el portal de sostenibilidad de EASA. Este procedimiento abarca:

1. Carga de datos: Información acerca del combustible necesario, el combustible cargado, la cantidad de vuelos y las horas de funcionamiento.
2. Comprobación: Es necesario que los datos sean auditados por un verificador acreditado independiente.
3. Validación: La autoridad correspondiente examina y ratifica los informes, si se requieren correcciones.

Las peticiones deben enviarse con un mínimo de tres meses de anticipación a través del portal de sostenibilidad de EASA, acompañadas de documentos que las respalden.

El proceso de adhesión al Reglamento ReFuelEU Aviation incluye diversas etapas:

1. Seguimiento y recolección de información: En el año de funcionamiento, las compañías aéreas tienen la obligación de documentar el volumen de combustible cargado, la cantidad de SAF empleada, los datos de vuelo y el cumplimiento del requisito del 90 % de reabastecimiento en aeropuertos de la Unión Europea.
2. Reporte anual: Previo al 31 de marzo del próximo año, los operadores tienen la obligación de entregar un informe corroborado a la autoridad reguladora.
3. Verificación: La información proporcionada es auditada por entidades acreditadas para asegurar su precisión.
4. Valoración y penalizaciones: Si se incumple, se imponen sanciones económicas o limitaciones en las operaciones.
5. Adquisición de derechos de emisión: Los operadores de aeronaves que emplean el SAF tienen la posibilidad de obtener derechos de emisión sin coste, de acuerdo con el Régimen de Comercio de Derechos de Emisión (RCDE). La suma asignada se determina a través de la fórmula siguiente:

$$\frac{\text{Cantidad de combustible admisible consumido} * \text{diferencial de precio} * \text{porcentaje de apoyo}}{\text{Precio del derecho de carbono}}$$

Figura 8.6: Asignación de derechos de emisión [61]

El proceso de cumplimiento está fuertemente vinculado con el Régimen de Comercio de Derechos de Emisión (RCDE), modificado bajo el paquete "Fit for 55". Los operadores aéreos tienen la posibilidad de obtener derechos de emisión sin coste si evidencian el uso de SAF y satisfacen las condiciones de reporte. La distribución de derechos sin coste estará accesible hasta el año 2030.

La puesta en marcha del Reglamento ReFuelEU Aviation constituye un avance importante hacia la sostenibilidad del transporte aéreo en España. El acatamiento de las responsabilidades de mezcla de SAF, sumado al uso eficaz de instrumentos digitales para la supervisión y reporte, favorecerá el cambio hacia una aviación más sostenible, en concordancia con los objetivos climáticos de Europa.

Propuesta de Estrategias para la Expansión del SAF en España

9.1. Análisis de la infraestructura aeronáutica en España

La infraestructura aeronáutica en España desempeña un rol crucial en la conexión global, el crecimiento económico y la integración territorial. Además de ser una de las más extensas de Europa, esta red afronta en la actualidad el desafío de ajustarse a las metas de sostenibilidad establecidas por la legislación europea y mundial, como el plan RefuelEU Aviation y el Tratado de París. España cuenta con una red de 46 aeropuertos y 2 helipuertos administrados por AENA, los cuales atienden tanto a operaciones nacionales como internacionales. Aeropuertos tales como Adolfo Suárez Madrid-Barajas y Barcelona-El Prat están entre los núcleos europeos más importantes, administrando millones de viajeros anualmente y funcionando como sitios esenciales para conexiones a nivel transcontinental. Adicionalmente, aeropuertos regionales tales como Málaga-Costa del Sol y Bilbao ejercen un efecto considerable en el crecimiento económico de la región y la unificación territorial [10]. En las últimas décadas, esta red ha sufrido importantes modernizaciones, con inversiones en la expansión de pistas, terminales y sistemas de administración del tráfico aéreo. No obstante, el reto principal en este momento es asegurar que estas infraestructuras sean capaces de resistir la incorporación de combustibles de aviación sostenibles (SAF) sin poner en riesgo su seguridad y eficiencia operativa.

En España, la implementación de SAF conlleva una reorganización parcial de la cadena de abastecimiento de combustibles en los aeropuertos, con la finalidad de alcanzar

las metas de sostenibilidad a largo plazo. De acuerdo con la figura 9.1, la cadena de valor del SAF no solo incluye las fases directas de producción, traslado, almacenaje, mezcla y distribución, sino que también muestra un flujo constante durante un lapso estimado de 45 años. Este periodo de tiempo enfatiza la importancia de adoptar un enfoque estratégico en la creación e implementación de la infraestructura. El procedimiento inicia con la fabricación de SAF, que emplea recursos renovables como aceites de uso, desechos agrícolas o CO₂ recolectado. En el escenario español, proyectos encabezados por empresas como Repsol y Cepsa están modificando sus refinerías para incorporar procesos particulares de biocombustibles. La figura 9.1 resalta que este proceso productivo está orientado a incorporar gradualmente mayores porcentajes de SAF, con un aumento previsto que alcanza el 70% de mezcla en el abastecimiento total de combustibles para el año 2050. Una vez elaborado, el SAF necesita ser trasladado a través de las redes logísticas ya establecidas. En España, esta fase se ve favorecida por la amplia red de oleoductos y sistemas de transporte terrestre que vinculan las plantas de producción más importantes con los aeropuertos. De acuerdo con el flujo mostrado en la figura 9.1, se espera que las tecnologías de transporte se optimicen progresivamente para disminuir las emisiones indirectas vinculadas a esta fase, implementando sistemas de transporte híbridos o eléctricos para reducir la huella de carbono [24]. El SAF, se somete a estrictos controles de calidad antes de su mezcla con queroseno convencional. Esto se puede llevar a cabo en las instalaciones del proveedor o en los aeropuertos. Este proceso, regulado por estándares internacionales como ASTM D7566, garantiza que las propiedades del SAF sean equivalentes a las del combustible fósil. Según la figura 9.1, este paso debe mantenerse constante a lo largo de los años, adaptándose gradualmente a mayores proporciones de SAF en las mezclas [12]. Este cambio no requiere modificaciones significativas en la infraestructura actual, lo que representa una ventaja frente a otros combustibles emergentes como el hidrógeno, que sí demandarían inversiones sustanciales. Desde los depósitos de almacenaje, el SAF se suministra directamente a las aeronaves a través de camiones cisterna o sistemas de hidrantes ya establecidos. Esta etapa de operación es crucial para asegurar la presencia de combustible en los aeropuertos de gran demanda, como Madrid-Barajas y Barcelona-El Prat. En la figura 9.1, este procedimiento está concebido para ser totalmente interoperable,

garantizando una transición suave hacia un uso más amplio de SAF durante las décadas venideras. En las primeras dos décadas, el objetivo se centrará en fortalecer la infraestructura de producción y distribución, mientras que en las fases subsiguientes se prevé un incremento exponencial en la utilización de SAF, llegando al 70% del abastecimiento total en 2050 [24]. Esta perspectiva a largo plazo también anticipa progresos tecnológicos importantes, tales como la automatización en los sistemas de mezcla y distribución, junto con mejoras en la rastreabilidad digital para asegurar que el SAF se adhiera a los estándares internacionales de sostenibilidad. Además, se prevé una disminución gradual en los gastos de producción debido a las curvas de aprendizaje, lo que promoverá una mayor adopción por parte de las aerolíneas y los aeropuertos.

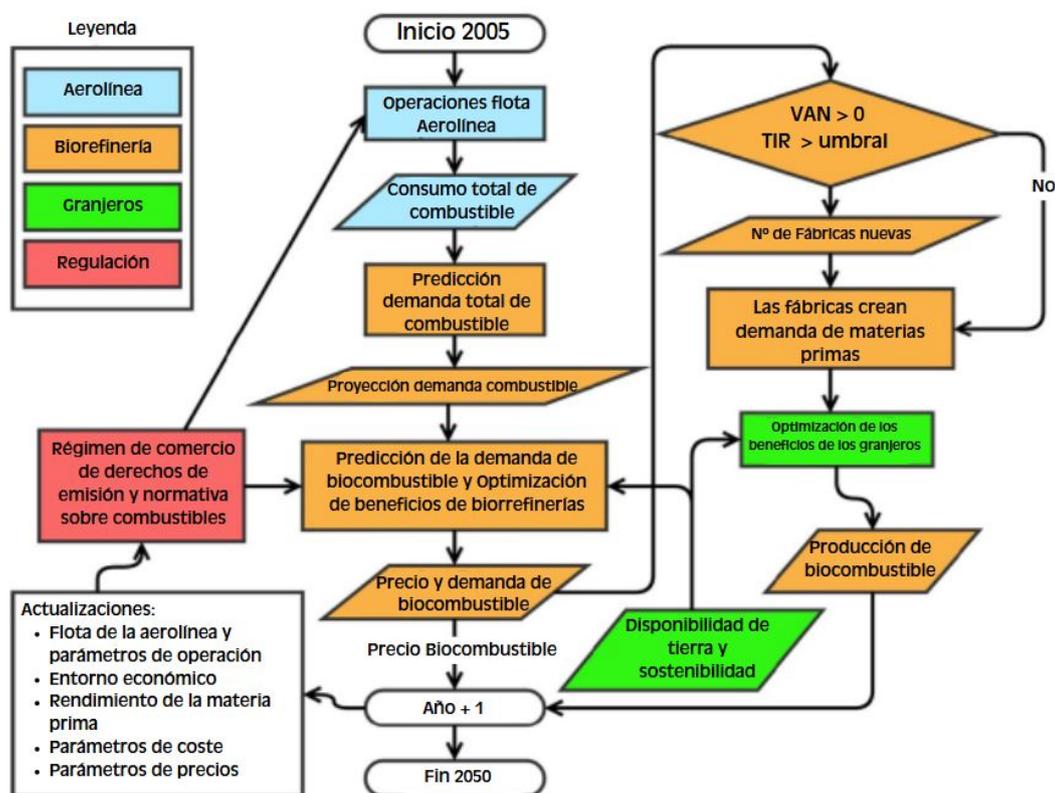


Figura 9.1: Diagrama de flujo para integrar el modelo SAF LCA en el modelo de operaciones aéreas [12]

España ha iniciado el liderazgo de proyectos emblemáticos en el desarrollo de SAF. Por ejemplo, el aeropuerto de Madrid-Barajas ha puesto en marcha acciones para simplificar la provisión de SAF a través de la cooperación con Repsol en la creación de refinerías

personalizadas. A escala regional, aeropuertos como Sevilla se encuentran involucrados en proyectos de prueba para experimentar con tecnologías novedosas de SAF y perfeccionar los sistemas de reparto [24]. En contraste con otras naciones europeas como Noruega y los Países Bajos, España está progresando a un ritmo acelerado en la incorporación de SAF. Por ejemplo, Noruega encabeza la implementación utilizando el aeropuerto de Oslo como punto de referencia, donde ya se han fijado metas obligatorias para el uso de SAF. No obstante, España posee la posibilidad de utilizar su posición estratégica y su red logística para sobrepasar estos patrones y transformarse en un modelo a nivel mundial. La infraestructura aeronáutica en España se encuentra adecuadamente situada para encabezar la transición hacia una aviación sostenible. No obstante, para maximizar su capacidad, resultará esencial incrementar la inversión en producción y certificación de SAF, robustecer la cooperación entre el sector público y privado y aprender de los modelos exitosos en otras naciones europeas. La implementación masiva del SAF no solo asegurará la consecución de las metas de descarbonización, sino que también establecerá a España como un referente en innovación y sostenibilidad en el sector aeronáutico mundial.

9.2. Medidas para incentivar el uso de SAF en la aeronáutica española

Uno de los elementos clave para promover la implementación del SAF en el sector aeronáutico es la necesidad de simplificar y armonizar el marco regulatorio. En la actualidad, la presencia de varias entidades europeas como RED III, ReFuelEU Aviation y el ETS provoca una fragmentación que complica la toma de decisiones de inversores y productores. Es crucial incorporar estas regulaciones en un marco consistente que ofrezca seguridad legal y fomente la inversión. Además, es necesario renovar las normas técnicas para permitir mezclas que superen el 50 % de SAF, lo que abriría la vía hacia una adopción más amplia de estos combustibles.

El aspecto económico también constituye una barrera importante, dado que el coste del SAF continúa siendo significativamente superior al del queroseno tradicional. Para reducir esta disparidad, es esencial establecer estímulos financieros que contemplen sub-

venciones directas para proyectos de producción de SAF y préstamos tributarios para las aerolíneas que se interesen en su utilización. De forma adicional, se podrían fijar precios mínimos asegurados durante las fases iniciales de producción, además de investigar métodos de financiación basados en el modelo de Numeros de Identificación Renovables (RIN) implementado en Estados Unidos [53].

Respecto a la infraestructura, resulta imprescindible implementar mejoras en las infraestructuras aeroportuarias para simplificar la gestión y distribución del SAF. Esto podría abarcar la edificación de canalizaciones específicas y la renovación de las infraestructuras ya existentes. La valoración de las demandas logísticas presentes a través de inventarios exhaustivos también ayudará a una ejecución más eficaz.

Finalmente, la educación y la sensibilización acerca de las ventajas del SAF juegan un papel fundamental. Las campañas informativas enfocadas en consumidores y participantes del sector podrían promover un compromiso más firme con la sostenibilidad. Además, programas de lealtad para los pasajeros que elijan vuelos con SAF y acciones de concienciación para el equipo de las aerolíneas ayudarán a fortalecer esta transición hacia una aviación más sostenible. En resumen, estas estrategias proporcionan una guía precisa para vencer los obstáculos presentes y promover una implementación eficaz del SAF en el sector aeronáutico, abriendo la vía hacia un futuro más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

9.3. Lecciones aprendidas y recomendaciones para la industria

A lo largo de este trabajo, se han identificado diversos aprendizajes clave en relación con la transición hacia una aviación más sostenible. La industria enfrenta una transformación compleja que exige no solo avances tecnológicos, sino también cambios en la estructura regulatoria, económica y operativa. Una de las enseñanzas más significativas es que no se conseguirá la descarbonización del sector aeronáutico con una sola solución. Pese al fervor por la utilización del hidrógeno y la electrificación como opciones futuras, la realidad tecnológica y operativa establece significativas restricciones. A pesar de su poten-

cial, el hidrógeno todavía necesita de una infraestructura totalmente renovada, cambios en el diseño de aeronaves y una generación masiva de energía renovable para su factibilidad. Por otro lado, a pesar de que la electrificación es conveniente para vuelos cortos, se topa con obstáculos considerables en cuanto a la densidad energética de las baterías, lo que la convierte en inviable para trayectos de larga distancia. En este escenario, el SAF ha emergido como la respuesta más rápida para disminuir las emisiones sin alterar de manera drástica la flota actual [23].

No obstante, dentro del SAF mismo, no todas las alternativas resultan ser igual de sostenibles o escalables. Una de las conclusiones fundamentales es que los combustibles sintéticos y efuels, derivados de energías renovables y captura de CO₂, muestran beneficios considerables en comparación con los biocombustibles tradicionales. Aunque estos últimos requieren de materias primas agrícolas o desechos orgánicos cuya disponibilidad es restringida y provocan competencia con otros sectores, los efuels pueden ser fabricados en cantidades más grandes y sin comprometer la seguridad alimentaria. Aunque su precio de producción actual es alto, su capacidad de expansión a largo plazo podría transformarlos en una opción más factible que el SAF fundamentado en biomasa.

Otra enseñanza significativa ha sido el rol esencial de la regulación y las políticas de incentivación. La implementación del SAF no podrá realizarse sin un marco regulatorio definido que fomente su fabricación y utilización, tal como lo han evidenciado iniciativas como ReFuelEU. Sin acciones del gobierno que impongan compromisos de mezcla y subvenciones para disminuir el margen de precio con el queroseno fósil, el SAF continuará siendo una opción poco competitiva en el mercado. Esto subraya la relevancia de la cooperación entre gobiernos, empresas aéreas, aeropuertos y proveedores de energía para elaborar tácticas eficaces que agilicen la transición. Por último, la puesta en marcha del SAF y otros combustibles sostenibles ha evidenciado la importancia de modificar la infraestructura aeroportuaria. En la actualidad, los aeropuertos funcionan con sistemas creados para el queroseno convencional, y la implementación de combustibles alternativos demanda inversiones en nuevas infraestructuras de almacenaje, distribución y mezcla. Además, la industria tiene que abordar problemas logísticos fundamentales, como la incorporación de estos combustibles en la cadena de suministro sin perjudicar la eficacia

operacional de las aerolíneas.

Para conseguir una transición sostenible en la aviación, es esencial adoptar un enfoque de múltiples aspectos que fusiona la innovación tecnológica, las políticas de regulación y las estrategias económicas. Primero, la industria debe dar prioridad al desarrollo y venta de efuels y combustibles sintéticos como sustituto al SAF fundamentado en biomasa. A pesar de que en la actualidad estos combustibles tienen un alto coste, su generación a partir de energía renovable y CO₂ capturado proporciona una solución duradera que no se basa en la presencia de materia orgánica. La inversión en estas tecnologías podría impulsar la disminución de gastos y potenciar su posición competitiva en el mercado.

Además, es crucial implementar mecanismos de financiación que promuevan la implementación del SAF. Es necesario que los gobiernos establezcan subsidios, rebajas fiscales y sistemas de mercado que minimicen la disparidad de precios con el queroseno fósil. Modelos tales como los créditos de carbono o los impuestos diferenciados pueden funcionar como instrumentos para asegurar que las aerolíneas dispongan de incentivos efectivos para el uso de combustibles sostenibles. En términos de infraestructura, resulta esencial que los aeropuertos modifiquen sus sistemas de almacenaje y distribución para simplificar la puesta en marcha del SAF y los efuels. Esto significa actualizar los depósitos de almacenamiento, implementar sistemas de mezcla y colaborar con los proveedores de combustible para asegurar un abastecimiento eficaz. Es necesario planificar la inversión en estas mejoras a escala mundial para prevenir disparidades en la disponibilidad de SAF entre diferentes aeropuertos y regiones.

Finalmente, la industria requiere una armonización regulatoria más amplia a escala global. Las variaciones en las políticas de cada nación pueden provocar alteraciones en el mercado que impidan la implementación del SAF. Es fundamental que entidades como la OACI colaboren en un marco mundial que defina normas unificadas de certificación, incentivos y requerimientos de mezcla para asegurar una transición organizada y eficaz hacia una aviación más sostenible.

Conclusiones y Recomendaciones

Finales

10.1. Resumen de los hallazgos

El estudio efectuado ha corroborado que el cambio hacia una aviación sostenible es un reto de múltiples facetas que abarca elementos tecnológicos, económicos y regulatorios. En el corto y medio plazo, el SAF emerge como la alternativa más factible para disminuir las emisiones sin la necesidad de alterar la flota actual. Sin embargo, su implementación se topa con significativos obstáculos vinculados con los gastos de producción, la accesibilidad de la materia prima y la infraestructura de distribución.

Durante el estudio, se ha demostrado que los combustibles sintéticos y los efuels proporcionan una opción más escalable y sostenible en relación a los biocombustibles convencionales. Su generación a partir de energía renovable y CO₂ capturado previene la competencia con el sector agrícola y ofrece una mayor adaptabilidad en la localización de las instalaciones productivas. No obstante, su factibilidad financiera todavía depende de progresos en tecnología y economías de escala que disminuyan sus gastos de operación. Otro descubrimiento crucial es la importancia esencial de la regulación y las políticas de estímulo. El ejemplo de programas como ReFuelEU ha evidenciado que la puesta en marcha de mandatos de mezcla y ayudas financieras es crucial para fomentar la adopción de combustibles sostenibles. Sin estas medidas, el SAF y los e-fuels seguirán siendo económicamente inviables frente al queroseno fósil.

Finalmente, la investigación ha enfatizado la relevancia de la cooperación entre aerolíneas, proveedores, aeropuertos y entidades gubernamentales. La actualización de la infraestructura aeroportuaria y la cooperación entre las distintas partes interesadas en el

sector son elementos esenciales para asegurar que el paso a combustibles sostenibles no perjudique la eficacia operacional del sector.

10.2. Futuras líneas de investigación

El porvenir de la aviación sostenible se basará en gran parte en el progreso en varias áreas estratégicas y tecnológicas.

Una de las principales áreas de estudio debería ser la mejora en la fabricación de efuels y combustibles sintéticos. Es imprescindible crear procesos más eficaces y disminuir los gastos de producción para que estos combustibles puedan rivalizar con el queroseno tradicional. La incorporación de fuentes de energía renovable novedosas, como la solar o la eólica, en la producción de biocombustibles es un camino de trabajo con gran potencial.

Otro campo de estudio esencial es la optimización de la infraestructura para la distribución de SAF y efuels en los aeropuertos. Se necesitan investigaciones acerca de cómo incorporar estos combustibles en la cadena de suministro sin perjudicar las operaciones aéreas, además de la factibilidad de modelos de producción descentralizados que disminuyan la necesidad de grandes refinerías.

Es imprescindible llevar a cabo investigaciones que expongan de forma completa el efecto ambiental de diversas alternativas, incluyendo SAF, hidrógeno y electrificación. Aunque la electrificación y el hidrógeno podrían disminuir las emisiones de CO₂, plantean retos vinculados con la infraestructura y el almacenamiento de energía. Por último, también resulta necesario más estudio acerca de los impactos de los NO_x, las estelas de condensación y el desplazamiento radiativo de estos combustibles alternativos.

Entrevista AESA/DGAC

[*Voz en off Teresa*] En primer lugar se ha optado por llevar a cabo la entrevista a la entidad regulatoria, AESA/DGCA, representada por Raúl Martín, coordinador de la parte de implementación de biocombustibles y de la parte de sostenibilidad en Senasa. Esta entrevista se llevará a cabo por microfot teams, tal y como se puede ver en la imagen del final de la entrevista.

[*Teresa*] Hola Raúl, ¿que tal? Encantada de conocerte.

[*Raúl*] Un gustazo conocerte y saber que hay gente que está interesada también en explorar este mundo de la sostenibilidad del sector aéreo y a tu disposición. Ví que me mandaste un correo, si quieres lo vamos viendo un poco o me vas comentando tú cuáles son tus principales, bueno, pues dudas o consultas. Hola, Antonio, creo que te has conectado.

[*Voz en off Teresa*] Se conecta Antonio Donoso, mi tutor del TFM y compañero de trabajo de Raúl Martín, a la reunión de teams.

[*Antonio*] Muy buenas. Teresa es alumna de la Europea, de la Universidad Europea. Estoy llevando su TFM y surgió, entre otras cuestiones, la posibilidad también de poder hacer entrevistas, que me parece mucho más útil y oye, adecuado.

[*Raúl*] Bueno, el equipo de Senasa, el equipo concreto que yo llevo, nos dedicamos a la parte sobre todo de cambio climático, vinculada tanto al apoyo a la administración

española en el ámbito del Régimen Europeo de Comercio de Emisiones, del EU-ETS, también gestionamos la aplicación del esquema Corsia, que es un esquema de compensación a nivel internacional de la OACI, y también como principal mecanismo de descarbonización, toda la parte vinculada a Refuel EU Aviation y tratamos las medidas de promoción del combustible sostenible en España.

[*Teresa*] ¿Qué papel desempeña y desempeñáis vosotros en concreto en la regulación y promoción del biocombustible en la aviación española concretamente?

[*Raúl*] El principal mecanismo para la promoción es el reglamento Refuel, donde en este caso el Ministerio de Transportes es la autoridad competente con todo lo que implica. Hay que velar por el cumplimiento de las obligaciones, de las obligaciones que aplican a los gestores aeroportuarios y a los operadores aéreos. Las obligaciones bajo refugio que aplican a los suministradores de combustible son la competencia que queda atribuida en el Ministerio de Medio Ambiente, en la Dirección de Energía. Entonces, en la parte de refuel, como digo, el Ministerio de Transportes es la autoridad competente para velar por el cumplimiento de las obligaciones que aplican a los sujetos, en este caso a los operadores de forma más general. Y otra medida muy importante de promoción están vinculadas al régimen europeo de comercio de emisiones, dado que el uso de combustibles sostenibles otorga ciertos beneficios a los operadores aéreos que acreditan su uso. Y en este caso, la autoridad competente bajo EU - ETS es el Ministerio de Medio Ambiente de Transición Ecológica a través de la Oficina Española de Cambio Climático, si bien la autoridad de ámbito técnico para la aplicación del esquema al sector aéreo recae en la Agencia Estatal de Seguridad Aérea. De manera que nuestro papel es evaluar que efectivamente todos los beneficios asociados al consumo de SAP de un operador aéreo se hace de acuerdo a la normativa en vigor, a la directiva 2003/8, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de octubre de 2003, por la que se establece un régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero en la Comunidad y por la que se modifica la Directiva 96/61/CE del Consejo.

[Teresa] Y volviendo a la primera medida que me has comentado, la del Refuel, ¿qué impacto ha tenido en la aviación en los últimos años?

[Raúl] A efectos del reglamento, lo que establece es un escalado de su suministro y que crece hasta el año 2050 del suministro de examen de aeropuertos europeos, la obligación recae sobre los suministradores, sobre Repsol, Cepsa, etc. Estos tienen la obligación de incluir a partir del año 2025 un 2 % de SAP en todo el combustible de aviación que suministren. Como digo, este porcentaje aumenta a medida que pasa el tiempo y en el 2050 la obligación asciende hasta el 70 %. Se pasa desde el dos al 70 a través de escaladas, el 2 % es en el 2025, el 5 % en el 2030, etc. Entonces el impacto se va a ir viendo ya desde que aplica la normativa, es decir, desde el 1 de enero del 2025. Actualmente toda la repercusión es que efectivamente los proveedores han garantizado el cumplimiento de esos volúmenes, y tienen capacidad productiva para suministrar en España dicho combustible que no tenían hasta ahora. La demanda entonces no se estaba suministrando. Ahora ya da igual que exista demanda, están obligados. Por lo cual todo hace indicar que no solo se cumplirán estos objetivos de suministro, sino que tendrán capacidad incluso de ir un poquito más allá. Ahora bien, solo irán más allá de los porcentajes si un operador aéreo les pide ese SAF, si no, ellos cumplirán con el objetivo mínimo que tienen. Entonces, ya te digo, todavía no se ha evidenciado, se empezará a evidenciar por el suministro futuro.

[Teresa] Y claro, como me has comentado, la obligación recae sobre los proveedores. ¿De qué manera AESA/DGAC está apoyando la colaboración entre estos proveedores, entre las aerolíneas, los aeropuertos para que todo esto fluya?

[Raúl] Esto es un trabajo que viene de muchos años atrás y desde el año 2010 el Ministerio estableció mecanismos y bonos de encuentro de todos, tanto de productores, como de operadores, como de productores de materia prima en España, tratando de fomentar el desarrollo de una industria de SAF en España. De hecho, en la ley de cambio climático se incluyó un artículo específico para establecer una obligación de suministro. La

ley nacional lo que pasa es que no ha tenido un desarrollo normativo porque se ha implantado a través de un reglamento de cumplimiento europeo, por lo cual no ha sido necesario desarrollar más. Entonces lo que hace la vigencia estatal y la Dirección General es que ha promovido sobre todo mecanismos y foros de encuentro para tratar de poner en común los problemas e identificar soluciones. Esto sí, uno de los estados que principalmente, como se dice, impulsaron Refuel fue España, en este caso a través de los representantes de la Unión Europea y en el Parlamento y también todos los mecanismos asociados a EU-ETS de fomento del SAF también han tenido una participación muy activa de las autoridades españolas.

[Teresa]¿Qué desafíos regulatorios se enfrenta la implementación de SAF en aeropuertos nacionales?

[Raúl]En realidad el desafío no es tanto regulatorio, la norma ya está, ya existe una obligación, como cuando nosotros en el coche echamos gasolina, eso lleva un biocombustible, el combustible ya está. El principal desafío es, bueno, la disponibilidad de materias primas. Puede existir todavía cierta competencia con otros medios de transporte donde se destinen esas materias primas a la producción de biocombustibles para el sector terrestre, pero aquí y el principal problema es el precio. Existe todavía una diferencia de precios significativa entre el biocombustible y el combustible de origen fósil. Por lo tanto, cuando la diferencia es alta, la demanda es baja para que no exista una diferencia entre el gap de precios, la diferencia de precios entre ambos tipos de combustibles, pues será complicado, o sea, no terminará de igualarse. Desde ahora mismo todos los mecanismos están tratando de desarrollar mecanismos que apoyen o hagan más barato el combustible sostenible de manera que se aproxime su precio al del fósil.

[Teresa]Claro, porque bueno, eso también viene relacionado con lo del régimen europeo de comercio de emisiones.

[Raúl] Es una medida para incentivar la inversión. Por ejemplo, las emisiones asociadas al consumo de esa no contabilizan bajo la VTS. Es una manera de hacer el precio más atractivo, porque en el EU-ETS todas las compañías de manera anual tienen que declarar las emisiones de los vuelos que están dentro del esquema y tienen que entregar una cantidad equivalente de una cosa que se llaman derechos de emisión. Equivalen a una tonelada de carbono que más o menos ronda los 80 euros. Lo que viene a ser por eso es que cada tonelada que se consume cuesta pues unos €250 en términos de emisión. Si en lugar de quemar una tonelada de queroseno, se quema biocombustible que no tendría emisiones, tendría un ahorro de €250 porque no tengo emisiones que compensar. Es ese tipo de mecanismos.

[Teresa] De todas formas, esto es más orientado a las aerolíneas y los proveedores. ¿Hay alguna medida para incentivar la inversión de infraestructura en aeropuertos para el biocombustible?

[Raúl] Perdona, disculpa, porque sí que es verdad que no lo he comentado. El combustible sostenible de aviación no necesita adaptaciones ni de los motores de las aeronaves, ni de las redes de distribución logística. No hay ningún tipo de inversión más allá. Quizá algún tipo de inversión asociada a pruebas de laboratorio para comprobar el cumplimiento de los estándares de calidad de los combustibles, dado que el SAP actualmente solo se puede utilizar si es mezclado con fósil, pero una vez mezclado, se considera que no se necesita ninguna modificación ni de la red de éxodo ni de la red de distribución de keroseno, por eso son tan atractivos. O sea que a los aeropuertos ya se les proporciona directamente mezclado, entonces no tienen problemas para almacenarlo de otra manera. A diferencia de la problemática que supondrá el hidrógeno en este aspecto.

[Teresa] ¿Y que hay de la supervisión y trazabilidad de este biocombustible en la cadena de suministro?

[*Raúl*] Bueno, vamos a ver, por una parte, el combustible sostenible tiene que reunir dos estándares, uno, estándares que se llaman ASTM, que eso es lo que te digo, el combustible mezclado tiene las características del fósil, con lo cual cumple esos estándares y aparte tiene que cumplir los estándares de sostenibilidad que a Nivel del Sector perdón, son dos estándares prácticamente utilizados a nivel mundial, que son los estándares de sostenibilidad denominados ISD y RSB, que son dos compañías de estandarización, que estas compañías lo que acreditan es que este combustible denominado sano, cumple los criterios de sostenibilidad que a nivel europeo son regidos por la Directiva de Energías Renovables. El sistema español de distribución de combustible es a través de Exolu, una antigua compañía que es la red de poleoductos. Es un sistema que llaman interconectado, sistema especial, donde introduce en la red de distribución una cantidad de SAF mezclado de lo que sea, y la red es muy eficiente, lo introduce en Puerto Llano o en Cartagena y lo sacan en Bilbao. A través de un balance de masas se comprueba que lo que se ingresa dentro de la red de distribución es una cantidad equivalente a la que se saca del sistema, pero no hay una trazabilidad de la molécula.

[*Teresa*] ¿Esto se permite a nivel europeo?

[*Raúl*] Se permite que el combustible que se suministra en Bilbao tiene las características de sostenibilidad del combustible que ingresó en Cartagena, aunque no sea el mismo. Eso es independiente Sé que ese combustible en algún momento ha salido de la red y ha cumplido esos estándares de sostenibilidad. Entonces, como digo, la trazabilidad viene marcada a través de unos estándares por la Comisión Europea que acreditan que se cumplen los criterios de la directiva de energías renovables por los cuales podemos considerar sostenible un combustible de alimento.

[*Teresa*] Y bueno, también como has comentado antes, que España dentro de las medidas europeas ha tenido una gran participación una alta colaboración para que se lleven a cabo. Esto nos puede llegar a poner pues de los primeros a nivel de competitividad

en la industria aeronáutica en España.

[*Raúl*] España parece un país con un alto potencial para la producción de SAF, bueno, por sus características, por la cantidad de materias primas que tienen disponibles, pero se necesita una inversión potente y hay mecanismos que están evaluando. Están evaluando desde el gobierno mecanismos para tratar de no solo garantizar el cumplimiento, sino de desarrollar nuevas infraestructuras que permitan maximizar la producción de SAF en España. Se necesitan muchos, muchos millones de euros para este tipo de infraestructura, para la refinería, la construcción de nuevas refinerías y claro, se necesitan fondos de inversión.

[*Antonio*] Oye, y perdón, me voy a destacar aquí en una pregunta que disculpa, ¿el tanquering, más o menos esa posibilidad de que en vez de hacer aquí un reportaje se vaya fuera y no sea tan necesario, cómo se evita o cómo se protege y protege?

[*Raúl*] Si al operador le obliga a que todo aeropuerto de la Unión al menos tiene que cargar un 90% del que necesita para el vuelo, es justamente eso, se denomina la medida antitanque para evitar que aeronaves que vienen desde fuera de Europa o desde la península, desde los países productores de petróleo normalmente, que vengan muy, muy cargados de combustible y eviten cargar en Europa. Entonces es otra vez, esta es la obligación que aplican los operadores aéreos en el ámbito de recibo, lo que se llama obligados. Yo al suministrador le obligo a meterse y al operador aéreo le obligo a cargar combustible. Con lo cual cierro el tiempo.

[*Teresa*] Y bueno, volviendo un poco lo que estábamos comentando antes de los incentivos y demás, eso que de momento está en proceso, entiendo, pero sí que a nivel nacional ¿se está adaptando algún tipo de regulación europea?

[Raúl] Momento se están explorando diversos mecanismos. Lo que hay que ver es de dónde se puede obtener el dinero. Entonces existen distintos mecanismos, pero está en proceso ahora mismo de evaluación. Quizá proveniente de las subastas de derechos de EU - ETS se pueda dotar de una partida presupuestaria para tratar de mitigar esta diferencia de precios. Quizás a través de algún fondo de innovación, tanto europeos como nacionales, se pueda obtener la financiación. Pero aquí el problema que tienes, Teresa, sobre todo es que el sector aéreo es un sector incluido bajo el régimen EU- ETS que tiene unos objetivos de descarbonización asociados, con lo cual mecanismos que puedan, como si dijéramos, reducir la carga en el ámbito del EU-ETS no son tan sencillos de implantar, no es un mecanismo tan fácil. Sí que existe la intención desde el ministerio de transportes de buscar mecanismos, pero están en una fase todavía de análisis, no hay un mecanismo que digamos el año que viene va a implantarse.

[Teresa] ¿Y ahora mismo, cuál sería el eslabón más débil en la cadena de suministro?

[Raúl] El precio. Existe una diferencia de precios importante. Las compañías aéreas todavía son un poco reacias al coste asociado. El combustible de una compañía normalmente siempre haga que puede rondar al menos de cuatro por millón, el 40% de sus gastos, con lo cual un aumento de los costes por el uso de un SAF en el principal gasto, pues tiene implicaciones que van mucho más allá. Normalmente hay fondos de inversión muchas veces involucrados en las compañías aéreas que están asociadas a un rendimiento económico, con lo cual es muy delicado el decir bueno, pues venga, nos gastamos un 10% más por el uso de SAF, pero eso en las cuentas de resultados, luego tiene implicaciones. Entonces, en tanto ahora mismo es verdad que la oferta es muy limitada, hay pocos a nivel mundial, con lo cual los precios son elevados. A medida que haya más oferta en el mercado de SAF, pues en un mercado que tendrá a reducir de cierta manera su precio del producto y también lógicamente, lo que llaman las curvas de aprendizaje, cada vez la producción será más eficiente, tendrá menos costes, podrá tener se perderá la reducción en el precio de hasta dónde, pues habrá que ver esto. Lógicamente toda la potentísima, potentísima

industria del que no sea un fósil no se va a quedar aceptando que le quiten el mercado. La reducción de precios se puede conseguir de dos maneras, reduzco el precio del SAF o también otra que es un poco esta peor vista, lógicamente, es aumentar el precio de fósile. Esto requiere unanimidad de a nivel de los estados miembros de la Unión Europea, está actualmente en negociación desde el año 2021, porque es normal, pues es un mecanismo que tendría un impacto gravísimo sobre el sector aéreo, con lo cual no hay todavía esta normativa no está en vigor ni está siquiera aprobada.

[*Teresa*] Otra preguntilla que no estaba en las que te envié por correo, que me surgió ayer, era si había alguna actualización reciente respecto a las normativas del acuerdo de París y de Refuel.

[*Raúl*] Creo que ha habido algunas actualizaciones vinculadas, La de EU-ETS sí que ha tenido grandes implicaciones, descodificaciones, no solo para el sector aéreo, sino por la inclusión del sector marítimo, del sector terrestre y del sector de identificaciones del régimen. Pero también para sectores de aviación ha tenido fuertes actualizaciones, fuerte impacto, sobre todo fuera del ámbito de Refuel Hasta la fecha se entregaban una serie de derechos gratuitos a los operadores aéreos de manera que les redujera el gasto económico que tenían que hacer. Derechos gratuitos que serán eliminados en el 2026, con lo cual todas las emisiones ya tendrán un coste asociado, no van a tener derechos gratuitos. Y luego se generan una serie de derechos gratuitos por uso de salud.

[*Teresa*] ¿Y bueno, ya por último, cuáles serían los futuros pasos para dar por vuestra parte?

[*Raúl*] Nuestra parte, siempre desde las administraciones españolas, y esto sí que lo puedo para asegurar, se trata no sólo de velar de que se cumplan las obligaciones, sino de tratar de ser el mecanismo de facilitación a los operadores aéreos. De hecho, nosotros desde la agencia estatal no solo tratamos de facilitar el cumplimiento de la normativa

a operadores atribuidos a España, sino que tenemos una potente colaboración con la región latinoamericana, con todos los agentes, tanto autoridades como operadores aéreos, tratando de explicar todas las obligaciones que les aplican y de ayudarles al cumplimiento de las mismas. Y también ayudando a las autoridades latinoamericanas en desarrollar normativa para la descarbonización del sector aéreo internacional que opera en sus estados. Entonces, la autoridad trata de crear foros de encuentro, como te decía, y después de facilitar el cumplimiento en la medida de sus posibilidades, cuando hay un incumplimiento ejerce todo el derecho que corresponde a una autoridad, como la Dirección General de Elección Civil o la agencia estatal. Trata también de promover mecanismos de garantizar el crecimiento sostenible del sector, manteniendo las tasas del sector aéreo pero con un comportamiento más sostenible del que se ha tenido en el pasado.

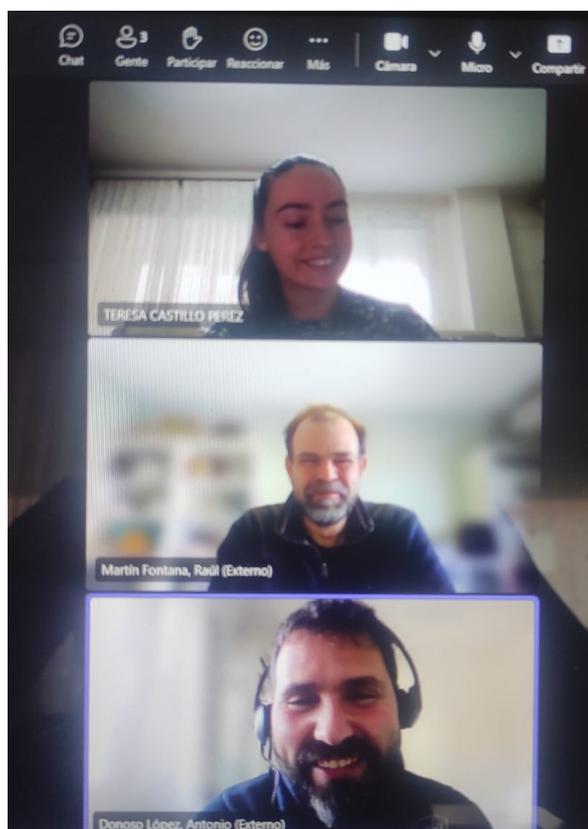


Figura A.1: Captura de pantalla de la entrevista por Microsoft Teams entre Raúl Martín, Antonio Donoso y Teresa Castillo

Entrevista Repsol

[*Voz en off Teresa*] A continuación, se decidió llevar a cabo la entrevista a uno de los proveedores de biocombustible en España, Repsol, representada por Maria Borrell Chaves, Regulatory Affairs Manager en Repsol. Esta entrevista se llevará a cabo por email por petición de la entrevistada

[*Teresa*]¿Que papel desempeña Repsol como proveedor en la promoción del SAF en la aviación Española?

[*María*]Hemos estado trabajando intensamente en la producción de SAF desde 2020, cuando decidimos invertir en una planta de biocombustibles en nuestro complejo industrial de Cartagena. Este combustible se ha convertido en un eje estratégico para nuestra compañía, y supone tanto un reto como una oportunidad para transformar sus instalaciones industriales y conseguir una producción más sostenible. La planta de Cartagena tiene capacidad para fabricar hasta 195.000 toneladas anuales de SAF , a partir de residuos, como el aceite de cocina usado.

[*Teresa*]¿Qué tipo de tecnologías emergentes está explorando Repsol para mejorar la producción de SAF y hacerla más rentable?

[*María*]La ruta HEFA es la tecnología más madura pero es necesario impulsar el desarrollo de nuevas tecnologías como la gasificación + Fischer Trops, Alcohol to Jet o eFuels. Para que estas nuevas tecnologías sean competitivas en costes, se necesita apoyo financiero y un marco regulatorio claro y estable. Repsol tiene en cartera proyectos con

potencial para aumentar significativamente la capacidad de producción de SAF. Después de 2030, si la madurez tecnológica lo permite, se considerarán proyectos para producir SAF sintéticos mediante nuevas tecnologías.

[*Teresa*]¿Cuáles son los principales desafíos que enfrentan en la cadena de suministro de SAF y cómo planean abordarlos?

[*María*]Los principales desafíos a los que nos enfrentamos son:

- Posible limitación de disponibilidad de SAF: las especificaciones técnicas que validan las rutas de producción de combustibles renovables para aviación deberán ser capaces de ampliar las rutas cualificadas de forma ágil y acorde a la velocidad a la que tengan lugar los desarrollos tecnológicos. Ahora mismo, se puede mezclar hasta un máximo del 50 % de SAF con 50 % jet fósil [42]. Para poder cumplir el objetivo de ReFuelEU Aviation en 2050 de suministrar el 70 % del volumen de jet como SAF, es necesario que estas especificaciones cambien. Por esta razón, nuestra principal ruta para la producción de SAF actualmente es la ruta HEFA, pero estamos mirando a partir de 2030 otras opciones que permitan aprovechar otros residuos no lipídicos para la producción de SAF.
- Reconocimiento del Sistema logístico nacional de combustibles: en España tenemos un sistema logístico optimizado que permite evitar el trasiego de cisternas entre los centros de producción al punto de consumo, reduciendo las emisiones de CO₂ asociadas al transporte. Este sistema logístico debería ser visto como una ventaja competitiva y medioambiental para nuestro país. El Reglamento de REfuelEU Aviation reconoce el uso del sistema del balance de masas para demostrar el cumplimiento de las obligaciones de los proveedores de combustible, como suministrar el 2 % en 2025, lo que facilita la distribución a través de nuestro sistema logístico.
- Los combustibles renovables en carretera son imprescindibles para descarbonizar el sector de la aviación y el marítimo: En Europa, el transporte por carretera repre-

senta el 93 % de la energía consumida en el transporte (aviación doméstica el 2 % y marino doméstico el 1 %). En el proceso de producción de combustibles renovables, se obtienen diferentes calidades de combustible, algunas de las cuales sólo son válidas para su uso en el transporte por carretera debido a las especificaciones del producto final. Los productores de combustible no pueden fabricar combustibles renovables exclusivamente para los sectores aéreo y marítimo sin infrautilizar las instalaciones, ya que esto se traduce en mayores costes de producción e ineficiencias. Por esta razón es indispensable que se reconozca que los vehículos de combustión que consuman exclusivamente combustibles 100 % renovables como una solución para el cumplimiento de las obligaciones establecidas a los fabricantes de vehículos [43]. En caso contrario, veremos incentivadas a multinacionales que tienen sus centros de producción fuera de la UE y que nos importarán el SAF mientras la industria de combustibles renovables de la UE desaparece. Adicionalmente, cuanto mayor sea la capacidad de la planta de producción y se puedan aprovechar todos los productos obtenidos, menores serán los CAPEX y OPEX por producto/unidad producida. También se optimizan otros costes asociados, como la logística y las infraestructuras. Por ejemplo, un aumento de la producción al triple de la capacidad de la planta (SAF + combustibles renovables para el transporte por carretera) supone una reducción del 16 % de los costes por tonelada (Para tecnología HEFA).

- Escalados tecnológicos, un reto a resolver: las rutas para la fabricación de combustibles sintéticos para aviación, eSAF, se encuentran actualmente en fase de maduración y no existen referencias industriales. La disponibilidad de un H₂ renovable electrolítico a un coste competitivo, la integración de los procesos de producción que garanticen una operación eficiente y un rendimiento adecuado, junto con las elevadas inversiones asociadas a este tipo de plantas son los grandes retos que deben salvarse de cara al escalado industrial de estas tecnologías.

[Teresa]¿Cómo ha cambiado la demanda de SAF en los últimos años y cómo impacta esto en las operaciones de Repsol?

[*María*] Desde 2014, las aerolíneas deben declarar las emisiones generadas por los vuelos realizados principalmente dentro de la Unión Europea, en cumplimiento de la Directiva de Comercio de Emisiones (ETS). Esta normativa también otorga derechos de emisión gratuitos, que entre 2014 y 2022 fueron establecidos en un 95 %. Sin embargo, a partir de 2023, la reducción progresiva de las asignaciones gratuitas (85 % en 2023, 64 % en 2024, 43 % en 2025 y 0 % en 2026) ha impulsado una mayor demanda de SAF (combustible de aviación sostenible). Dado que las aerolíneas se ven obligadas a reducir sus emisiones debido a la disminución de los derechos gratuitos, el SAF ha emergido como una de las principales soluciones, ya que se considera que genera emisiones netas de 0 gCO₂ por cada metro cúbico consumido.

[*Teresa*] ¿Qué tipo de colaboraciones estratégicas han establecido con aerolíneas o aeropuertos para fomentar la adopción de SAF? ¿Cómo ha sido la participación en foros de encuentro, se han resuelto dudas, se ha proporcionado orientación?

[*María*] Tenemos acuerdos firmados varias aerolíneas (Vueling [44], Ryanair [45], Vueling [46], IAG [47], entre otras) que son las principales interesadas en consumir el SAF de cara a reducir el impacto del coste del cumplimiento de sus obligaciones derivadas del comercio de emisiones (ETS).

[*Teresa*] ¿Cómo se alinean los objetivos de producción de SAF de Repsol con las políticas de sostenibilidad a nivel europeo?

[*María*] En Repsol, estamos firmemente comprometidos con el cumplimiento de las normativas que afectan a nuestras operaciones. Por ello, el SAF que producimos cumple con los criterios de sostenibilidad establecidos a nivel europeo, como los definidos en la Directiva de Energías Renovables.

[*Teresa*] ¿Cuáles son los retos para asegurar una disponibilidad de materias primas sostenible y suficiente para la producción de SAF?

[*María*] Actualmente el 99% del SAF que se pone en el mercado se fabrica con la ruta HEFA. Esta es una tecnología madura, con muchas referencias comerciales y que utiliza como materias primas residuos lipídicos. Hay estudios, como el realizado por Imperial College London Consultants [48], que concluyen que la disponibilidad potencial de biomasa sostenible, sin perjuicio para la biodiversidad, podría apoyar una producción de biocombustibles avanzados y basados en residuos de hasta 175 Mtep en 2050, pudiendo cubrir la demanda estimada por los sectores de carretera, aviación y marítimo de la UE (170 Mtep en 2050 [49]). Esta conclusión refuerza un estudio de Concawe que muestra que los biocombustibles avanzados y basados en residuos, junto con los combustibles sintéticos, pueden desempeñar un papel clave, complementario a la electrificación, para la descarbonización del transporte de la UE en consonancia con el objetivo de neutralidad climática para 2050. Sin embargo, también será necesario utilizar otro tipo de residuos que requieren de tecnologías menos maduras y con altas inversiones que tendrán un impacto en el precio final del producto (por ejemplo, como la ruta Alcohol a Jet o eFuels). Este impacto debería reducirse en la medida que estas tecnologías maduren y las nuevas cadenas logísticas necesarias para movilizar las nuevas materias primas estén suficientemente desarrolladas.

[*Teresa*] ¿Cómo aborda Repsol la trazabilidad del SAF y asegura el cumplimiento de estándares internacionales de sostenibilidad?

[*María*] Repsol, tanto sus centros productivos como la cadena de logística, está certificada bajo el Esquema Voluntario de Sostenibilidad ISCC-EU y el Sistema Nacional de Verificación de la Sostenibilidad de España, asegurando la trazabilidad y la producción de biocombustibles sostenibles conforme a los estándares de la Directiva de Energías Renovables (RED). Adicionalmente, también cuenta con la certificación de toda la ca-

dena logística del combustible de aviación sostenible bajo el esquema ISCC CORSIA, asegurando el cumplimiento de los requisitos de sostenibilidad conforme a esta norma internacional.

[*Teresa*] ¿Cuáles son los obstáculos regulatorios y tecnológicos más significativos para la producción y distribución de SAF en Europa?

[*María*] Algunos están comentados en la pregunta 3 pero concretamente, sobre el marco regulatorio y la producción y distribución de SAF, destacamos:

- La necesidad de un marco regulatorio claro y armonizado: existen distintas regulaciones con distintos alcances (RED III, RefuelEU Aviation y ETS-aviación). Es necesario un despliegue de la normativa coordinado. A futuro las diferentes regulaciones deberían converger y simplificarse. Adicionalmente, el sector de la aviación se mueve en un entorno global y por lo tanto las señales regulatorias para la producción de SAF deberían ser homogéneas a nivel global (CORSIA vs ETS-aviación) para evitar distorsiones de mercado y pérdida de competitividad en aquellas regiones con más restricciones.
- Economías de escala: es fundamental poder aprovechar en el mercado EU toda la producción de combustibles renovables que se generan en un mismo proceso. Esto permite tener plantas de producción de mayor capacidad y optimizar los costes de producción.

[*Teresa*] ¿Cómo va a afectar a nivel tecnológico el aumento del porcentaje de SAF en el combustible? ¿Se podrán seguir utilizando el mismo tipo de motores aeronáuticos cuando sea 90 % SAF?

[*María*] El incremento del porcentaje de SAF establecido en el Reglamento podrá llegar a ser una realidad si las especificaciones [50] del jet-A1 se actualizan, según el

procedimiento establecido, e incrementan el porcentaje de SAF posible en mezcla. De momento se puede mezclar como máximo hasta un 50 % de SAF en función de la ruta de producción, por lo que queda camino todavía por recorrer para garantizar que el mismo tipo de motor aeronáutico puede usar concentraciones superiores de SAF.

[*Teresa*] ¿Qué papel juegan los gobiernos en la promoción del SAF según la experiencia de Repsol?

[*María*] Los gobiernos son los principales habilitadores para que el SAF se convierta en una realidad. No solo porque tienen la capacidad de crear incentivos económicos para su producción y consumo, sino también porque, como reguladores, pueden facilitar el desarrollo de estos proyectos. Desde 2021, nos enfrentamos a un "tsunami regulatorio" complejo que complica aún más la toma de decisiones en proyectos con alto riesgo tecnológico y económico. Es responsabilidad de los gobiernos, tanto a nivel europeo como nacional, armonizar y simplificar esta maraña regulatoria. Este es uno de los compromisos clave adquiridos por Ursula von der Leyen para la nueva Comisión Europea: simplificar la burocracia derivada del nuevo marco regulatorio para evitar la pérdida de competitividad de la industria europea.

[*Teresa*] ¿Qué medidas están tomando para reducir los costos de producción de SAF y aumentar su competitividad en el mercado?

[*María*] Como se mencionó en la pregunta 3, una de las medidas clave para reducir los costos de producción de SAF y aumentar su competitividad en el mercado es permitir, a partir de 2035, el consumo de combustibles 100 % renovables en el sector de la carretera en la UE. Actualmente, con la prohibición de los motores de combustión en los turismos, esto no es posible, ya que las únicas alternativas reconocidas son la electricidad y el hidrógeno. Es crucial poder optimizar tanto los CAPEX como los OPEX de las nuevas plantas de producción de combustibles renovables, ya que, en la actualidad, no es viable producir

exclusivamente SAF o combustibles renovables marinos. Solo mediante una optimización adecuada se podrá asegurar el volumen suficiente de SAF a largo plazo.

[*Teresa*] ¿Cuáles serían los futuros pasos a dar por parte de Repsol en la producción y distribución de SAF?

[*María*] Los próximos pasos ya están en marcha. Contamos con la primera planta de producción de SAF en Cartagena y con una planta piloto de combustibles sintéticos en Bilbao. Actualmente, estamos explorando otras tecnologías como alcohol-to-jet, gasificación + Fischer-Tropsch y los efuels a escala industrial, con el objetivo de garantizar una oferta continua de SAF a largo plazo.

Entrevista Iberia

[*Voz en off Teresa*] Por último, realiza la entrevista a una de las aerolíneas [59] que utiliza biocombustible en España, Iberia, representada por Beatriz Urruchi del Barrio, Fuel Efficiency and OPS Strategy Manager en Iberia. Esta entrevista se llevará a cabo por email por petición de la entrevistada.

[*Teresa*] ¿Cuáles son los principales desafíos que enfrentan en la cadena de suministro de SAF y cómo planean abordarlos?

[*Beatriz*] El principal desafío es la disponibilidad de SAF en todas las escalas operadas en Europa. Actualmente el requisito de cargar un 2 % de SAF lo tienen los proveedores a nivel país, por lo que cada proveedor puede decidir donde ubica el SAF en base a sus preferencias. Para poder reducir las emisiones de la aerolínea, que es la que adquiere el SAF, el SAF debe ser cargado en un aeropuerto desde donde la aerolínea tenga operación, por lo que se deben llegar a acuerdos con los proveedores para que el SAF sea ubicado en todos los aeropuertos operados.

[*Teresa*] ¿Cómo ha cambiado la demanda de SAF en los últimos años y cómo impacta esto en las operaciones de Iberia? ¿Cómo visualizan el impacto de la creciente demanda de sostenibilidad por parte de los clientes y el cambio en los comportamientos de viaje en las emisiones de la industria a largo plazo?

[*Beatriz*] De acuerdo con la IATA, la producción de SAF se ha triplicado en 2024, alcanzando los 1,900 millones de litros. Aunque esto representa solo un 0.53 % del com-

bustible necesario por la aviación en 2024. Esta demanda será aun mayor con la entrada en vigor de la normativa Refuel EU, por la que se incrementa el porcentaje de SAF requerido progresivamente. Operativamente, un mayor uso de SAF no tiene impacto, pero el impacto es significativo en la cuenta de resultados de cualquier aerolínea con base en Europa a no ser que los precios de SAF se equiparen a los del combustible convencional.

[*Teresa*] ¿Cómo va a afectar a nivel tecnológico el aumento del porcentaje de SAF en el combustible? ¿Se podrán seguir utilizando el mismo tipo de motores aeronáuticos cuando sea 90 % SAF?

[*Beatriz*] Los motores aeronáuticos actuales están diseñados para funcionar con mezclas de SAF y combustibles fósiles tradicionales. Actualmente, la mayoría de los combustibles SAF están certificados para mezclas de hasta un 50 % con queroseno convencional, aunque existen combustibles SAF menos avanzados (coprocesados) que sólo permiten hasta un 24 % en la actualidad, en 2024 sólo se permitía el 5 %. La certificación ASTM (American Society for Testing and Materials) es clave para garantizar la seguridad y funcionalidad de los combustibles utilizados en la aviación. Actualmente, los combustibles SAF están regulados por la norma ASTM D7566, que establece las especificaciones técnicas para su mezcla y uso en motores aeronáuticos. Los motores actuales podrían necesitar ajustes menores o modificaciones en algunos componentes para adaptarse a propiedades químicas y físicas específicas del SAF, como su densidad energética ligeramente diferente, mayor estabilidad térmica y menor contenido de azufre. La certificación para operar con 100 % SAF ya está en desarrollo. Pruebas iniciales han demostrado que muchos motores actuales pueden funcionar sin problemas, pero podrían requerirse adaptaciones menores en sistemas de combustión y gestión del flujo de combustible.

[*Teresa*] ¿Qué importancia tiene para la aerolínea la transparencia en la trazabilidad del SAF para garantizar su sostenibilidad y cumplir con los estándares ambientales globales? ¿Se va a inculcar esto a nivel de clientes y trabajadores?

[*Beatriz*] Es de vital importancia, es requisito obligatorio tener trazabilidad del SAF adquirido y volcado en los aeropuertos, de donde proviene y % de reducción de CO₂, entre otros parámetros. Todo el SAF debe cumplir con la normativa RED III de cara a poder ser utilizado en los distintos esquemas de emisiones.

[*Teresa*] Actualmente, la producción de SAF es limitada y depende de fuentes específicas. ¿Qué medidas concretas está tomando Iberia para garantizar un suministro estable, especialmente en aeropuertos secundarios o menos conectados?

[*Beatriz*] Mediante alianzas con proyectos de investigación para creación de SAF con tecnología sintética, que garanticen el desarrollo de nuevas tecnologías de SAF basadas en materias primas no finitas, como el PTL.

[*Teresa*] En términos de liderazgo sectorial, ¿qué acciones específicas diferencian a Iberia de otras aerolíneas europeas en cuanto al cumplimiento y promoción del uso de SAF? ¿Cómo planean mantener esa posición competitiva a largo plazo?

[*Beatriz*] Mediante un estrategia que apoye el uso de SAF voluntario, por encima de los requisitos normativos de la Unión Europea.

[*Teresa*] Si el mercado global de SAF no logra satisfacer la demanda creciente debido a restricciones en las materias primas, ¿cuál sería el plan alternativo de Iberia para cumplir con sus compromisos climáticos?

[*Beatriz*] Es un requisito normativo, si no existe volumen de SAF disponible no se podría cumplir con las exigencias de la normativa de la UE y el SAF es fundamental para la reducción de emisiones ya que no existe actualmente otra tecnología disponible que permita alcanzar los objetivos climáticos de IAG y de la UE.

Bibliografía

- [1] Terrenoire, E., Hauglustaine, D. A., Gasser, T., and Penanhoat, O. (2019). The contribution of carbon dioxide emissions from the aviation sector to future climate change. *Environmental Research Letters*, 14(8), 084019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab3086> 5, 6
- [2] Grimme, W. (2023). The Introduction of Sustainable Aviation Fuels—A Discussion of Challenges, Options and Alternatives. *Aerospace*, 10(3), 218. <https://doi.org/10.3390/aerospace10030218> 1, 5
- [3] Green Energy to Sustainability: Strategies for Global Industries, First Edition. Edited by Alain A. Vertès, Nasib Qureshi, Hans P. Blaschek and Hideaki Yukawa. 2020 John Wiley and Sons Ltd. Published 2020 by John Wiley and Sons Ltd. Chapter 5: Recent Trends, Opportunities and Challenges of Sustainable Aviation Fuel 7, 10, 24
- [3.2] https://www.enaire.es/es_ES/2024_03_01/ndp_plan_sostenibilidad_ambiental_enaire 10
- [4] Becken, S. and Pant, P., 2019; “Iniciativas de las aerolíneas para reducir el impacto climático”, Amadeus. <https://amadeus.com/es/articulos/libroblanco/iniciativas-de-las-aerolineas-para-reducir-el-impacto-climatico> 8
- [5] Fahey, D.W. et al., 2016; “White paper on climate change aviation impacts on climate: state of the science”, ICAO. <https://www.icao.int/environmentalprotection/Documents/Forms/AllItems.aspx?RootFolder=%2fenvironmental%2dprotection%2fDocuments%2fScientific%2fUnderstanding&FolderCTID=0x01200048E70A3021A9504D98DF706482A68A4C> 11, 12
- [6] OAG, 2020; “How green is your airline? The sustainability debate”, OAG. <https://www.oag.com/how-green-is-your-airline> 12

- [7] Shahriar, M. F., and Khanal, A. (2022). The current techno-economic, environmental, policy status and perspectives of sustainable aviation fuel (SAF). *Fuel*, 325, 124905. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124905> 13
- [8] Ng, K. S., Farooq, D., and Yang, A. (2021). Global biorenewable development strategies for sustainable aviation fuel production. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 150, 111502. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111502> 13, 15, 16, 17, 18
- [9] Baxter, G. (2020). The Use of Aviation Biofuels as an Airport Environmental Sustainability Measure: The Case of Oslo Gardermoen Airport. *MAD - Magazine Of Aviation Development*, 8(1), 6-17. <https://doi.org/10.14311/mad.2020.01.01> 14, 20, 62, 63
- [10] Helena Michelle Rodriguez (2023). Sustainable Aviation Fuel Implementation Strategies for European Airports. 17, 19, 23, 24, 28, 29, 48, 49, 50, 73
- [11] Moriarty, K., and Kvien, A. (2021). U.S. Airport Infrastructure and Sustainable Aviation Fuel. <https://doi.org/10.2172/1768316> 11, 17, 18, 19, 23, 26
- [12] Chao, H., Agusdinata, D. B., DeLaurentis, D., and Stechel, E. B. (2019). Carbon offsetting and reduction scheme with sustainable aviation fuel options: Fleet-level carbon emissions impacts for U.S. airlines. *Transportation Research Part D Transport And Environment*, 75, 42-56. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.08.015> 20, 74, 75
- [13] LINA MARTINEZ-VALENCIA (2022).A SYSTEM DYNAMICS MODEL APPROACH FOR POLICY ANALYSIS OF SUSTAINABLE AVIATION FUEL 33
- [14] Doliente SS, Narayan A, Tapia JFD, Samsatli NJ, Zhao Y and Samsatli S (2020) Bio-aviation Fuel: A Comprehensive Review and Analysis of the Supply Chain Components. *Front. Energy Res.* 8:110. doi: 10.3389/fenrg.2020.00110 34, 35
- [15] Walter T. Kelso III (2019). Cost Optimization of US Sustainable Aviation Fuel Supply Chain Under Different Policy Constraints 34, 35

- [16] <https://www.lufthansa.com/es/es/discover-lufthansa/carbon-offsetting/faq-saf> 37
- [17] P. Schmidt, V. Batteiger, A. Roth, W. Weindorf, T. Raksha; Power-to-Liquids as Renewable Fuel Option for Aviation: A Review 2018, 90(1-2), 127-140. 37, 38, 39, 43
- [18] Vincent Eyberg, Vincent Dieterich, Sebastian Bastek, Marcel Dossow, Hartmut Spliethoff, Sebastian Fendt (2024). Techno-economic assessment and comparison of Fischer–Tropsch and Methanol-to-Jet processes to produce sustainable aviation fuel via Power-to-Liquid. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118728> 37, 39, 41
- [19] Maria Fernanda Rojas-Michaga, Stavros Michailos, Evelyn Cardozo, Muhammad Akram, Kevin J. Hughes, Derek Ingham, Mohamed Pourkashanian (2023). Sustainable aviation fuel (SAF) production through power-to-liquid (PtL): A combined techno-economic and life cycle assessment. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117427> 38, 39
- [20] Felix Habermeyer, Julia Weyand, Simon Maier, Esa Kurkela, Ralph-Uwe Dietrich (2023). Power Biomass to Liquid — an option for Europe’s sustainable and independent aviation fuel production. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03671-y> 38, 39, 40
- [21] <https://www.sun-to-liquid.eu/> 40, 41, 42
- [22] LA SOSTENIBILIDAD MEDIOAMBIENTAL EN EL SECTOR AERONÁUTICO ADENDA 2023. Informe del Colegio Oficial de Ingenieros Aeronáuticos de España. Julio 2024. Dña. Encarna Martín Santana D. Víctor García Gómez
- [23] Ficca, A., Marulo, F., and Sollo, A. (2023). An open thinking for a vision on sustainable green aviation. Progress In Aerospace Sciences, 141, 100928. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2023.100928> 44, 78

- [24] Santos, K., and Delina, L. (2021). Soaring sustainably: Promoting the uptake of sustainable aviation fuels during and post-pandemic. *Energy Research and Social Science*, 77, 102074. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102074> 44, 74, 75, 76
- [25] ICAO Environmental Report 2022 (Organización de Aviación Civil Internacional - ICAO): <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/envrep2022.aspx> 44, 45
- [26] Aviation and the Global Atmosphere (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, 2022) <https://www.ipcc.ch/report/aviation-and-the-global-atmosphere-2/> 45
- [27] Chong, C. T., and Ng, J. (2021). *Biojet Fuel in Aviation Applications: Production, Usage and Impact of Biofuels*. Elsevier. 45
- [28] Wittmer, A., Bieger, T., and Müller, R. (2021). *Aviation systems: Management of the Integrated Aviation Value Chain*. Springer Nature. 45
- [29] Braun, M., Grimme, W., and Oesingmann, K. (2024). Pathway to net zero: Reviewing sustainable aviation fuels, environmental impacts and pricing. *Journal Of Air Transport Management*, 117, 102580. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2024.102580> 44
- [30] Progress in Commercialization of Biojet /Sustainable Aviation Fuels (SAF): Technologies, potential and challenges. IAE Bioenergy Technology Collaboration Programme. May 2021. 47, 48, 49
- [31] Ansell, P. J. (2023). Review of sustainable energy carriers for aviation: Benefits, challenges, and future viability. *Progress In Aerospace Sciences*, 141, 100919. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2023.100919> 48, 50
- [32] Anderson, B. J., Mueller, D. W., Hoard, S. A., Sanders, C. M., and Rijkhoff, S. A. M. (2022). Social Science Applications in Sustainable Aviation Biofuels Research: Opportunities, Challenges, and Advancements. *Frontiers In Energy Research*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.771849> 48, 49

- [33] <https://www.sugarcane.org/sustainability-the-brazilian-experience/renovabio/> 49
- [34] La sostenibilidad ambiental en la actividad aérea. Vinculaciones entre el derecho ambiental y el derecho aeronáutico y aeroportuario. Mariel Bobasso, Guadalupe Hidalgo. *elDial DC3503*. 2024 61, 62
- [35] Marzi, E.; Morini, M.; Gambarotta, A. Analysis of the Status of Research and Innovation Actions on Electrofuels under Horizon 2020. *Energies* 2022, 15, 618. <https://doi.org/10.3390/en15020618>
- [36] <https://www.greendealstargate.eu/>
- [37] <https://www.olga-project.eu/>
- [38] <https://alight-aviation.eu/>
- [39] <https://eneuron.eu/>
- [40] Morch, A., Laveneziana, L., Erga, I., Restaldo, G., Odisio, M., and Chiaramonti, D. (2024). Electrification of airports and air transport: Airports becoming integrated energy systems. 2022 18th International Conference On The European Energy Market (EEM), 290, 1-6. <https://doi.org/10.1109/eem60825.2024.10608967>
- [41] <https://tulips-greenairports.eu/> 65
- [42] <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Conversion-processes.aspx> 66
- [43] <https://eur-lex.europa.eu/ES/legal-content/summary/reduction-in-co2-emissions-of-new-passenger-cars-and-of-new-light-commercial-vehicles.html?fromSummary=20> 66
- [44] <https://www.repsol.com/es/sala-prensa/notas-prensa/2021/repsol-y-vueling-se-alian-en-el-primer-vuelo-con-combustible-sos/index.cshtml> 66
- [45] <https://www.repsol.com/content/dam/repsol-corporate/es/sala-de-prensa/documentos-notas-de-prensa/2023/np04052023-repsol-ryanair-acuerdo-fomentar-combustibles-renovables.pdf> 65, 66, 67

- [46] <https://www.repsol.com/content/dam/repsol-corporate/es/sala-de-prensa/documentos-notas-de-prensa/2024/np01082024-repsol-volotea-compra-saf.pdf>
- [47] <https://www.repsol.com/es/sala-prensa/notas-prensa/2024/iag-y-repsol-acuerdan-la-mayor-compra-de-saf-en-espana/index.cshtml> 94
- [48] <https://www.fuelseurope.eu/publications/publications/sufficient-sustainable-biomass-feedstock-available-to-support-an-ambitious-low-carbon-liquid-fuels-strategy-for-eu-transport> 95
- [49] See figure 22 in <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX3A52021SC0621> 96
- [50] <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Conversion-processes.aspx> 96
- [51] Wang, B., Ting, Z. J., and Zhao, M. (2024). Sustainable aviation fuels: Key opportunities and challenges in lowering carbon emissions for aviation industry. *Carbon Capture Science and Technology*, 13, 100263. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2024.100263> 96
- [52] Hari, T. K., Yaakob, Z., and Binitha, N. N. (2014). Aviation biofuel from renewable resources: Routes, opportunities and challenges. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 42, 1234-1244. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.095> 96
- [53] Thompson, W., Meyer, S., and Westhoff, P. (2010). The New Markets for Renewable Identification Numbers. *Applied Economic Perspectives And Policy*, 32(4), 588-603. [https://doi.org/10.1093/aep/32\(4\)/588](https://doi.org/10.1093/aep/32(4)/588) 97
- [54] Sustainable Aviation Fuels: Status, challenges and prospects of drop-in liquid fuels, hydrogen and electrification in aviation. Niccolò Bitossi, Lizzie German, Anisha Harris, Khangzhen Leow E4tech Ltd, 83 Victoria Street, London, SW1H 0HW, UK. <https://doi.org/10.1595/205651320X15816756012040> 97

- [55] Seymour, K., Held, M., Stolz, B., Georges, G., and Boulouchos, K. (2024). Future costs of power-to-liquid sustainable aviation fuels produced from hybrid solar PV-wind plants in Europe. *Sustainable Energy and Fuels*, 8(4), 811-825. <https://doi.org/10.1039/d3se00978e> 98
- [56] Pimchanok Su-ungkavatin, Ligia Tiruta-Barna, Lorie Hamel. Biofuels, electrofuels, electric or hydrogen?: A review of current and 51
- [57] Cabrera, E., and De Sousa, J. M. M. (2022). Use of Sustainable Fuels in Aviation—A Review. *Energies*, 15(7), 2440. <https://doi.org/10.3390/en15072440> 50, 51
- [58] Ahmad, S., and Xu, B. (2021). A cognitive mapping approach to analyse stakeholders' perspectives on sustainable aviation fuels. *Transportation Research Part D Transport And Environment*, 100, 103076. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103076> 77
- [59] Ibn-Mohammed, T., Mustapha, K., Godsell, J., Adamu, Z., Babatunde, K., Akintade, D., Acquaye, A., Fujii, H., Ndiaye, M., Yamoah, F., and Koh, S. (2020). A critical analysis of the impacts of COVID-19 on the global economy and ecosystems and opportunities for circular economy strategies. *Resources Conservation And Recycling*, 164, 105169. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105169> 1, 2
- [60] Braun, M., Grimme, W., and Oesingmann, K. (2024b). Pathway to net zero: Reviewing sustainable aviation fuels, environmental impacts and pricing. *Journal Of Air Transport Management*, 117, 102580. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2024.102580>. 39
- [61] Materiales Jornada Informativa AESA 30 Enero 2025 Implementación del Reglamento ReFuel EU Aviation y novedades en el ámbito del Régimen de Comercio de Emisiones en el sector aéreo. 43