

# Trabajo de Fin de Máster

## Ingeniería Industrial

Procesos de producción de Combustible Sostenible para la Aviación. Estado del arte y desarrollo industrial.

Autor: Antonio Álvarez Acuña

Tutor: José Fernando Vidal Barrero

**Dpto. Ingeniería Química y Ambiental**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2024





Trabajo de Fin de Máster  
Ingeniería Industrial

# **Procesos de producción de Combustible Sostenible para la Aviación. Estado del arte y desarrollo industrial.**

Autor:

Antonio Álvarez Acuña

Tutor:

José Fernando Vidal Barrero

Catedrático

Tutora externa:

Ana Pequenín Martínez

Dpto. Ingeniería Química y Ambiental  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024



Trabajo de Fin de Máster: Procesos de producción de Combustible Sostenible para la Aviación. Estado del arte y desarrollo industrial.

Autor: Antonio Álvarez Acuña

Tutor: José Fernando Vidal Barrero

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2024

El Secretario del Tribunal

*A mi familia*

*A mis maestros*



# Resumen

---

Este trabajo explora el estado del arte y los procesos de producción de Combustible Sostenible para la Aviación (SAF). En un contexto donde la sostenibilidad emerge como un imperativo ineludible, particularmente en sectores cuyo uso de energía resulta intensivo como es el caso de la aviación, el SAF se presenta como una alternativa prometedora frente a los combustibles fósiles tradicionales. Este estudio se centra en el estudio de la viabilidad del SAF, resaltando su potencial para reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la aviación comercial.

Los objetivos del trabajo son dobles: primero, proporcionar una visión exhaustiva del marco normativo y del estado del arte en la producción de SAF; y segundo, evaluar los desafíos y oportunidades asociados a la adopción de SAF en la industria aeronáutica. A través de un análisis detallado de las tecnologías de producción, incluyendo los métodos aprobados hasta la fecha y los que se encuentran en proceso de aprobación, el estudio demuestra la viabilidad técnica y la eficiencia de estos métodos en la producción de SAF.

El trabajo también revisa los proyectos llevados a cabo, en desarrollo y futuros que implican la utilización de SAF, destacando iniciativas significativas y estudios de caso de aerolíneas que han comenzado a utilizar estos combustibles. Además, se revisan y plantean las barreras técnicas, económicas y regulatorias que suponen un desafío para la expansión del SAF, buscando y proponiendo rutas a seguir para superar estos obstáculos.

Finalmente, se plantean las perspectivas futuras del SAF, con especial atención en las políticas de sostenibilidad y los incentivos gubernamentales que podrían fomentar su uso extendido. Las conclusiones del trabajo enfatizan la importancia del desarrollo continuo de tecnologías de SAF y la implementación de un marco normativo favorable para alcanzar los objetivos de reducción de emisiones y sostenibilidad en la aviación.

# Abstract

---

This master's thesis addresses the state of the art and the production processes of Sustainable Aviation Fuel (SAF). In a context where sustainability emerges as an unavoidable imperative, especially in energy-intensive sectors like aviation, SAF stands out as a promising alternative to traditional fossil fuels. This study focuses on the definition, importance, and feasibility of SAF, highlighting its potential to significantly reduce greenhouse gas emissions associated with commercial aviation.

The objectives of the work are twofold: first, to provide a comprehensive overview of the regulatory framework and current technological advancements in SAF production; and second, to assess the challenges and opportunities associated with the adoption of SAF in the aviation industry. Through a detailed analysis of production technologies, including the currently validated processes and the processes under validation, the study demonstrates the technical viability and efficiency of these methods in producing SAF.

The work also reviews current and future projects involving the use of SAF, highlighting significant initiatives and case studies of airlines that have begun to implement these fuels. Additionally, the technical, economic, and regulatory challenges that could hinder the expansion of SAF are discussed, searching and proposing a way forward to overcome these obstacles.

Finally, future prospects of SAF are considered, with special focus on sustainability policies and government incentives that could encourage its widespread use. The conclusions of the work emphasize the importance of ongoing development of SAF technologies and the implementation of a favorable regulatory framework to achieve emission reduction and sustainability goals in aviation.

# Índice

---

<b>Resumen</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract</b>	<b>x</b>
<b>Índice</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Ilustraciones</b>	<b>xiv</b>
<b>Glosario</b>	<b>xvi</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Definición de Combustible Sostenible para la Aviación</i> .....	1
1.2 <i>Importancia de SAF en la aviación</i> .....	3
<b>2 Objetivos y Estructura del Trabajo</b>	<b>5</b>
<b>3 Marco Normativo de SAF</b>	<b>6</b>
3.1 <i>Regulaciones y políticas relacionadas con SAF a nivel internacional</i> .....	6
3.2 <i>Normas y estándares de calidad para SAF</i> .....	8
3.3 <i>Incentivos gubernamentales para la producción y uso de SAF</i> .....	9
<b>4 Tecnologías de Producción de SAF</b>	<b>11</b>
4.1 <i>Métodos actuales de producción de SAF</i> .....	12
4.1.1 Fischer-Tropsch.....	13
4.1.2 Hidrotratamiento de Ácidos Grasos y Ésteres.....	14
4.1.3 Isoparafinas Sintéticas.....	15
4.1.4 Alcohol-to-Jet.....	16
4.1.5 Hidrotermólisis Catalítica .....	17
4.2 <i>Avances en la producción de SAF de próxima generación</i> .....	19
4.2.1 Queroseno Sintetizado Aromático .....	20
4.2.2 Hidropirólisis e Hidroconversión Integrada .....	20

<b>5</b>	<b>Proyectos Actuales de Producción y Uso de SAF</b>	<b>22</b>
5.1	<i>Estudios de caso de aerolíneas y empresas que utilizan SAF</i> .....	22
5.2	<i>Iniciativas de producción de SAF a gran escala</i> .....	24
5.3	<i>Beneficios económicos de la adopción de SAF</i> .....	27
<b>6</b>	<b>Desafíos y Puntos de Bloqueo en la Adopción de SAF</b>	<b>29</b>
6.1	<i>Escenarios de adopción de SAF a largo plazo</i> .....	29
6.1.1	Escenario 1: impulso de tecnología y operaciones .....	29
6.1.2	Escenario 2: despliegue agresivo de SAF .....	30
6.1.3	Escenario 3: perspectiva tecnológica aspiracional y agresiva .....	30
6.2	<i>Barreras técnicas y económicas en la producción de SAF</i> .....	31
6.2.1	Barreras técnicas .....	32
6.2.2	Barreras económicas.....	32
6.3	<i>Disponibilidad y distribución de SAF</i> .....	33
<b>7</b>	<b>Modelo de Producción de SAF</b>	<b>37</b>
7.1	<i>Perspectiva futura de flotas y emisiones</i> .....	37
7.2	<i>Modelo de costes de queroseno</i> .....	41
7.3	<i>Modelo de coste de SAF</i> .....	45
7.3.1	Resultados y discusión .....	51
<b>8</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>54</b>
	<b>Referencias</b>	<b>55</b>

# Índice de Tablas

---

Tabla 1. Eventos en el desarrollo de la regulación de emisiones de carbono.....	7
Tabla 2. Procesos de conversión aprobados por la ASTM.....	9
Tabla 3. Características y composición del Jet A fuel.....	18
Tabla 4. Procesos de conversión bajo evaluación.....	19
Tabla 5. Comparativa de propiedades de distintos combustibles de aviación vs SAK.....	20
Tabla 6. Resumen de características de tipos de SAF.....	27
Tabla 7. Resumen del impacto de la producción de SAF en España.....	28
Tabla 8. Precio de biomasa comúnmente utilizada para la producción de SAF.....	34
Tabla 9. Referencia de CORSIA para emisiones de combustibles alternativos.....	35
Tabla 10. Evolución de flotas hasta 2050.....	38
Tabla 11. Consumo de combustible de aviación global por escenario Waypoint 2050 y año.....	39
Tabla 12. Valor de Créditos de Reducción de Emisiones.....	40
Tabla 13. Factores de conversión para los cálculos de emisiones de CO <sub>2</sub> .....	41
Tabla 14. Emisiones de CO <sub>2</sub> a nivel global.....	42
Tabla 15. Compensaciones por emisiones según esquema CORSIA.....	43
Tabla 16. Evolución del gasto en queroseno.....	44
Tabla 17. Valores de CapEx para la producción de SAF por ruta.....	46
Tabla 18. Coste de materia prima.....	47

# Índice de Ilustraciones

---

Ilustración 1. Cantidad de combustible sostenible a suministrar por proveedores de combustible de aeropuertos de la UE según la regulación RefuelEU Aviation.....	8
Ilustración 2. Concepto de ruta de producción de SAF.....	11
Ilustración 3. Tipos de fuentes de biomasa y rutas para la obtención de SAF [24].....	11
Ilustración 4. Diagrama de flujo de rutas de producción de SAF certificadas por ASTM.....	13
Ilustración 5. Diagrama de proceso de producción de combustibles mediante síntesis de Fischer-Tropsch [25].....	14
Ilustración 6. Sistema de HEFA simplificado [30].....	15
Ilustración 7. Proceso de ATJ.....	16
Ilustración 8. Diagrama de flujo del proceso de Hidrotermólisis Catalítica (CHJ).....	17
Ilustración 9. Composición de SAF comparado con Jet A Fuel.....	18
Ilustración 10. Proceso de evaluación ASTM D4054.....	19
Ilustración 11. Proceso de IH2.....	21
Ilustración 12. Aeropuertos con distribución de SAF mundialmente.....	23
Ilustración 13. Aeropuertos distribuyendo SAF de forma regular (rojo) e intermitente (amarillo) en Europa.....	23
Ilustración 14. Aeropuertos distribuyendo SAF de forma regular (rojo) e intermitente (amarillo) en América.....	23
Ilustración 15. LanzaJet Freedom Pines Fuels, Soperton, Estados Unidos.....	24
Ilustración 16. Proyección del consumo de combustible para aviación en España por tipo de vuelo [Mt].	25
Ilustración 17. Nº de plantas de producción de biocombustibles.....	25
Ilustración 18. Evolución de la producción global de SAF según el S&P.....	26
Ilustración 19. Capacidad de producción potencial y actual de SAF a fecha de 2021.....	27
Ilustración 20. Escenario 1 del informe Waypoint 2050.....	29
Ilustración 21. Concepto de avión regional ZEROe Airbus.....	30
Ilustración 22. Escenario 2 del informe Waypoint 2050.....	30
Ilustración 23. Escenario 3 del informe Waypoint 2050.....	31
Ilustración 24. Principales barreras para la introducción de combustibles sostenibles.....	31
Ilustración 25. Comparativa de tasas de cambio entre petróleo y queroseno.....	32
Ilustración 26. Estimación de costes de producción de SAF.....	33
Ilustración 27. Demanda de aviones comerciales estimada entre 2023 y 2042.....	37
Ilustración 28. Evolución del coste total anual por el uso de queroseno.....	45

Ilustración 29. Evolución de la demanda de SAF.....	46
Ilustración 30. Costes de producción de SAF.....	47
Ilustración 31. Evolución del coste de SAF.....	48
Ilustración 32. Distribución de la producción de SAF según tecnología.....	49
Ilustración 33. Evolución de costes de SAF globales para Escenario 1.....	49
Ilustración 34. Evolución de costes de SAF globales para Escenario 2.....	50
Ilustración 35. Evolución de costes de SAF globales para Escenario 3.....	50
Ilustración 36. Coste nivelado de los distintos combustibles.....	51
Ilustración 37. Evolución de costes de SAF vs queroseno para el Escenario 1.....	52
Ilustración 38. Evolución de costes de SAF vs queroseno para el Escenario 2.....	52
Ilustración 39. Evolución de costes de SAF vs queroseno para el Escenario 3.....	53

# Glosario

---

ASTM	American Society for Testing and Materials
ATJ	Alcohol-to-Jet
CapEx	Capital Expenditures
CER	Créditos de Reducción de Emisiones
CHJ	Queroseno derivado de Hidrotermólisis Catalítica
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CORSIA	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation
EASA	European Union Safety Agency
EESI	Environmental and Energy Study Institute
EU ETS	EU Emissions Trading System
FT	Fischer-Tropsch
FTE	Full Time Equivalent
GMF	Global Market Forecast
GTI	Gas Technology Institute
HEFA	Hydroprocessed Esters and Fatty Acids
HFS	Hydroprocessed Fermented Sugars
ICAO	International Civil Aviation Organization
ICCT	International Council of Clean Transportation
IEA	International Energy Agency
IH2	Hidropirólisis e hidroconversión integrada
ILUC	Induced Land Use Change
ISCC	International Sustainability & Carbon Certification
ISO	International Organization for Standardization
LCA	Life Cycle Assessment
LSf	Life cycle emissions factor for a CORSIA eligible fuel in gCO <sub>2</sub> e/MJ
MTJ	Methanol-to-Jet
OMC	Organización Mundial del Comercio
ONU	Naciones Unidas
OpEx	Operating Expenditures
SAF	Sustainable Aviation Fuel (Combustible Sostenible para Aviación)
SAK	Queroseno Sintetizado Aromático
SCS	Sustainability Certification Scheme
SIP	Synthetic Isoparaffins
SPK	Synthesized Paraffinic Kerosene
UCO	Used Cooking Oil
UE	Unión europea
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change

# 1 INTRODUCCIÓN

---

En un mundo en constante cambio y evolución, en el que la sociedad manifiesta su preocupación frente a crecientes desafíos ambientales, sociales y económicos, la sostenibilidad se ha convertido en un imperativo ineludible. Sin duda, el sector más enfocado por esta necesidad es la industria. La producción y consumo desenfrenados durante las últimas décadas han ejercido una presión insostenible sobre los recursos naturales, amenazando la estabilidad del planeta y la prosperidad de futuras generaciones.

La economía global se sostiene sobre la industria como pilar fundamental. Son infinitos los beneficios que la industria genera para la sociedad: el suministro de bienes y servicios esenciales, la creación de empleo, o el impulso del desarrollo tecnológico, entre otros. Sin embargo, el modelo tradicional está caracterizado por la explotación desmedida de recursos finitos y la generación de residuos, con efectos devastadores a medio y largo plazo, lo que hace que este modelo se esté volviendo insostenible.

Un factor común que caracteriza la industria en la mayoría de sus sectores es el uso de combustibles fósiles. Los combustibles fósiles comprenden el 80% de la demanda actual de energía primaria a nivel mundial y el sistema energético es la fuente de aproximadamente dos tercios de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> [1], con el consecuente impacto climático. Se avanza hacia un futuro incierto, pero inevitablemente vinculado a la sostenibilidad, en el cual es esencial que la industria adopte prácticas y estrategias de producción más responsables y limpias. Tanto la viabilidad de las empresas como la calidad de vida de las futuras generaciones dependen de ello.

## 1.1 Definición de Combustible Sostenible para la Aviación

El Combustible Sostenible para la Aviación, mayormente conocido en la industria por sus siglas en inglés, SAF (Sustainable Aviation Fuel), es una respuesta clave a los desafíos medioambientales que enfrenta la industria de la aviación en la actualidad. El SAF presenta las mismas características fisicoquímicas que el combustible convencional de aviación, y por tanto se puede usar en aviones a reacción sin requerir adaptaciones ni modificaciones.

A medida que la conciencia sobre el cambio climático y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero ha aumentado, la aviación se ha convertido en un foco importante de atención debido a su contribución significativa a dichas emisiones. El SAF ofrece a la industria aérea una vía efectiva para mitigar su impacto ambiental al permitir vuelos más sostenibles y alineados con los objetivos de reducción de emisiones.

Antes de entrar en el detalle de la metodología de producción de SAF, es necesario comprender el concepto de sostenibilidad, ya que es la condición necesaria que debe cumplir un combustible para poder ser denominado SAF. El informe Brundtland “Our Common Future (Nuestro Futuro Común)” [2], publicado en 1987 por la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas, define la sostenibilidad como la capacidad de satisfacer las necesidades presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.

Esto se trata de un enfoque holístico que tiene en cuenta las repercusiones sociales, medioambientales y económicas de las acciones y decisiones que se toman en la actualidad. La sostenibilidad medioambiental es la capacidad de preservar y proteger el entorno natural a lo largo del tiempo mediante las políticas y prácticas adecuadas. Por otro lado, la sostenibilidad social se enfoca en el bienestar de las comunidades y personas, promoviendo la equidad y derechos fundamentales como el acceso a la educación, sanidad o empleo digno. Por último, la sostenibilidad económica promueve el bienestar económico a largo plazo, pretendiendo crear un equilibrio entre crecimiento económico y eficiencia de los recursos, entre otros factores [3].

Son muchos los organismos oficiales que promueven el desarrollo sostenible a nivel global:

1. Las Naciones Unidas (ONU) son un actor fundamental en la promoción de la sostenibilidad a través de su Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible incluye 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) diseñados para abordar los desafíos económicos, sociales y ambientales a nivel global [4].
2. La Organización Mundial del Comercio (OMC) aborda la sostenibilidad en el contexto del comercio internacional, promoviendo prácticas comerciales que sean económicamente viables, socialmente justas y respetuosas con el medio ambiente.
3. La Unión Europea (UE) tiene políticas y estrategias específicas relacionadas con la sostenibilidad, incluyendo el Pacto Verde Europeo, que busca transformar la economía europea en una economía sostenible y neutral en carbono [5].
4. La International Organization for Standardization (ISO) ha desarrollado normas relacionadas con la sostenibilidad, como la norma ISO 14001 para sistemas de gestión ambiental y la norma ISO 26000 para la responsabilidad social corporativa.

La Organización Internacional de Aviación Civil (International Civil Aviation Organization, ICAO), desarrolló en octubre de 2016 el Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA), en el que define los 13 criterios de sostenibilidad aplicables a SAF [6]:

1. A lo largo de su ciclo de vida, el SAF debe generar emisiones de carbono menores que el combustible convencional, siendo estas reducciones de al menos un 10% comparado con los valores de emisiones de ciclo de vida de este.
2. El SAF no debe provenir de biomasa obtenida de ecosistemas terrestres/acuáticos con altas reservas de carbono biogénico, como bosques, arrecifes de coral o estuarios, entre otros.
3. La producción de SAF debe mantener o mejorar la calidad del agua y su disponibilidad, evitando el agotamiento de aguas superficiales o subterráneas más allá de sus capacidades de reposición.
4. Las prácticas de gestión de materias primas y residuos para la producción de SAF debe mantener o mejorar la calidad del suelo.
5. La producción y uso de SAF debe minimizar los efectos negativos en la calidad del aire.
6. La producción de SAF debe mantener la biodiversidad.
7. La producción de SAF debe promover la gestión responsable de los residuos y el uso de químicos.
8. La producción de SAF debe respetar los derechos humanos y laborales.
9. La producción de SAF debe respetar los derechos sobre la tierra y derechos sobre el uso de la tierra, incluyendo indígenas.
10. La producción de SAF debe respetar los derechos sobre el uso del agua de las distintas comunidades.
11. La producción de SAF debe contribuir al desarrollo socioeconómico de las regiones más empobrecidas.
12. La producción de SAF debe garantizar la seguridad alimentaria en las zonas de producción directamente involucradas.

El cumplimiento del criterio de sostenibilidad debe ser certificado por un Esquema de Certificación de Sostenibilidad (Sustainability Certification Scheme, SCS) de la ICAO [7]. Como se puede ver, que el proceso de producción de combustible sea alternativo al convencional no es condición suficiente para que sea considerado SAF, debe cumplir con los criterios de sostenibilidad para esto.

El SAF se produce utilizando una variedad de materias primas renovables y sostenibles, incluyendo aceites vegetales, residuos de biomasa, cultivos energéticos y otros recursos orgánicos. Estas materias primas se someten a procesos químicos de refinación para crear un combustible que puede utilizarse en motores de aviación convencionales sin necesidad de modificar las aeronaves existentes. Esto hace que el SAF sea una opción atractiva para reducir las emisiones de carbono de la aviación sin requerir una transformación completa de la infraestructura y las flotas de aviones, estando actualmente certificado para su uso mezclado con combustible convencional en una mezcla de hasta el 50% sin requerir ningún cambio.

A medida que se desarrollan y expanden las tecnologías de producción de SAF y se establecen nuevas normativas y estándares más estrictos en la industria de la aviación, se espera que el uso de combustibles sostenibles para la aviación juegue un papel fundamental en la reducción del impacto ambiental de esta industria y en la transición hacia un transporte aéreo más respetuoso con el medio ambiente.

Las rutas de producción de SAF pueden variar en función de las materias primas utilizadas y los procesos de conversión empleados. Aquí se presentan las rutas más comunes de producción de SAF [8]:

1. Hidrotratamiento de aceites vegetales y grasas: En esta ruta, se utilizan aceites vegetales y grasas animales como materias primas. Estos aceites y grasas se someten a un proceso de hidrotratamiento, que implica la eliminación de oxígeno y otros contaminantes para producir un combustible limpio y seguro para su uso en aviones. Los aceites vegetales utilizados pueden ser aceite de cocina usado, aceite de palma sostenible, aceite de soja, entre otros.
2. Gasificación y Fischer-Tropsch: En esta ruta, se utilizan materias primas como biomasa, residuos sólidos urbanos o residuos agrícolas para producir gas de síntesis a través de la gasificación. Luego, el gas de síntesis se convierte en SAF mediante el proceso Fischer-Tropsch, que sintetiza hidrocarburos líquidos. Esta ruta es versátil y puede aprovechar una variedad de fuentes de biomasa.
3. Pirólisis: En la pirólisis, se calienta la biomasa en ausencia de oxígeno, lo que produce un bioaceite. Este bioaceite se somete a procesos posteriores, como el hidrotratamiento, para convertirlo en SAF. La pirólisis puede utilizar materiales como madera, residuos agrícolas y algas.
4. Síntesis biológica: En esta ruta, los microorganismos modificados genéticamente se utilizan para convertir azúcares o lípidos en combustibles líquidos. Los microorganismos pueden ser diseñados para producir SAF directamente a partir de materias primas sostenibles, como azúcares derivados de plantas o algas.
5. Electrofuels: Esta es una ruta emergente que implica la captura de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) del aire y su conversión en combustibles líquidos utilizando electricidad renovable. Aunque es un campo de investigación en desarrollo, los electrofuels tienen un gran potencial para ser una fuente sostenible de SAF en el futuro.

Estos métodos de producción se describirán en detalle y analizarán posteriormente. Es importante destacar que la disponibilidad y la viabilidad de estas rutas de producción pueden variar según la región y las condiciones locales. Además, la certificación y la calidad son aspectos críticos en la producción de SAF para garantizar su cumplimiento con los estándares de aviación y medio ambiente. La investigación y el desarrollo continuos están expandiendo las opciones de producción de SAF y mejorando su eficiencia y sostenibilidad.

## 1.2 Importancia de SAF en la aviación

La aviación es responsable de una parte significativa de las emisiones globales de CO<sub>2</sub>, emisiones que van en constante aumento. De acuerdo con la International Energy Agency (IEA), en 2022 la aviación fue responsable del 2% de las emisiones de CO<sub>2</sub>, alcanzando casi las 800 Mt de CO<sub>2</sub>, y habiendo crecido más rápido en las últimas décadas que el transporte ferroviario, por carretera o marítimo [9]. Entre 2005 y 2017, el número de vuelos en el espacio económico europeo aumentó en un 9,56%, según datos de la Comisión Europea [10]. Antes de la crisis del covid-19, IATA había estimado que el número de pasajeros se doblaría en los próximos 20 años, lo que habría supuesto un increíble crecimiento del sector en las próximas dos décadas [11]. El SAF ofrece una alternativa más limpia a los combustibles fósiles utilizados en la aviación como el queroseno, lo que resulta en una reducción sustancial de las emisiones de carbono. El uso de SAF puede

ofrecer una reducción de entre un 50-80% de las emisiones de carbono en comparación con el uso de combustibles convencionales [12].

Uno de los aspectos más destacados del SAF es su capacidad para reducir significativamente las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en comparación con los combustibles fósiles tradicionales utilizados en la aviación. El proceso de producción del SAF, aunque no es completamente libre de emisiones, tiende a ser más eficiente y a emitir menos gases de efecto invernadero en general. Esto puede ayudar a la industria de la aviación a cumplir con los objetivos de reducción de emisiones establecidos a nivel global.

Además de su capacidad para reducir las emisiones de carbono, el SAF también puede ayudar a disminuir la emisión de otros contaminantes nocivos, como óxidos de nitrógeno y partículas finas, lo que puede mejorar la calidad del aire en las áreas cercanas a los aeropuertos y rutas de vuelo.

Diversos acuerdos internacionales y regulaciones gubernamentales están estableciendo metas cada vez más estrictas para reducir las emisiones de carbono. Internacionalmente, destaca el Acuerdo de París, adoptado en 2015, bajo la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), tiene como objetivo principal limitar el calentamiento global a menos de 2 grados Celsius por encima de los niveles preindustriales, con un esfuerzo por limitarlo a 1.5 grados Celsius [13]. Los países que son parte del Acuerdo de París se han comprometido a establecer y alcanzar objetivos nacionales de reducción de emisiones de carbono y a informar periódicamente sobre sus avances. El Protocolo de Kioto es un tratado internacional, en vigor desde 2005, que estableció objetivos vinculantes de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero para los países industrializados. Aunque ha sido sucedido por el Acuerdo de París en términos de ambición y alcance, el Protocolo de Kioto fue un hito importante en la lucha contra el cambio climático. La Agenda 2030 es un plan global adoptado por los 193 Estados miembros de las Naciones Unidas en septiembre de 2015. Su objetivo principal es abordar los desafíos globales más apremiantes, como la pobreza, el hambre, la desigualdad, la salud, la educación, el género, el agua limpia, el saneamiento y la sostenibilidad ambiental. La Agenda 2030 se compone de 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y 169 metas específicas que los países se comprometen a alcanzar para el año 2030. La Agenda 2030 se considera un marco integral para la acción que tiene en cuenta los aspectos económicos, sociales y ambientales del desarrollo sostenible. Dentro de la Agenda 2030, la reducción de las emisiones de carbono y la acción climática son abordadas principalmente a través del Objetivo de Desarrollo Sostenible número 13 (ODS 13), que se titula "Acción por el clima". El ODS 13 establece metas como las siguientes: fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales en todos los países, integrar medidas de mitigación y adaptación al cambio climático en las políticas, estrategias y planificaciones nacionales, o implementar el compromiso de los países desarrollados de movilizar conjuntamente USD 100 mil millones al año para abordar las necesidades de los países en desarrollo en relación con la mitigación y la adaptación al cambio climático [14]. Estas metas son fundamentales para la Agenda 2030 y se alinean con los compromisos internacionales, como el Acuerdo de París, para limitar el calentamiento global y sus impactos.

Las aerolíneas que adoptan SAF pueden cumplir con estas regulaciones de manera más efectiva, lo que les permite operar de manera más sostenible y evitar posibles sanciones o restricciones.

La inversión y el desarrollo de tecnologías relacionadas con la producción de SAF está en aumento. Esto no solo fomenta la innovación en la industria de la aviación, sino que también tiene el potencial de impulsar la economía y crear empleos en el sector de energías renovables y biocombustibles.

Al diversificar las fuentes de combustible utilizadas en la aviación, el SAF reduce las dependencias de los recursos fósiles, lo que hace que la industria sea menos vulnerable a las fluctuaciones en los precios del petróleo y a las interrupciones en el suministro.

En resumen, el SAF es esencial para la sostenibilidad a largo plazo de la industria de la aviación. Su capacidad para reducir las emisiones de carbono y mejorar la calidad del aire, junto con su contribución al cumplimiento de los objetivos medioambientales globales, lo convierten en una pieza clave en la lucha contra el cambio climático y en la búsqueda de un futuro más limpio y sostenible para la aviación.

## 2 OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DEL TRABAJO

---

El objetivo principal de este trabajo es dar visibilidad sobre el estado actual de la industria de producción de SAF y su potencial a largo plazo. Para alcanzar este objetivo, se establecen objetivos parciales como destacar su importancia para el sector de la aviación, ver qué es lo que se ha avanzado en cuanto a las tecnologías de producción de SAF hasta la fecha, e identificar los puntos de bloqueo y los pasos a seguir en el futuro.

Para ello, en primer lugar, y con el objetivo de aclarar la importancia del SAF para el sector de la aviación, se comenzará analizando el marco normativo en el cual se encuentra la producción de SAF, empezando por las regulaciones y políticas relacionadas con el propio SAF a nivel global, continuando por los estándares de calidad requeridos para que un combustible de aviación alternativo pueda ser considerado SAF, y terminando por los incentivos gubernamentales para fomentar la producción de SAF, y el uso de éste por las aerolíneas.

Tras el análisis del marco normativo, se pasará al estudio de las diferentes metodologías de producción de SAF, comenzando por el análisis de las tecnologías que se encuentran actualmente en funcionamiento, para concluir con los nuevos métodos de producción de SAF que se encuentran bajo estudio actualmente.

Una vez repasados el marco normativo y las tecnologías de producción de SAF, el siguiente paso consistirá en analizar los proyectos que se están llevando a cabo en la actualidad entorno al SAF, con el objetivo de aclarar dónde se sitúa la producción de SAF a día de hoy; empezando por las aerolíneas y empresas que están introduciendo el uso de SAF, las iniciativas de escalado de la producción de SAF para poder abastecer la demanda del mercado, y los distintos beneficios económicos y ambientales de la implementación de estos proyectos.

El siguiente paso a realizar durante este trabajo será identificar los desafíos y puntos de bloqueo para el desarrollo e implementación de la producción de SAF a gran escala, tales como barreras técnicas, económicas, o logísticas.

Una vez identificados los puntos de bloqueo, se procederá a identificar los pasos a seguir para desbloquear estas barreras presentes; investigaciones llevadas a cabo actualmente, implicación a nivel geopolítico, y otras estrategias para identificar la perspectiva que hay a futuro en este ámbito, seguido de las respectivas conclusiones y llamado a la acción para el futuro.

Por último, se realizará un modelo de costes para comparar la evolución de los costes del SAF frente a los del combustible convencional, para así estimar la potencial cabida en el mercado que tendrá el SAF.

## 3 MARCO NORMATIVO DE SAF

Tal y como se ha explicado en el apartado 1, no cabe duda de que la aviación debe ser sostenible, causar el menor impacto medioambiental posible, y contribuir a una alta calidad de la vida humana. Se están aplicando regulaciones ambientales cada vez más rigurosas para luchar contra el calentamiento global, lo que obliga a hacer esfuerzos a nivel global para reducir la huella de carbono. Los combustibles sostenibles son clave en tales esfuerzos debido a la creciente demanda de combustibles de aviones.

### 3.1 Regulaciones y políticas relacionadas con SAF a nivel internacional

Como se puede ver en la Tabla 1, el compromiso con la reducción de las emisiones de carbono recibe un consenso común a nivel internacional. El respaldo de los líderes mundiales a la reducción de las emisiones de carbono y la lucha contra el cambio climático finalmente se ha convertido en algo generalizado.

Los Esquemas de Comercio de Emisiones (Emissions Trading Schemes, ETS) están operativos en varios países y regiones. En Europa, la EU ETS se ha convertido en una práctica bien establecida. Este sistema es un sistema basado en límites máximos e intercambios comerciales (cap and trade). Esto significa que, si las emisiones de una instalación determinada superan el límite máximo establecido, la instalación tendrá que comprar cuotas de emisión en el mercado, y si las emisiones quedan por debajo del límite, la instalación dispondrá de cuotas para vender.

El Paquete de Energía Limpia de la Comisión Europea proporcionó la política e instrumentos regulatorios para apoyar el cumplimiento de los objetivos de la Agenda 2030 [15]; más allá de 2030, la estrategia a largo plazo de la Unión Europea para 2050 llama a la neutralidad en emisiones de carbono en 2050. El Pacto Verde Europeo [5] representa la ambición de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero un 55% para 2030, y asentar las bases para conseguir cero emisiones netas en 2050. Para conseguir esta reducción del 55%, la Comisión Europea presentó el paquete “Fit for 55” en 2021, introduciendo propuestas legislativas para revisar todo el marco energético y climático europeo [16].

Entre otras, destaca la regulación del Parlamento Europeo “ReFuelEU Aviation”, cuya última actualización se realizó en octubre de 2023, que define un conjunto progresivo de mandatos con el objeto de aumentar el uso de SAF [17]. En la Ilustración 1, se puede observar la cantidad de combustible sostenible a suministrar por proveedores de combustible de aeropuertos de la UE según RefuelEU Aviation. Se puede ver cómo para 2050 se espera que el combustible de aviación suministrado en los aeropuertos europeos sea mayoritariamente SAF.

Como se ha descrito anteriormente, la industria de la aviación es responsable de más de un 2% de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> [9]. La ICAO es la agencia de las Naciones Unidas encargada de manejar todos los temas relacionados con la aviación civil, tales como la seguridad en la navegación aérea, o la sostenibilidad de la aviación [18]. ICAO se marca como objetivo una reducción del 50% en las emisiones netas de carbono en 2050 con respecto a los niveles de 2005. Un hito histórico en este proceso es el ya citado desarrollo de CORSIA en 2016, con el objetivo de compensar aproximadamente el 80% de las emisiones superiores a los niveles de 2020 [6], en la que 70 países tienen intención de participar. ICAO exige que las aerolíneas compensen las emisiones mediante la compra de créditos de emisiones elegibles equivalentes a los requisitos de compensación de los mercados de carbono. Esta compensación es actualmente voluntaria, pero se volverá obligatoria en 2027. Esta regulación es legalmente vinculante para los países que firmaron el protocolo de Kioto, acuerdo durante el cual se formó la UNFCCC (Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático) [19]. CORSIA se está implementando en varias fases: inicialmente, una fase piloto, con participación voluntaria para los estados, entre los años 2021 y 2027, y luego una segunda fase, entre 2027 y 2035, con la participación de todos los estados menos aquellos exentos de requisitos de compensación [6].

Tabla 1. Eventos en el desarrollo de la regulación de emisiones de carbono

<b>Año</b>	<b>Organización</b>	<b>Acuerdos</b>	<b>Naciones participantes</b>	<b>Obligatoriedad</b>	<b>Notas</b>
1947	ICAO		191	No vinculante	Formación de la ICAO
1981	Convención de Chicago	“Aircraft engine emission”	191	No vinculante	
1992	UNFCCC	Protocolo de Kioto	154	Legalmente vinculante	Formación de la UNFCCC
2005	Directiva del Parlamento Europeo y el Consejo Europeo	EU ETS (EU Emissions Trading System)	Miembros del Protocolo de Kioto	Legalmente vinculante	Fase 1 (2005-2007 lanzada)
2008	Directiva del Parlamento Europeo y el Consejo Europeo	EU ETS (EU Emissions Trading System)	Miembros del Protocolo de Kioto	Legalmente vinculante	Fase 2 (2008-2012)
2009	UNFCCC	Acuerdo de Copenhage	114	No vinculante	Se fija límite de calentamiento global en 2°C
2010	UNFCCC	Cumbre del Clima de Cancún	196	No vinculante	Se establecen acercamientos para conseguir la reducción de emisión de carbono
2008	Directiva del Parlamento Europeo y el Consejo Europeo	EU ETS (EU Emissions Trading System)	Miembros del Protocolo de Kioto	Legalmente vinculante	Fase 3 (2012-2013)
2015	UNFCCC	Acuerdo de París	196	Obligatoria	
2016	ICAO	CORSIA	191	Obligatoria desde 2027	Compensación de emisiones

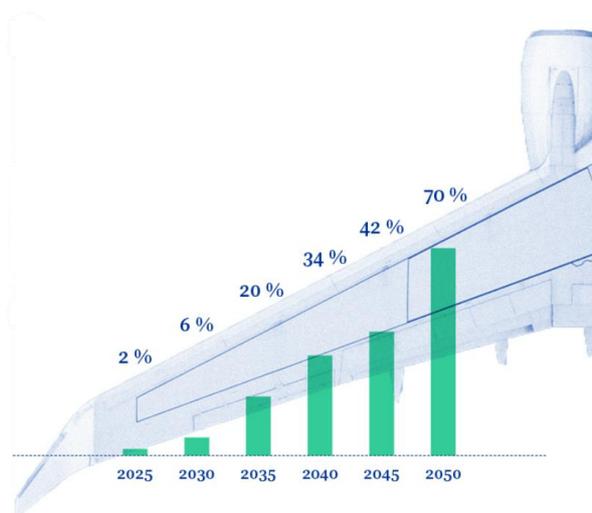


Ilustración 1. Cantidad de combustible sostenible a suministrar por proveedores de combustible de aeropuertos de la UE según la regulación RefuelEU Aviation [17].

### 3.2 Normas y estándares de calidad para SAF

El SAF es producido a partir de recursos sostenibles tales como aceites de origen biológico o residuos de la agricultura. Como se ha comentado anteriormente, para ser considerado SAF, el combustible tiene que cumplir con el Criterio de Sostenibilidad de CORSIA [7], por lo que tiene que garantizar un ahorro mínimo de emisión de gases de efecto invernadero del 10% en comparación con los combustibles fósiles de aviación, y que los combustibles no se elaboren a partir de biomasa obtenida de tierras con altas reservas de carbono.

Las condiciones de operación en el sector de la aviación, con suministro de combustible en diferentes Estados y altos requisitos de seguridad, exigen una estricta garantía de calidad del combustible, basada en estándares globalmente aceptados.

Además del estándar general para combustibles para turbinas de aviación (ASTM D1655) [20], en 2009 ASTM introdujo una norma para combustibles de aviación alternativos, la ASTM D7566 [21], relacionada con la especificación para combustibles de aviación que contienen hidrocarburos sintetizados. Cada vez que un nuevo proceso es aprobado, esta norma se modifica incorporando un nuevo anexo.

El primer proceso de conversión certificado se anunció en 2009, el FT-SPK, derivado del carbón, gas natural o biomasa. Actualmente su uso está restringido a una mezcla del 50% en términos de volumen. A fecha de noviembre de 2023 ya se encuentran 8 procesos aprobados por la ASTM D7566 y ASTM D1655 para la producción de SAF, como se puede ver en la Tabla 2 [22].

Tabla 2. Procesos de conversión aprobados por la ASTM.

Anexo ASTM D7566	Proceso de conversión	Abreviación	Posible Materia Prima	Ratio de mezcla (% volumen)
1	Queroseno Parafínico Sintetizado a partir del proceso Fischer-Tropsch (Fischer-Tropsch hydroprocessed synthesized paraffinic kerosene)	FT-SPK	Carbón, gas natural, biomasa (puede ser procedente de residuos urbanos)	50
2	Ácidos Grasos Hidroprocesados (Synthesized paraffinic kerosene produced from hydroprocessed esters and fatty acids)	HEFA-SPK	Bioaceites, grasas animales, aceites reciclados	50
3	Isoparafinas Sintetizadas (Synthesized iso-paraffins produced from hydroprocessed fermented sugars)	SIP-HFS	Biomasa usada para la producción de azúcar	10
4	FT-SPK más aromáticos (Synthesized kerosene with aromatics derived by alkylation of light aromatics from non-petroleum sources)	SPK/A	Carbón, gas natural, biomasa	50
5	Queroseno derivado de Alcohol (Alcohol-to-jet synthetic paraffinic kerosene)	ATJ-SPK	Biomasa utilizada para la producción de etanol o isobutanol	50
6	Queroseno producido por Hidrotermólisis Catalítica (Catalytic Hydrothermolysis Jet)	CHJ	Bioaceites, aceites procedentes de algas	50
7	Hidrocarburos-Ésteres y Ácidos Grasos Hidroprocesados (Hydrocarbon-Hydroprocessed Esters and Fatty Acids)	HC-HEFA SPK	Algas	50
8	Alcohol-to-Jet más aromáticos	ATJ-SKA	Biomasa utilizada para la producción de etanol o isobutanol	50

### 3.3 Incentivos gubernamentales para la producción y uso de SAF

En 2023, la ICAO publicó una guía con potenciales políticas y aproximaciones coordinadas para el despliegue de SAF. En ella, establece potenciales políticas para estimular el crecimiento de la producción y la demanda de SAF [23]. Para ello, entre otras cosas, propone:

- Financiación por parte de los gobiernos para el desarrollo e investigación sobre la producción de SAF, con el objetivo principal de apoyar la innovación tecnológica.
- Incentivos específicos y desgravaciones fiscales para ampliar la infraestructura de suministro de SAF, ya que dicha infraestructura se suele enfrentar a mayores gastos financieros debido a la mayor percepción de riesgo en las inversiones.

- Incentivos específicos y desgravaciones fiscales para ayudar a la operación de las instalaciones de SAF, ya que se pueden enfrentar a mayores costes operativos y riesgos que las convencionales.
- Reconocimiento y valoración de los beneficios medioambientales del uso de SAF.
- Creación de normativas de SAF y actualización de las políticas actuales, incorporando la obligación de niveles mínimos de uso de SAF.

# 4 TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN DE SAF

En este capítulo se van a estudiar las diferentes rutas de producción de SAF, empezando por las aprobadas hasta la fecha por la ASTM, y por tanto aptas para su comercialización, y siguiendo por las que se encuentran bajo evaluación. Una “ruta de producción” de combustible consiste en una secuencia de etapas, comenzando por la producción de materia prima, continuando por su pretratamiento para lograr los requisitos de los procesos de conversión, y finalmente los procesos de conversión para producir SAF, como se puede observar en la Ilustración 2.

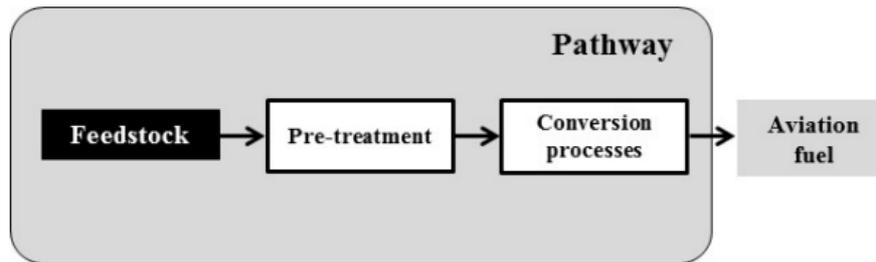


Ilustración 2. Concepto de ruta de producción de SAF.

La viabilidad de la producción de un combustible está fuertemente ligada a la configuración de su ruta de producción, incluyendo el transporte de productos a través de las distintas etapas [22]. La Ilustración 3 describe distintos tipos de fuentes de biomasa y rutas para la obtención de SAF [24].

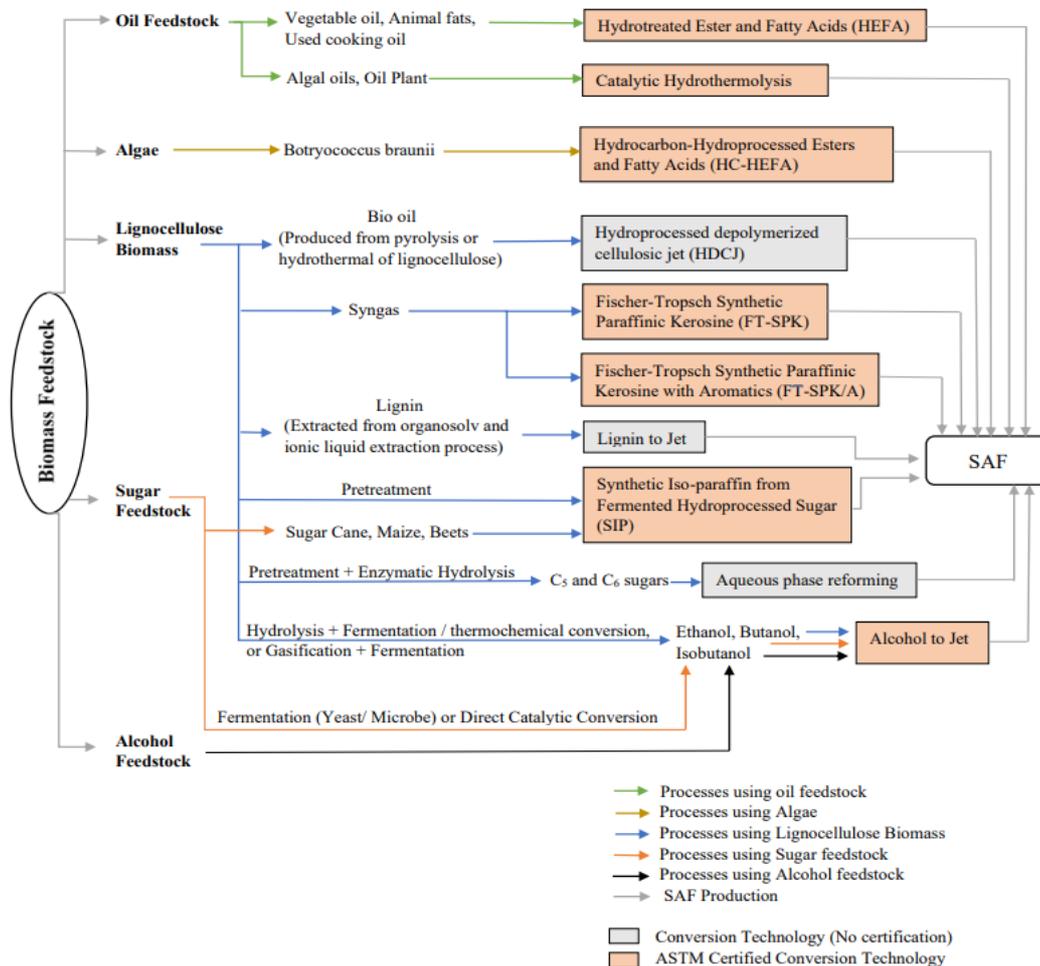


Ilustración 3. Tipos de fuentes de biomasa y rutas para la obtención de SAF [24].

## 4.1 Métodos actuales de producción de SAF

La ASTM International es una organización internacional que desarrolla estándares técnicos para una gran variedad de materiales, productos, sistemas y servicios. Estos estándares están basados en el consenso de los miembros de la ASTM International, representado por, en el caso de la industria aeronáutica, los fabricantes de aeronaves, proveedores y productores de combustibles, empresas tecnológicas y agencias federales. Por tanto, es de obligatorio cumplimiento que el combustible de aviación cumpla con los estándares y especificaciones de calidad de la ASTM para ser elegible para su uso en aviación y, en consecuencia, comercializable a nivel internacional [25].

La norma ASTM D7566 “Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons” [21] establece los requisitos para SAF que pueden utilizarse en aeronaves y motores certificados para operar con combustible Jet-A o Jet A-1, definidos por el estándar D1655 “Standard Specification for Aviation Turbine Fuels” [20].

Esta norma define, a fecha de 28 de noviembre de 2023 (ASTM D7566-23b), ocho métodos de producción de SAF que se pueden mezclar con combustible convencional en aeronaves actuales, enumerados en los anexos de la propia norma:

- Anexo A1: Queroseno Parafínico Sintetizado (Synthesized Paraffinic Kerosene) a partir del proceso Fischer-Tropsch (FT-SPK)
- Anexo A2: Ácidos Grasos Hidroprocesados (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids, HEFA SPK)
- Anexo A3: Isoparafinas Sintéticas (Synthetic Isoparaffins, SIP)
- Anexo A4: FT-SPK más aromáticos (SPK/A)
- Anexo A5: Queroseno derivado de Alcohol (Alcohol-to-Jet, ATJ)
- Anexo A6: Queroseno producido por Hidrotermólisis Catalítica (Catalytic Hydrothermolysis Jet, CHJ)
- Anexo A7: Hidrocarburos-Ésteres y Ácidos Grasos Hidroprocesados (Hydrocarbon-Hydroprocessed Esters and Fatty Acids, HC-HEFA SPK)
- Anexo A8: Alcohol-to-Jet más aromáticos (ATJ-SKA)

La Ilustración 4 muestra un resumen del diagrama de flujo de las rutas de producción de SAF certificadas por la ASTM.

A continuación, se procede a describir cada uno de los procesos anteriormente citados.

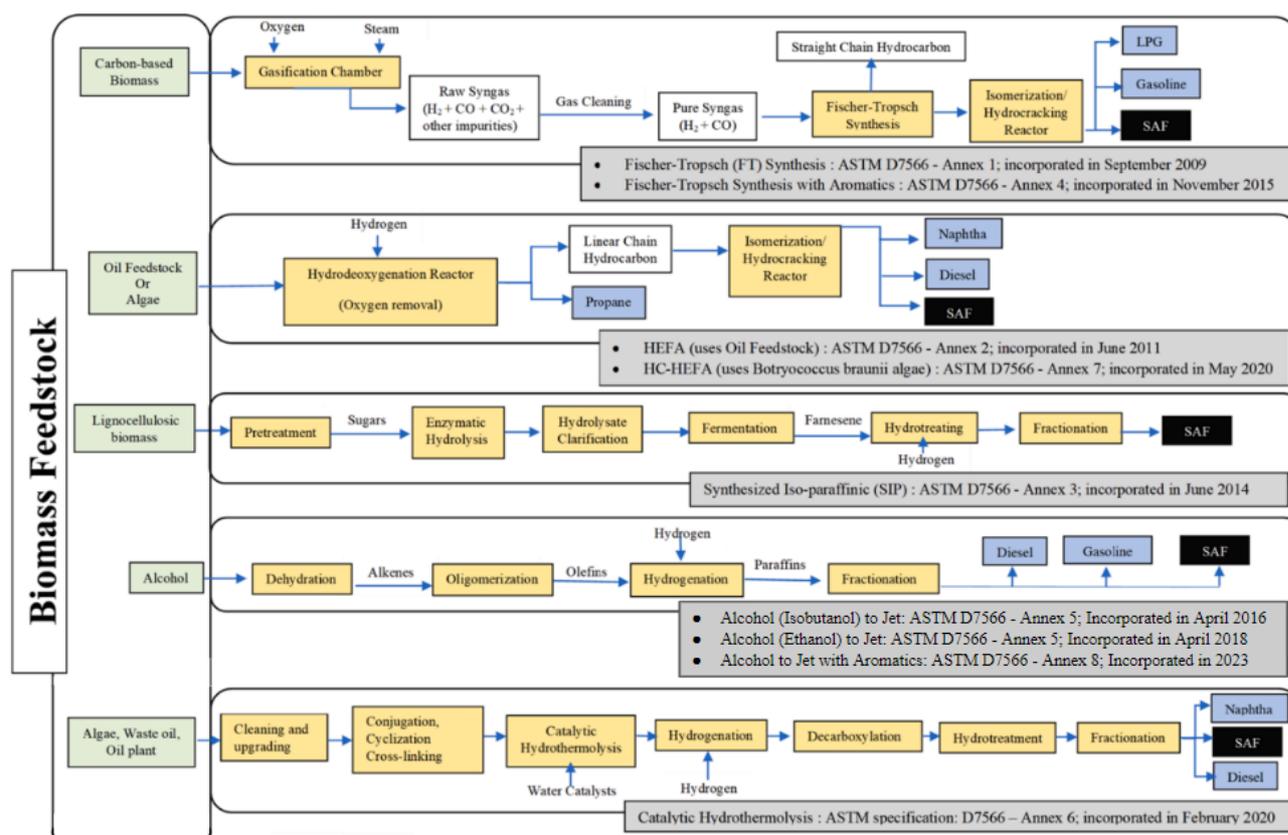


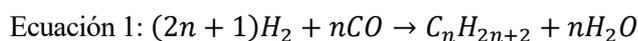
Ilustración 4. Diagrama de flujo de rutas de producción de SAF certificadas por ASTM.

#### 4.1.1 Fischer-Tropsch

El proceso de síntesis Fischer-Tropsch, creado en la década de 1920 por sus dos inventores que le dan nombre, los alemanes Franz Fischer y Hans Tropsch, es un proceso catalítico, altamente eficiente para la producción de hidrocarburos líquidos, entre los cuales se encuentra el SAF.

La síntesis de Fischer-Tropsch se divide en tres etapas principales, la conversión de biomasa en syngas, la conversión del syngas en hidrocarburos líquidos para su posterior refinamiento. Se comienza con la generación de gas de síntesis (syngas), que consiste en una mezcla de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H<sub>2</sub>). En esta etapa se eliminan componentes indeseados como compuestos de azufre, nitrogenados, metales que puedan envenenar o reducir la eficiencia del catalizador y otras impurezas. Este syngas se puede obtener mediante la gasificación de una amplia variedad de materias primas, como carbón, biomasa, residuos sólidos o gas natural. El gas de síntesis limpio se introduce en un reactor en presencia de un catalizador de Fischer-Tropsch. Este catalizador, comúnmente basado en metales como el hierro o el cobalto, facilita la reacción química en la que los átomos de carbono e hidrógeno se combinan para formar hidrocarburos más largos.

La Ecuación 1 y Ecuación 2 muestran las reacciones principales de generación de parafinas y olefinas de cadena lineal. Se trata en ambos casos de reacciones muy exotérmicas, es decir, que liberan una gran cantidad de calor. Además, se producen varias reacciones secundarias indeseadas en las que se producen metano y alcoholes [26]:



La composición específica de los productos obtenidos, como parafinas, olefinas y naftenos, depende de los factores como la temperatura, la presión y el tipo de catalizador utilizado. La cadena de hidrocarburos resultante puede ser adaptada para satisfacer las necesidades específicas del producto final, como el SAF [24]. La Ilustración 5 muestra el diagrama de proceso de Fischer-Tropsch.

Los productos obtenidos se someten a procesos de recuperación y refinamiento para separar y purificar los hidrocarburos producidos. Esto puede incluir procesos de destilación y otras técnicas de purificación como el hidrocrackeo o hidrotratamiento en los que se utiliza hidrógeno.

El proceso de síntesis de Fischer-Tropsch es conocido por su flexibilidad en la utilización de diferentes materias primas, en principio cualquiera que pueda ser suministrada para su conversión en la forma de hidrógeno y monóxido de carbono. Por el contrario, el proceso es energéticamente intensivo y requiere de una inversión en infraestructura significativa.

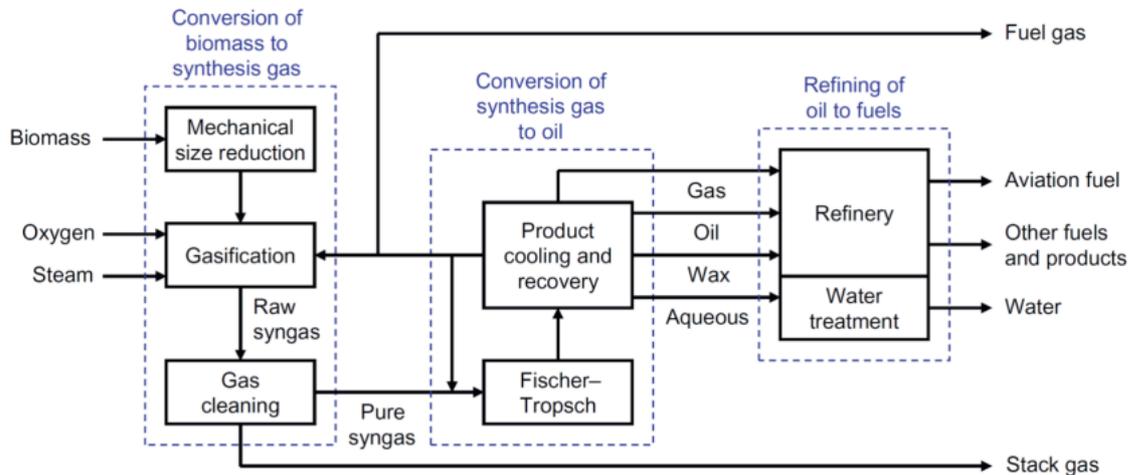


Ilustración 5. Diagrama de proceso de producción de combustibles mediante síntesis de Fischer-Tropsch [25]

Son dos los métodos de producción de SAF aprobados por la ASTM D7566 a partir del proceso de síntesis de Fischer-Tropsch. El Anexo A1 habla del queroseno parafínico sintético (FT-SPK), el cual es un tipo de SAF que está compuesto principalmente por hidrocarburos parafínicos. Puede ser diseñado para cumplir con las especificaciones del queroseno de aviación convencional, como el Jet A-1. FT-SPK es conocido por su alta pureza y bajo contenido de contaminantes, lo que lo hace adecuado para su uso en motores de aviación convencionales sin modificaciones. La proporción máxima de mezcla con combustible convencional permitida para esta opción es del 50%, según la ASTM D7566 - Anexo 1 [27].

El Anexo A4 habla del FT-SPK con aromáticos (FT-SPK/A), el cual es una variante del FT-SPK que incluye también hidrocarburos aromáticos en su composición. Aunque los aromáticos pueden proporcionar ciertas propiedades beneficiosas al combustible, como una mayor densidad de energía, su inclusión puede requerir ajustes adicionales en las aeronaves para garantizar el cumplimiento con las especificaciones de rendimiento y emisiones. En principio, puede calificarse como Jet A-1, siempre y cuando cumpla en última instancia todas las especificaciones del Jet A-1 [28]. La proporción máxima de mezcla con combustible convencional permitida para esta opción es del 50%, según la ASTM D7566 - Anexo 4 [27].

#### 4.1.2 Hidrotratamiento de Ácidos Grasos y Ésteres

La producción de SAF a partir del Hidrotratamiento de Ácidos Grasos y Ésteres (HEFA) es una ruta común para producir SAF a partir de materias primas tales como aceites vegetales (aceite de colza, soja o palma entre otros) o grasas animales. Estas fuentes son ricas en triglicéridos, que son ésteres de ácidos grasos.

El proceso se compone de dos etapas catalíticas principales, una de hidrogenación y otra de isomerización/hidrocrackeo. Además de los aceites y grasas mencionados anteriormente, se utiliza hidrógeno en el proceso como materia prima adicional.

En la primera etapa del proceso, los aceites o grasas pasan por un reactor de hidrogenación, donde los ésteres se hidrogenan y se saturan con hidrógeno bajo altas temperaturas y presiones, utilizando catalizadores metálicos. En esta etapa producen hidrocarburos de cadena larga y propano como coproducto. Tras esto comienza el proceso de isomerización/hidrocrackeo, donde los hidrocarburos pasan por un reactor donde se rompen e isomerizan produciéndose hidrocarburos parafínicos similares al queroseno [29] [24].

Dependiendo de las especificaciones finales del SAF, puede llevarse a cabo una etapa de desparafinado para eliminar parafinas no deseadas, que podrían afectar la temperatura de fluidez del combustible. Los hidrocarburos resultantes, que ahora tienen propiedades similares al queroseno de aviación convencional, se recuperan y se mezclan para cumplir con las especificaciones requeridas. El producto final se conoce como HEFA-SPK (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids - Synthetic Paraffinic Kerosene).

El SAF producido a través de la síntesis HEFA debe someterse a procesos rigurosos de certificación para garantizar que cumple con los estándares de calidad y sostenibilidad necesarios para su uso en la aviación comercial. La proporción máxima de mezcla con combustible convencional permitida para esta opción es del 50%, según la ASTM D7566 - Anexo 2 [27]. La Ilustración 6 muestra un diagrama de un sistema de HEFA simplificado [30].

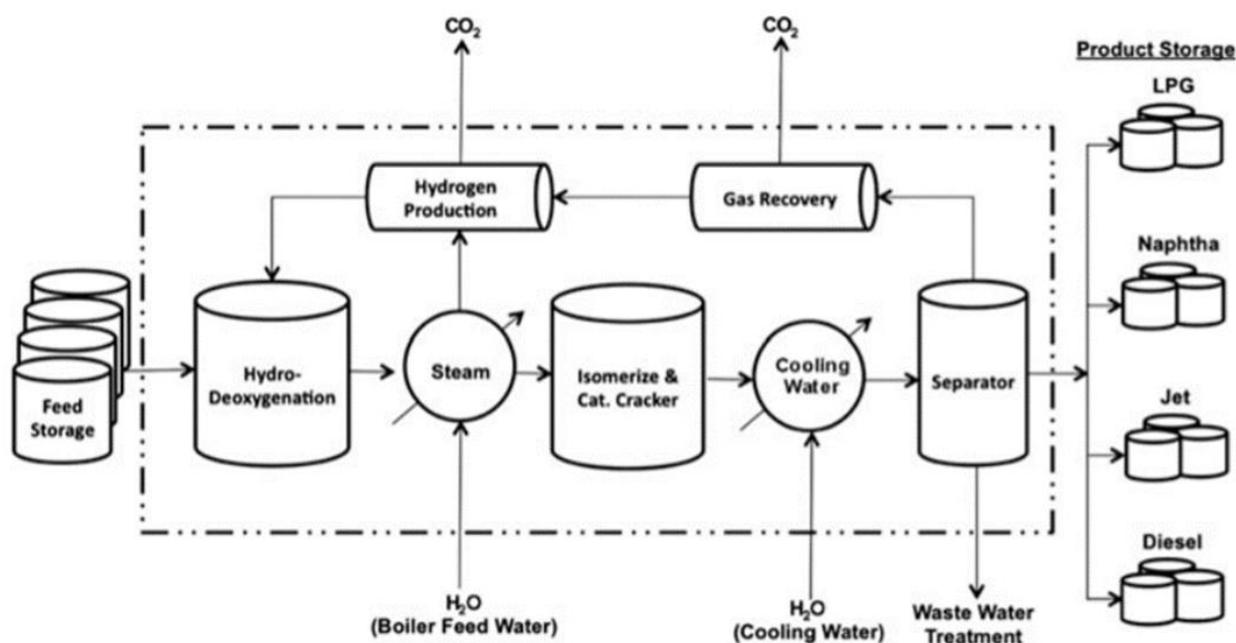


Ilustración 6. Sistema de HEFA simplificado [30].

El HEFA-SPK se produce a partir de ácidos grasos de cadena larga. Existe otro proceso similar aprobado por la ASTM D7566 Anexo A7, llamado HC-HEFA SPK, que se puede considerar una variación de la tecnología HEFA. Este proceso, en lugar de utilizar ácidos grasos de cadena larga, emplea hidrocarburos bioderivados para su producción, obtenidos a partir de algas. Este proceso de producción de biocombustible fue desarrollado por el Grupo IHI y la Universidad de Kobe en 2017, que emplearon el hipercrecimiento del alga *Botryococcus braunii* para producir biocombustible a partir de algas. Esta alga presenta una excepcional ratio de crecimiento y un alto contenido graso (hidrocarburos) [31] [32]. El combustible final tiene un contenido aromático más alto que el HEFA-SPK, lo que le da una mayor densidad energética y un mejor rendimiento en climas fríos. El ratio máximo de mezcla de HC-HEFA SPK con combustible convencional es del 10%, según la ASTM D7566 - Anexo 7 [21].

### 4.1.3 Isoparafinas Sintéticas

El proceso de producción de Isoparafinas Sintéticas (Synthetic Isoparaffins, SIP) aprobado por la ASTM 7566 Anexo A3 en 2014, puede emplear varias materias primas como la caña de azúcar, remolacha o maíz, además de biomasa lignocelulósica (materia vegetal seca) tras algún pretratamiento.

El proceso de SIP se compone de seis etapas principales: pretratamiento y acondicionamiento, hidrólisis enzimática, clarificación de hidrolizado, conversión biológica, hidroprocesamiento y purificación final, como se puede observar en la Ilustración 4 [33], para biomasa lignocelulósica con su correspondiente pretratamiento, y otras materias primas como azúcares sin necesidad de este.

El proceso de SIP suele utilizar una levadura modificada convenientemente para fermentar los azúcares hasta obtener una molécula de hidrocarburo llamada farneseno ( $C_{15}H_{24}$ ), el cual se puede transformar posteriormente en distintos productos, como diésel o SAF. Posteriormente, el farneseno es hidroprocesado para formar farnesano ( $C_{15}H_{32}$ ), el cual ya se puede mezclar con combustibles convencionales [31].

La estructura química del farnesano dependerá de las condiciones dadas durante la fermentación, siendo otros productos posibles dependiendo del proceso, especies microbiológicas y materia prima empleadas. El proceso de fermentación puede llevarse a cabo en un único tanque, lo cual resulta en un bajo número de pasos de producción. Otras ventajas del proceso de SIP son la no necesidad de catalizadores ni altas temperaturas o presiones durante el proceso [24].

La proporción máxima de mezcla con combustible convencional permitida para el SIP es del 10%, según la ASTM D7566 - Anexo 3 [21] [27].

#### 4.1.4 Alcohol-to-Jet

El proceso de Alcohol-to-Jet, ATJ, aprobado por la ASTM D7566 en el Anexo A5, es una tecnología para convertir alcoholes como el etanol, el butanol o el isobutanol en SAF. El proceso se compone de tres etapas principales: deshidratación, oligomerización e hidrogenación. La Ilustración 7 muestra el proceso de ATJ [34] [35].

Se utilizan alcoholes renovables como materias primas. Estos pueden ser etanol, butanol, propanol u otros alcoholes derivados de fuentes sostenibles como residuos orgánicos. En primer lugar, los alcoholes pasan por una fase de deshidratación. Tras esto, las olefinas producidas son oligomerizadas para producir un destilado con fracciones de diésel y queroseno. Finalmente, los destilados se hidrogenan y destilan con el fin de obtener la gama de parafinas que cumplan con las especificaciones requeridas [36].

En resumen, es un proceso relativamente simple y eficiente que puede utilizar una amplia variedad de alcoholes como materia prima. La proporción máxima de mezcla con combustible convencional permitida para el AtJ es del 50%, según la ASTM D7566 - Anexo 5 [21].

El Alcohol-to-Jet más aromáticos (ATJ-SKA), aprobado por la ASTM D7566 - Anexo A8, es un proceso similar al del ATJ, que comparte las etapas de deshidratación, oligomerización e hidrogenación, pero al cual se le añaden aromáticos para producir parafinas con aromáticos que se parecen más al combustible convencional que el combustible parafínico. Puede utilizar las mismas materias primas que el ATJ, además de alcoholes con un mayor contenido de carbono como el pentanol o el hexanol, sin embargo, es un proceso más complejo que el ATJ y requiere un catalizador más costoso [35] [37]. La proporción máxima de mezcla con combustible convencional permitida para el ATJ-SKA es del 50%, según la ASTM D7566 - Anexo 5 [37].

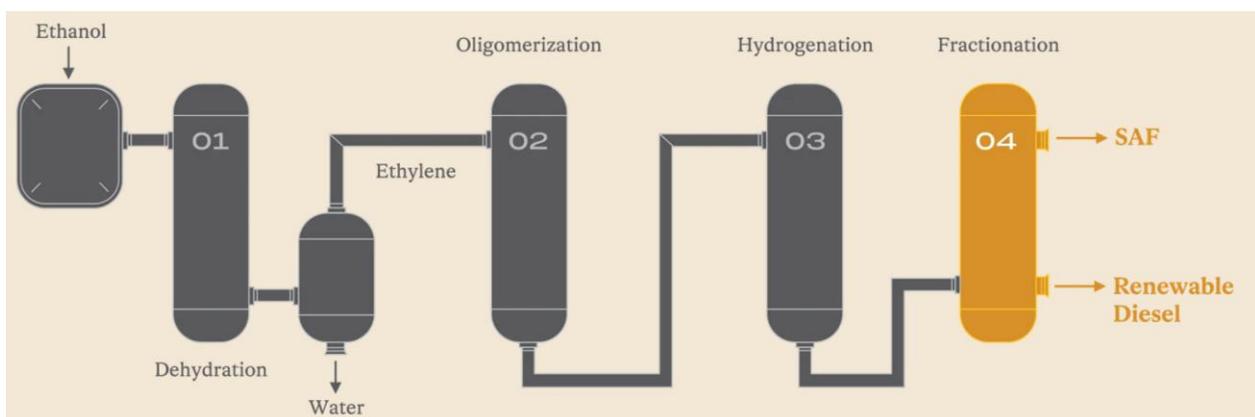


Ilustración 7. Proceso de ATJ

#### 4.1.5 Hidrotermólisis Catalítica

El proceso de producción de Catalytic Hydrothermolysis Jet, CHJ, aprobado por la ASTM D7566 en el Anexo A6, es otra de las tecnologías existentes para convertir aceites y grasas en SAF. Este proceso se basa en tres etapas principales, una de pretratamiento, otra de conversión de hidrocarburos y, finalmente, una etapa de refinamiento para convertir la materia prima en SAF.

CHJ puede utilizar como materia prima aceites residuales además de otros aceites a base de triglicéridos. Estos aceites pasan por una etapa de pretratamiento donde se mejora la estructura molecular [38]. La materia prima pasa por unas etapas de craqueo e hidrólisis, tras las cuales el aceite limpio y libre de ácidos grasos es combinado con agua precalentada para pasar al reactor de hidrotermólisis catalítica, donde se produce una reacción catalítica a altas temperatura (250-380 °C) y presión (5-30 MPa). Los productos de esta reacción son alcanos, cicloalcanos y aromáticos, que pasan a una etapa de fraccionamiento para producir naphtha, diésel y SAF, como se puede ver en la Ilustración 8 [24].

La proporción máxima de mezcla con combustible convencional permitida para el CHJ es del 50%, según la ASTM D7566 - Anexo A6 [21].

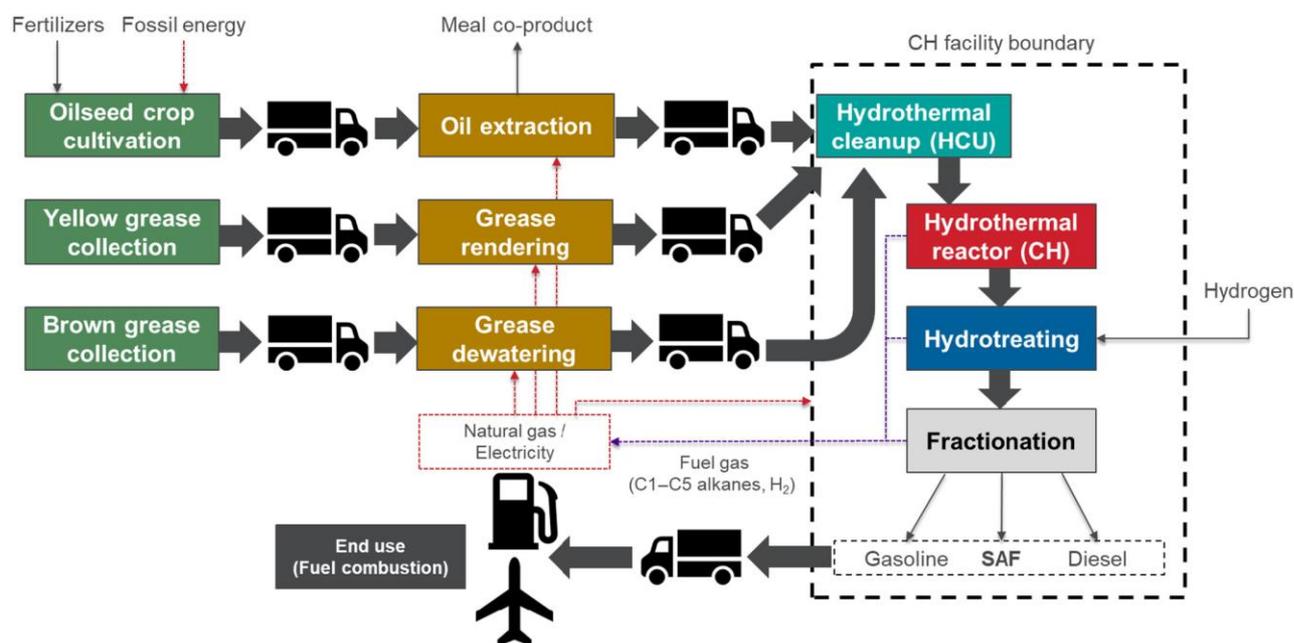


Ilustración 8. Diagrama de flujo del proceso de Hidrotermólisis Catalítica (CHJ)

Como se puede observar, son cinco las clases de materia prima que pueden ser empleadas para la producción de SAF con las tecnologías que se han descrito en este capítulo, tal y como se describe en la Ilustración 3:

1. Aceites y grasas: HEFA y CHJ.
2. Algas: HC-HEFA.
3. Biomasa lignocelulósica: FT-SPK, FT-SPK/A y SIP.
4. Azúcares: SIP y AtJ (este último tras la fermentación de los azúcares).
5. Alcoholes.

Para que el combustible producido a través de las tecnologías revisadas a lo largo de este capítulo pueda ser mezclado con Jet A fuel, su composición debe ser muy similar. La Tabla 3 muestra la composición y las características de los componentes del Jet A fuel [24] [39].

Tabla 3. Características y composición del Jet A fuel

Clase	Características	Características de combustión	Porcentaje en peso en Jet A fuel
Parafinas	Alta energía específica, combustión limpia, buena estabilidad, mala fluidez a baja temperatura	✓✓	28,8
Isoparafinas	Alta energía específica, buena fluidez a baja temperatura	✓✓	39,7
Cicloparafinas	Menor ratio hidrógeno-carbono, menor energía específica, mayor densidad, menor punto de congelamiento que las parafinas	✓	15,5
Olefinas	Buenas características de combustión, pero reactivo	×	1,2
Aromáticos	Combustión con llama humeante (puede causar problemas de formación de hollín y depósitos si hay presencia en exceso), libera más energía química como radiación térmica que otros hidrocarburos	××	14,8
Total			100

La Ilustración 9 muestra la composición de SAF de los tipos descritos en este apartado, comparado con el Jet A [40]. Destaca la falta de aromáticos en comparación con el Jet A en todos los casos menos en FT-SPK/A, CHJ y ATJ-SPK, una de las principales razones de la limitación actual en la mezcla con combustible convencional que hay actualmente. Esto hace que las tres tecnologías mencionadas anteriormente tengan potencial para ir al 100% en futuros vuelos, tras pequeñas modificaciones para que los motores sean completamente compatibles.

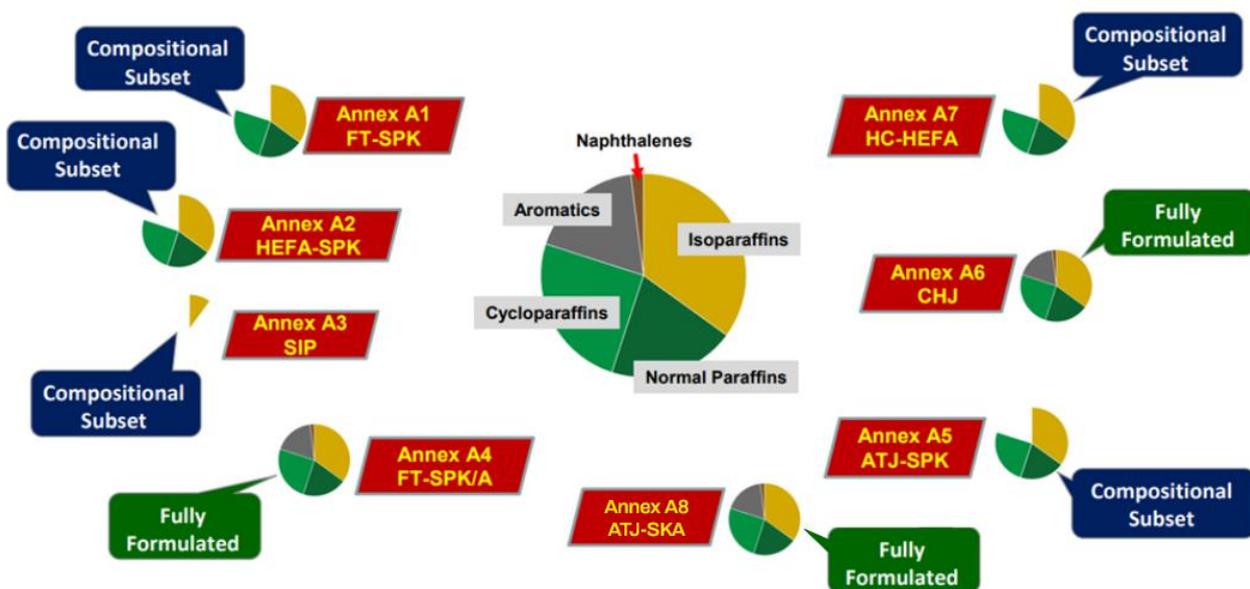


Ilustración 9. Composición de SAF comparado con Jet A Fuel.

## 4.2 Avances en la producción de SAF de próxima generación

Como se ha visto en el apartado anterior, son varios los procesos de conversión para producir SAF aprobados por instituciones como la ASTM. El Anexo 16 Volumen IV del Plan de Compensación y Reducción de Carbono para la Aviación Internacional (CORSIA) define proceso de conversión como el tipo de tecnología empleada para convertir una materia prima en combustible de aviación [6].

No todos los procesos de conversión tienen cabida en CORSIA y pueden ser considerados como elegibles para la producción de SAF. Para ello, deben cumplir con los criterios de sostenibilidad [41]. A fecha de julio de 2023, son varios los procesos de conversión que están siendo evaluados para ser considerados como elegibles para la producción de SAF por la ASTM. En concreto, son cinco los procesos que activamente están en proceso de certificación [42]. La Tabla 4 muestra estos cinco procesos de conversión que actualmente se están evaluando para su calificación, con el objetivo de estar certificados por la ASTM D7566 [43].

Tabla 4. Procesos de conversión bajo evaluación

Procesos de conversión bajo evaluación	Abreviación	Principales desarrolladores
Queroseno Sintetizado Aromático	SAK	Virent
Hidropirólisis e hidroconversión integrada	IH2	Shell
Derivado de AtJ utilizando producción bioquímica de isobuteno		Global Bioenergies
Derivado de AtJ empezando con mezcla de alcoholes		Swedish Biofuel
HEFA de reactor único	DILSAAF	Indian CSIR-IIP

Como se puede ver, son muchos los procesos de producción de SAF que se encuentran bajo evaluación. La Ilustración 10 muestra el proceso de evaluación de procesos de producción de SAF bajo la ASTM D4054 para que puedan figurar en un nuevo anexo de la ASTM D7566 [40]. A lo largo de este capítulo se van a desarrollar los dos más cercanos a la certificación actualmente, el SAK y el IH2.

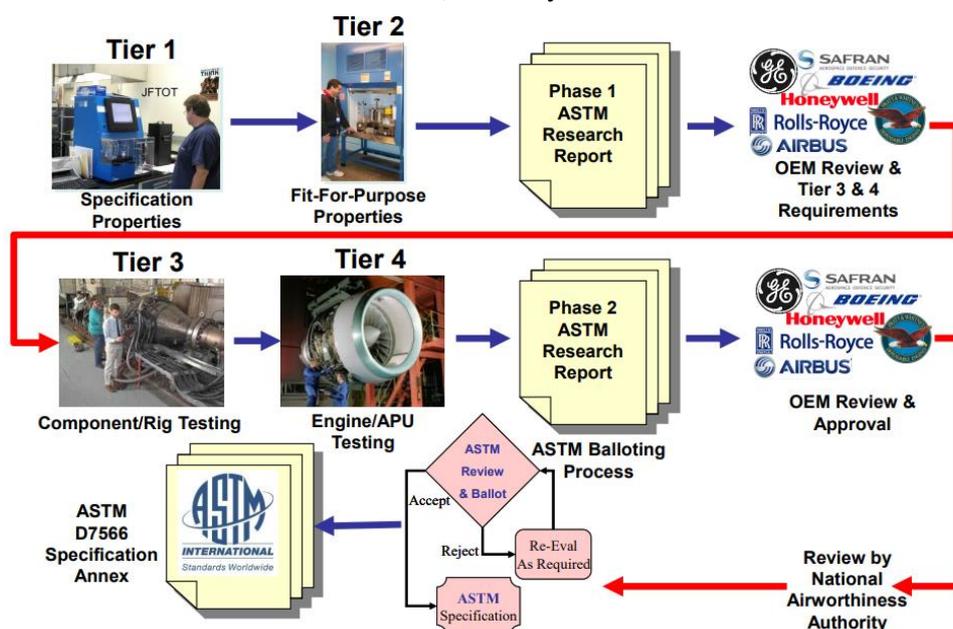


Ilustración 10. Proceso de evaluación ASTM D4054.

### 4.2.1 Queroseno Sintetizado Aromático

El Queroseno Sintetizado Aromático (Synthesized Aromatic Kerosene, SAK) convierte residuos derivados de plantas en combustible. El producto mezcla aromáticos de combustión limpia que faltan en otros tipos de SAF. La mezcla con SAK mejora la baja densidad y los problemas de compatibilidad material que limitan los niveles de mezcla permitidos para otros tipos de SAF, debido a la presencia de aromáticos.

El producto presenta varias ventajas frente a otros combustibles alternativos. Para el proceso de conversión se puede emplear una amplia variedad de azúcares vegetales celulósicos y convencionales, presenta un excelente punto de congelación, por debajo de los 80 °C, y es compatible con la infraestructura actual. SAK contiene los mismos tipos de hidrocarburos que el Jet Fuel derivado de petróleo, y satisface los niveles mínimos de aromáticos sin contener naftalenos. La Tabla 5 muestra la comparativa de propiedades de distintos combustibles de aviación vs SAK [44]. Se puede observar cómo la composición del SAK es similar con respecto al Jet A Fuel, teniendo un punto de congelación menor que éste, además de la presencia de aromáticos en cantidades similares al combustible convencional, lo cuál es una ventaja frente a otros como HEFA.

Tabla 5. Comparativa de propiedades de distintos combustibles de aviación vs SAK.

Spec Test	ASTM D1655 Jet A	VIRENT SAK	HEFA	Conventional Jet A
Aromatics, V%	< 25	16,8	< 1	18,8
Naphthalenes	< 3	< 0,01	< 0,01	1,2
Sulfur, Mass%	< 0,30	163	0,00	0,08
Flash point, °C	≤ 38	40	> 130	51
Thermal Stab Break Pt, °C	> 260	295	> 325	280
Freeze Point, °C	< -40	< -80	-59	-50
Density @ 15°C, kg/m3	775-840	775	756	804

### 4.2.2 Hidropirólisis e Hidroconversión Integrada

Otro de los procesos bajo evaluación es la hidropirólisis e hidroconversión integrada (Integrated Hydrolysis and Hydroconversion, IH2). Es un proceso termoquímico catalítico continuo que se estima que proporcione una ruta rentable, desde un amplio espectro de desechos orgánicos hasta combustibles completamente fungibles de hidrocarburos líquidos. Como materia prima, se puede emplear prácticamente cualquier tipo de biomasa, incluyendo desde residuos forestales o de agricultura, hasta varios tipos de plásticos o residuos municipales [45].

El proceso fue inventado por Gas Technology Institute (GTI) de Des Plaines en 2009 y fue desarrollado con la ayuda de la compañía Shell Catalysts and Technologies, logrando grandes avances de cara a la preparación comercial del proceso. Se han hecho estimaciones a gran escala en las que para una planta con tasas de alimentación 2.000 toneladas/día de biomasa forestal y una producción del orden de 60,9 millones de galones/año, con un precio estimado de 2 dólares por galón. Ya hay plantas piloto en funcionamiento con una tasa de alimentación de 50 kg/día.

El proceso de IH2 se compone de las siguientes etapas: pretratamiento de la biomasa, hidropirólisis, donde la biomasa se descompone en moléculas más pequeñas como gases de síntesis, bioaceites y char, al mezclarse con agua a altas temperaturas y presiones en presencia de un catalizador, separación, un proceso de hidroconversión en el que el bioaceite y los gases de síntesis se convierten en hidrocarburos, y por último purificación. La Ilustración 11 muestra el proceso de IH2 [46].

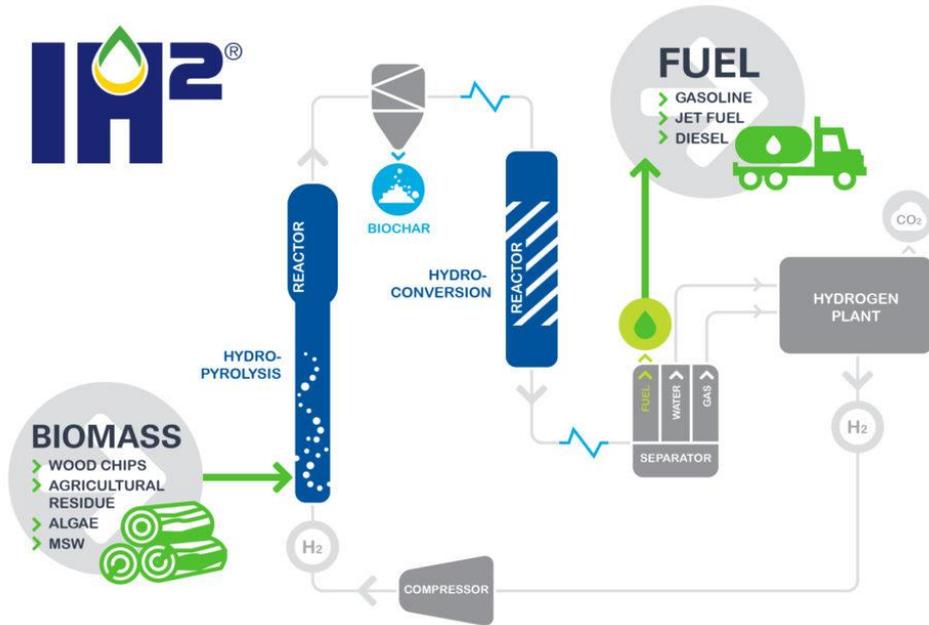


Ilustración 11. Proceso de IH2

# 5 PROYECTOS ACTUALES DE PRODUCCIÓN Y USO DE SAF

## 5.1 Estudios de caso de aerolíneas y empresas que utilizan SAF

En el apartado 3 se introduce “ReFuelEU Aviation”, la iniciativa aprobada por el Parlamento Europeo en 2023 por la cual se establece la introducción gradual de combustibles sostenibles en la aviación europea a partir de 2025, año en el que las aerolíneas europeas deberán utilizar un 2% de SAF, aumentando al 6% en 2030, y progresivamente hasta un 70% en 2050, tal y como se observó en la Ilustración 1 [47], para ayudar a conseguir los objetivos Net Zero en 2050. Con esta iniciativa se pretende llegar al uso de 3,58 miles de millones de toneladas de SAF en 2030. Además de esta, hay otras políticas similares en el sector, como el SAF Grand Challenge de los Estados Unidos (9,08 miles de millones de toneladas) [48], u otros mandatos en Reino Unido, Noruega, Brasil, Japón o India, entre otros [49].

En 2023 se cumplió el hito de los 500.000 vuelos utilizando SAF. Son más de 50 aerolíneas las que han operado con SAF hasta la fecha, entre las que se pueden encontrar Lufthansa, Air France, SWISS, Singapore Airlines, Delta Air Lines o American Airlines. La tendencia de pedidos de SAF está aumentando. Según datos de la OACI, en 2021 el uso de SAF por parte de las aerolíneas se cuadruplicó con respecto a 2019, con 0,08 miles de millones de toneladas frente a las 0,02 miles de millones de toneladas de dos años atrás, y en 2022 volvió a triplicarse para alcanzar las 0,24 mil millones de toneladas, lo que todavía representó menos del 1% del combustible empleado durante ese año. Se espera que esta cantidad siga incrementándose gracias al uso comercial de nuevas y ampliadas plantas de producción [49].

Más de 50 aerolíneas se han comprometido con objetivos de uso de SAF de entre el 5 y el 30% de su uso total de combustible para 2030. Estas aerolíneas representan más del 40% del combustible consumido globalmente. Por ejemplo, la aerolínea Ryanair se ha comprometido con una mezcla del 12,5% de SAF en su flota para 2030 [50]. Otras aerolíneas como FedEx, DHL y UPS se han comprometido con un 30% para 2030, y otras muchas como American Airlines, British Airways, Qatar Airways, Air France o Vueling se comprometen al 5% [49].

Una de las aerolíneas a destacar es la española Iberia, reconocida por IBA como la segunda aerolínea del mundo que más había reducido sus emisiones entre 2019 y 2022. Iberia se ha comprometido a alcanzar las cero emisiones netas en 2050, e IAG, grupo al que pertenece la aerolínea, se ha comprometido al abastecimiento de sus vuelos con un 10% de combustible sostenible en 2030, invirtiendo 865 millones de dólares en compras e inversiones en SAF para impulsar su producción [51].

Como se puede ver en la Ilustración 12, en 2023 ya son 80 los aeropuertos que distribuyen SAF de forma regular mundialmente, con una clara tendencia positiva.

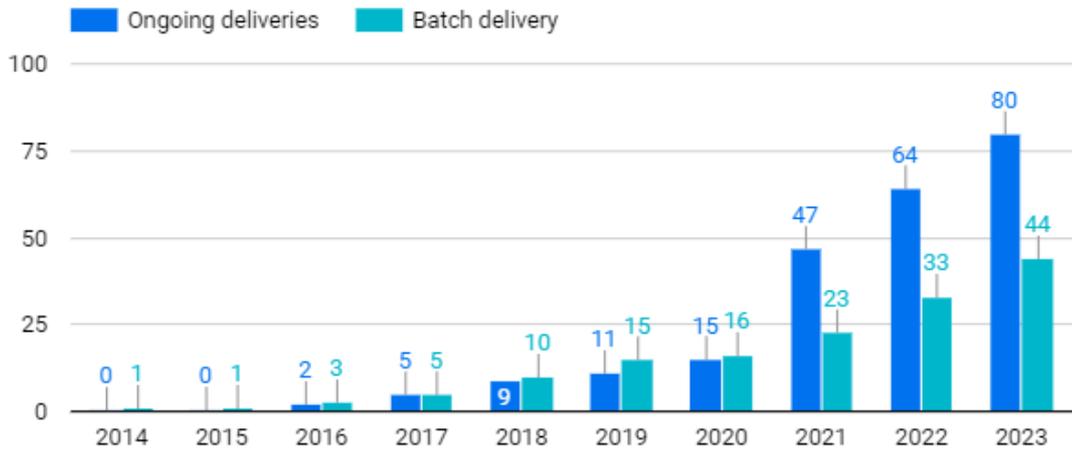


Ilustración 12. Aeropuertos con distribución de SAF mundialmente.

La Ilustración 13 e Ilustración 14 muestran la distribución de estos en Europa y América del Norte, respectivamente [52].

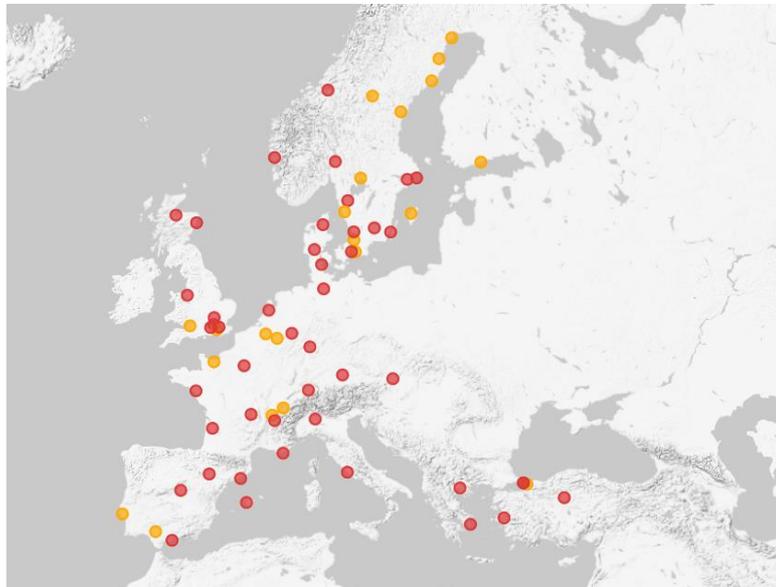


Ilustración 13. Aeropuertos distribuyendo SAF de forma regular (rojo) e intermitente (amarillo) en Europa

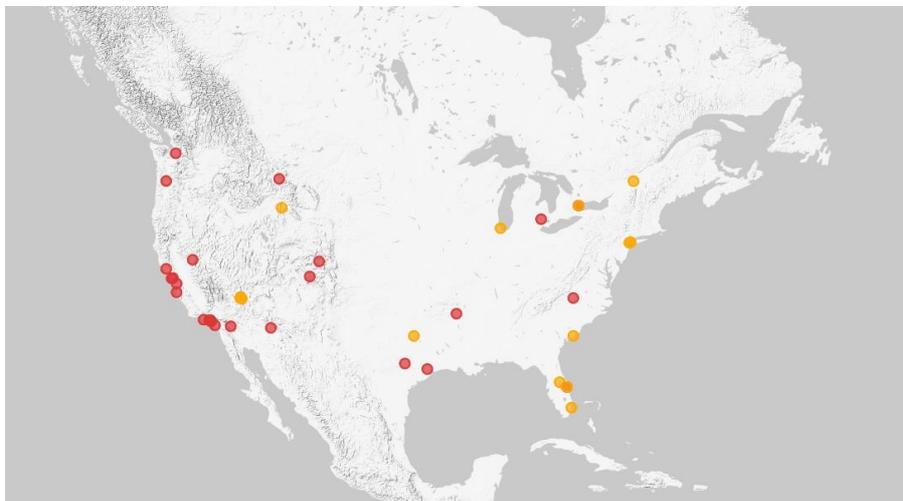


Ilustración 14. Aeropuertos distribuyendo SAF de forma regular (rojo) e intermitente (amarillo) en América.

## 5.2 Iniciativas de producción de SAF a gran escala

El incremento experimentado en la producción de SAF se ha visto impulsado por la puesta en servicio de nuevas refinerías de combustible renovable, junto con la ampliada capacidad de plantas existentes por todo el mundo. A finales de 2023, unos 10 centros producen SAF regularmente, con plantas de producción operadas por BP, Calumet, ENI, Marathon, Neste, Philips 66, Repsol, Shell, Total y World Energy [49].

Uno de los recientes hitos en la historia de la aviación es la inauguración de la primera planta del mundo para producir biocombustible a partir de etanol en enero de 2024, LanzaJet Freedom Pines Fuels (Ilustración 15). Esta planta ha sido montada por la compañía LanzaJet Inc. en una zona rural de Georgia, Estados Unidos, y está valorada en 200 millones de dólares. LanzaJet Inc. es una compañía puntera en el desarrollo de combustibles sostenibles, habiendo patentado un AtJ a base de etanol.



Ilustración 15. LanzaJet Freedom Pines Fuels, Soperton, Estados Unidos.

La planta ha contado con el apoyo financiero del gobierno estadounidense, además de empresas privadas como Microsoft. Esta planta tendrá una producción anual de 9 millones de galones de SAF en su primer año de operación, unas 30 mil toneladas [53] [54].

Otra instalación a destacar es la planta Sierra Biofuels, construida por Fulcrum en Nevada, cuya ingeniería y construcción fue llevada a cabo por la empresa sevillana Abengoa, la cual fue la primera instalación de conversión de residuos sólidos urbanos para producción de biocombustibles mediante Fischer-Tropsch, produciendo 11 millones de galones de crudo anuales [55].

España es uno de los países donde ya se ha comenzado con la producción de biocombustibles, como medida para la descarbonización de la aviación frente a la creciente tendencia en el consumo de combustible de aviación en el país, como se puede observar en la Ilustración 16. La energética Repsol ha puesto en marcha a finales de 2023 en Cartagena, Murcia, la primera planta de España capaz de suministrar 250.000 toneladas al año de biocombustibles avanzados a partir de residuos lípidos que permite reducir 900.000 toneladas de CO<sub>2</sub> al año. La compañía ha invertido 200 millones de euros en el proyecto [51]. La industria de producción de SAF puede suponer una gran oportunidad para generar riqueza y empleo en países como España, donde se podría localizar en zonas rurales repartidas por el país, que es donde se encuentran las mayores fuentes de residuos que se emplean para la producción de SAF. Un estudio realizado por la empresa PwC para las aerolíneas Iberia y Vueling estima que, si se reparten por España entre 30 y 40 plantas de producción, el país sería capaz de cubrir toda su demanda nacional, pudiendo incluso exportar grandes volúmenes a nivel internacional dado el potencial de producción que es superior a la demanda local, ya que se estima un potencial de producción de más de 7 millones de toneladas anuales de SAF en España, destacando AtJ y FT [56] [57].

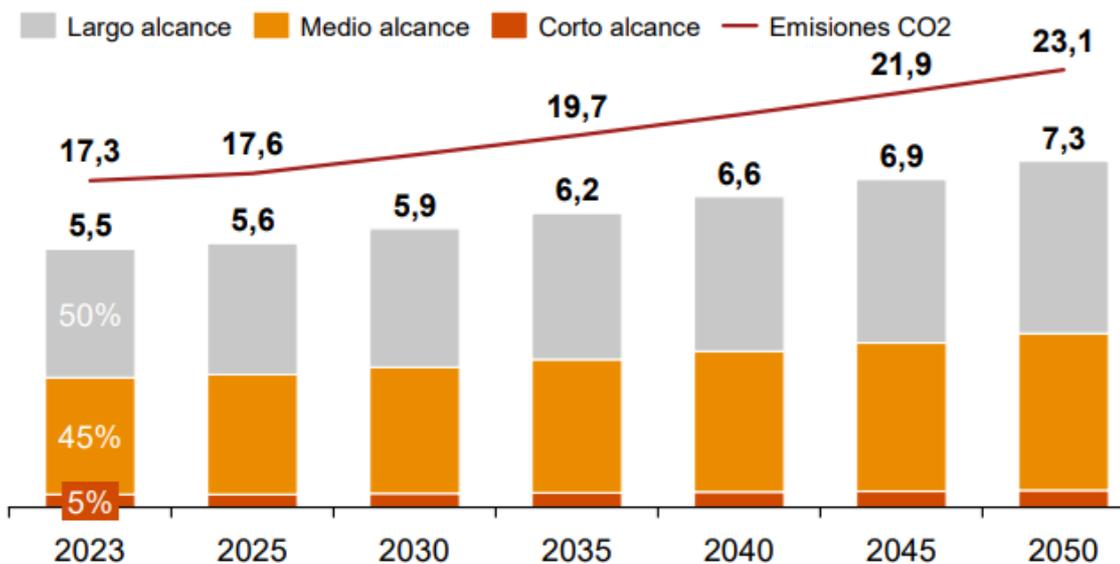


Ilustración 16. Proyección del consumo de combustible para aviación en España por tipo de vuelo [Mt]

La Ilustración 17 muestra una estimación de la evolución del número de plantas de producción de SAF en España en base a una capacidad media por planta de 767 kt/año para HEFA, 168 kt/año para FT y 99 kt/año para AtJ, teniendo en cuenta biodiésel y otros subderivados además de SAF [57].

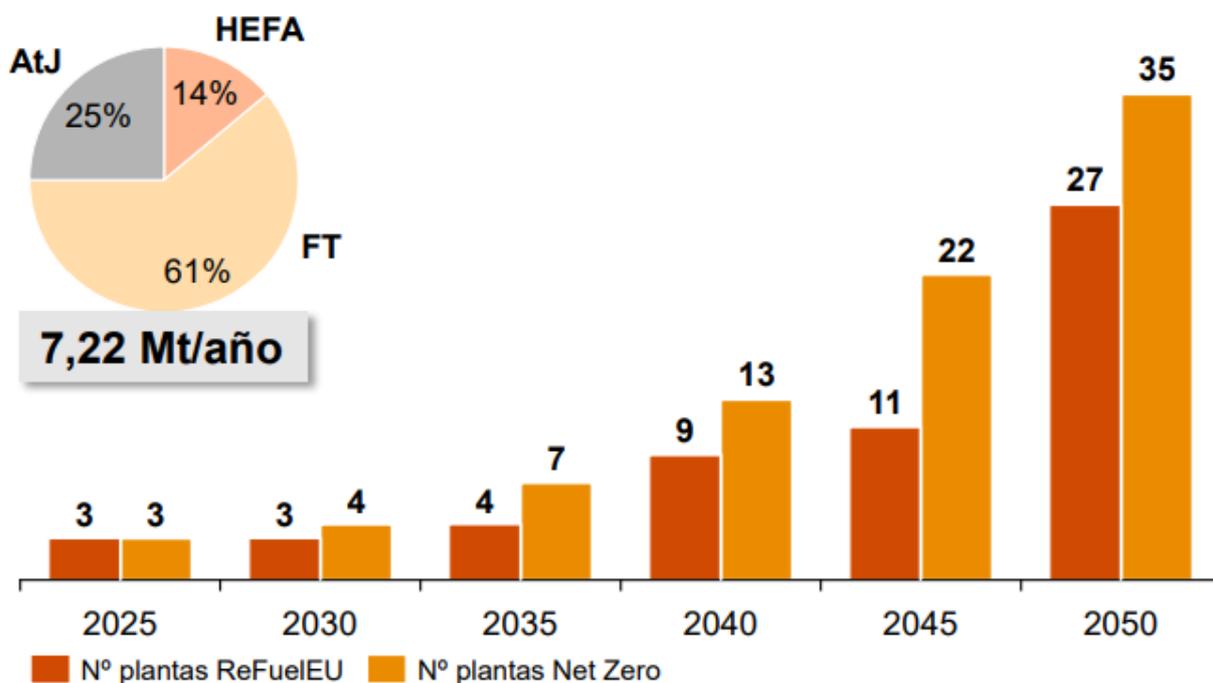


Ilustración 17. Nº de plantas de producción de biocombustibles

De vuelta a España, en 2024, las compañías Cepsa y Bio-Oil han comenzado la construcción de la mayor planta de biocombustibles del sur de Europa. La instalación está localizada en Palos de la Frontera, Huelva, y cuenta con una inversión de 1.200 millones de euros. La puesta en marcha está planificada para 2026, año en el que se planea que la planta empiece con una producción de 500 mil toneladas anuales de biocombustible, tanto SAF como diésel renovable [58].

Como se puede ver, son muchas las compañías que ya tienen plantas de producción de SAF puestas en marcha. Neste, la mayor productora de SAF a nivel mundial, cuenta con su mayor refinería en Singapur, que actualmente tiene una capacidad anual de producción de 345 millones de galones netos de SAF, 1 millón de toneladas aproximadamente, aumentando al medio millón de galones a mediados de 2024. La compañía estima producir 750 millones de galones (más de dos millones de toneladas) anuales en 2026, cuando finalice las modificaciones de su refinería de Rotterdam. Otras compañías como World Energy o Phillips 66 también tienen grandes refinerías en funcionamiento actualmente [59].

A fecha de noviembre de 2023, un 85% de los proyectos de SAF tienen su origen en la vía de hidrotratamiento de ésteres y ácidos grasos (HEFA). Sin embargo, la disponibilidad limitada de materias primas puede suponer un impedimento para que HEFA pueda cumplir con toda la demanda de SAF para el sector a largo plazo. Por tanto, existe la necesidad de diversificación de materias primas para poder aumentar la disponibilidad de SAF proveniente de otras vías de desarrollo avanzadas como AtJ o FT para finales de la década de 2030 [49].

La Ilustración 18 muestra la evolución estimada de la producción de SAF hasta 2030, según estimaciones globales del S&P [60]. Se puede observar la perspectiva de un aumento de producción muy significativo a medio plazo, debido al efecto de iniciativas como ReFuelEU Aviation. Por otro lado, en la Ilustración 19, se puede ver la fotografía, a fecha de 2021, de la capacidad de producción de SAF a nivel global, donde destaca la compañía Neste, y de la capacidad potencial de producción a corto plazo a nivel global, donde destaca Estados Unidos, con plantas como las mencionadas anteriormente, o Singapur y Holanda con sus plantas de Neste, entre otras [24].

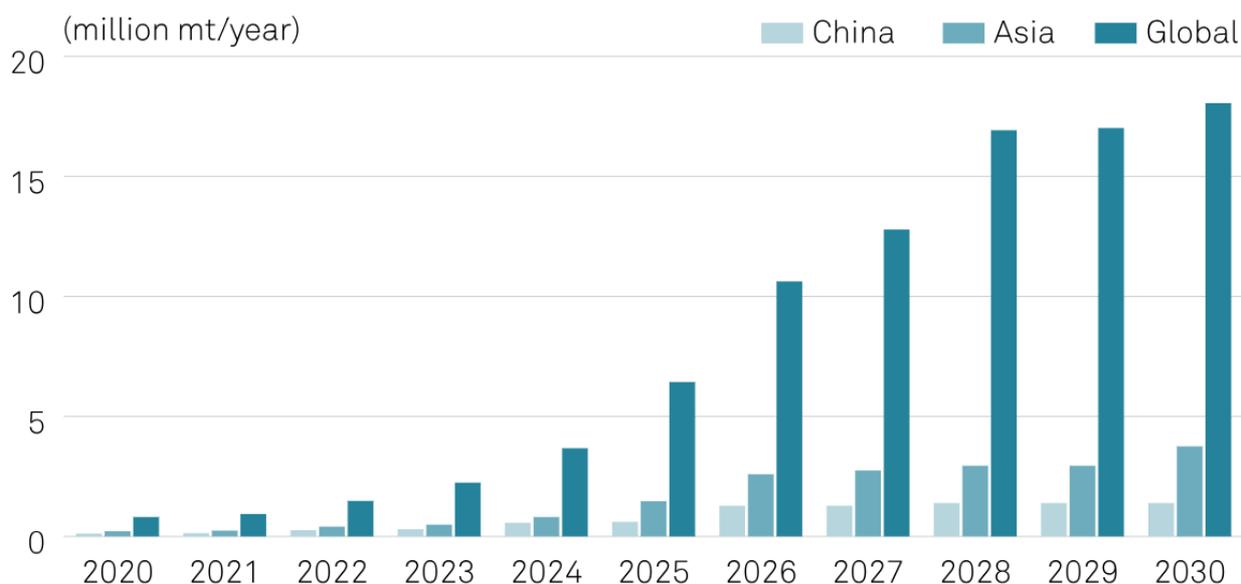


Ilustración 18. Evolución de la producción global de SAF según el S&P

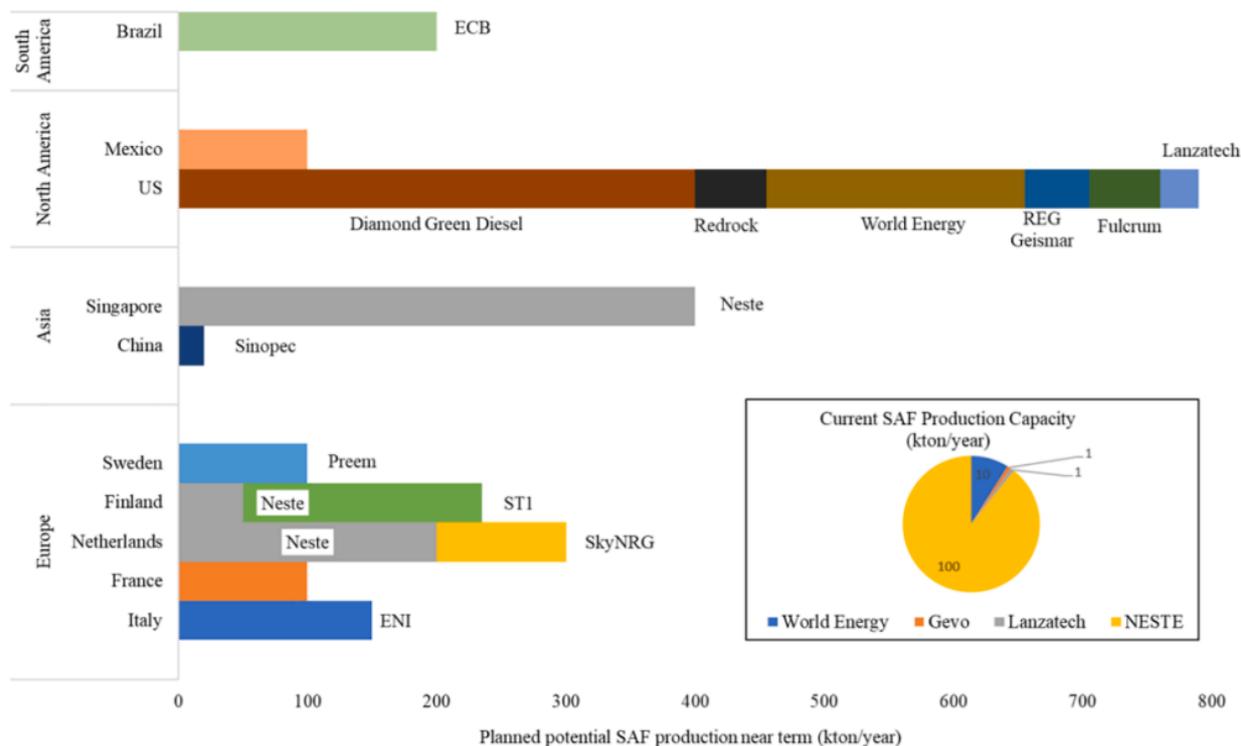


Ilustración 19. Capacidad de producción potencial y actual de SAF a fecha de 2021.

### 5.3 Beneficios económicos de la adopción de SAF

Anteriormente se han descrito los beneficios ambientales que supone el uso de SAF. En este apartado se procede a analizar los potenciales beneficios económicos de la adopción de este.

Volviendo al caso de España, el país encuentra en la producción de SAF una gran oportunidad de crecimiento económico. Como se ha comentado en el apartado anterior, HEFA ocupa el mayor porcentaje de proyectos de producción de SAF en la actualidad. El éxito en esta industria se encontrará con mayor probabilidad en los territorios que sean capaces de disponer de la materia prima para la producción, además de las capacidades industriales, la colaboración entre empresas del sector y gobierno, y la garantía del desarrollo de medidas que faciliten este tipo de proyectos. Teniendo en cuenta el tipo de residuos disponibles en España, destaca su potencial de producción para los procesos de AtJ y FT. En la Tabla 6 se puede encontrar un resumen de los tipos de SAF, con materias primas, madurez tecnológica y costes de producción, entre otros. Se puede apreciar como HEFA es la tecnología más madura actualmente, con los menores costes de producción, aunque Fischer-Tropsch es la tecnología con mayor reducción de emisiones pese a tener mayores costes de producción [57].

	Origen	Madurez tecnológica	% de mezcla	LCA (g CO <sub>2e</sub> /MJ)	Reducción emisiones (%)	Coste de producción (€/ton)	
1	<b>HEFA</b>	Aceites (residuos vegetales)	Es la <b>vía más madura</b> actualmente y ha probado ser una tecnología segura y escalable. Abarca el total de la producción actual de SAF	50%	13 - 57	35 – 85%	1.375
2	<b>FT</b>	Biomasa (residuos agrícolas, forestales, municipales)	Es la <b>vía con mayor desarrollo después de los HEFA</b> , con algunas plantas de prueba en operación	50%	5 - 13	85 – 95%	2.050
3	<b>AtJ</b>	Residuos agrícolas, forestales, azúcar, maíz	Es una <b>tecnología certificada más reciente</b> y todavía no está siendo comercializada	50%	26-53	40 – 70 %	2.450

Tabla 6. Resumen de características de tipos de SAF.

La Tabla 7 muestra el impacto en la economía que tendría el desarrollo de 27 de plantas de producción de SAF, número de plantas estimado para asumir todo el consumo nacional de SAF en 2050. Como se puede ver, el impacto en PIB y empleo (Full Time Equivalent, FTE, unidad que representa el tiempo de trabajo de una persona a jornada completa) sería muy considerable, tanto a nivel directo como indirecto, además de descarbonizar la aviación y suponer para España la independencia energética en el sector con respecto a otros países [57].

	Plantas		Construcción			Operación		
	Cap. media por planta [kt/año]	Nº Plantas	Inversión [M€]	PIB [M€]	Empleo [#FTE]	Ingresos [M€]	PIB [M€]	Empleo [#FTE]
HEFA	767	3	1.971	1.181	19.884	18.963	13.773	4.791
FT	168	12	5.652	3.386	57.020	4.660	4.783	4.941
AtJ	99	12	576	345	5.811	5.272	5.435	6.971
<b>TOTAL</b>		<b>27</b>	<b>8.199</b>	<b>4.912</b>	<b>82.715</b>	<b>28.895</b>	<b>23.991</b>	<b>16.703</b>

Tabla 7. Resumen del impacto de la producción de SAF en España.

Este análisis es extrapolable a nivel global, dependiendo el resultado final del tipo de planta construido, lo que principalmente dependerá del tipo de materia prima mayormente disponible según la región, y el resto de los costes logístico, de construcción y operación. Aun así, no cabe duda de que la puesta en marcha de nuevas refinerías tiene un impacto positivo en el empleo y la economía de la región.

Según la EASA, el precio del combustible de aviación ronda los 600 \$/t, mientras que el precio del SAF se encuentra actualmente en un rango de entre 1,5 y 6 veces más. Esto se debe a varios motivos como a la baja madurez de las tecnologías de producción y los costes de producción, entre otros. Sin embargo, se estima que a largo plazo estos costes de producción se reduzcan tras los esperados avances en las tecnologías de producción y las economías de escala, al aumentar la producción media de las plantas. Otros factores que ayudarían a la reducción de precios serían incentivos económicos como créditos fiscales [61]. Un factor a destacar es que, pese al mayor coste del SAF respecto al combustible convencional actualmente, la producción de SAF sigue estando por debajo de su demanda, debido a medidas de incentivación de su uso como RefuelEU [17].

Aunque insuficientes, son varias las formas en las que se incentiva y promueve el uso de SAF. Destacan medidas como los permisos de emisión de carbono gratuito para aerolíneas que usan SAF, prioridad en la asignación de huecos en aeropuertos para las mismas, o incentivos y beneficios fiscales, que varían según el país. Por ejemplo, en Europa, se beneficia el uso de SAF con la exención del impuesto para sobre el consumo de energía [62].





Ilustración 21. Concepto de avión regional ZEROe Airbus

### 6.1.2 Escenario 2: despliegue agresivo de SAF

El escenario 2 propuesto por el informe Waypoint 2050 considera mejoras en las configuraciones de los aviones, pero basadas en tecnologías actuales, dejando de lado el camino hacia aviones híbridos o eléctricos, ya que la industria habría optado por la priorización de la inversión en SAF. Según este escenario, se necesitaría la producción de 445 millones de toneladas anuales en 2050 para contribuir a la reducción del 71% de las emisiones totales, como se puede observar en la Ilustración 22 [65].

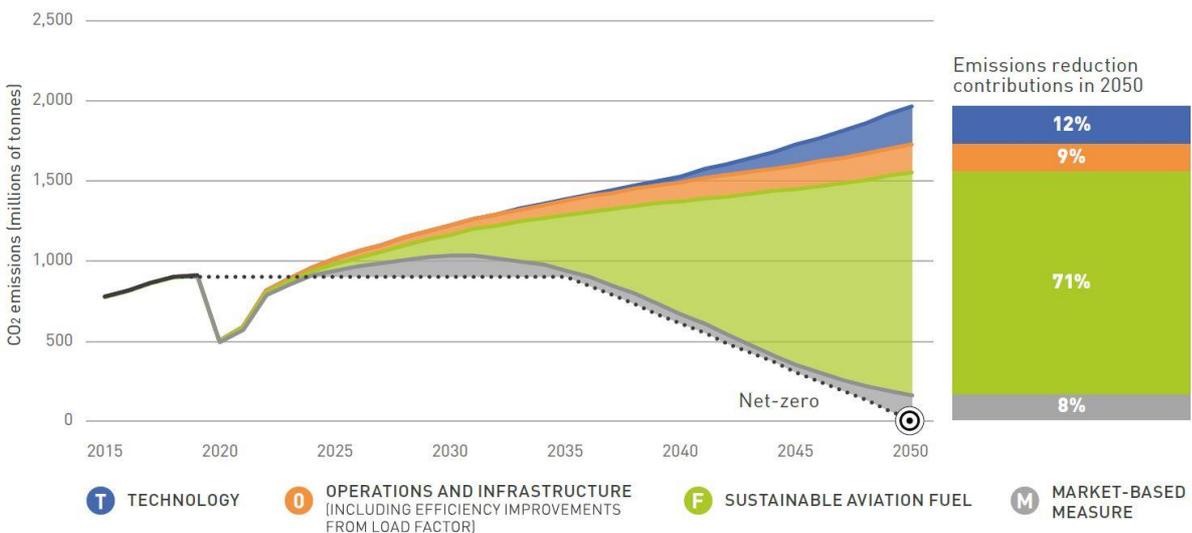


Ilustración 22. Escenario 2 del informe Waypoint 2050

### 6.1.3 Escenario 3: perspectiva tecnológica aspiracional y agresiva

En este escenario considerado por el informe Waypoint 2050, las mejoras tecnológicas van aún más allá que en el escenario 1, permitiendo, además de la aparición de aviones regionales eléctricos, la entrada en servicio de aviones propulsados por hidrógeno verde en el tramo de 100 a 200 pasajeros, junto con nuevas configuraciones de propulsión eléctrica híbrida para aviones más grandes. Sigue habiendo alguna contribución a las reducciones debido a mejoras en operaciones e infraestructuras a causa de inversiones en este sector.

En este escenario, la contribución a las reducciones de emisiones de carbono debida al uso de SAF es menor que en el resto de escenarios, aunque aún sigue siendo el factor más importante con un 53% de la contribución total, con una producción de 330 millones de toneladas anuales, como se puede ver en la Ilustración 23 [65].

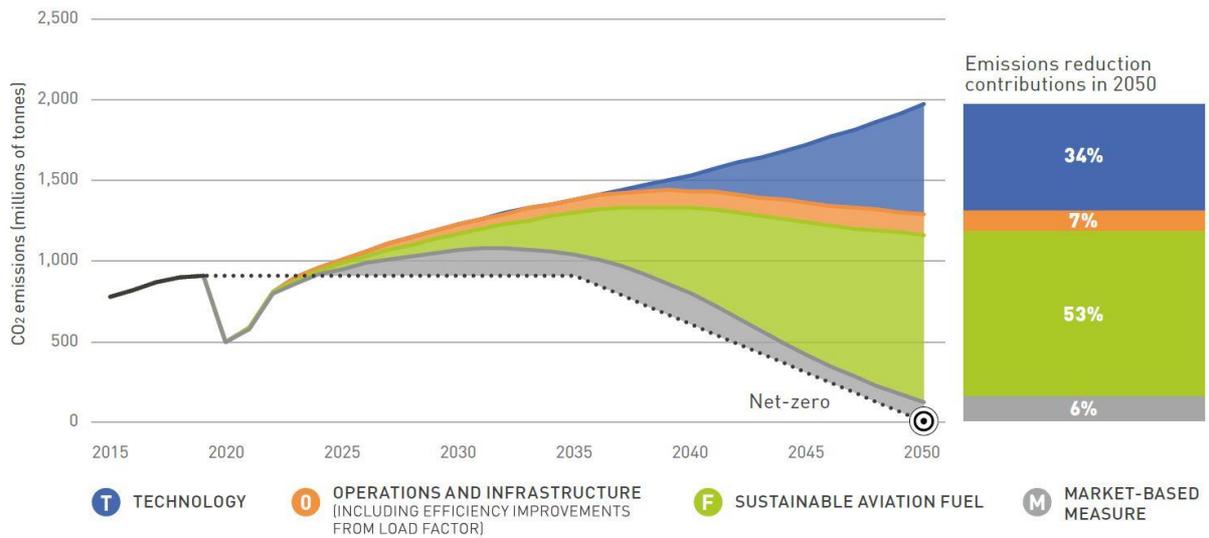


Ilustración 23. Escenario 3 del informe Waypoint 2050

Como se puede observar, en cualquiera de los tres escenarios, el papel del SAF es clave para alcanzar las cero emisiones netas en 2050. Para entonces, la producción de SAF tiene que llegar a estar entre el rango de 330 y 445 millones de toneladas anuales [65], muy lejos de las poco más de 0,5 millones de toneladas producidas en 2023 [66]. En este capítulo se van a repasar las barreras, puntos de bloqueo y retos técnicos y logísticos que se sitúan entre la situación actual y el objetivo a alcanzar en 2050.

## 6.2 Barreras técnicas y económicas en la producción de SAF

La Ilustración 24 muestra las principales barreras para la introducción de SAF [67]. En esta sección se van a describir las principales.

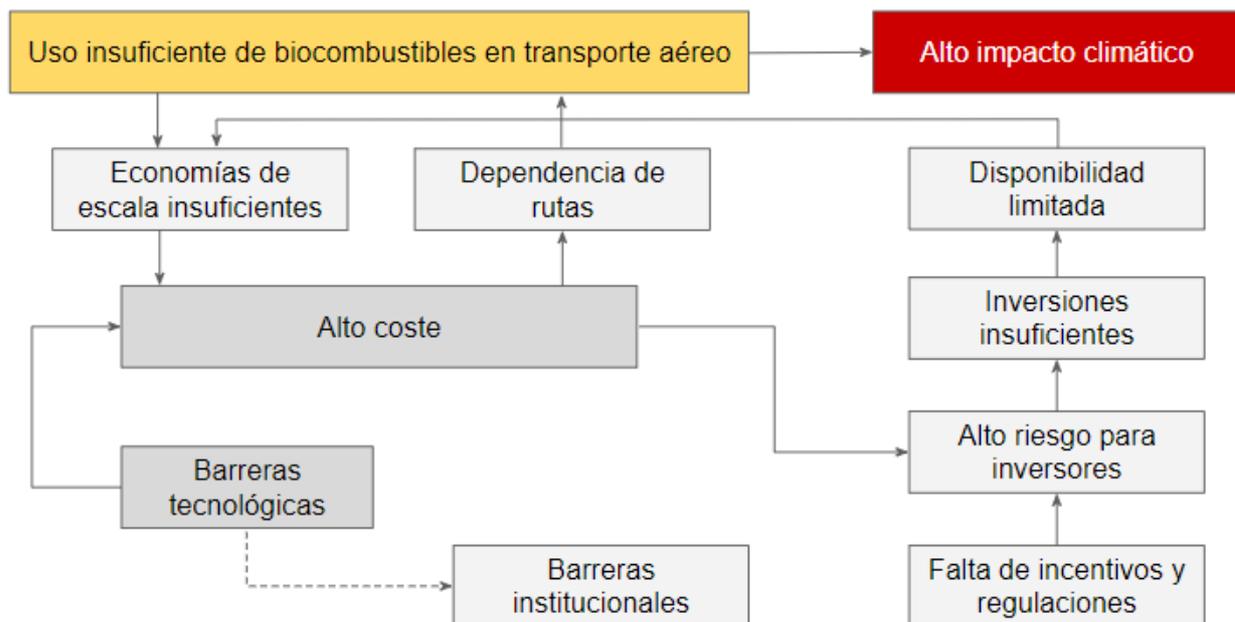


Ilustración 24. Principales barreras para la introducción de combustibles sostenibles.

## 6.2.1 Barreras técnicas

Una de las principales barreras presentes en la actualidad es la limitación del uso de SAF al 50% de mezcla con combustibles convencionales. Es sabido que a este nivel de mezcla los motores convencionales pueden operar sin problemas sin necesidad de modificación en estos, pero ¿qué sucede cuando se llena el depósito al 100% con SAF? Un estudio realizado por la compañía Safran Aerosystems sobre el comportamiento de los sistemas de distribución de combustible, donde los equipos se sometieron a variaciones de temperatura y altitud operando con 100% de SAF, concluyendo que, a temperaturas muy bajas, el bombeo de estos combustibles se vuelve más complicado, principalmente debido a la falta de aromáticos que contribuyen a crear un sello y añaden propiedades lubricantes, requiriendo por lo tanto la necesidad, o bien de modificaciones en los equipos de distribución de combustible, o bien en la composición de los SAF añadiendo aromáticos para hacerlos completamente compatibles con los equipos actuales [68]. Se trata de una gran limitación para la escalación del uso de SAF, ya que el mejor de los casos es una ratio de mezcla del 50% para tecnologías como FT, pero tratándose de un 10% para otras tecnologías de producción. Esto se soluciona con la adición de aromáticos a los combustibles.

Otra de las barreras tecnológicas es la compatibilidad con la infraestructura de producción existente, requiriendo mayores o menores cambios en medida de la tecnología de producción y almacenamiento utilizada. Según la región en la que se produce el SAF, la disponibilidad de materia prima y otros factores logísticos determinaran la solución de producción de SAF preferible, lo cual repercutirá en las modificaciones de la infraestructura de producción, dificultando en muchos casos la escalabilidad de la producción [67].

Otras posibles barreras pueden derivar de la materia prima empleada para la producción del combustible. Un ejemplo de esto es el uso de residuos sólidos municipales, los cuales pueden variar mucho en su composición, pudiendo estar altamente contaminados con cenizas o metales pesados, por ejemplo, y pueden tener un alto contenido de humedad, lo que hace que esta materia prima requiera un pretratamiento y separación más complejo que otras. Otras materias primas presentan barreras económicas que se tratarán en el siguiente apartado [69]. Cada ruta de producción de SAF presenta unas determinadas barreras tecnológicas particulares, las cuales dependen de la madurez de la tecnología empleada y de la tecnología en sí.

## 6.2.2 Barreras económicas

El precio del queroseno está directamente ligado al precio del crudo, tal y como se puede ver en la Ilustración 25, que muestra la comparación de la evolución de las tasas de cambio de petróleo crudo y queroseno a lo largo del año 2023. Estudios como el de Pelayo Menéndez Rodríguez en 2021 confirman que esta estrecha relación se ha mantenido a lo largo de la historia [70] [71]. Para las aerolíneas, unos de los mayores costes operativos es el de combustibles, por lo que están altamente expuestas a la volatilidad de los precios del petróleo crudo, que se puede ver en la Ilustración 25 como, históricamente, han tenido variaciones muy importantes debido a aspectos ajenos a las propias aerolíneas como pueden ser los factores geopolíticos o económicos.

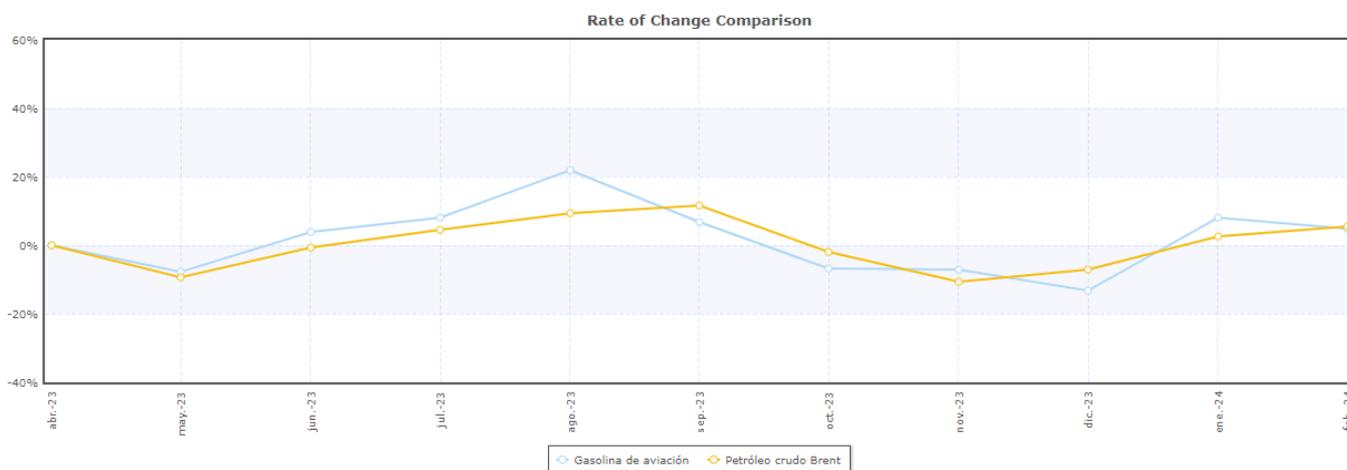


Ilustración 25. Comparativa de tasas de cambio entre petróleo y queroseno

Por tanto, el coste de producción del SAF, que actualmente puede ser de entre 2 y 5 veces mayor que el del queroseno, supone una gran barrera para la expansión de la producción de SAF. Este coste dependerá del precio de la materia prima usada, y de la tecnología de producción, como se puede observar en la Ilustración 26 [72]. Se espera que esta barrera se mitigue con la economía de escala, abaratando costes al ampliar sustancialmente la producción [70].

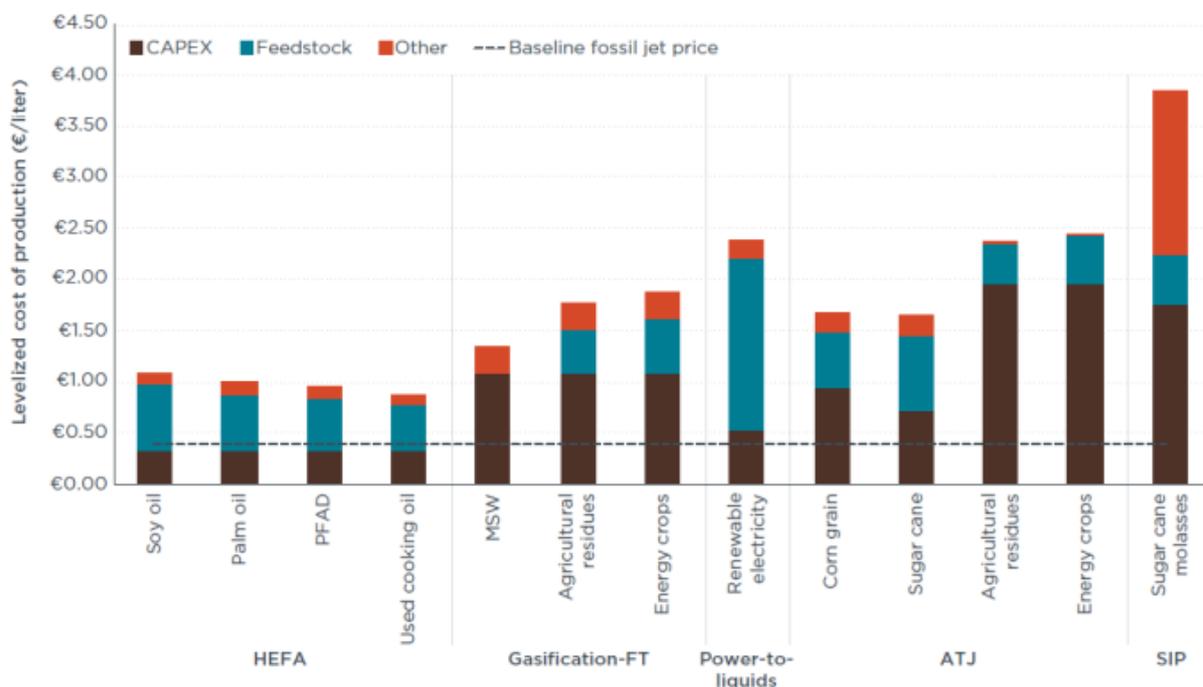


Ilustración 26. Estimación de costes de producción de SAF

### 6.3 Disponibilidad y distribución de SAF

Para hablar de la disponibilidad y distribución de SAF, en primer lugar, es necesario hablar de la disponibilidad y los costes de la materia prima necesitada. Los tipos de materia prima usados para producir SAF se pueden clasificar en tres tipos, los llamados de primera, segunda y tercera generación. La materia prima de primera generación consiste en aquella biomasa que se considera comestible, mientras que la de segunda generación consiste en los subproductos no comestibles de la biomasa comestible, lo cual hace que este segundo tipo sea más sostenible que el primero. Por otro lado, la materia prima de tercera generación es la biomasa basada en algas con rápido crecimiento [73].

El coste de la materia prima es crítico a la hora de establecer el coste de producción de SAF. Son muchos los factores que influyen en este coste, por lo que es complicado predecir la evolución de estos precios debido a factores como el cambio climático o la localización de las distintas refinerías. El precio de la materia prima también varía significativamente según la región. Como ejemplo representativo, la Tabla 8 muestra los costes de materia prima usada para la producción de biocombustibles en Estados Unidos [74] [24]. Como se puede observar, a pesar de que HEFA hoy en día es la ruta de producción con menores costes y precio de venta, la materia prima usada para este tiene un mayor que precio que otras.

Tabla 8. Precio de biomasa comúnmente utilizada para la producción de SAF

	Materia Prima	Precio (\$/ton)	Ruta de producción	Comentarios	Referencia
Bajo coste (<100\$/ton)	Caña de azúcar	31-34	FT, ATJ, SIP	Uno de los cultivos más eficientes	[75]
	Astilla de madera	65	FT, ATJ		[75]
	Álamo	77-80	ATJ, Pirólisis	Tasa de crecimiento rápida	[76]
	Residuo de maíz	80	FT	Debido a su alto contenido de almidón y disponibilidad, el maíz es la materia prima principal para producir etanol en EEUU	[77]
Coste moderado (100-300 \$/ton)	Fruta de Jatropha	127	HEFA	Puede cultivarse todo el año en condiciones húmedas o de regadío	[78]
	Grano de maíz	144	ATJ	Debido a su alto contenido de almidón y disponibilidad, el maíz es la materia prima principal para producir etanol en EEUU	[77]
	Aceite de camelina	281	HEFA	Prometedor para las condiciones agroclimáticas de EEUU	[79]
Coste alto (>300\$/ton)	Aceite de palma	312	HEFA	Se puede generar energía quemando sus tallos y racimos de frutos	[80]
	Aceite de soja	382	HEFA	Menor rendimiento para SAF comparado con el aceite de palma	[80]

El precio es uno de los factores principales que determina si una materia prima es propicia o no pero, además, existen otros factores como la accesibilidad a la materia prima, el nivel de industrialización de las cadenas de suministro, la capacidad máxima de provisión, el impacto en el uso de la tierra y el agua o la consideración de sostenibilidad [70].

CORSIA, por medio de la International Sustainability & Carbon Certification (ISCC), ha construido un manual de evaluación de emisiones a ciclo completo (LCA) para las principales materias primas utilizadas para la producción de SAF, utilizando como referencia el valor de 89 gCO<sub>2</sub>e /MJ para el combustible de aviación convencional. La Tabla 9 muestra los valores medidos por CORSIA, donde se puede observar que los materiales empleados para la producción de SAF por Fischer-Tropsch muestran la mayor reducción de emisiones a ciclo completo con respecto al combustible convencional, con una media del 97% de reducción, seguido por AtJ con un 65% [81].

Para HEFA-SPK, las materias primas de mayor interés son el aceite de cocina usado (Used Cooking Oil, UCO), el sebo (grasa animal) y los ácidos grasos de palma. El UCO es la materia prima más utilizada a nivel mundial en la producción actual, con ejemplos como la compañía NESTE, con acuerdos con cadenas de restauración [82]. El sebo sería complementario, con acuerdos con la industria cárnica, aunque la industrialización a gran escala es más limitada, mientras que los ácidos grasos de palma tienen gran potencial, aunque genera controversia respecto al uso indirecto de la tierra.

Tabla 9. Referencia de CORSIA para emisiones de combustibles alternativos

Fuel Conversion Process	Region	Fuel Feedstock	Core LCA Value	ILUC LCA Value	LSf (gCO <sub>2</sub> e/MJ)	Reducción de emisiones LCA (gCO <sub>2</sub> e/MJ)	Reducción de emisiones LCA (%)
Fischer-Tropsch (FT)	Global	Agricultural residues	7,7	0,0	7,7	-81,3	-91
	Global	Forestry residues	8,3	0,0	8,3	-80,7	-91
	Global	Municipal solid waste (MSW), 0% non- biogenic carbon (NBC)	5,2	0,0	5,2	-83,8	-94
	USA	Poplar (short-rotation woody crops)	12,2	-5,2	7,0	-82,0	-92
	Global		12,2	8,6	20,8	-68,2	-77
	USA	Miscanthus (herbaceous energy crops)	10,4	-32,9	-22,5	-111,5	-125
	EU		10,4	-22,0	-11,6	-100,6	-113
	Global		10,4	-12,6	-2,2	-91,2	-102
	USA	Switchgrass (herbaceous energy crops)	10,4	-3,8	6,6	-82,4	-93
	Global		10,4	-5,3	5,1	-83,9	-94
Hydroprocessed esters and fatty acids (HEFA)	Global	Tallow	22,5	0,0	22,5	-66,5	-75
	Global	Used cooking oil	13,9	0,0	13,9	-75,1	-84
	Global	Palm fatty acid distillate	20,7	0,0	20,7	-68,3	-77
	Global	Corn oil	17,2	0,0	17,2	-71,8	-81
	Malaysia and Indonesia	Palm Oil	37,4	0,0	37,4	-51,6	-58
	Brazil	Brassica carinata oil	34,4	-20,4	14	-75,0	-84
	USA		34,4	-21,4	13	-76,0	-85
	Global		34,4	-12,7	21,7	-67,3	-76
	USA	Soybean oil	40,4	24,5	64,9	-24,1	-27
	Brazil		40,4	27	67,4	-21,6	-24
	Global		40,4	25,8	66,2	-22,8	-26
	EU	Rapeseed oil	47,4	24,1	71,5	-17,5	-20
	Global		47,4	24,1	71,5	-17,5	-20
	Global	Camelina oil	42	-13,4	28,6	-60,4	-68
	India	Jatropha oil	46,9	-24,8	22,1	-66,9	-75
Alcohol (isobutanol) to jet (ATJ)	Global	Agricultural residues	29,3	0	29,3	-59,7	-67
	Global	Forestry residues	23,8	0	23,8	-65,2	-73
	Brazil	Sugarcane	24	7,3	31,3	-57,7	-65
	Global		24	9,1	33,1	-55,9	-63
	USA	Corn grain	55,8	22,1	77,9	-11,1	-12
	Global			29,7	29,7	-59,3	-67
	USA	Miscanthus (herbaceous energy crops)	43,4	-54,1	-10,7	-99,7	-112
	EU		43,4	-31	12,4	-76,6	-86
	Global		43,4	-14,5	28,9	-60,1	-68
	USA	Switchgrass	43,4	-14,5	28,9	-60,1	-68
	Global		43,4	5,4	48,8	-40,2	-45
	Brazil	Molasses	27	7,3	34,3	-54,7	-61
	Global		27	9,1	36,1	-52,9	-59
	Synthesized isoparaffins (SIP)	Brazil	Sugarcane	32,8	11,3	44,1	-44,9
Global		32,8		11,1	43,9	-45,1	-51
EU		Sugar beet	32,4	20,2	52,6	-36,4	-41
Global			32,4	11,2	43,6	-45,4	-51

Por otro lado, el FT-SPK emplea como materia prima principalmente residuos provenientes de la agricultura, residuos forestales y residuos sólidos municipales. Empresas productoras de SAF como Lanzajet, ya mencionado anteriormente por sus plantas operativas en Estados Unidos, destacan por la utilización de residuos agrícolas [54]. Los residuos forestales pueden ayudar a la prevención de incendios en zonas de gran densidad forestal como los países nórdicos, aunque la rentabilidad de la utilización de estos está por estudiarse. Empresas como RedRock, que opera en Estados Unidos, utilizan esta clase de materia prima [83]. Por último, los residuos municipales tienen un papel clave en el desarrollo a medio y largo plazo, favoreciendo enormemente la economía circular [70].

Por último, la tecnología AtJ-SPK emplea preferentemente, al igual que FT-SPK, residuos agrícolas y forestales, además de caña de azúcar y grano de maíz. La caña de azúcar es una de las materias primas más usadas en América, aunque genera cierta controversia por el uso indirecto de las tierras, al igual que el grano de maíz [70].

Tras hablar de la disponibilidad y distribución de materia prima para la producción de SAF, el siguiente paso lógico es hablar de la disponibilidad del propio SAF. Como se ha comentado en capítulos anteriores, a día de hoy la demanda de SAF se puede decir que es fuerte frente a la producción actual, ya que toda la producción de SAF ha sido comprada y consumida, siendo esta producción de más de 600 millones de litros (0,5 Mt) en 2023, aunque esto sólo supone una ínfima parte de las necesidades globales de combustible de aviación, poco más de un 0,5% [84].

En 2023, la Unión Europea fue la región con mayor consumo de SAF, muestra de su liderazgo en la descarbonización de la aviación, y fruto de la puesta en marcha de iniciativas ya mencionadas como RefuelEU Aviation [85]. La Ilustración 13, ya comentada anteriormente, muestra los aeropuertos que actualmente distribuyen SAF en Europa.

El potencial de producción de SAF en Asia y América es incluso mayor que en Europa, como se puede observar en la Ilustración 19, aunque el número de aerolíneas consumidoras de SAF sea menor, lo cual es clara muestra de la necesidad de seguir el modelo de iniciativas de incentivos al uso de SAF que se promueve en Europa.

Como se puede observar, son muchos los retos logísticos que envuelven la distribución y disponibilidad de SAF. Hay que avanzar en infraestructura, tecnología, sistemas de distribución y, en definitiva, hace falta colaboración entre todas las partes interesadas en el sector de la aviación para conseguir la aceptación del público.

## 7 MODELO DE PRODUCCIÓN DE SAF

En los capítulos anteriores se ha hecho un análisis detallado del contexto, la normativa y las metodologías de producción de SAF, repasando los proyectos actuales e identificando puntos de bloqueo y potenciales desarrollos en el futuro. A continuación, partiendo de todo el conocimiento adquirido hasta el momento, se procede a realizar un modelo económico y de capacidad que permita comparar a medio y largo plazo la producción de SAF con la de combustible de aviación convencional. Para ello, a partir de estimaciones basadas en el estudio realizado hasta ahora, se calculará el número de flotas que habrá en los próximos años y sus respectivas emisiones, además de la evolución del precio del queroseno teniendo en cuenta las futuras penalizaciones sobre las emisiones, y la evolución del precio del SAF teniendo en cuenta el desarrollo de las tecnologías y el aumento de su producción.

### 7.1 Perspectiva futura de flotas y emisiones

El primer paso para construir el modelo es calcular el número de aviones que habrá volado en los próximos años. La compañía Airbus realizó en 2023 su predicción de mercado global (Global Market Forecast, GMF), compartiendo así su estimación sobre el tráfico aéreo y el crecimiento de las flotas entre 2023 y 2043, siendo válido para aviones de más de 100 pasajeros, y teniendo en cuenta las sensibilidades de los precios energéticos considerando EU-ETS, CORSIA y otros esquemas de compensación. El número de vuelos realizados a diario ha remontado rápidamente tras la retirada de las restricciones causadas por la crisis del Covid-19, recuperándose los valores en 2023. Se estima que la demanda de aviones comerciales, tanto de pasajeros como cargueros, crezca a un valor del 3,6% anual. Airbus estima que en los próximos 20 años haya una demanda de 40.850 aviones de pasajeros y cargueros nuevos, como se puede observar en la Ilustración 27, de los cuales aproximadamente el 80% serían aviones de pasillo único y el resto aviones de fuselaje ancho. Cabe destacar que entorno al 40% de esa demanda se destinaría a reemplazar aviones que han entrado en servicio en el 2020, y el resto se corresponderían con el crecimiento del tráfico aéreo [86].

#### Número de aviones

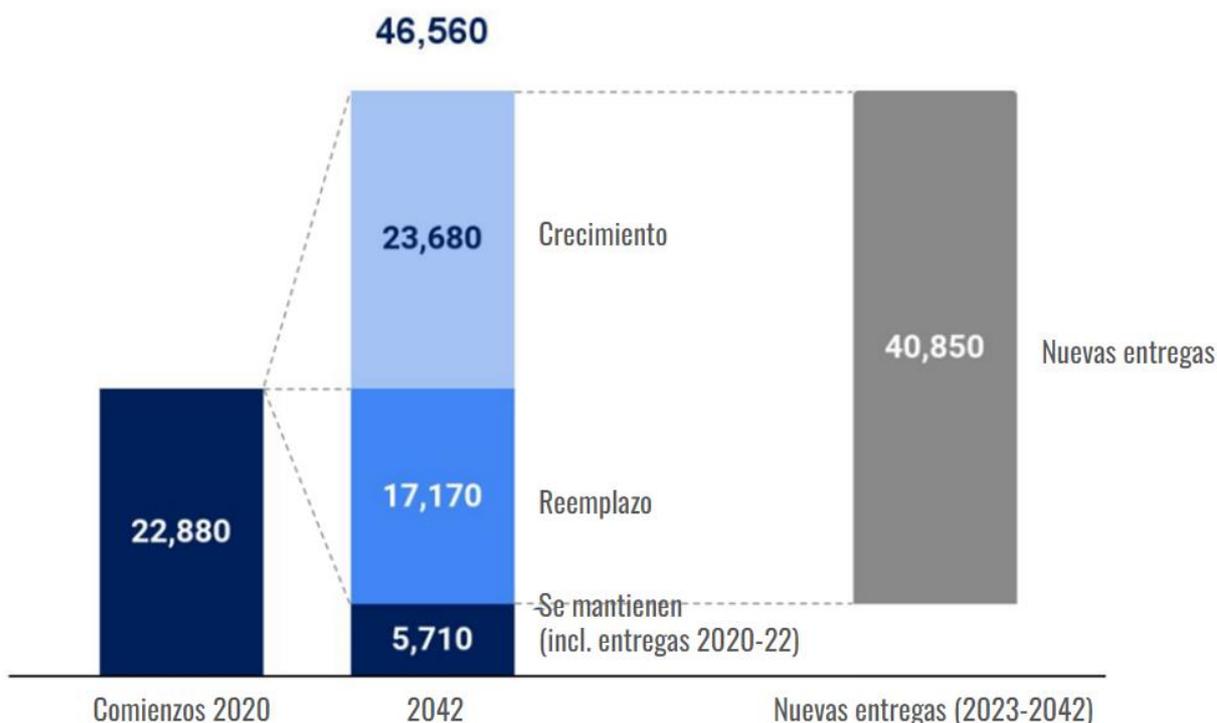


Ilustración 27. Demanda de aviones comerciales estimada entre 2023 y 2042

Partiendo de estos datos, se quiere estimar la evolución del número de aviones hasta 2050, teniendo en cuenta las siguientes suposiciones: tras las crisis del Covid-19, el número de aviones en 2022 se mantiene constante con respecto a los números previos a la pandemia, y tras eso, se mantiene una tasa de crecimiento de flotas del 3,6% anual, siguiendo las estimaciones de la compañía Airbus. La Tabla 10 muestra esta evolución, donde se observa el crecimiento de las flotas globales superando los 30.000 aviones en 2030, los 43.000 en 2040 y los 61.000 aviones en 2050 [86].

Tabla 10. Evolución de las flotas de aviones hasta 2050

<b>Año</b>	<b>Nº aviones (tasa de crecimiento 3,6%/año)</b>
2022	22.880
2023	23.704
2024	24.557
2025	25.441
2026	26.357
2027	27.306
2028	28.289
2029	29.307
2030	30.362
2031	31.455
2032	32.588
2033	33.761
2034	34.976
2035	36.235
2036	37.540
2037	38.891
2038	40.291
2039	41.742
2040	43.245
2041	44.801
2042	46.414
2043	48.085
2044	49.816
2045	51.610
2046	53.468
2047	55.392
2048	57.386
2049	59.452
2050	61.593

Una vez obtenido el tamaño de las flotas a nivel global, el siguiente paso es calcular el consumo de combustible global en las próximas décadas. La Agencia Internacional de Energía (International Energy Agency, IEA) calculó que el consumo de Jet fuel en 2022 fue de 5,42 mb/día (millones de barriles al día), lo que hace un total de 1.930 millones de barriles en 2022 [87]. Sabiendo este dato, y habiendo obtenido el número de aviones por año, se puede calcular por tanto la evolución del consumo de combustible anual. Para ello, es importante considerar la mejora en la eficiencia energética de las aeronaves, que reducirán su consumo

a medida que mejora la tecnología. Para esto, se ha tenido en cuenta las estimaciones de mejora de eficiencia energética compartidas por el informe Waypoint 2050, como se vio en el apartado 6.1, con valores de 22% de reducción de emisiones en 2050 para el escenario 1, 12% para el escenario 2 y 34% para el escenario 3 [63].

La Tabla 11 muestra la evolución del consumo de combustible de aviación global para cada uno de los escenarios de desarrollo que propone el informe Waypoint 2050. Se puede observar como el escenario 2, que es el que supone una reducción de consumo de un 12% por desarrollo de tecnologías es el pronostica un mayor consumo de combustible de aviación en el futuro, con un valor de 2.887,5 millones de barriles al año en 2035 y 4.574,1 millones de barriles al año de 2050, seguido del escenario 1, con valores de 2.745,6 y 4.045,3 millones de barriles anuales en 2035 y 2050 respectivamente, y por último el escenario 3 con valores de 2.575,2 y 3.430,6 millones de barriles anuales en 2035 y 2050 respectivamente. Se puede ver como en cualquiera de los tres escenarios, pese a la mejora de la tecnología y eficiencia energética de los aviones, el consumo de combustible de aviación aumentará entre un 77% y 136% de aquí a 2050 debido al aumento de las flotas a nivel mundial.

Tabla 11. Consumo de combustible de aviación global por escenario Waypoint 2050 y año

Año	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3	
	Mejora eficiencia energética interanual (%)	Escenario 1 (mb/año)	Mejora eficiencia energética interanual (%)	Escenario 2 (mb/año)	Mejora eficiencia energética interanual (%)	Escenario 3 (mb/año)
2022	0,0	1930,8	0,0	1930,8	0,0	1930,8
2023	0,8	1984,6	0,4	1991,8	1,2	1976,1
2024	1,6	2039,8	0,9	2054,6	2,4	2022,0
2025	2,4	2096,4	1,3	2119,4	3,6	2068,8
2026	3,1	2154,4	1,7	2186,1	4,9	2116,2
2027	3,9	2213,8	2,1	2255,0	6,1	2164,4
2028	4,7	2274,8	2,6	2325,9	7,3	2213,4
2029	5,5	2337,2	3,0	2399,0	8,5	2263,0
2030	6,3	2401,2	3,4	2474,4	9,7	2313,4
2031	7,1	2466,8	3,9	2552,1	10,9	2364,4
2032	7,9	2534,0	4,3	2632,2	12,1	2416,1
2033	8,6	2602,8	4,7	2714,8	13,4	2468,5
2034	9,4	2673,4	5,1	2799,9	14,6	2521,6
2035	10,2	2745,6	5,6	2887,5	15,8	2575,2
2036	11,0	2819,5	6,0	2977,9	17,0	2629,4
2037	11,8	2895,2	6,4	3071,1	18,2	2684,2
2038	12,6	2972,7	6,9	3167,0	19,4	2739,6
2039	13,4	3052,1	7,3	3266,0	20,6	2795,4
2040	14,1	3133,3	7,7	3367,9	21,9	2851,8
2041	14,9	3216,4	8,1	3472,9	23,1	2908,5
2042	15,7	3301,4	8,6	3581,2	24,3	2965,7
2043	16,5	3388,4	9,0	3692,7	25,5	3023,1
2044	17,3	3477,3	9,4	3807,6	26,7	3080,9
2045	18,1	3568,3	9,9	3926,0	27,9	3139,0
2046	18,9	3661,3	10,3	4048,0	29,1	3197,2
2047	19,6	3756,4	10,7	4173,7	30,4	3255,5
2048	20,4	3853,5	11,1	4303,2	31,6	3313,9
2049	21,2	3952,8	11,6	4436,6	32,8	3372,3
2050	22,0	4054,3	12,0	4574,1	34,0	3430,6

Tras haber calculado el consumo de combustible de aviación a nivel global en las próximas décadas, el siguiente paso es la estimación del precio de los derechos de emisión. Para ello, este modelo se va a centrar en el sistema CORSIA, ya introducido y comentado en capítulos anteriores, el cual es un esquema de compensación (offsetting) basado en la compensación de las emisiones de un sector a través de la reducción de las emisiones en otros sectores. Este sistema se volverá de obligado cumplimiento en 2027, aunque actualmente las principales aerolíneas y estados que representan el 77% del tráfico aéreo internacional ya se han adherido a CORSIA de forma voluntaria, lo cual ya es bastante representativo [6]. CORSIA establece los precios de los Créditos de Reducción de Emisiones (CER), que fluctúan con el mercado y varían con el tiempo. A principios 2024 el valor de CER se situaba en 0,5 USD/tCO<sub>2</sub>eq según la compañía Carbon Credits, valor que se va a tomar como referencia [88] [89].

Existen otros mecanismos de mercado ya comentados en este trabajo como el Régimen Europeo de Comercio de Emisiones, EU-ETS, que establece un techo de emisiones con respecto a un periodo de referencia, techo hasta el cual las emisiones de carbono son “gratuitas” y a partir del cual los organismos que lo hayan superado tendrán que adquirir derechos de emisiones en el mercado proveniente de empresas con un superávit de estos [90]. Este esquema se debe cumplir en los estados pertenecientes a la Unión Europea, por lo que para el modelo que se va a construir en este trabajo se tendrán en cuenta los precios de CER de CORSIA, debido a su carácter global.

Se estima que el precio de CER tenga una considerable revalorización con el paso de los años, por lo que cada año costará más emitir carbono. Partiendo del valor de CER en 2024 según la compañía Carbon Credits de 0,5 USD/tCO<sub>2</sub>eq, se estima que este valor experimentará un crecimiento constante de un 20% anual hasta 2035, tras lo cual crecerá un 15% anual entre 2035 y 2050 [70]. La Tabla 12 muestra las estimaciones de valores de CER entre 2024 y 2050, tomando el cambio \$/€ como 0,94, siendo este el valor a fecha de abril de 2024.

Tabla 12. Valor de Créditos de Reducción de Emisiones

Año	Valor de CER	
	USD/tCO <sub>2</sub> eq	€/tCO <sub>2</sub> eq
2024	0,50	0,47
2025	0,60	0,56
2026	0,72	0,68
2027	0,86	0,81
2028	1,04	0,97
2029	1,24	1,17
2030	1,49	1,40
2031	1,79	1,68
2032	2,15	2,02
2033	2,58	2,43
2034	3,10	2,91
2035	3,72	3,49
2036	4,27	4,02
2037	4,91	4,62
2038	5,65	5,31
2039	6,50	6,11
2040	7,47	7,02
2041	8,59	8,08
2042	9,88	9,29
2043	11,36	10,68
2044	13,07	12,28
2045	15,03	14,13
2046	17,28	16,25
2047	19,88	18,68
2048	22,86	21,49
2049	26,29	24,71
2050	30,23	28,42

Se puede observar cómo se prevé que el valor de CER aumente sustancialmente en las próximas décadas, aumentando más de 5€ por tonelada de CO<sub>2</sub> emitida entre 2030 y 2040, y más de 21€ por tonelada de CO<sub>2</sub> emitida entre 2040 y 2050. Esto unido al aumento del consumo de combustible estimado anteriormente durante esos años hará que cada vez el coste total por emisiones sea mayor.

El siguiente paso será, precisamente, calcular cuáles serán las emisiones debidas al uso de combustibles convencionales de aviación, y el coste de producción de estos, para así poder calcular el coste total por el uso de estos. Por último, se hará un modelo de producción de SAF en el que se estimarán sus costes de producción en el futuro para así poder compararlos frente a los convencionales.

## 7.2 Modelo de costes de queroseno

En este apartado se tratará de estimar los costes de producción y asociados al uso del queroseno en los próximos años. Para ello, el primer paso consistirá en calcular las emisiones totales de CO<sub>2</sub> por el uso de queroseno. Se va a utilizar como referencia el Jet A1, el cual es el combustible de aviación más usado a nivel global. Para obtener las emisiones de CO<sub>2</sub> se tomará como valor de referencia el valor calculado por el ICCT (International Council of Clean Transportation) de 3,16 kg CO<sub>2</sub>eq/kg Jet A1 [91]. La Tabla 13 muestra el resto de factores de conversión utilizados para el cálculo de emisiones de CO<sub>2</sub>.

Tabla 13. Factores de conversión para los cálculos de emisiones de CO<sub>2</sub>

Factor de conversión	Valor	Fuente
Emisiones Jet A1	3,16 kg CO <sub>2</sub> eq/kg Jet A1	[91]
Densidad del Jet A1	0,8 kg/l	[91]
Capacidad barril de combustible	159 l/barril	[92]

Estos datos, junto al consumo de combustible estimado en la Tabla 11 para los distintos escenarios presentados permitirán el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel global en cada uno de esos escenarios, tal y como se puede observar en la Tabla 14.

Se puede observar como las emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel global crecen junto con el consumo de combustible estimado para cada uno de los escenarios estimados, llegando a unos valores máximos en 2050 de 1.629,6 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> anuales para el escenario 1, 1.838,6 millones para el escenario 2 y 1.378,9 millones para el escenario 3.

Una vez calculadas las emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel global, el siguiente paso será calcular las compensaciones que habrá que pagar por estas. Como se ha explicado anteriormente, el esquema CORSIA establece que hay que pagar compensaciones por las emisiones que superen un cierto límite, el cual se estableció en las emisiones de 2019 [6]. En el capítulo 7.1 se puede ver como el número de vuelos diarios igualó los valores de 2019 en 2023, por lo que se tomarán las emisiones calculadas para este año como referencia, a partir del cual se tendrán que pagar los créditos de reducción de emisiones estimados para cada año en la Tabla 12.

Tabla 14. Emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel global

Año	Emisiones (Mt CO <sub>2</sub> /año)		
	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
2022	776,1	776,1	776,1
2023	797,7	800,6	794,3
2024	819,9	825,9	812,8
2025	842,6	851,9	831,5
2026	866,0	878,7	850,6
2027	889,8	906,4	870,0
2028	914,3	934,9	889,7
2029	939,4	964,3	909,6
2030	965,2	994,6	929,9
2031	991,5	1025,8	950,4
2032	1018,5	1058,0	971,2
2033	1046,2	1091,2	992,2
2034	1074,6	1125,4	1013,5
2035	1103,6	1160,7	1035,1
2036	1133,3	1197,0	1056,9
2037	1163,7	1234,4	1078,9
2038	1194,9	1273,0	1101,2
2039	1226,8	1312,8	1123,6
2040	1259,4	1353,7	1146,3
2041	1292,8	1396,0	1169,1
2042	1327,0	1439,5	1192,1
2043	1362,0	1484,3	1215,2
2044	1397,7	1530,5	1238,4
2045	1434,3	1578,1	1261,7
2046	1471,7	1627,1	1285,1
2047	1509,9	1677,6	1308,6
2048	1548,9	1729,7	1332,0
2049	1588,9	1783,3	1355,5
2050	1629,6	1838,6	1378,9

Como se puede observar en la Tabla 15, las compensaciones por emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel global serán mayores a medida que aumenten el consumo de combustible y por tanto las emisiones, llegando a dispararse en las próximas décadas, alcanzando valores del orden de las decenas de miles de millones de euros al año en cualquiera de los tres escenarios planteados.

Tabla 15. Compensaciones por emisiones según esquema CORSIA

Año	CER (€/tCO2)	Escenario 1			Escenario 2			Escenario 3		
		Emisiones (Mt CO2/año)	Diferencia (Mt CO2/año)	Compensaciones (M€)	Emisiones (Mt CO2/año)	Diferencia (Mt CO2/año)	Compensaciones (M€)	Emisiones (Mt CO2/año)	Diferencia (Mt CO2/año)	Compensaciones (M€)
2023	-	797,7	-	-	800,6	-	-	794,3	-	-
2024	0,5	819,9	22,2	10,4	825,9	25,3	11,9	812,8	18,5	8,7
2025	0,6	842,6	44,9	25,3	851,9	51,3	28,9	831,5	37,3	21,0
2026	0,7	866,0	68,2	46,2	878,7	78,1	52,9	850,6	56,3	38,1
2027	0,8	889,8	92,1	74,8	906,4	105,8	85,9	870,0	75,7	61,5
2028	1,0	914,3	116,6	113,6	934,9	134,3	130,9	889,7	95,4	93,0
2029	1,2	939,4	141,7	165,7	964,3	163,7	191,4	909,6	115,3	134,9
2030	1,4	965,2	167,4	235,0	994,6	194,0	272,3	929,9	135,6	190,3
2031	1,7	991,5	193,8	326,4	1025,8	225,2	379,3	950,4	156,1	262,9
2032	2,0	1018,5	220,8	446,3	1058,0	257,4	520,2	971,2	176,9	357,5
2033	2,4	1046,2	248,5	602,6	1091,2	290,6	704,7	992,2	197,9	480,0
2034	2,9	1074,6	276,8	805,6	1125,4	324,8	945,2	1013,5	219,3	638,1
2035	3,5	1103,6	305,9	1068,1	1160,7	360,1	1257,3	1035,1	240,8	841,0
2036	4,0	1133,3	335,6	1347,7	1197,0	396,4	1591,8	1056,9	262,6	1054,7
2037	4,6	1163,7	366,0	1690,4	1234,4	433,8	2003,5	1078,9	284,7	1314,6
2038	5,3	1194,9	397,2	2109,4	1273,0	472,4	2508,9	1101,2	306,9	1630,0
2039	6,1	1226,8	429,1	2620,6	1312,8	512,2	3128,1	1123,6	329,3	2011,6
2040	7,0	1259,4	461,7	3243,0	1353,7	553,1	3885,1	1146,3	352,0	2472,3
2041	8,1	1292,8	495,1	3999,2	1396,0	595,3	4809,0	1169,1	374,8	3027,4
2042	9,3	1327,0	529,3	4916,5	1439,5	638,9	5934,4	1192,1	397,8	3694,9
2043	10,7	1362,0	564,2	6027,4	1484,3	683,7	7303,5	1215,2	420,9	4496,0
2044	12,3	1397,7	600,0	7370,7	1530,5	729,9	8966,5	1238,4	444,1	5455,8
2045	14,1	1434,3	636,5	8992,9	1578,1	777,5	10983,9	1261,7	467,4	6603,6
2046	16,2	1471,7	673,9	10949,1	1627,1	826,5	13428,2	1285,1	490,8	7974,3
2047	18,7	1509,9	712,1	13305,6	1677,6	877,0	16386,4	1308,6	514,3	9608,6
2048	21,5	1548,9	751,2	16140,7	1729,7	929,1	19962,7	1332,0	537,7	11554,2
2049	24,7	1588,9	791,1	19548,1	1783,3	982,7	24282,2	1355,5	561,2	13867,1
2050	28,4	1629,6	831,9	23639,2	1838,6	1038,0	29494,4	1378,9	584,6	16612,9

El siguiente paso en la elaboración del modelo será el establecimiento del coste del propio combustible. Como se explicó en el apartado 6.2.2 y se puede apreciar en la Ilustración 25, el precio del queroseno está altamente vinculado al precio del barril de petróleo, lo que conlleva una alta variabilidad en el precio debido principalmente a inestabilidades geopolíticas. Esto hace que establecer un modelo robusto para la evolución de los precios de crudo se trate de una tarea difícil.

Los analistas de la IEA, en su informe anual de perspectivas del sector energético, prevén unos precios medios del barril de crudo de 61 \$/barril en 2025, 73 \$/barril en 2030, 80 \$/barril en 2035, 87 \$/barril en 2040, 91 \$/barril en 2045 y 95 \$/barril en 2050, siendo estos los valores que se han tomado como referencia para la elaboración del modelo [93].

A fecha de abril de 2024, la compañía Global Petrol Prices estima que el precio medio del queroseno por barril a nivel mundial está en 166,6 \$, lo que significa que es 2,84 veces más caro que el barril de crudo. Conociendo la estrecha relación en la variación del precio de uno y de otro, se estima que esta relación entre el precio de ambos se mantendrá en los próximos años [94]. La Tabla 16 muestra la evolución del gasto en queroseno a nivel global hasta 2050, en la que se puede ver como el gasto en este combustible se va a prácticamente triplicar entre 2025 y 2050 para cualquiera de los tres escenarios superando el billón de euros anuales en los escenarios 1 y 2.

Tabla 16. Evolución del gasto en queroseno

Año	€/barril	Escenario 1 (m€/año)	Escenario 2 (m€/año)	Escenario 3 (m€/año)
2024	156,60	319.441,24	321.759,39	316.659,46
2025	163,02	341.745,07	345.495,02	337.245,13
2026	169,43	365.016,60	370.400,32	358.556,13
2027	175,85	389.288,52	396.524,37	380.605,51
2028	182,26	414.594,35	423.918,06	403.405,90
2029	188,67	440.968,41	452.634,24	426.969,41
2030	195,09	468.445,83	482.727,72	451.307,57
2031	198,83	490.470,25	507.435,02	470.112,53
2032	202,57	513.311,64	533.207,44	489.436,68
2033	206,31	536.994,45	560.086,47	509.284,02
2034	210,05	561.543,63	588.115,10	529.657,87
2035	213,79	586.984,63	617.337,85	550.560,76
2036	217,53	613.343,36	647.800,85	571.994,37
2037	221,28	640.646,22	679.551,86	593.959,45
2038	225,02	668.920,09	712.640,36	616.455,77
2039	228,76	698.192,29	747.117,56	639.481,98
2040	232,50	728.490,61	783.036,50	663.035,55
2041	234,64	754.685,96	814.883,42	682.449,02
2042	236,78	781.691,66	847.936,72	702.197,59
2043	238,91	809.527,37	882.239,41	722.272,92
2044	241,05	838.212,93	917.835,92	742.665,35
2045	243,19	867.768,39	954.772,20	763.363,82
2046	245,33	898.213,93	993.095,68	784.355,82
2047	247,47	929.569,87	1.032.855,41	805.627,22
2048	249,60	961.856,65	1.074.102,04	827.162,18
2049	251,74	995.094,79	1.116.887,90	848.943,06
2050	253,88	1.029.304,89	1.161.267,06	870.950,29

Por tanto, una vez obtenido el precio del combustible y el precio a pagar por la compensación de emisiones según el esquema de CORSIA, se puede calcular el coste total que supondrá el uso de queroseno anualmente. La Ilustración 28 muestra el resultado del modelo realizado, en el que se puede ver la evolución del coste total por el uso de queroseno hasta 2050, llegando a ser de 1,05 billones de € anuales para el escenario 1, 1,19 billones de € anuales para el escenario 2 y 0,89 billones de € anuales para el escenario 3. Se puede observar como el escenario 2 es el que muestra un mayor aumento del coste a lo largo de los años.

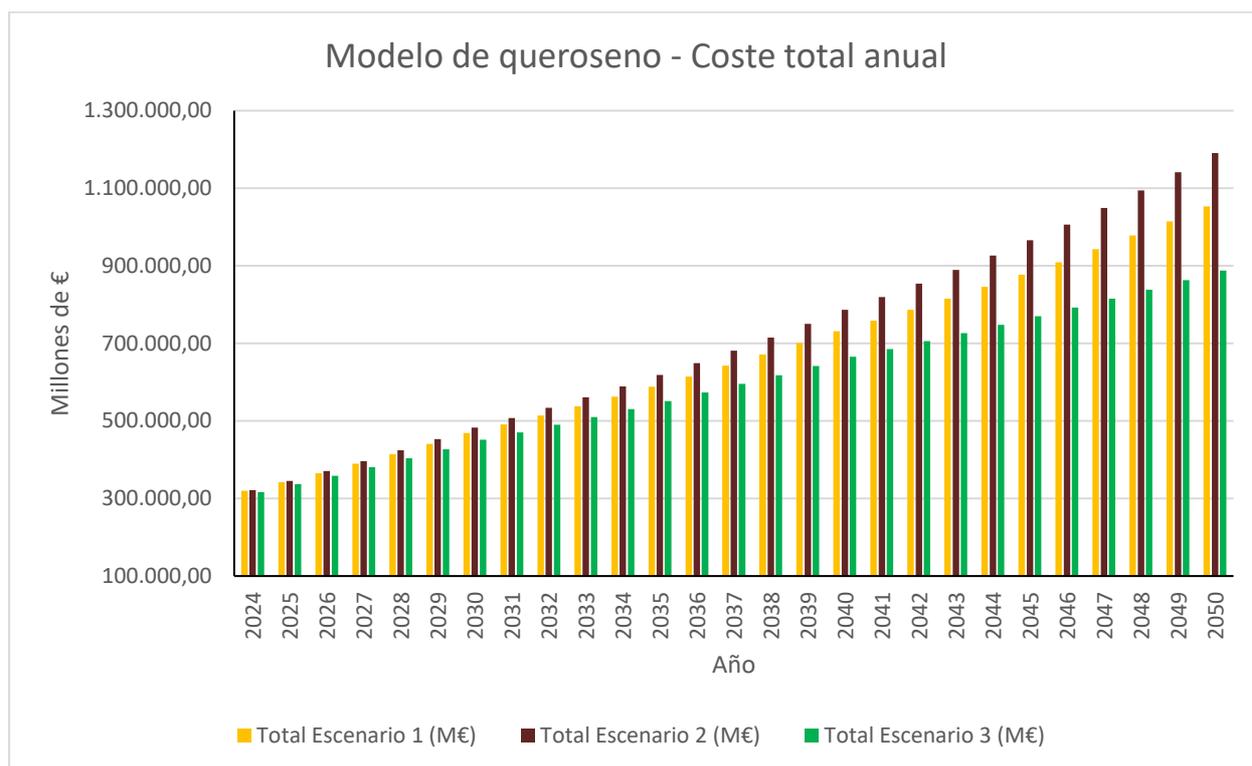


Ilustración 28. Evolución del coste total anual por el uso de queroseno

### 7.3 Modelo de coste de SAF

En este capítulo se construirá un modelo en el que se estime el coste de la producción de SAF para poder compararlo con el modelo de costes del queroseno elaborado en el capítulo 7.2. Para ello, el primer paso será estimar cuál será la producción de SAF hasta 2050. La iniciativa ReFuelEU, ya comentada anteriormente, establece los porcentajes mínimos de SAF que deben ser abastecidos en los aeropuertos europeos, tal y como se muestra en la Ilustración 1, habiendo una cuota mínima del 2% en 2025, 6% en 2030, 20% en 2035, 34% en 2040, 42% en 2045 y 70% en 2050. Está claro que Europa es referente en cuanto al impulso y el fomento del uso de SAF, aunque cabe decir que otras regiones como Estados Unidos ya han empezado a proponer iniciativas similares. Es por esto por lo que, para el modelo que se va a elaborar en este apartado, se va a considerar que el resto de regiones se sumarán a las cuotas establecidas por RefuelEU, por lo que la producción de SAF para abastecer estas cantidades establecidas por estas cuotas serán las mostradas en la Ilustración 29 para los distintos escenarios.

El siguiente paso será estimar los costes de producción de SAF. Como ya se ha comentado a lo largo del trabajo, coexiste una gran variedad de métodos de producción de SAF, los cuales utilizan distintas materias primas, por lo que resulta necesario hacer un análisis de las distintas tecnologías y materias primas para entender cuáles de ellas resultará más rentable o viable.

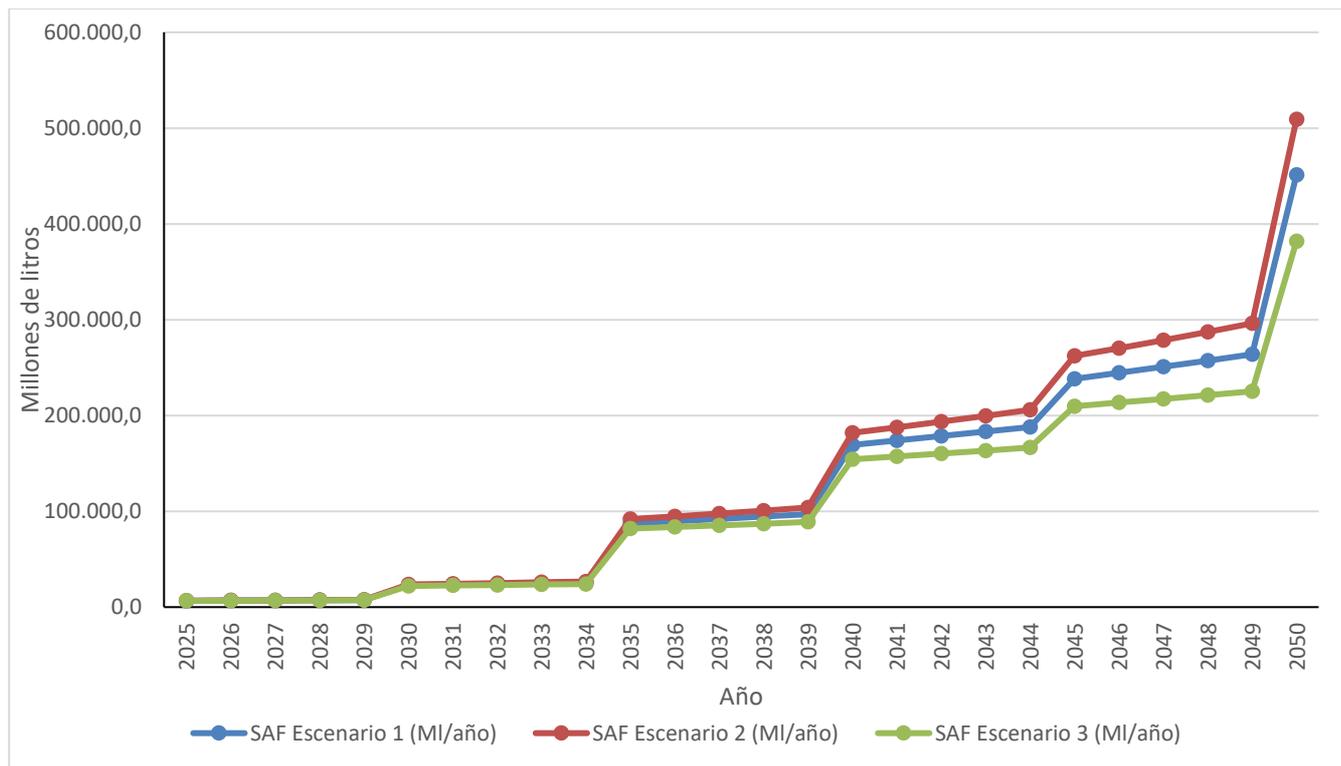


Ilustración 29. Evolución de la demanda de SAF

Es necesario comprender cuáles son los principales componentes en los costes de producción de SAF a la hora de realizar el modelo. Para ello, independientemente de la variabilidad debida al distinto número de procesos y materias primas, el enfoque escogido será agrupar los costes entre CapEx, OpEx y costes de materia prima.

El CapEx (del inglés Capital Expenditure) consiste en los gastos de capital que son utilizados para adquirir, ampliar y mantener los activos físicos, como propiedades, plantas, edificios, tecnologías o equipos. Por tanto, en este caso consistirán principalmente en los costes de construcción de la planta de producción y la obtención de los equipos necesarios. Se han utilizado los resultados de distintos estudios para estimar los valores de CapEx de distintos procesos de producción. Para cada uno de estos procesos, estos valores representan los costes de construcción, obtención e instalación de equipos. Pese a que estos costes pueden presentar una alta variabilidad, son los que se tomarán como referencia.

La Tabla 17 muestra los valores estimados de CapEx para distintos métodos de producción. Se han escogido estos datos para realizar el modelo basándose en los estudios realizados por el ICCT (International Council of Clean Transportation) para las plantas de las capacidades dadas. Se puede ver como HEFA es el proceso de producción con los menores gastos de capital, con un valor de 1,03€ por litro de producción anual, seguido de AtJ, con un valor de 1,96€ por litro de producción anual, Fischer-Tropsch, con un valor de 2,54€ por litro de producción anual y por último SIP, con un valor de 4,10€ por litro de producción anual, aunque hay que tener en cuenta que se estima una menor capacidad de producción para este último método de producción [95].

Tabla 17. Valores de CapEx para la producción de SAF por ruta

Tecnología	Valor (M€)	Capacidad de la planta asumida (MI/año)	€/l anuales	Referencia
HEFA	237	230	1,03	[30]
FT	585	230	2,54	[96]
AtJ	451,5	230	1,96	[97]
SIP	250	61	4,10	[98]

Por otro lado, el OpEx (del inglés Operating Expense) son los gastos operativos que una empresa realiza durante sus operaciones normales. Pueden contener gastos como alquiler del terreno o instalaciones utilizadas, inventario, nómina de empleados o costes de operación. Entre otras cosas, la materia prima utilizada en el proceso tendrá un impacto directo en los costes de operación, dependiendo de la cantidad de preprocesado que requiera. Por ejemplo, las plantas que utilicen residuos sólidos municipales tendrán mayor OpEx debido al alto preprocesado de materia prima requerido. Para el modelo elaborado se utilizarán los costes operativos unitarios estimados por un estudio de la Universidad Politécnica de Madrid en 2021, siendo estos de 0,45€/l para HEFA, 1,05€/l para FT, 0,49€/l para AtJ y 1 €/l para SIP [70].

El siguiente paso en la elaboración del modelo será estimar los costes debidos a la materia prima. Para ello, se ha escogido la materia prima más utilizada para cada uno de los procesos, según se explicó en el apartado 6.3, que son UCO o aceites de palma para HEFA, con un coste de 293,28 €/ton, residuos municipales sólidos para FT, con un coste de 7,29 €/ton, y caña de azúcar para AtJ y SIP con un precio de 29,14 €/ton. También hay que tener en cuenta la eficiencia del proceso en cuanto a las toneladas de materia prima necesarias para generar una tonelada de combustible. Con estos datos se puede calcular el coste de materia prima, como se puede observar en la Tabla 18 [24] [95].

Tabla 18. Coste de materia prima

Tecnología	Materia prima	Coste (€/ton)	Eficiencia (ton SAF/ton materia prima)	kton/año	M€/año
HEFA	Aceite usado o de palma	293,28	0,90	204,44	59,96
FT	MSW	7,29	0,12	1.533,33	11,17
AtJ	Sugarcane	29,14	0,47	391,49	11,41
SIP	Sugarcane	29,14	0,30	162,67	4,74

Una vez recopilados todos estos datos, se puede obtener el coste total para la producción de SAF según cada ruta de producción, tal y como se muestra en la Ilustración 30. Se puede observar cómo HEFA es el método de producción más barato, con un coste total de 2,18 €/kg, y el menor CapEx de todos, aunque las materias primas necesarias para su producción son las más caras, lo cual es algo a tener en cuenta en caso de que los costes de producción del resto de métodos se abaratasen en un futuro. Le sigue AtJ con un coste total de 3,13 €/kg, y FT con un coste total de 4,55 €/kg.

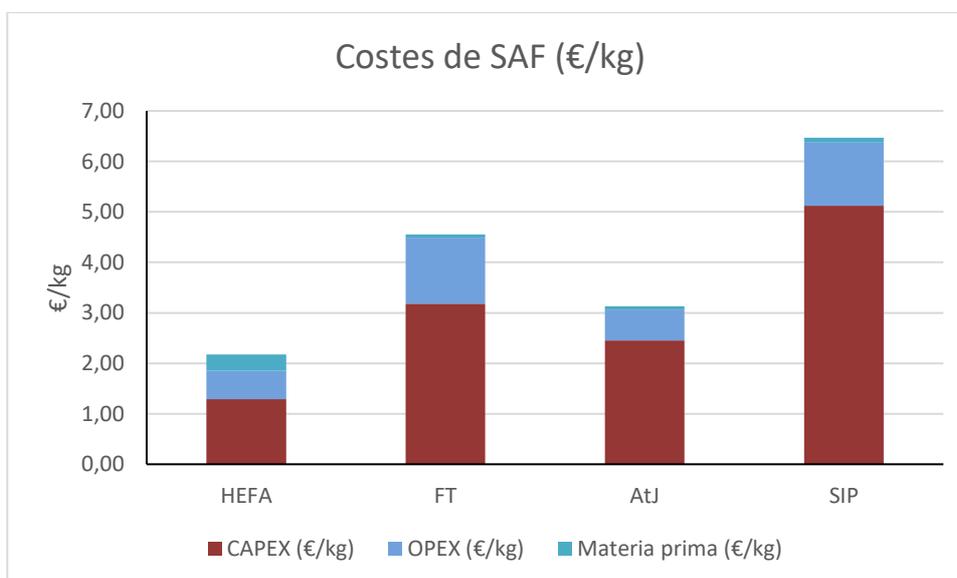


Ilustración 30. Costes de producción de SAF

El siguiente paso a realizar será estimar la evolución del coste de producción de SAF a lo largo de los años. Para ello, se ha utilizado el siguiente conjunto de fórmulas, establecidas por Escobar en su trabajo “Análisis de la introducción a gran escala de biocombustible para la aviación en la UE” [99]:

$$\text{Ecuación 3: } \text{Coste SAF} = \text{OpEx}/\text{ton} + \text{CapEx}/\text{ton} + \text{Coste mat. prima}/\text{ton}$$

$$\text{Ecuación 4: } \text{Coste SAF año } n + 1 = \text{Coste SAF año } n - (\text{OpEx} + \text{CapEx}) \times \Delta \text{Eficiencia Interanual}$$

Para realizar el cálculo se ha tenido que estimar la mejora en la eficiencia interanual, la cual se ha estimado en un 0,25% para HEFA, ya que se trata de una tecnología más madura, y del 0,5% para el resto de tecnologías.

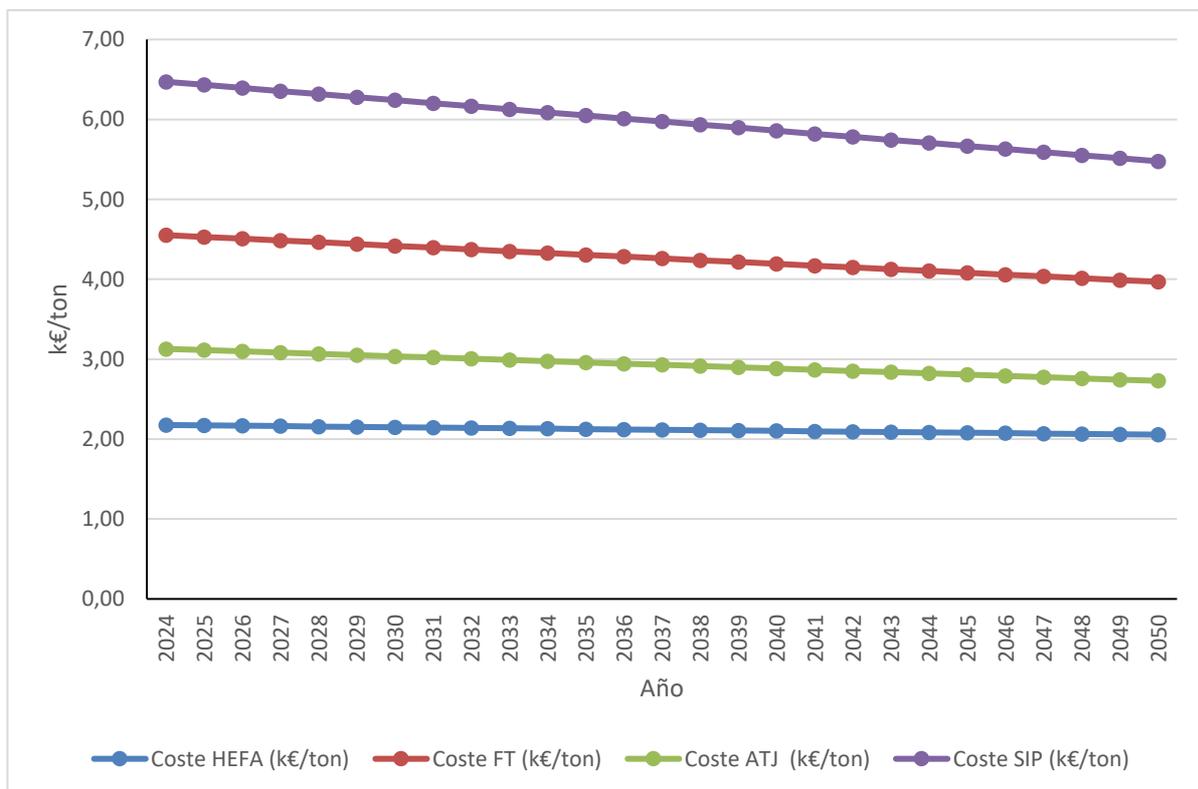


Ilustración 31. Evolución del coste de SAF

Una vez conocidos el coste de SAF a lo largo de los años, y la evolución de la producción de SAF, se pueden estimar los costes totales que supondrá la producción de SAF a nivel global. Para ello, la distribución de la producción de SAF entre tecnologías para España estimada en el capítulo 5.3 se ha extrapolado a nivel global, estimándose que el 36% de la producción de SAF global será mediante HEFA, el 32% mediante Fischer-Tropsch, el 17% mediante AtJ y el 15% restante mediante SIP, tal y como se puede observar en la Ilustración 32.

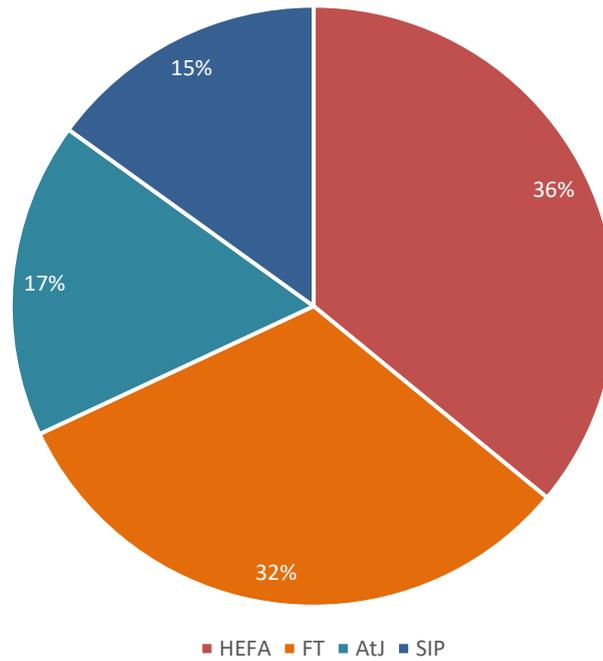


Ilustración 32. Distribución de la producción de SAF según tecnología

Con estas distribuciones de producción de SAF según tecnología de producción se ha calculado el gasto total en SAF hasta 2050 para los tres escenarios propuestos por Waypoint 2050, tal y como se puede observar en la Ilustración 33, Ilustración 34 e Ilustración 35. Se puede observar como este coste asciende a los 1.189.692 millones de euros en 2050 para el escenario 1, donde ya se alcanzaría un 70% de la cobertura de la demanda global, siendo este mismo valor de 1.342.216 millones de euros para el escenario 2 y 1.006.662 millones de euros para el escenario 3.

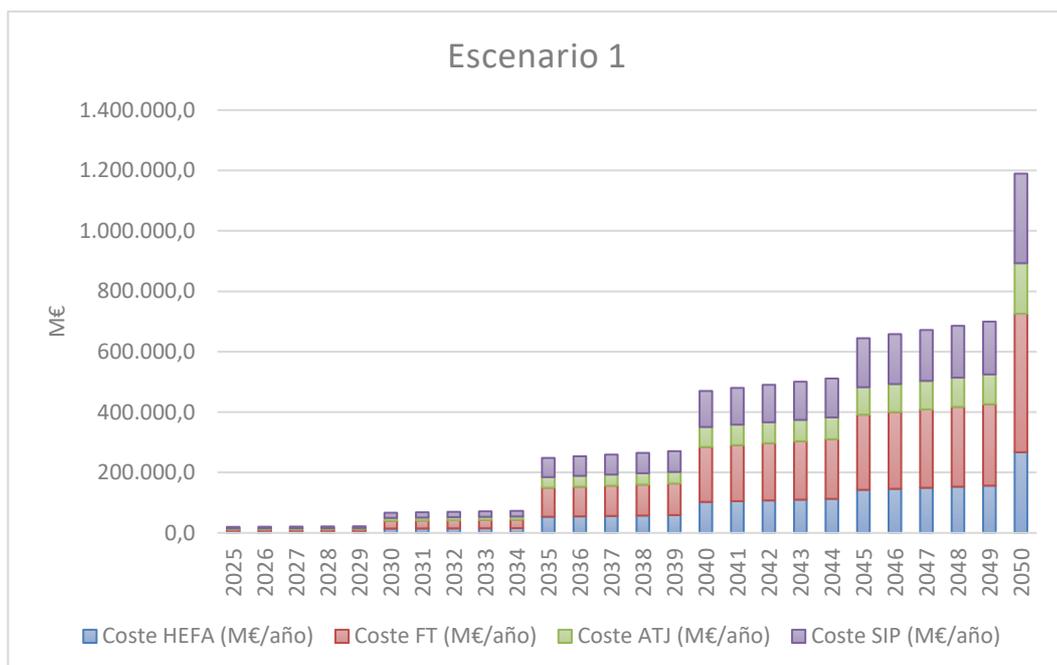


Ilustración 33. Evolución de costes de SAF globales para Escenario 1

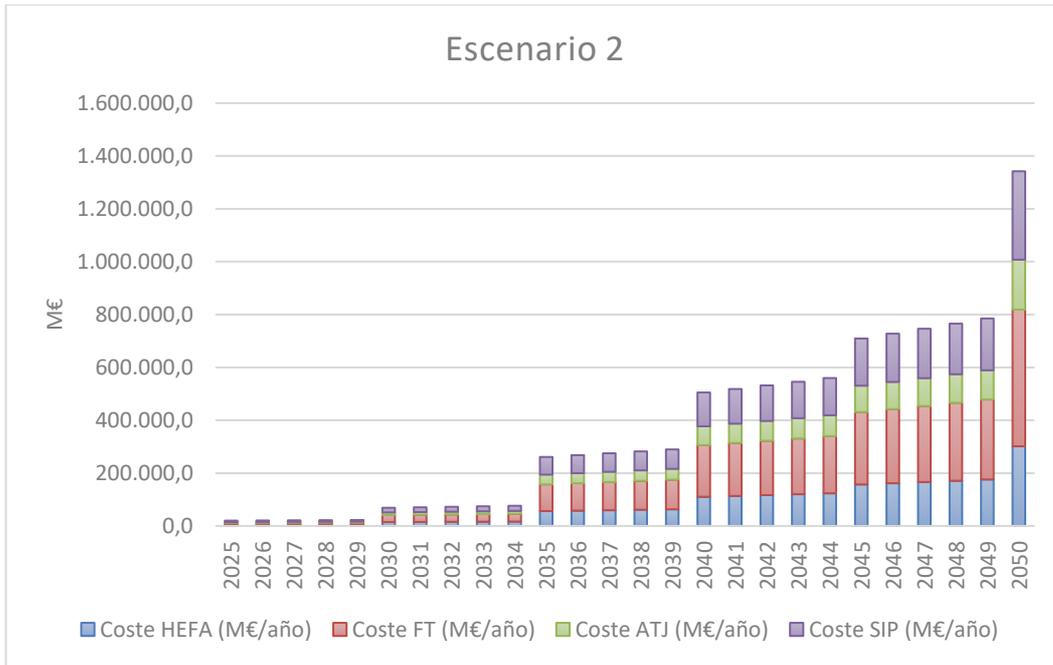


Ilustración 34. Evolución de costes de SAF globales para Escenario 2

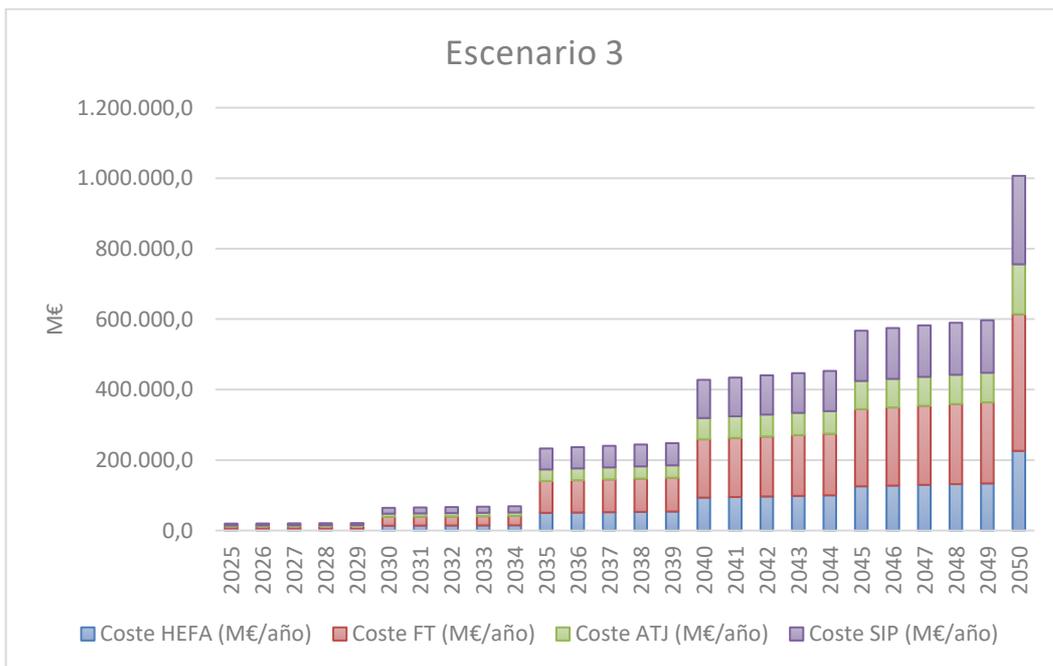


Ilustración 35. Evolución de costes de SAF globales para Escenario 3

### 7.3.1 Resultados y discusión

La Ilustración 36 muestra la evolución del coste nivelado de los distintos combustibles estudiados en este trabajo. Se puede observar como la tendencia es que el coste de los distintos tipos de SAF baje con los años, mientras que el coste del queroseno sube progresivamente. Esto se debe principalmente a las penalizaciones por emisiones, que crecerán progresivamente debido al aumento del precio de los créditos de reducción de emisiones. Se puede observar como ya en 2050, se prevé que el coste de queroseno sea muy similar, lo cual no quiere decir que se deje de utilizar queroseno ya que seguirá siendo necesario para cubrir la totalidad de la demanda global, y con HEFA sólo se podrá cubrir un cierto porcentaje de esta demanda debido a la infraestructura y disponibilidad de materia prima para ello. Se puede concluir que en términos generales SAF seguirá siendo más caro, pero se aprecia una tendencia convergente en los precios que podría llegar a igualarlos en cierto punto.

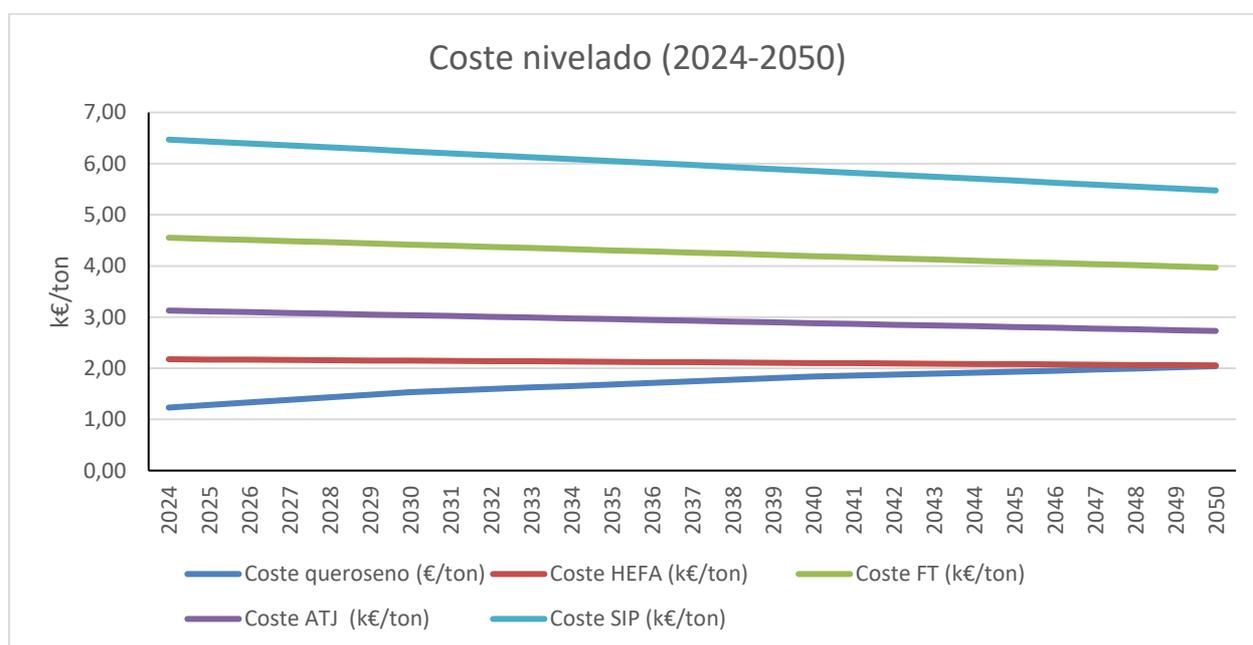


Ilustración 36. Coste nivelado de los distintos combustibles

En este trabajo se han introducido los tres escenarios de adopción de SAF a largo plazo propuestos por el informe Waypoint 2050, en el que, a la hora de realizar los modelos se ha tenido en cuenta principalmente las predicciones de desarrollo tecnológico que permitirán reducir las emisiones y la eficiencia de la tecnología actual.

El Escenario 1 contempla principalmente unas grandes mejoras en tecnologías, operaciones e infraestructura de la aviación, con mejoras de eficiencia de hasta el 22% en 2050. La Ilustración 37 muestra como tanto el gasto global para el SAF como para el queroseno tienen una tendencia ascendente. El gasto en SAF crece más rápidamente que el gasto en queroseno, a medida que se aplicarían medidas como ReFuelEU, llegando el gasto en SAF a ser mayor que el gasto en queroseno en 2050, cuando se espera que deba cubrir el 70% de la demanda global.

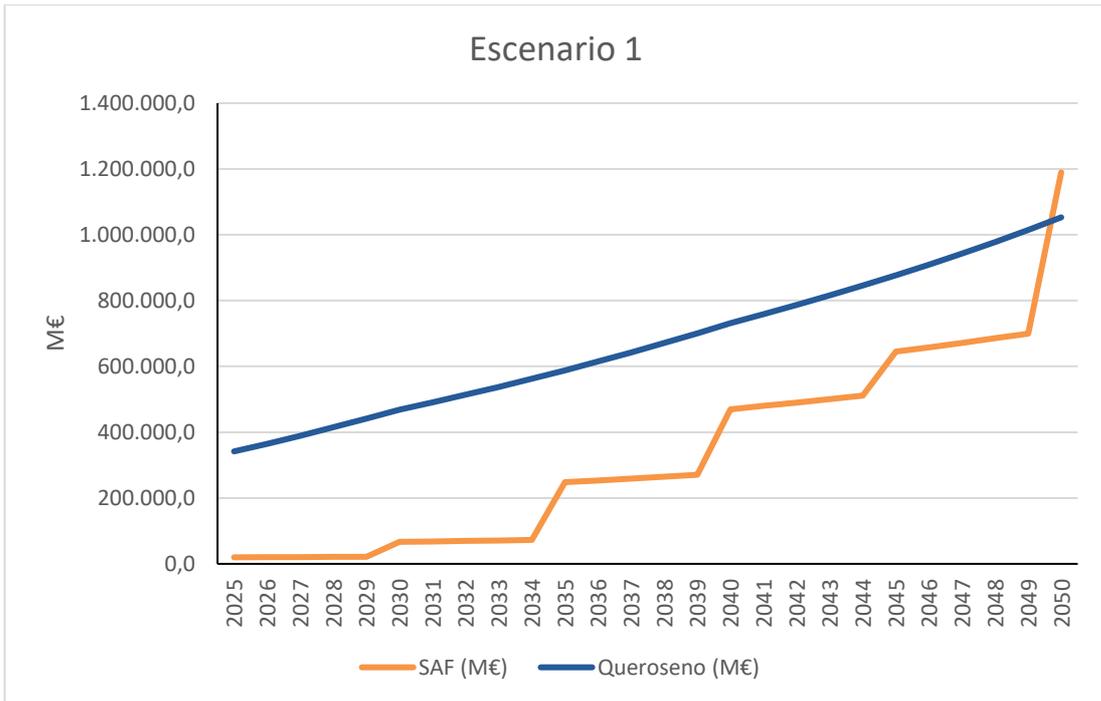


Ilustración 37. Evolución de gastos de SAF vs queroseno para el Escenario 1

El Escenario 2 del informe Waypoint 2050 considera un despliegue más agresivo de SAF que en el escenario 1. En este escenario se desarrollan menos las tecnologías actuales de producción y combustión de queroseno, por lo que su contribución a la disminución de su eficiencia. La Ilustración 38 muestra la evolución de ambos costes a nivel global hasta 2050, donde se puede apreciar que el gasto es mayor en ambos casos, llegando a ser de 1.342.216 millones de euros anuales para SAF y de 1.190.761 millones de euros anuales para queroseno.

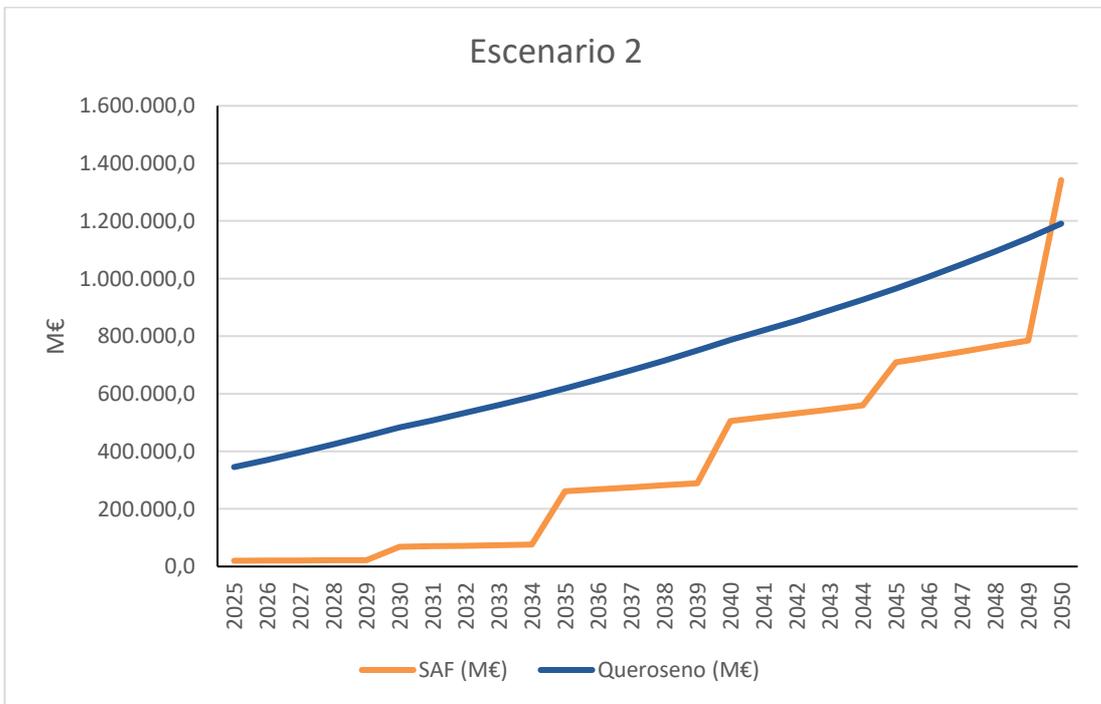


Ilustración 38. Evolución de gastos de SAF vs queroseno para el Escenario 2

Por último, el escenario 3 planteado por el informe Waypoint 2050 una perspectiva tecnológica más agresiva y ambiciosa. Esto hace que el desarrollo de la tecnología se traduzca en una mayor medida que en el resto de escenarios en una mejora de la eficiencia energética de los procesos actuales, lo que haga que a nivel global la demanda de combustible sea menor que en el resto de escenarios, y lo que se traduce, como se puede observar en la Ilustración 39, en el escenario con menor gasto para ambos SAF y queroseno a nivel global.

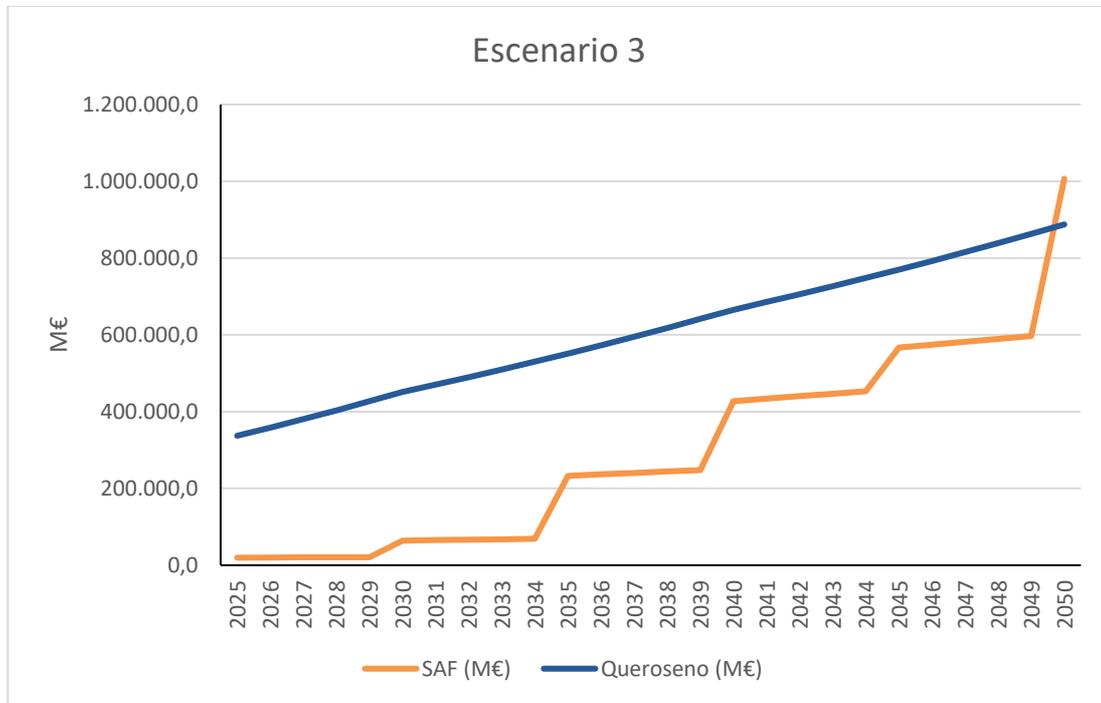


Ilustración 39. Evolución de gastos de SAF vs queroseno para el Escenario 3

## 8 CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se ha descrito detalladamente todo el estado del arte relacionado con el combustible sostenible de aviación. Se ha estudiado el marco normativo, las tecnologías de producción actuales y las futuras que se encuentran en proceso de desarrollo o certificación. Se ha repasado el actual despliegue de compañías y plantas de producción de SAF puestas en marcha en la actualidad, y los proyectos planeados durante los próximos años para aumentar la producción y cubrir la demanda esperada a futuro. Sin duda, es un contexto de desarrollo sujeto a un gran número de variables y que experimenta un elevado número de desafíos, puntos de bloqueo e incertidumbre.

Por este motivo, en este trabajo se ha elaborado un modelo para estimar la evolución de la producción de SAF hasta 2050 y su comparación con la evolución en los costes del queroseno, para entender qué cabida tendrán los combustibles de aviación en el futuro próximo, siempre sujeto al esperado desarrollo positivo de las tecnologías bajo investigación, que harán que la producción sea más eficiente, las economías de escala, que abaratarán costes a medida que crezca la producción, y la continuidad de la puesta en práctica de incentivos al desarrollo de tecnologías sostenibles y penalizaciones a las tecnologías con mayores niveles de emisión de carbono.

Con los resultados obtenidos en este trabajo se puede concluir que el SAF es una alternativa real y viable a medio plazo para sustituir a los combustibles convencionales contribuyendo a la reducción de las emisiones globales, ya que para todos los procesos de conversión y materias primas utilizadas la reducción de emisiones de carbono a lo largo del ciclo de vida es muy sustancial, estando entre el 50 y el 100% en la mayoría de los casos.

Se ha visto cómo la aceptación del uso de SAF será cada vez mayor debido a dos factores. Por un lado, los créditos de compensación de emisiones harán que el uso de combustibles convencionales sea cada vez más costoso, y por otro, la disminución del precio y la obligatoriedad de cubrir un porcentaje mínimo de la demanda con SAF hará que este entre en el mercado sin lugar a duda. Este segundo punto depende de que el precio del SAF baje, cosa para la cual se han hecho ciertas estimaciones en la elaboración del modelo, con una bajada de precio progresiva según la tecnología de conversión. Para que esto pase la investigación y el desarrollo para aumentar la eficiencia de los procesos actuales debe continuar, además de seguir adelante con la certificación de nuevos procesos que añadan variabilidad dando alternativas en zonas geográficas donde puede que los procesos actuales no sean tan viables. Otro factor determinante son los costes de operación y materia prima, que constituyen gran parte de los costes totales. Se espera que estos costes disminuyan progresivamente a medida que mejore la infraestructura y las economías de escala abaraten precios.

Sin duda, el desarrollo de la producción y uso de SAF es indispensable para alcanzar el objetivo de una aviación limpia con cero emisiones netas. Es el comienzo de un largo camino en el que aún hay diversas barreras por desbloquear, pero el pronóstico es que se convierta en una realidad competente y con una posición potente en el mercado. Otros factores que contribuirán a la reducción de emisiones en la aviación y que no se han tratado en este trabajo es la coexistencia del SAF con la producción de combustibles sintéticos y el uso de hidrógeno para la propulsión de aeronaves como alternativas sostenibles a implementar en el sector de la aviación.

## REFERENCIAS

---

- [1] Naciones Unidas, «El papel de los combustibles fósiles en un sistema energético sostenible,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/es/chronicle/article/el-papel-de-los-combustibles-fosiles-en-un-sistema-energetico-sostenible>.
- [2] Naciones Unidas, «Our Common Future,» 1987.
- [3] Enel, «Los tres pilares de la sostenibilidad: medioambiental, social y económico,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.enel.com/es/nuestra-compania/historias/articles/2023/06/tres-pilares-sostenibilidad>.
- [4] Naciones Unidas, «Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>.
- [5] Comisión Europea, «Pacto Verde Europeo».
- [6] ICAO, «Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA),» 2016.
- [7] International Civil Aviation Organization, «CORSIA Eligibility Framework and Requirements for Sustainability Certification Schemes,» 2022.
- [8] M. T. A. B. B. K. T. B. G. P. M. Shahabuddina, «A review on the production of renewable aviation fuels from the gasification,» 2020.
- [9] International Energy Agency, «IEA Tracking Aviation,» [En línea]. Available: <https://www.iea.org/energy-system/transport/aviation>.
- [10] Comisión Europea, «European Aviation Environmental Report,» 2019.
- [11] L. M. R. José Francisco Alenza García, Estudios sobre cambio climático y transición energética, 2022.
- [12] T. L. B. B. Y. Libing Zhang, Green Energy to Sustainability Structure of the Energy Business, 2020.
- [13] Naciones Unidas, «Acuerdo de París,» 2015.
- [14] Naciones Unidas, «Agenda 2030,» 2015.
- [15] Comisión Europea, «Clean Energy for all Europeans Package,» 2021.
- [16] Comisión Europea, «Fit for 55,» 2021.

- [17] Comisión Europea, «RefuelEU Aviation,» 2021.
- [18] Naciones Unidas, «ICAO,» 1994.
- [19] Naciones Unidas, «Protocolo de Kioto,» 1997.
- [20] American Society for Testing and Materials (ASTM), «ASTM D1655».
- [21] American Society for Testing and Materials (ASTM), «ASTM D7566-23b,» 2023.
- [22] ICAO, «Sustainable Aviation Fuels Guide,» 2018.
- [23] ICAO, «Guidance on potential policies and coordinated approaches for the development of Sustainable Aviation Fuels,» 2023.
- [24] A. K. Md Fahim Shahriar, «The current techno-economic, environmental, policy status and perspectives of sustainable aviation fuel (SAF),» 2022.
- [25] SkyNRG, «SUSTAINABLE AVIATION FUEL CERTIFICATION AND ASTM INTERNATIONAL: WHAT IS IT & WHY DOES IT MATTER?,» 2023. [En línea]. Available: SUSTAINABLE AVIATION FUEL CERTIFICATION AND ASTM INTERNATIONAL: WHAT IS IT & WHY DOES IT MATTER?.
- [26] Y. B. C. G. Liu G, «Technical review on jet fuel production. Renew Sustain Energy Rev,» 2013.
- [27] Skyng, «SAF TECHNOLOGY BASICS,» [En línea]. Available: <https://skyng.com/sustainable-aviation-fuel/technology-basics/>.
- [28] G. C. C. H. F. L. N. M. S. B. G. H. E. M. E. R. S. R. L. Arno de Klerk, «Sustainable aviation fuel: Pathways to fully formulated synthetic jet fuel via Fischer–Tropsch synthesis,» 2022.
- [29] SAF Investor, «HOW IS SUSTAINABLE AVIATION FUEL (HEFA SAF) MADE?,» [En línea]. Available: <https://www.safinvestor.com/news/142447/how-is-sustainable-aviation-fuel-hefa-saf-made/>.
- [30] C. W. a. J. H. Matthew Pearlson, «A techno-economic review of hydroprocessed renewable esters and fatty acids for jet fuel production,» 2013.
- [31] Green Car Congress, «ASTM approves 7th annex to D7566 sustainable jet fuel specification: HC-HEFA,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.greencarcongress.com/2020/05/20200514-ih.html>.
- [32] Green Car Congress, «ASTM approves 7th annex to D7566 sustainable jet fuel specification: HC-HEFA,» 2020.
- [33] K. A. A. M. H. E.-N. Sulaiman Al-Zuhair, «Synergistic effect of pretreatment and hydrolysis enzymes on the production of fermentable sugars from date palm lignocellulosic wastev,» 2013.
- [34] Intecsa Industrial, «Combustibles Renovables de Aviación,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.intecsaustrial.com/es/proyectos-de-desarrollos-saf/#alcoholtojet>.

- [35] I. M. A. Velázquez, «Tecnología ATJ para la obtención de bioturbosina,» 2018.
- [36] I. A. Q. Pérez, «Oligomerización de etileno para la obtención de iso olefinas en el proceso ATJ,» 2018.
- [37] Europapress, «La decisión de ASTM pone al alcance de la mano la certificación SAF al 100 %,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.europapress.es/comunicados/internacional-00907/noticia-comunicado-decision-astm-pone-alcance-mano-certificacion-saf-100-20230807210129.html>.
- [38] IATA, «Annual Review 2020,» 2020.
- [39] L. S.-S. S. J. M. B. G.-S. L. D. J. F. J. H. J. O. L. H. F. B. I. P. R. J. P. R. H. D. S. K.P. Brooks, «Low-Carbon Aviation Fuel Through the Alcohol to Jet Pathway,» 2016.
- [40] ICAO, «SAF production technologies and certification».
- [41] ICAO, «CORSIA Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels,» 2022.
- [42] ICAO, «New Sustainable Aviation Fuels (SAF) technology pathways under development,» 2022.
- [43] ICAO, «Conversion processes,» [En línea]. Available: <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Conversion-processes.aspx>.
- [44] Virent, «BioForm® SAK Jet Fuel,» 2015.
- [45] Shell, «INTEGRATED HYDROLYSIS AND HYDROCONVERSION,» [En línea]. Available: [https://www.shell.com.cn/en\\_cn/business-customers/catalysts-technologies/licensed-technologies/benefits-of-biofuels/ih2-technology/hydrolysis.html#iframe=L2h5ZHJvcHlyb2x5c2lzLWZvcem0](https://www.shell.com.cn/en_cn/business-customers/catalysts-technologies/licensed-technologies/benefits-of-biofuels/ih2-technology/hydrolysis.html#iframe=L2h5ZHJvcHlyb2x5c2lzLWZvcem0).
- [46] GTI Energy, «Producing Alternative Transportation Fuels (including SAF) From Renewable Resources With IH2®,» [En línea]. Available: <https://www.gti.energy/producing-alternative-transportation-fuels-from-renewable-resources-with-ih2/>.
- [47] Aviación Digital, «Europa aprueba el uso del SAF en aviones,» Septiembre 2023. [En línea]. Available: <https://aviaciondigital.com/europa-aprueba-uso-saf-aviones/#:~:text=La%20normativa%20establece%20objetivos%20de,y%20al%2070%25%20en%202050..>
- [48] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, «Sustainable Aviation Fuel Grand Challenge Roadmap: Flight Plan for Sustainable Aviation Fuel Report,» 2022.
- [49] ICAO, «TERCERA CONFERENCIA SOBRE LA AVIACIÓN Y LOS COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS (CAAF/3): ESTADO DEL SECTOR DE LOS SAF: EL PUNTO DE VISTA DEL SECTOR,» 2023.
- [50] Ryanair, «RYANAIR COMPRA 500 TONELADAS DE SAF A OMV,» 2023. [En línea]. Available: <https://corporate.ryanair.com/spanish/ryanair-compra-500-toneladas-de-saf-a-omv/>.
- [51] Iberia, «Iberia y Repsol ofrecen combustible de origen sostenible a las empresas para

- descarbonizar sus viajes corporativos,» 2023. [En línea]. Available: <https://grupo.iberia.es/pressrelease/details/14880>.
- [52] ICAO, «Mapa de la OACI de aeropuertos que usan SAF,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Airports.aspx>.
- [53] H2 Business News, «Inauguran la primera planta del mundo para producir SAF a base de etanol,» 2024. [En línea]. Available: <https://h2businessnews.com/inauguran-la-primera-planta-del-mundo-para-producir-saf-a-base-de-etanol/>.
- [54] JanzaJet, «LanzaJet Celebrates Grand Opening of Freedom Pines Fuels Plant, the World's First Ethanol to Sustainable Aviation Fuel Production Facility,» Enero 2024. [En línea]. Available: <https://www.lanzajet.com/news-insights/lanzajet-celebrates-grand-opening-of-freedom-pines-fuels-plant-the-worlds-first-ethanol-to-sustainable-aviation-fuel-production-facility>.
- [55] Biorrefinería, «Fulcrum BioEnergy completa la construcción de su primera planta de conversión de residuos en combustibles,» 2021. [En línea]. Available: <https://biorrefineria.blogspot.com/2021/07/Fulcrum-BioEnergy-completa-la-construccion-de-su-primera-planta-de-conversion-de-residuos-en-combustibles.html>.
- [56] Iberia, «La producción de SAF puede generar 56 000 millones de euros de PIB y 270 000 nuevos puestos de trabajo en España,» Junio 2023. [En línea]. Available: <https://grupo.iberia.es/pressrelease/details/16656#:~:text=IAG%2C%20el%20grupo%20al%20que,mercado%20de%20SAF%20en%20Espa%C3%B1a..>
- [57] PwC, «Resumen Ejecutivo: Estudio sobre los impactos ligados a la transición ecológica en el sector de la aviación,» 2023.
- [58] Energías Renovables Magazine, «Comienza la construcción de la mayor planta de biocombustibles 2G del sur de Europa,» 23 Febrero 2024. [En línea]. Available: <https://www.energias-renovables.com/bioenergia/comienza-la-construccion-de-la-mayor-planta-20240223>.
- [59] AIN, «Many Projects Give Promise of More SAF,» Octubre 2023. [En línea]. Available: <https://www.ainonline.com/aviation-news/aerospace/2023-10-02/many-projects-give-promise-more-saf>.
- [60] S&P Global, «SAF production to triple to 1.5 mil mt in 2024 but progress slow: IATA,» 2023.
- [61] European Union Aviation Security Agency, «Current landscape and future of SAF industry,» 2023.
- [62] El Confidencial, «La exención de impuestos por emisiones a la aviación privada llega a su fin en la UE,» 2021. [En línea]. Available: [https://www.elconfidencial.com/medioambiente/clima/2021-07-26/exencion-queroseno-aviacion-impuesto-co2\\_3198768/](https://www.elconfidencial.com/medioambiente/clima/2021-07-26/exencion-queroseno-aviacion-impuesto-co2_3198768/).
- [63] Air Transport Action Group, «Waypoint 2050,» 2021.
- [64] Airbus, «ZEROe,» 2020.
- [65] Aviation Benefits Beyond Borders, «Waypoint 2050,» 2021.

- [66] Corresponsables, «Air France-KLM incorpora cerca de 80.000 toneladas de combustible sostenible de aviación en 2023,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.corresponsables.com/Actualidad/AirFrance-KLM-SAF-objetivos-2030#:~:text=En%202023%2C%20la%20producci%C3%B3n%20mundial,duplicando%20los%200%2C25%20Mt.>
- [67] S. M. W. G. Janina Scheelhaasea, «Synthetic fuels in aviation – Current barriers and potential political measures,» 2019.
- [68] Safran, «JETSCREEN: comprensión del impacto del SAF en los sistemas de combustible,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.safran-group.com/es/noticias/jetscreen-comprension-impacto-saf-sistemas-combustible-2021-06-22>.
- [69] D. F. A. Y. Kok Siew, «Global biorenewable development strategies for sustainable aviation fuel production,» 2021.
- [70] P. M. Rodríguez, «Estudio y modelo de las cadenas productivas de hidrógeno y SAF en la futura aviación sostenible,» 2021.
- [71] Index Mundi, «Precios de Mercado,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=gasolina-de-aviacion&meses=12&moneda=eur&mercancia=petroleo-crudo-brent>.
- [72] IATA, «Aircraft Technology Roadmap to 2050,» 2020.
- [73] R. A. L. a. J.-M. Lavoie, «From first- to third-generation biofuels: Challenges of producing a commodity from a biomass of increasing complexity,» 2013.
- [74] M. M. M. A. S. S. C.J. Chuck, «Feedstocks for Aviation Biofuels,» 2016.
- [75] K. M. P. K. K. E. Atsonios K, «Alternative thermochemical routes for aviation biofuels via alcohols synthesis: Process modeling, techno-economic assessment and comparison.,» 2015.
- [76] S. C. B. E. M. H. B. R. G. R. Crawford JT, «Hydrocarbon bio-jet fuel from bioconversion of poplar biomass: Techno-economic assessment,» 2016.
- [77] M. J. H. Z. B. M. Tao L, «Techno-economic analysis for upgrading the biomass-derived ethanol-to-jet blendstocks,» 2017.
- [78] W. WC, «Techno-economic analysis of a bio-refinery process for producing Hydro-processed Renewable Jet fuel from Jatropha,» 2016.
- [79] W. W. R. W. Z. K. Natelson RH, «Technoeconomic analysis of jet fuel production from hydrolysis, decarboxylation, and reforming of camelina oil,» 2015.
- [80] C. M. J. T. R. M. C. T. C. O. e. a. Klein BC, «Techno-economic and environmental assessment of renewable jet fuel production in integrated Brazilian sugarcane biorefineries,» 2018.
- [81] CORSIA, «ISCC CORSIA 205 LIFE CYCLE EMISSIONS,» 2023.
- [82] Neste, «Neste to acquire used cooking oil collection and aggregation business from Crimson Renewable Energy in the United States to strengthen Neste’s renewable raw materials sourcing

- platform,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.neste.com/news/neste-to-acquire-used-cooking-oil-collection-and-aggregation-business-from-crimson-renewable-energy-in-the-united-states-to-strengthen-neste-s-renewable-raw-materials-sourcing-platform#:~:text=Neste%2C%20the%20world%27s%20leadin>.
- [83] Energy Global, «Red Rock Biofuels and Frontline BioEnergy produce syngas from biomass,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.energyglobal.com/bioenergy/23082022/red-rock-biofuels-and-frontline-bioenergy-produce-syngas-from-biomass/>.
- [84] Aviacionline, «La producción de SAF se duplicó en 2023, pero el transporte aéreo necesita más esfuerzos combinados para avanzar en la transición energética,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.aviacionline.com/2023/12/saf-produccion-2023-iata/>.
- [85] EASA, «Current landscape and future of SAF industry,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.easa.europa.eu/eco/eaer/topics/sustainable-aviation-fuels/current-landscape-future-saf-industry>.
- [86] Airbus, «Global Market Forecast 2023,» Toulouse, 2023.
- [87] International Energy Agency, «Global Energy Review 2021,» 2021.
- [88] Carbon Credits, «Live Carbon Prices Today,» 2024. [En línea]. Available: <https://carboncredits.com/carbon-prices-today/>.
- [89] Agencia Estatal de Seguridad Aérea, «CORSA,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.seguridadaerea.gob.es/es/ambitos/sostenibilidad/comercio-de-emisiones/sostenibilidad-del-sector-aereo.-medidas-de-mitigacion-frente-al-cambio-climatico-y-preservacion-de-la-calidad-del-aire-local/mecanismos-de-mercado/corsia>.
- [90] Agencia Estatal de Seguridad Aérea, «EU-ETS,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.seguridadaerea.gob.es/es/ambitos/sostenibilidad/comercio-de-emisiones/sostenibilidad-del-sector-aereo.-medidas-de-mitigacion-frente-al-cambio-climatico-y-preservacion-de-la-calidad-del-aire-local/mecanismos-de-mercado/eu-ets>.
- [91] International Council of Clean Aviation, «CO2 emissions from comercial aviation,» 2019.
- [92] MBGS, «¿Cuántos litros hay en un barril de petróleo?,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.mbgs.es/cuantos-litros-hay-en-un-barril-de-petroleo/>.
- [93] CAPEX, «Análisis del petróleo y previsión de precios para hoy, 2023 y los próximos años: ¿el WTI y el Brent recuperarán momentum en la segunda mitad de 2023?,» 2024. [En línea]. Available: <https://capex.com/es/prevision/petroleo-precio>.
- [94] Global Petrol Prices, «Precios de keroseno, Oil barrel, 22-abr-2024,» 2024. [En línea]. Available: [https://es.globalpetrolprices.com/kerosene\\_prices/](https://es.globalpetrolprices.com/kerosene_prices/).
- [95] S. S. a. A. C. Nikita Pavlenko, «The cost of supporting alternative jet fuels in the European Union,» 2019.
- [96] S. A. J. P. Daan Peters, «How to advance cellulosic biofuels,» 2015.
- [97] L. M. J. N. H. Z. & B. M. J. Tao, «Techno-economic analysis for upgrading the biomass-

- derived ethanol-to-jet blendstocks,» 2017.
- [98] D. T. C. A. M. G. P. D. R. G. G. P. M. H. B. H. K. S. P. T. S. E. S. R. & N. Klein-Marcuschamer, «Technoeconomic analysis of renewable aviation fuel from microalgae, *Pongamia pinnata*, and sugarcane,» 2017.
- [99] A. E. Ventosa, «Análisis de la introducción a gran escala de biocombustible para,» 2016.
- [100] CEUPE Magazine, «¿Qué es la transesterificación?,» [En línea]. Available: <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-transesterificacion.html?dt=1706814807702>.
- [101] Chemical Safety Factors, «Olefinas - Información sobre la seguridad química,» 14 Octubre 2022. [En línea]. Available: <https://es.chemicalsafetyfacts.org/chemicals/olefins/#:~:text=Las%20olefinas%20son%20una%20clase,butadieno%20son%20ejemplos%20de%20olefinas..>
- [102] K. Haas, «Polimerizaciones Ziegler-Natta,» 2022. [En línea]. Available: [https://espanol.libretexts.org/Quimica/Qu%C3%ADmica\\_Inorg%C3%A1nica/Mapa%3A\\_Qu%C3%ADmica\\_Inorg%C3%A1nica\\_\(LibreTextos\)/14%3A\\_Reacciones\\_organomet%C3%A1licas\\_y\\_Cat%C3%A1lisis/14.04%3A\\_Catalizadores\\_Heterog%C3%A9neos/14.4.01%3A\\_Polimerizaciones\\_Ziegler-Natt](https://espanol.libretexts.org/Quimica/Qu%C3%ADmica_Inorg%C3%A1nica/Mapa%3A_Qu%C3%ADmica_Inorg%C3%A1nica_(LibreTextos)/14%3A_Reacciones_organomet%C3%A1licas_y_Cat%C3%A1lisis/14.04%3A_Catalizadores_Heterog%C3%A9neos/14.4.01%3A_Polimerizaciones_Ziegler-Natt).
- [103] C. M. S. M. Rocío Díaz Rey, «Oligomerización de Olefinas Ligeras con Catalizadores Zeolíticos,» 2016.
- [104] Sandglass Patrol, «SAF (Sustainable Aviation Fuel) SC (Sin Complejos) o ¿qué es el SAF?,» [En línea].
- [105] Transparency Market Research, «Catalytic Hydrothermolysis Jet (CHJ) Fuel Market,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.transparencymarketresearch.com/catalytic-hydrothermolysis-jet-chj-fuel-market.html>.
- [106] U. L. X. L. H. C. M. W. Peter Hua Chen, «Life-cycle analysis of sustainable aviation fuel production through catalytic hydrothermolysis,» 2023.
- [107] Krohne, «Hidrocraqueo en la industria del petróleo y gas,» [En línea]. Available: <https://krohne.com/es/industrias/industria-del-petroleo-y-gas/refinacion-petroleo-y-gas/hidrocraqueo-en-la-industria-del-petroleo-y-gas>.
- [108] SEPLA, «En julio de 2023, las aerolíneas realizarán su vuelo número 500.000 con SAF,» 2023. [En línea]. Available: <https://sepla.es/en-julio-de-2023-las-aerolineas-realizaran-su-vuelo-numero-500-000-con-saf/>.
- [109] ExxonMobil, «ExxonMobil Jet A-1,» 2024.
- [110] ICAO, «CORSIA at a glance series,» 2019.