

LA SOSTENIBILIDAD MEDIOAMBIENTAL EN EL SECTOR AERONÁUTICO

ADENDA 2022



COIAE

Informe del Colegio Oficial de Ingenieros
Aeronáuticos de España.

DICIEMBRE 2023

Autor:

D. Óscar Castro Álvarez, colegiado 5083.

1. PRÓLOGO

Desde el Colegio Oficial de Ingenieros Aeronáuticos de España asistimos con preocupación a la avalancha de informaciones que inciden en el mensaje de que la aviación es el modo de transporte que más contamina y que, por ello, debería regularse prohibiendo volar en algunas rutas y reduciendo las frecuencias en otras, en una palabra: limitando el libre desarrollo de la actividad de transporte aéreo.

Si bien es cierto que la aviación civil vs otros modos de transporte es el modo que más contamina por pasajero/Km (aunque discrepemos del rigor con el que se hacen las cuentas), también es cierto, que es el modo que menos emisiones genera: 2,4% de las emisiones totales a nivel mundial en 2019. A nivel de la Unión Europea el sector de aviación civil generó, el mismo año, el 13,4% del total de emisiones del sector transporte, sector que aportó el 29,6% del total de emisiones, es decir la aviación civil fue responsable del 3,9% del total de emisiones generadas en la Unión Europea en el año 2019.

Estos valores no han influido en el compromiso de la reducción de emisiones de la aviación civil, aunque sólo fuese por el interés en reducir el consumo de combustible, para reducir los costes y mejorar, por ello, el beneficio de la industria del transporte aéreo. La aviación civil ha estado siempre (y está) comprometida con la lucha contra el cambio climático habiéndose implicado en numerosas iniciativas encaminadas a lograr una aviación civil 100% libre de emisiones en el 2050.

Este informe se ha elaborado con el objetivo de que la sociedad civil conozca el estado del arte de las diversas iniciativas sobre las que se está investigando para introducir nuevas tecnologías que propiciarán un cambio revolucionario en la aviación civil y que permitirán lograr el objetivo de sostenibilidad comprometido.

La intención de este colegio es elaborar un nuevo informe cada dos años, para garantizar que la sociedad disponga de una fuente de información veraz y actualizada, que permita hacer un seguimiento del grado de maduración de las nuevas tecnologías y del avance en el cumplimiento de los objetivos de sostenibilidad.

José Manuel Hesse Martín

Decano del Colegio Oficial de Ingenieros Aeronáuticos de España

2. RESUMEN EJECUTIVO.

Al igual que otros sectores, la aviación está comprometida con la reversión del cambio climático, por lo que se ha vuelto imperativo encontrar soluciones innovadoras y sostenibles para abordar los desafíos ambientales que enfrentamos en la actualidad. Si bien en la actualidad las emisiones de la aviación son mucho menores que las del transporte por carretera, cada vez hay más personas viajando por el mundo, y las previsiones son que la demanda de transporte aéreo aumente en los próximos años de forma significativa.

En este esfuerzo común de reducción de emisiones que propician el cambio climático, la aviación no se está quedando atrás y, en medio de estos desafíos, también ha surgido una fuente de esperanza: las nuevas tecnologías en sostenibilidad que están transformando el panorama de la aviación. Estas innovaciones están allanando el camino hacia un futuro más ecológico y responsable en la industria aeroespacial.

Esta adenda al “Informe de Sostenibilidad Ambiental del COIAE 2022” se adentra en el análisis de las nuevas tecnologías en sostenibilidad en la aviación, explorando las vanguardistas soluciones que están revolucionando la forma en que volamos. Desde avances en la eficiencia de los motores hasta la implementación de biocombustibles y el desarrollo de aviones eléctricos, nos encontramos en el umbral de una nueva era de viajes aéreos más sostenibles.

El informe actualiza la evolución de las investigaciones, proyectos y desarrollos en el campo de la aviación sostenible realizadas en los últimos meses.

A medida que los esfuerzos de sostenibilidad se convierten en una prioridad global, las empresas aeroespaciales y los gobiernos están trabajando juntos para fomentar la innovación y establecer normas más estrictas en términos de emisiones y consumo de energía.

A lo largo de estas páginas, expondremos cómo la aviación se está reinventando para reducir su impacto en el medio ambiente y abordar el cambio climático. Examinaremos los desafíos técnicos, económicos y operativos que se deben superar para lograr una aviación más sostenible, así como los beneficios potenciales que esto puede generar.

Esta actualización también analiza las políticas y regulaciones en curso que están impulsando la adopción de tecnologías sostenibles en la industria de la aviación.

Con la esperanza de que la lectura de la actualización de este informe del COIAE brinde una visión clara y enriquecedora sobre el emocionante futuro que nos espera, donde la sostenibilidad y la innovación se entrelazan para construir un horizonte aeroespacial más verde y limpio. Juntos, podemos impulsar el cambio necesario para asegurar un transporte aéreo más sostenible y un planeta más saludable para las generaciones venideras.

¡Bienvenidos a esta travesía hacia un futuro sostenible en la aviación!

Contenido

1.	PRÓLOGO	2
2.	RESUMEN EJECUTIVO.....	3
3.	INTRODUCCIÓN	5
4.	IMPACTO AMBIENTAL DE LA AVIACIÓN EN CONTEXTO.....	5
5.	HACIA UNA AVIACIÓN SOSTENIBLE.....	7
6.	ACCIONES, INNOVACIÓN Y TECNOLOGÍA.....	10
6.1.	COMPENSACIÓN DE EMISIONES Y MEDIDAS ECONÓMICAS.....	11
6.1.1.	Concienciación y compensación	11
6.1.2.	CORSIA y EU ETS.....	13
6.1.1.	Medidas políticas y gestión de demanda.....	15
6.2.	NAVEGACIÓN Y OPERACIONES.....	16
6.3.	MEJORAS DE EFICIENCIA GRADUALES Y DE DISEÑO	16
6.3.1.	Propulsión	17
6.3.2.	Aerodinámica y Control de Ala.....	19
6.4.	COMBUSTIBLES SOSTENIBLES	21
6.4.1.	Producción.....	21
6.4.2.	Mandatos e Incentivos	23
6.4.3.	Ciclo de vida y tecnologías	24
6.4.4.	Ensayos con SAF	27
6.5.	AVIACIÓN ELÉCTRICA	28
6.5.1.	Tecnología	29
6.5.2.	Híbridos	32
6.5.3.	Aviación con baterías	35
6.6.	HIDRÓGENO	38
6.6.1.	Visión de futuro.....	40
6.6.2.	Pilas de combustible.....	42
6.6.3.	Combustión directa	45
7.	CONCLUSIONES	47
8.	BIBLIOGRAFÍA	48

3. INTRODUCCIÓN

La evolución de la aviación hacia la sostenibilidad medioambiental es una tendencia que se materializa con múltiples enfoques y estrategias. El objetivo de este informe del COIAE, como continuación de los publicados en años anteriores, es el de describir y dotar de contexto los desafíos e iniciativas en marcha para alcanzar una auténtica aviación sostenible. En particular, esta edición se circunscribirá a todo lo acontecido en este ámbito durante el año 2022, lleno de desarrollos y avances. Se puede acceder a una visión más amplia de esta temática en informes anteriores que incluyen, por ejemplo, información detallada sobre la contaminación acústica [1].

Así, hay que aclarar que el ámbito de la sostenibilidad en la aviación cubre mucho más terreno de lo aquí expuesto, comenzando por los pilares sociales y económicos de importancia capital pero que rebasan nuestro objetivo. El foco de este trabajo se centra en la urgente lucha por la mitigación del impacto de las emisiones de la aviación comercial, y fundamentalmente en lo referente al calentamiento global. No obstante, y como se presentará en algunos de los temas tratados, la sostenibilidad medioambiental de la aviación debería tratarse con un análisis de ciclo de vida, que tuviese en cuenta desde la producción de las aeronaves hasta su reciclado, pero que precisaría de un tratamiento mucho más amplio que el aquí pretendido.

Por último, es necesario aclarar que el campo tratado, a pesar de las limitaciones señaladas, es afortunadamente de una amplitud muy considerable, con multitud de propuestas y logros alcanzados durante el último año. Con este informe, que no puede ni pretende ser exhaustivo, se pretende simplemente conseguir una visión de conjunto actualizada del apasionante camino hacia una aviación medioambientalmente sostenible.

4. IMPACTO AMBIENTAL DE LA AVIACIÓN EN CONTEXTO

El conocimiento científico sobre el impacto de las emisiones de aviación ha alcanzado un gran nivel de madurez, aunque como ya se ha mencionado, queden áreas en las que se necesita seguir avanzando (por ejemplo, en las estelas de condensación y la interacción aerosoles-nubes¹). Esta solidez es fundamental para dirigir de forma óptima los esfuerzos de desarrollo hacia una aviación medioambientalmente sostenible.

A finales de 2021 se publicó una extensa revisión del consenso científico [1] en la que se confirmaba que las emisiones de CO₂ de la aviación representan un 2,4% del total de origen humano. Si se incluyen los efectos más allá del dióxido de carbono, el informe estimaba en un 4% su contribución al calentamiento global. A pesar de ello, los autores del estudio incidían en la importancia de centrarse en la reducción de las emisiones de CO₂ debido a su enorme período de permanencia en la atmósfera. En la Figura 1 se puede ver la relación entre ambos factores (muy dependiente del crecimiento de tráfico global) y diferentes proyecciones de futuro. Los beneficios de un incremento en el uso de combustibles sostenibles (SAF), y de la contención de las emisiones de CO₂ mediante una mejor gestión del volumen de tráfico aéreo u otros medios resultan evidentes, abriendo posibilidades realistas de frenar decisivamente la huella climática de la aviación comercial.

¹ <https://www.gfdl.noaa.gov/aerosols-and-climate/>

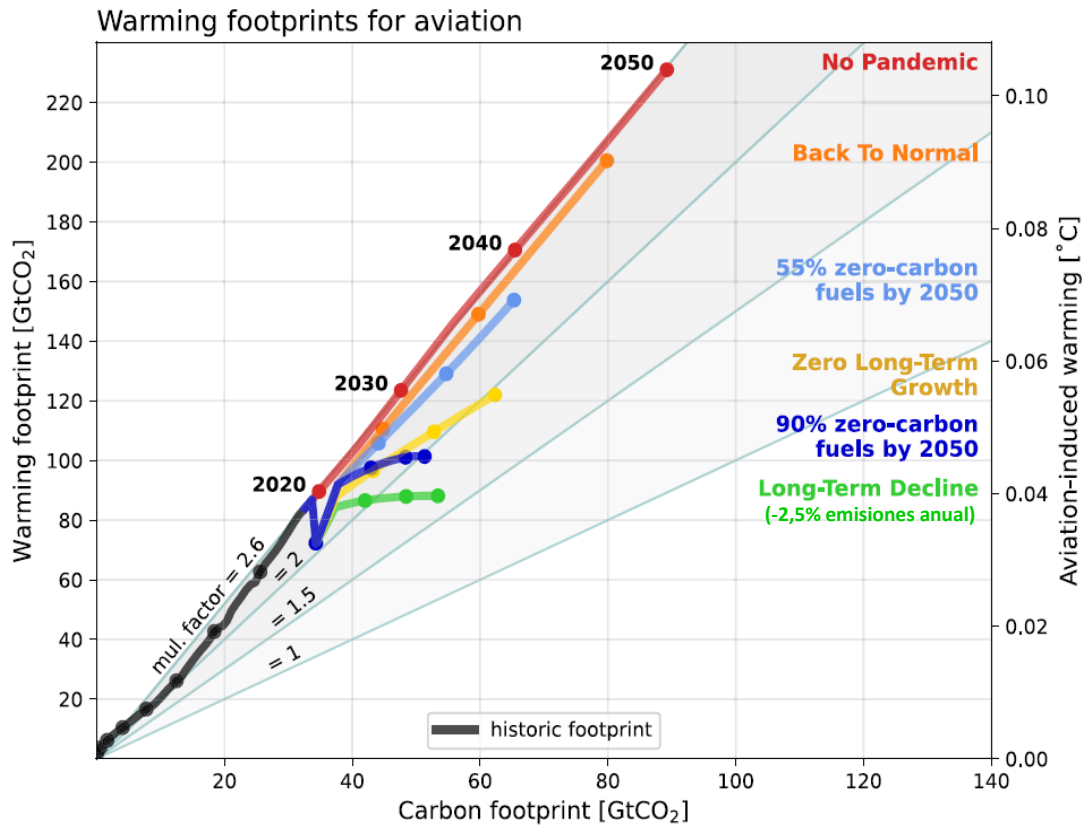


Figura 1. Impacto histórico de las emisiones de la aviación y contribución factores no-CO₂. Proyecciones de futuro con diferentes escenarios (Incorporación de SAF, contención y reducción tráfico aéreo) hasta 2050 [1].

El principal impacto no-CO₂ viene de la mano de las estelas de condensación y la nubosidad inducida por estas². Estas nubes de microhielos, resultado de la congelación del agua producida en la combustión de hidrocarburos, contribuyen al calentamiento global al bloquear la salida de radiaciones infrarrojas desde la superficie en mayor medida que las radiaciones solares que refleja durante el día. De acuerdo con el estudio señalado, estos efectos de corta duración funcionan como multiplicadores del CO₂, amplificando el aumento de temperatura en la atmósfera producido con tráficos aéreos crecientes, pero también conteniendo de forma significativa el impacto global de las emisiones de aviación en un escenario de reducción de las emisiones.

En la Figura 1 se puede apreciar, además el efecto mitigador duradero de la reducción del tráfico aéreo durante la pandemia de COVID19.

Durante 2022 también se dieron a conocer actualizaciones de las comparativas de emisiones entre diferentes medios de transporte (Figura 2), con algunos estudios incidiendo en la creciente relevancia del principal contribuyente al impacto medioambiental: el transporte por carretera³.

² <https://www.climateworks.org/blog/how-aviations-impact-on-global-warming-goes-beyond-carbon-emissions/>

³ <https://www.transportenvironment.org/discover/black-friday-exposes-dark-side-of-trucking/>

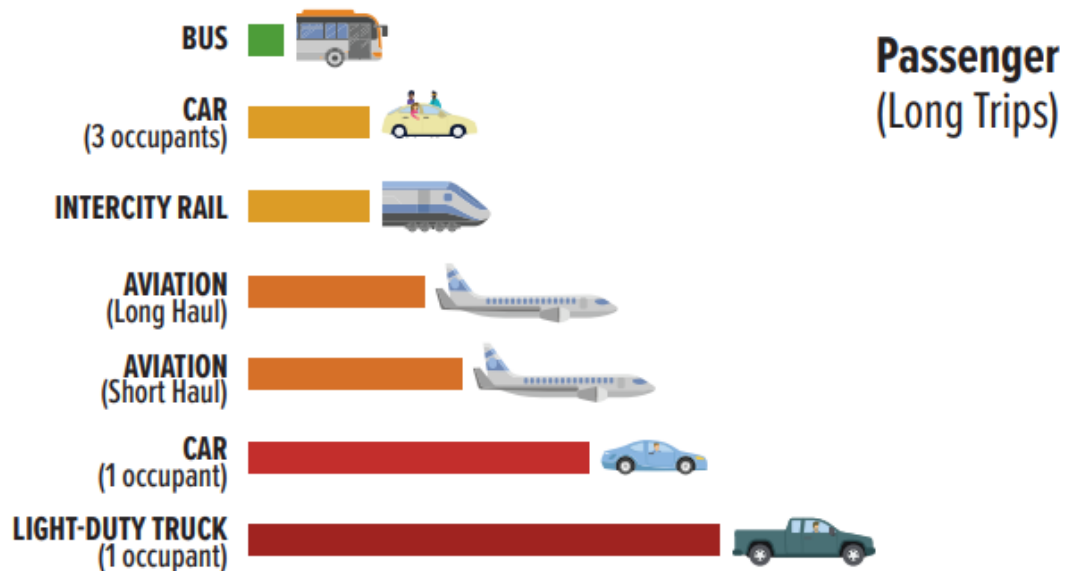


Figura 2. Comparativa de emisiones de gases de efecto invernadero, por pasajero y km, entre diferentes medios de transporte [3].

5. HACIA UNA AVIACIÓN SOSTENIBLE

Durante 2022 se produjeron acuerdos y compromisos de gran importancia para cimentar el camino hacia la aviación sostenible. En febrero se produjo la Declaración de Toulouse, en la que 37 países europeos, y cerca de 150 entidades privadas de la industria aeronáutica, se comprometieron a alcanzar la neutralidad neta de carbono para la aviación en 2050, además de cumplir ciertos objetivos intermedios. Aún más, a finales del año pasado se lanzó en Europa la Alianza para la Aviación con Cero Emisiones, organización público-privada que busca facilitar el desarrollo e introducción de aeronaves con propulsión eléctrica y de hidrógeno⁴.

Estos anuncios se suman a compromisos similares por parte de EE. UU. a finales de 2021⁵, así como desde la industria aeronáutica en su conjunto mediante la organización ATAG⁶. A nivel mundial, en octubre de 2022 la 41ª asamblea de la OACI aprobó el objetivo aspiracional a largo plazo (LTAG) para descarbonizar la aviación comercial en 2050⁷.

En general, todos estos compromisos se basan en medidas a corto plazo (implementación de mejoras en operaciones y aeronaves convencionales), medio plazo (introducción progresiva de combustibles sostenibles de aviación) y largo plazo (aeronaves con propulsión disruptiva, tanto eléctrica como por hidrógeno). Además, se refuerzan los sistemas de compensación de emisiones, incluidos los esquemas obligatorios (EU ETS, CORSIA), añadiendo otras alternativas para alcanzar el equilibrio de emisiones como la gestión del volumen de tráfico aéreo, o la captura de carbono de la atmósfera (DAC). Por supuesto, todos estos planes y propuestas deberán ser respaldadas por una voluntad política, empresarial y ciudadana de primer orden para alcanzar unos objetivos tan ambiciosos como necesarios.

⁴ https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-aeronautics-industry/alliance-zero-emission-aviation_en

⁵ <https://www.faa.gov/sustainability/aviation-climate-action-plan>

⁶ <https://aviationbenefits.org/FlyNetZero>

⁷ <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/LTAG.aspx>

De hecho, durante el año pasado se presentaron una gran cantidad de informes y estudios tratando de identificar rutas hacia la descarbonización de la aviación. Entre otros están los informes de Eurocontrol [4], ERA⁸ [5], ICCT⁹ [7], la propia OACI [6] o incluso herramientas online para construir diferentes escenarios¹⁰. Tal es así, que incluso se presentó un metaestudio por parte de Roland Berger sobre sus características de conjunto¹¹.

Esta consultora divide las propuestas entre *Arte de lo probable* (más conservadoras, con más protagonismo de la compensación de emisiones, Figura 3) y *Arte de lo posible* (más ambiciosas, cargando el peso de la reducción de CO2 en nuevas tecnologías propulsivas y SAF, Figura 4).

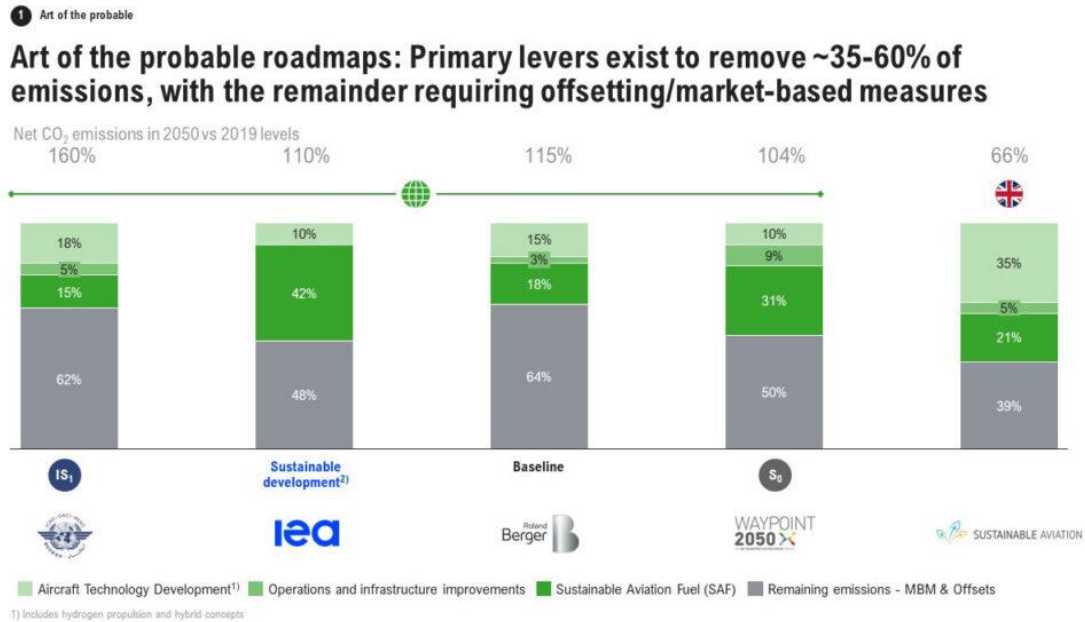


Figura 3. Arte de lo probable. Estimaciones hacia emisiones netas cero en aviación basadas en compensación.

⁸ European Regional Airline Association

⁹ The International Council on Clean Transportation

¹⁰ https://dash-mpp.plotly.host/mpp-aviation-net-zero-explorer/global_regional_lens

¹¹ <https://www.greenairnews.com/?p=3170>

Art of the possible roadmaps: Primary levers remove almost all emissions, leaving only a fraction requiring offsetting/market-based measures¹⁾

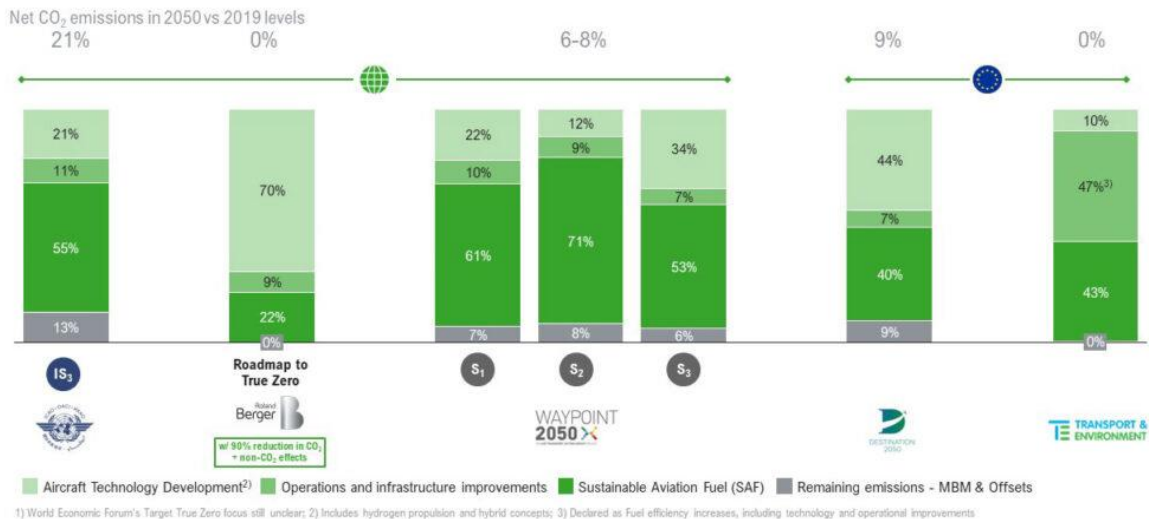


Figura 4. Arte de lo posible. Estimaciones hacia emisiones netas cero en aviación basadas en SAF y tecnologías disruptivas.

Entre otros puntos a destacar en los diferentes informes están los objetivos intermedios (55% reducción CO₂ en 2030), la capacidad de producción SAF, el cálculo de costes, incluyendo los impuestos asociados al combustible fósil, y la gestión de la demanda. Un aspecto determinante en los cálculos económicos es la evolución prevista del precio de los derechos de emisiones (EU ETS), que en algunos casos se calcula que alcanzará los 200 €/tCO₂ (a finales de 2022 rondaba los 85 €), con el coste de operación adicional para las aerolíneas, y el consiguiente incentivo a la reducción de emisiones.

Las aerolíneas, de hecho, están protagonizando diferentes iniciativas para avanzar en los objetivos de descarbonización. Desde la renovación de flota con aviones más eficientes, los acuerdos de compra masiva de SAF, inversiones en tecnologías de captura de CO₂ o acuerdos de desarrollo de propulsiones disruptivas (Air New Zealand¹²). Resulta interesante comprobar que, siguiendo este modelo diversificado, otros actores también apuestan por tecnologías de baterías e hidrógeno al mismo tiempo (Monte Aircraft Leasing¹³).

Desde el ámbito de los constructores, en 2022 se produjo, por una parte, la consolidación de propuestas como en el caso del programa *Energía* de Embraer¹⁴, con la reducción de opciones propulsivas centrándose en las soluciones híbrida-eléctrica y de pila de hidrógeno. Por otra, el sector vive una expansión de propuestas que buscan capitalizar las tecnologías disponibles. A modo de ejemplo sirva la propuesta de recuperar dirigibles de pasajeros (Airlander) en la que Air Nostrum será el cliente de lanzamiento¹⁵.

¹² <https://www.airnewzealand.co.nz/press-release-2022-air-new-zealand-announces-mission-next-gen-aircraft-partners>

¹³ <https://www.greenairnews.com/?p=3623>

¹⁴ <https://www.aviacionline.com/2022/12/embraer-refina-su-familia-energia-y-apuesta-a-dos-conceptos-de-19-y-30-asientos/>

¹⁵ https://cincodias.elpais.com/cincodias/2022/06/15/companias/1655287650_937336.html



Figura 5. Dirigible Airlander para el transporte de hasta 100 pasajeros [Air Nostrum]

Como ya se ha mencionado, el estudio y los proyectos para mitigar los efectos no-CO₂ de la aviación comercial también han ganado relevancia durante el pasado año. En particular, el DLR y Eurocontrol llevaron a cabo ensayos para redirigir vuelos en alturas en que no produzcan estelas de condensación desde el centro de control aéreo de Maastricht, con resultados positivos. Proyectos experimentales similares se han planificado en Alemania y en el Atlántico Norte¹⁶.

Otras medidas en investigación son el uso de SAF o combustibles con bajo contenido en compuestos aromáticos, lo que reduce y modifica la emisión de hollín, clave para la nucleación del hielo que conforma estas nubes (Proyecto ECLIF3¹⁷).

Todas estas estrategias cobran especial relevancia ante las propuestas presentadas para incluir los efectos no-CO₂ en el mercado de emisiones EU ETS, lo que implicaría, en el futuro, un gran incentivo para su implementación por parte de las aerolíneas en Europa. De hecho, como parte del acuerdo preliminar entre el Parlamento y el Consejo Europeo para reformar las normas del régimen de comercio de derechos de emisión de la UE (RCDE UE) aplicables al sector de la aviación, la Comisión Europea preparará un sistema de seguimiento, notificación y verificación de estas emisiones para 2025¹⁸.

6. ACCIONES, INNOVACIÓN Y TECNOLOGÍA

El avance tecnológico para alcanzar una aviación sostenible sigue un proceso acelerado con el desarrollo de múltiples soluciones de eficiencia probada, al mismo tiempo que surgen nuevas vías por explorar. A modo de ejemplo, durante el pasado año surgieron avances y propuestas industriales para introducir el amoníaco como vector energético sostenible, tanto para facilitar el transporte y gestión del hidrógeno verde, como para su uso directamente en la propulsión de aeronaves¹⁹.

Para fomentar estos progresos el apoyo institucional juega un papel decisivo, que en Europa se concreta a través de los proyectos amparados bajo el marco del programa Clean Aviation²⁰,

¹⁶ Flight International. Marzo 2022.

¹⁷ <https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/2021-11/EN-ECLIF3-study.pdf>

¹⁸ <https://www.consilium.europa.eu/es/press/press-releases/2022/12/07/ets-aviation-council-and-parliament-strike-provisional-deal-to-reduce-flight-emissions/>

¹⁹ https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2022-05-10/avion-amoniaco-bateria-electrico_3421430/

²⁰ https://clean-aviation.eu/sites/default/files/2023-04/Highlights2022_en.pdf

sucesor de Clean Sky 1 y 2. En 2022 se lanzó la primera convocatoria bajo este nuevo marco con un presupuesto de 735 millones de euros enfocada en tres áreas:

- Aviación eléctrica-híbrida regional
- Aeronaves ultraeficientes de corto y medio alcance
- Tecnologías disruptivas en propulsión de hidrógeno

En las siguientes secciones se van a repasar los avances, tanto en este tipo de propuestas tecnológicas como en las medidas más convencionales para mitigar el impacto climático de la aviación, así como en la compensación o regulación de las mismas.

6.1. COMPENSACIÓN DE EMISIONES Y MEDIDAS ECONÓMICAS

6.1.1. Concienciación y compensación

La concienciación de los pasajeros exige cada vez más información sobre el impacto medioambiental de sus desplazamientos, así como de las opciones para mitigarlo. En este sentido, un estudio reciente revelaba que casi un 40% de los mismos estarían dispuestos a encarecer sus tarifas un 2% para compensar sus emisiones de CO₂²¹. Respondiendo a esta demanda, la mayoría de las principales aerolíneas ofrecen estas opciones, de igual forma que se han desarrollado herramientas para que las plataformas de búsqueda de vuelos ofrezcan esta información sobre emisiones de forma comparada²². Finalmente, para contribuir a la robustez de las estimaciones, en 2022 la asociación de líneas aéreas IATA presentó una metodología exhaustiva para el cálculo de la huella de carbono para los pasajeros²³, así como el Aviation Carbon Exchange, un servicio centralizado para la compraventa de derechos de emisiones y gestión de compensaciones de CO₂ para las compañías aéreas, tanto en esquemas obligatorios como voluntarios²⁴.

A la opción convencional para la compensación voluntaria de las emisiones por parte de los pasajeros, con esquemas de reducción de CO₂ fuera de la industria aeronáutica, ahora se han añadido la subvención de combustibles sostenibles (book-and-claim) tanto para vuelos comerciales²⁵ como de negocios²⁶. Recientemente ha surgido también la compensación por captura directa de dióxido de carbono desde la atmósfera²⁷.

Los proyectos de descarbonización, a pesar de su creciente control y los estrictos procesos de certificación a los que están sometidos, no están exentos de críticas sobre su eficacia²⁸. De hecho, algunas compañías están desplazando su esfuerzo principal de compensación hacia las nuevas tecnologías²⁹. No obstante, como se destacaba en los principales estudios ya señalados,

²¹ <https://www.mckinsey.com/industries/travel-logistics-and-infrastructure/our-insights/opportunities-for-industry-leaders-as-new-travelers-take-to-the-skies>

²² <https://travalyst.org/work/aviation-industry/>

²³ <https://www.iata.org/globalassets/iata/you--iata/travelers-covid/qa-iata-rp-per-passenger-co2-calculation-methodology.pdf>

²⁴ <https://www.iata.org/en/programs/environment/ace/>

²⁵ <https://rsb.org/book-claim/>

²⁶ <https://aveliasolutions.com/>

²⁷ <https://ba.chooose.today/>

²⁸ <https://www.nytimes.com/2022/05/18/climate/offset-carbon-footprint-air-travel.html>

²⁹ <https://mediacentre.easyjet.com/story/15575/>

La compensación de emisiones sigue siendo una herramienta fundamental en el camino hacia una aviación sostenible.

La captura directa de dióxido de carbono, tanto para su uso como su almacenamiento, se está planteando como una nueva forma de cubrir las emisiones de la aviación. Empresas del sector, como por ejemplo Airbus, han comprometido inversiones en la tecnología necesaria para su implementación³⁰ y su aplicación por parte de las aerolíneas³¹.

Existe también la opción de evitar la emisión desde plantas de energía, en particular las que usan biomasa para cerrar un ciclo aún más sostenible (BECCS³²). El potencial de mitigación de estas opciones CDR³³ está todavía por confirmarse, pero han despertado grandes expectativas y la consideración del IPCC³⁴ para compensar sectores de difícil descarbonización como el transporte [8].

La Comisión Europea, por su parte, presentó en 2022 una propuesta de regulación³⁵ para certificar la eficiencia de los proyectos de captura de CO2 basada en cuatro principios:

1. Cuantificación: medición fiable de todas las actividades y del saldo de dióxido de carbono retirado de la atmósfera.
2. Adicionalidad: los nuevos proyectos deben suponer un cambio en las prácticas habituales y superar las exigencias legales.
3. Largo-plazo: el almacenamiento debe asegurar una duración suficiente para ser efectivo.
4. Sostenibilidad: todas las actividades de retirada de carbono deben contribuir a la consecución de objetivos sostenibles como la economía circular, la adaptación al cambio climático o el mantenimiento de la biodiversidad.

³⁰ <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2022-07-direct-air-carbon-capture-and-storage-for-aviation-explained>

³¹ <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2022-07-airbus-air-canada-air-france-klm-easyjet-international-airlines>

³² Bioenergy carbon capture and storage

³³ Carbon dioxide removal

³⁴ International Panel for Climate Change

³⁵ https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_7156

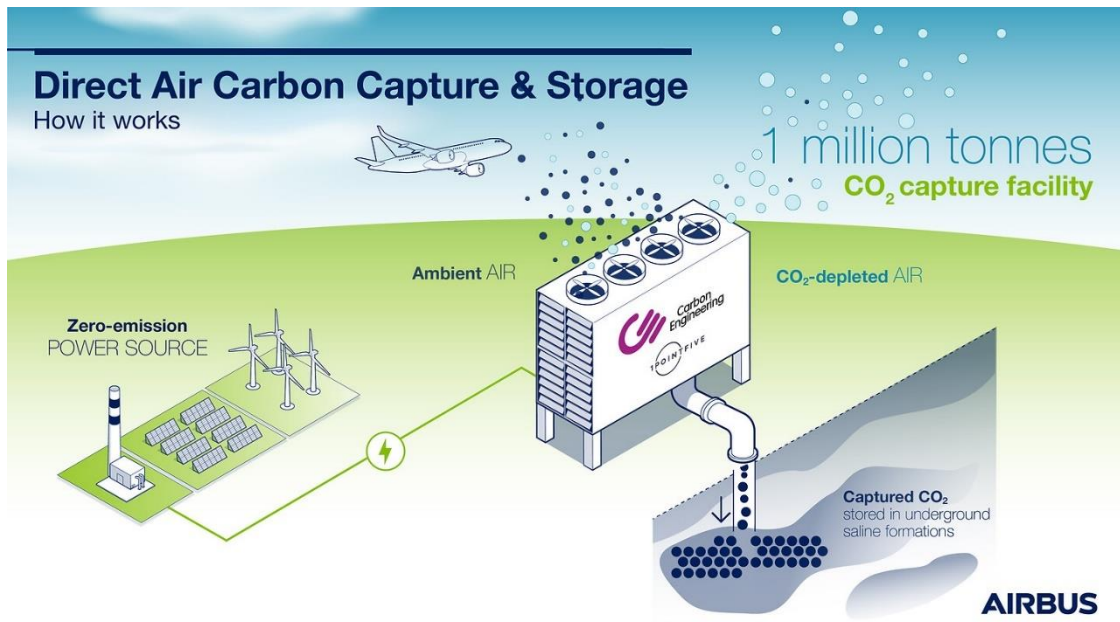


Figura 6. Esquema del funcionamiento de la captura y almacenaje de CO2 (DACCS) (Airbus)

6.1.2. CORSIA y EU ETS

Respecto a los esquemas de cumplimiento obligatorio de compensación de emisiones, en octubre de 2022, durante la mencionada asamblea general de OACI, se revisó y modificó el programa CORSIA. Implementado de forma gradual desde 2021, se habían generado muchas expectativas ya que su eficacia a la hora de incentivar la descarbonización de los vuelos internacionales, ámbito en el que se aplica, era muy limitada.

El núcleo del debate se centraba en la referencia a aplicar como límite de emisiones, a partir del cual las aerolíneas deben compensarlas. Si inicialmente era una media entre los años 2019 y 2020, la parada en seco de los vuelos durante la pandemia del COVID19 forzó una modificación para dejar únicamente las emisiones del primero como referencia. La decisión finalmente adoptada en 2022 por la asamblea fue la de bajar este nivel, endureciendo la exigencia de compensación, a un 85% de las emisiones de CO2 en 2019³⁶.

Si bien es un paso en la dirección correcta, CORSIA seguirá sin afectar al grueso de las emisiones de la aviación internacional, ya que solo obliga a compensar la parte que supere el nivel de referencia, a diferencia del mercado europeo de derechos de emisiones EU ETS, que limita las emisiones totales (*cap and trade*). Basándose en proyecciones de recuperación del tráfico aéreo, algunos estudios sugirieron que para 2030 solo un 22% de las mismas deberán ser compensadas bajo el esquema de OACI. Además, se apunta al bajo precio y la calidad de los créditos de descarbonización utilizados como problemas adicionales a resolver en los próximos años. A modo de ejemplo, un vuelo transatlántico bajo CORSIA implicaría un coste por pasajero de menos de 2€, frente a los casi 50€ si se aplicase el esquema EU ETS³⁷.

³⁶ <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/ES/States-adopts-netzero-2050-aspirational-goal-for-international-flight-operations.aspx>

³⁷ <https://www.transportenvironment.org/discover/un-body-icao-hails-empty-goal-and-cheap-offsetting-scheme-to-green-aviation/>

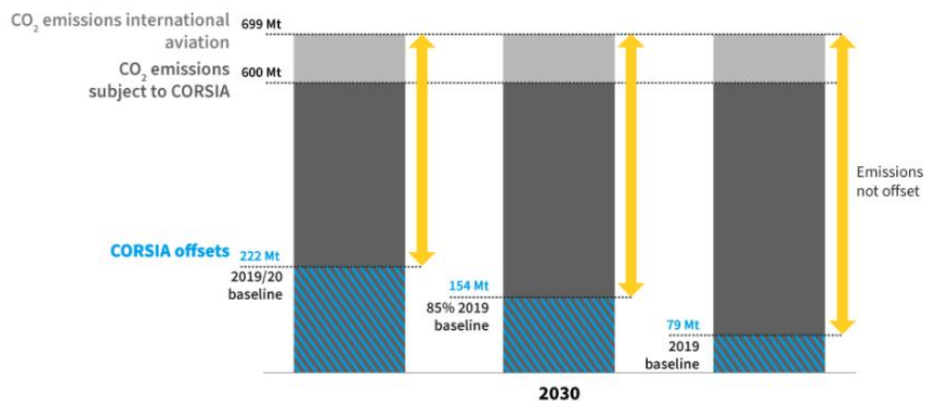


Figura 7. Volumen de emisiones internacionales cubierto por CORSIA en 2030 estimado según las diferentes referencias (T&E³⁸)

Como ya se ha señalado, el precio de adquisición de derechos de emisiones para las aerolíneas bajo el programa EU ETS se ha disparado en los últimos tiempos (Figura 6), con una tendencia que indica que se posicionará como uno de sus principales costes operativos.



Figura 8. Evolución histórica del precio de los derechos de emisiones de CO₂ en EU ETS [9]

Durante 2022 se sucedieron una serie de negociaciones a nivel europeo para encajar este mecanismo con el internacional CORSIA, terminando con la moratoria por el lanzamiento de este último (“stop-the-clock”). Frente a una ambiciosa propuesta inicial del Parlamento Europeo, el acuerdo alcanzado en diciembre supone una delimitación precisa entre los ámbitos de aplicación de ambos mecanismos de control de emisiones (opción “clean cut”), según la cual los vuelos intraeuropeos (incluyendo a Suiza y Reino Unido) seguirán regulados por EU ETS y los externos por CORSIA. Además, se eliminarán los derechos gratuitos a las aerolíneas y se incluyen incentivos a la utilización de SAF. Esta decisión se revisará a partir de 2025 teniendo en cuenta la implementación y eficiencia de CORSIA.

³⁸ <https://www.transportenvironment.org/discover/un-body-icao-hails-empty-goal-and-cheap-offsetting-scheme-to-green-aviation>

El ritmo de reducción del total de emisiones permitidas se acelerará hasta alcanzar una disminución del 60% en 2030 respecto a las emisiones de CO2 de 2005. Además, se pondrá en marcha un sistema de medición y verificación de las emisiones no-CO2. Finalmente, EU ETS se expandirá también para cubrir las emisiones del transporte marítimo y por carretera³⁹. Los ingresos provenientes de este mecanismo se destinarán a sufragar proyectos de eficiencia energética y mitigación del cambio climático⁴⁰.

6.1.1. Medidas políticas y gestión de demanda

En el ámbito político, en 2022 Dinamarca se unió a los países con objetivos establecidos respecto a la introducción de la aviación medioambientalmente sostenible. En 2025 deberán estar disponible vuelos domésticos descarbonizados, que serán los únicos permitidos para 2030⁴¹. Bélgica, por su parte, introdujo una tasa de 10 € por pasajero para todos los vuelos de menos de 500 km, en la línea de otros países que buscan promocionar un cambio hacia la red ferroviaria de alta velocidad. El debate respecto a la viabilidad y los beneficios reales de estas medidas continua, aunque la intermodalidad se consolida como un aspecto clave para alcanzar un transporte sostenible [10].

La aviación de negocios ha acaparado mucha atención mediática recientemente por su volumen de emisiones, hasta ahora en segundo plano, con un impacto de CO2 por pasajero hasta 10 veces superior al de un vuelo comercial (T&E 2021). En la estela de las restricciones durante la pandemia del coronavirus, la reducción de este tráfico se plantea como una opción alcanzable⁴². La gestión de la demanda sigue siendo uno de los factores más controvertidos, pero de importancia fundamental en la evolución del impacto medioambiental de la aviación comercial.

En este escenario, la imposición de tasas sobre los pasajeros, como en el caso belga, se defiende como una herramienta de aplicación directa para la gestión del volumen de tráfico aéreo, aunque esta relación no esté plenamente demostrada [12]. Existen diferentes modalidades en estudio sobre cómo aplicarlas:

- Tasa plana (APD⁴³): se aplica por vuelo y a todos los pasajeros por igual.
- Tasa por distancia (AML⁴⁴): gravaría incrementalmente de forma proporcional e individualizada a la distancia volada durante un período dado por un pasajero.
- Tasa para frecuencia (FFL⁴⁵): gravaría de forma proporcional e individualizada a los pasajeros según el número de vuelos realizados en un período dado.

En general, la sofisticación del sistema de gravamen supondrá una mayor dificultad a la hora de su implementación, sobre todo si fuera necesario un registro centralizado de los datos de los pasajeros. Otros parámetros a considerar para las tasas podrían ser el tipo de vuelos, con el foco puesto en la aviación de negocios, así como el destino de los fondos recaudados, que podrían destinarse a financiar los esfuerzos de descarbonización del sector en su conjunto [11]. En cualquier caso, y como demuestra el caso de Bélgica, el debate está de plena actualidad, y merece la pena afrontarlo con rigor para asegurarse de que las medidas que se introduzcan estén bien diseñadas.

³⁹ <https://www.transportenvironment.org/discover/eu-set-for-major-expansion-of-carbon-market/>

⁴⁰ https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_7796

⁴¹ <https://www.greenairnews.com/?p=2336>

⁴² <https://www.transportenvironment.org/discover/decision-time-board-a-flight-or-dial-in-on-zoom/>

⁴³ Air Passenger Duty

⁴⁴ Air Miles Levy

⁴⁵ Frequent Flyer Levy

6.2. NAVEGACIÓN Y OPERACIONES

A la espera de que se introduzca el Cielo Único Europeo⁴⁶, con la consiguiente reducción de consumo y emisiones [1], en 2022 se produjeron avances en el campo de la eficiencia medioambiental de las operaciones de aeronaves. Se generalizaron los servicios de compañías que optimizan las rutas, el manejo en tierra e incluso el mantenimiento para, de forma integrada, reducir la huella de carbono de los vuelos⁴⁷. Estos nuevos proveedores aprovechan datos meteorológicos disponibles⁴⁸, analizan los datos de vuelos anteriores de forma masiva⁴⁹, e incluso algunas ofrecen una optimización del vuelo para minimizar la creación de estelas de condensación y otros efectos no-CO2⁵⁰.

De hecho, en el pasado año se comenzó a dar los pasos para certificar estas reducciones de impacto medioambiental más allá del dióxido de carbono, abriendo posibilidades para su regulación y compensación⁵¹.

Por último, y entre otros desarrollos de eficiencia medioambiental, se recuperó la idea del e-taxi, con una operación en tierra autónoma de la aeronave con tracción eléctrica a través del tren delantero, y que verá su aplicación en aerolíneas españolas⁵².

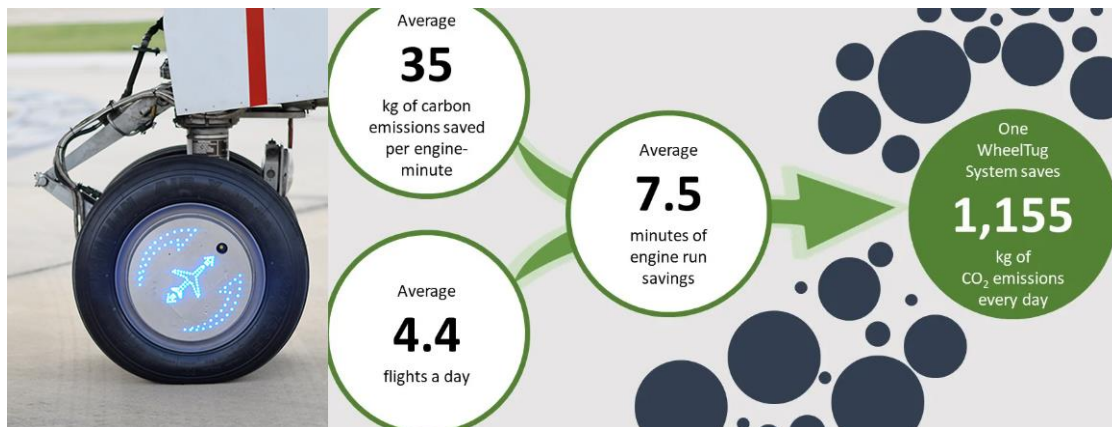


Figura 9 Sistema e-taxi y estimación de reducción CO2 [Wheeltug]

6.3. MEJORAS DE EFICIENCIA GRADUALES Y DE DISEÑO

El potencial de las medidas incrementales para reducir la huella de CO2 de la aviación comercial suele infravalorarse, cuando no tacharse como mero maquillaje de la industria. Sin embargo, en el corto plazo, la innovación sobre la base de las tecnologías actualmente en uso puede alcanzar una mitigación clave del impacto de los vuelos, como paso intermedio, hasta la implantación de otras estrategias más disruptivas.

⁴⁶ https://www.enaire.es/sobre_enaire/presencia_internacional/cielo_unico_europeo

⁴⁷ <https://www.safran-group.com/pressroom/flying-green-targets-lower-fuel-consumption-safran-sfco2-service-2022-06-16>

⁴⁸ <https://www.prnewswire.com/news-releases/easyjet-adopts-skybreathe-360-eco-flying-platform-to-reduce-co2-emissions-301474353.html>

⁴⁹ <https://www.fuelvision.io/>

⁵⁰ <https://satavia.com/>

⁵¹ <https://www.greenairnews.com/?p=2939>

⁵² <https://www.wheeltug.com/>

Sirva como prueba de lo anterior los dos vuelos de prueba realizados por AirFrance en mayo de 2022, en los que se alcanzaron reducciones del 45% en las emisiones de CO₂ en trayectos desde Paris a Lisboa y Montreal, respectivamente. Parte de esta reducción se consiguió simplemente por la operación de aeronaves más modernas y eficientes, que consumen entre un 20 y un 25% menos de combustible⁵³.

Repasaremos ahora algunas de las recientes innovaciones de calado medioambiental en esta mejora continuada de la propulsión, la aerodinámica y las estructuras de las aeronaves de pasajeros.

6.3.1. Propulsión

Los motores son los componentes más relevantes para la mejora en la eficiencia energética de una aeronave moderna. Durante las últimas décadas los consumos específicos de los turbofanes mejoraron de forma continua, de la mano de incrementos en su relación de derivación. En esta senda hacia unidades de mayor tamaño, en 2022 se puso a punto para las pruebas de tierra el mayor motor para aviación construido hasta ahora, el Ultrafan de Rolls-Royce, que cuenta con participación española⁵⁴. Su consumo, y por tanto sus emisiones de CO₂, serán un 10% menores que las de su equivalente actual más moderno (Trent XWB). Además, la cámara de combustión optimizada generará menos hollín y emisiones de NO_x, también importantes contaminantes. Por último, se espera una reducción en el nivel de ruido generado del 35%.



Figura 10. Motor de gran relación de derivación Ultrafan [Rolls-Royce]

Otro de los avances recientes en el diseño de los turbofanes consiste en la arquitectura con engranajes, como el GTF de Pratt & Whitney. Más disruptivo es el propulsor RISE, de CFM, con el que se recupera el prometedor concepto de rotor abierto [1], y cuyo rendimiento superaría el de los dos anteriores⁵⁵. En 2022 Airbus y CFM acordaron utilizar el avión de pruebas A380 para los ensayos en vuelo previstos para la segunda mitad de esta década.

⁵³ <https://unitingaviation.com/news/environment/among-their-actions-to-reduce-their-environmental-footprint-air-france-cuts-emissions-on-two-flights-by-half/>

⁵⁴ https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2022-12-25/mayor-motor-avion-listo-pruebas-rolls-royce_3547197/

⁵⁵ <https://leehamnews.com/2022/02/21/for-next-new-airplane-pratt-appears-to-trail-cfm-for-next-new-engine>



Figura 11. Motor de rotor abierto RISE de CFM [Airbus]

Otra conocida estrategia para incrementar el impulso de los reactores de aviación, la inyección de agua, vuelve a estar en el centro de un nuevo proyecto de turbofán: el WET de MTU. En este caso con una estrategia circular, ya que el H₂O se extraería del propio flujo central del motor, donde se genera por la combustión de hidrocarburos⁵⁶. A la mejora en eficiencia se añaden ventajas en el aspecto medioambiental por la reducción de emisiones de NO_x y de partículas sólidas.

A finales de 2022 se lanzó el consorcio SWITCH, financiado por Clean Aviation de la UE, en el que algunos de los principales actores en el sector de la propulsión y la construcción de aeronaves ampliaron el concepto del WET, para incluir una hibridación eléctrica y un sistema de recuperación de energía térmica que reduzcan aún más su consumo de combustible.

⁵⁶ <https://www.flightglobal.com/paid-content/water-enhanced-turbofan-revolutionary-propulsion-concept-based-on-a-gas-turbine-engine/150047.article>

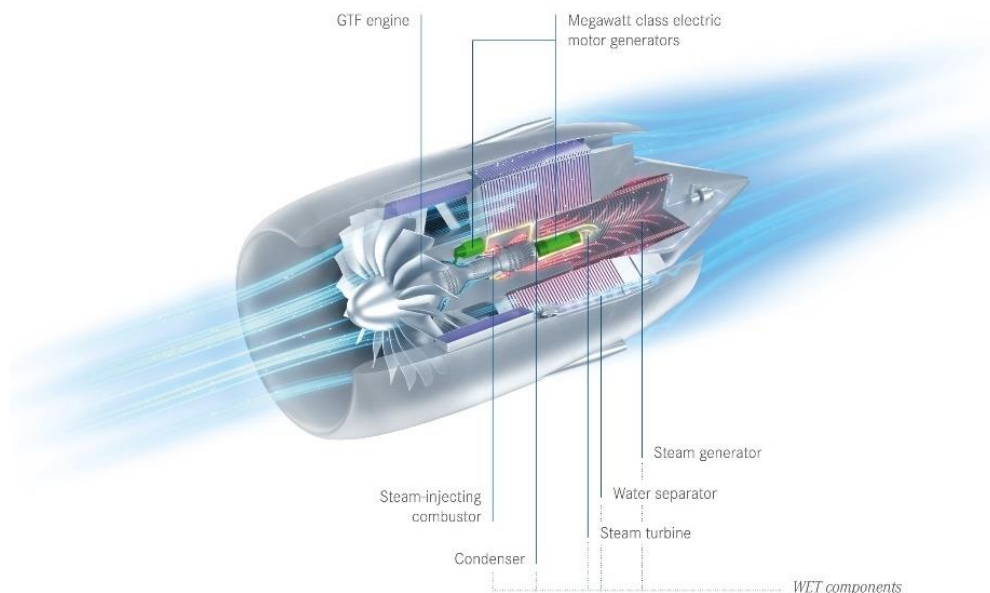


Figura 12. Proyecto SWITCH, financiado por el programa europeo Clean Aviation [SWITCH]

El motor resultante, además, se espera que genere menos estelas de condensación⁵⁷. Como ya se ha señalado, los efectos más allá del CO₂ están recibiendo una creciente atención y esfuerzos de investigación, como quedó demostrado en noviembre del pasado año durante el simposio de Clean Aviation sobre sistemas de combustión avanzada⁵⁸. De hecho, un estudio reciente señalaba que motores con doble anillo de combustión (DAC⁵⁹), una tecnología actualmente en uso en algunos propulsores comerciales, resultan particularmente efectivos a la hora de mitigar la generación de estelas [13]. En todo caso, ya sea con desarrollos consolidados pero redirigidos, ya sea con conceptos totalmente innovadores, no cesa el empuje hacia una propulsión de aviación más sostenible.

6.3.2. Aerodinámica y Control de Ala

A finales de 2022, la Agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA) concedió la certificación del sistema de recubrimiento de superficies externas en aeronaves conocido como AeroShark. Desarrollado por Lufthansa Technik y BASF, e inspirado en la piel rugosa de los tiburones, este tratamiento busca reducir la resistencia aerodinámica en más de un 1%, con el consiguiente ahorro de combustible⁶⁰. La aprobación vino precedida por ensayos en vuelo que validaron su eficiencia y seguridad. Las primeras aeronaves en recibir el AeroShark pertenecen a las flotas de Lufthansa y Swiss.

⁵⁷ <https://simpleflying.com/engine-makers-collaboarate-project-switch/>

⁵⁸ <https://www.clean-aviation.eu/media/news/advanced-combustion-technologies-workshop>

⁵⁹ Double Annular Combustor

⁶⁰ https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2022-12-27/piel-tiburon-aviones-ahorra-combustible-emisiones_3547998/



Figura 13. Aeronave comercial con tratamiento superficial AeroShark [Lufthansa]

Por otro lado, en abril de ese mismo año se completaron los ensayos en túnel de viento del modelo de ala de actuaciones mejoradas (*eXtra Performance Wing*) de Airbus. Este proyecto, en gran parte inspirado en las aves, busca una mejora en las actuaciones aerodinámicas de ala mediante la adaptación de su forma según las condiciones de vuelo, por ejemplo, mediante una punta plegable. Además, el diseño incorporará la detección temprana de ráfagas y una respuesta activa para mitigar las cargas generadas. Todas estas innovaciones buscan el objetivo de reducir la resistencia aerodinámica y el peso de la estructura del ala, con la consiguiente mayor eficiencia energética y menores emisiones⁶¹.

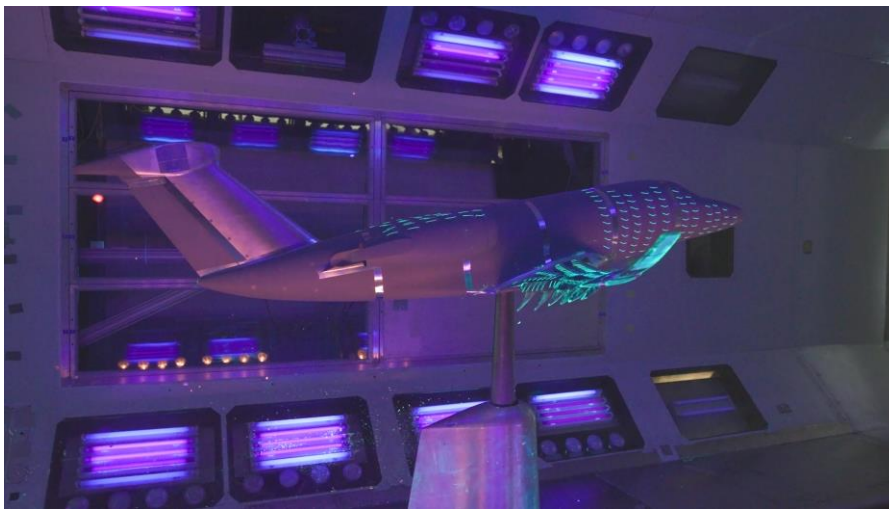


Figura 14. Modelo eXtra Performance Wing en túnel de viento [Airbus]

⁶¹ <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2022-04-nature-inspired-wing-demonstrator-completes-wind-tunnel-tests>

6.4. COMBUSTIBLES SOSTENIBLES

Entre las diferentes estrategias encima de la mesa para descarbonizar la aviación, destaca claramente el recurso a los combustibles sostenibles (SAF). Esta solución permite seguir operando con la flota actual de aeronaves, lo que acorta los plazos en gran medida, y no está pendiente de ningún gran desarrollo tecnológico ya que, tanto en su versión de biocombustible como en menor medida para los electrocombustibles (PtL⁶²), existen ya plantas industriales o demostradores en funcionamiento [1].

Se entiende por todo lo anterior que a los SAF se les confíe el grueso de la reducción de las emisiones de CO₂ en el objetivo de conseguir un impacto cero de las mismas para 2050, como muestra la predicción de IATA en la Figura 15.

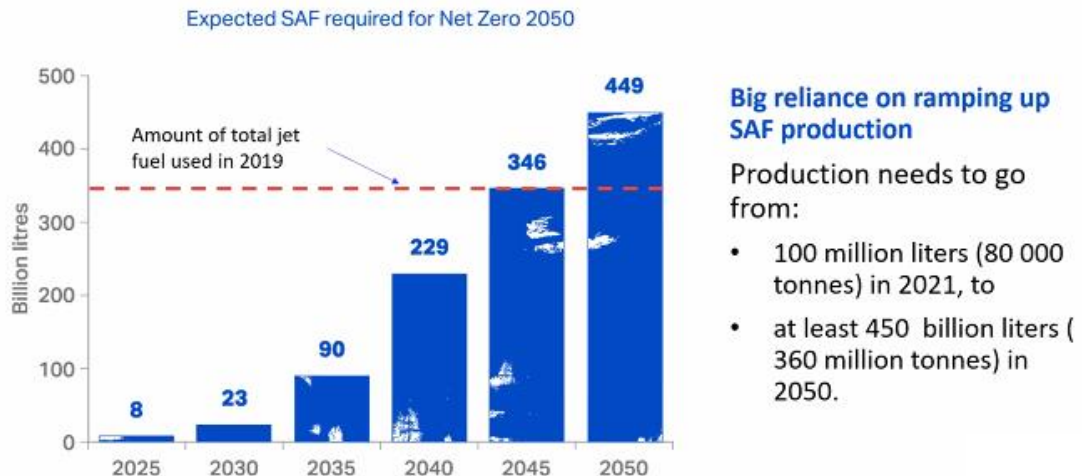


Figura 15. Evolución de consumo de SAF para alcanzar descarbonización en 2050 [IATA]

Y aquí es donde se encuentra el principal y formidable desafío para la generalización del SAF: la capacidad de producir de forma sostenible la ingente cantidad necesaria para proveer a la flota mundial de aeronaves, incluso dejando de lado la demanda adicional de esta solución para la descarbonización por parte de otros medios de transporte. En los siguientes apartados vamos a revisar el estado actual de esta cuestión clave, las medidas para hacerlo posible, y otras cuestiones alrededor de una de las mayores herramientas hacia la aviación sostenible.

6.4.1. Producción

En 2022 se incrementó la producción de SAF hasta un total entre los 300 y los 450 millones de litros, frente a los 100 ML de 2021⁶³. Este incremento, sin duda formidable, debe contextualizarse con el consumo total de la aviación comercial durante el último año, estimado por IATA en 276 millardos de litros. El SAF producido en este año se sitúa, por lo tanto, por debajo del 0,2% del combustible consumido, lo que realza la dificultad y el esfuerzo necesario para alcanzar, de entrada, los objetivos a corto plazo de un 2% en 2025.

En la parte del haber, hay que destacar que las iniciativas para producir y distribuir combustibles sostenibles de aviación se han multiplicado en los últimos meses (Figura 16).

⁶² Power to Liquid

⁶³ <https://www.iata.org/en/pressroom/2022-releases/2022-12-07-01/>



Figura 16. Proyectos de producción de SAF a nivel global [IATA]

El número de aeropuertos en los que se puede cargar estos combustibles sigue en aumento, al igual que las acciones políticas para su fomento y los acuerdos de precompra de SAF entre aerolíneas y proveedores (Figura 17): a finales de 2022 se contabilizaban compromisos de entrega a futuro por unos 42 millardos de litros, de los que aproximadamente la mitad fueron firmados durante el último año⁶⁴.

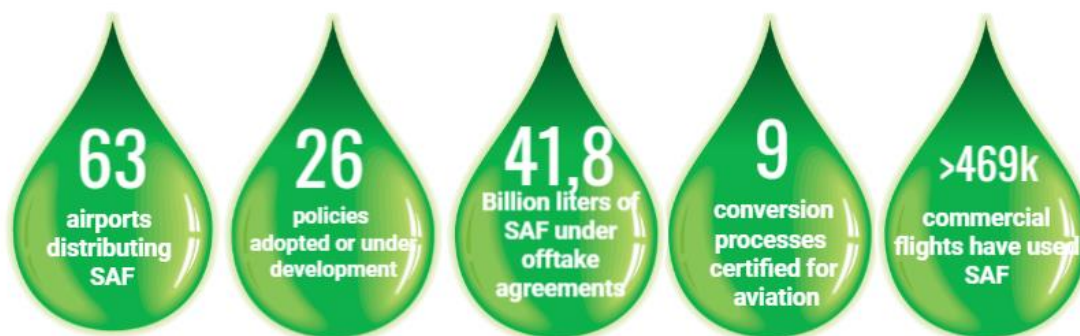


Figura 17. Datos sobre implantación de SAF a finales de 2022 [OACI]

Dentro de los SAF, hay que destacar la madurez industrial de los proyectos de producción de biocombustibles, con plantas en construcción con capacidad para entregar hasta mil millones de litros al año⁶⁵. Aunque más retrasados, los electrocombustibles o *e-fuels* también comienzan su fase comercial. Además del proceso estándar de electrólisis y captura de CO₂ de la atmósfera, se presentaron en el pasado año proyectos con captura en puntos de emisión de industrias carbointensivas como las cementeras⁶⁶ (Figura 18).

⁶⁴ <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Offtake-Agreements.aspx>

⁶⁵ <https://www.airproducts.com/campaigns/casaf>

⁶⁶ <https://www.concrete-chemicals.eu/>

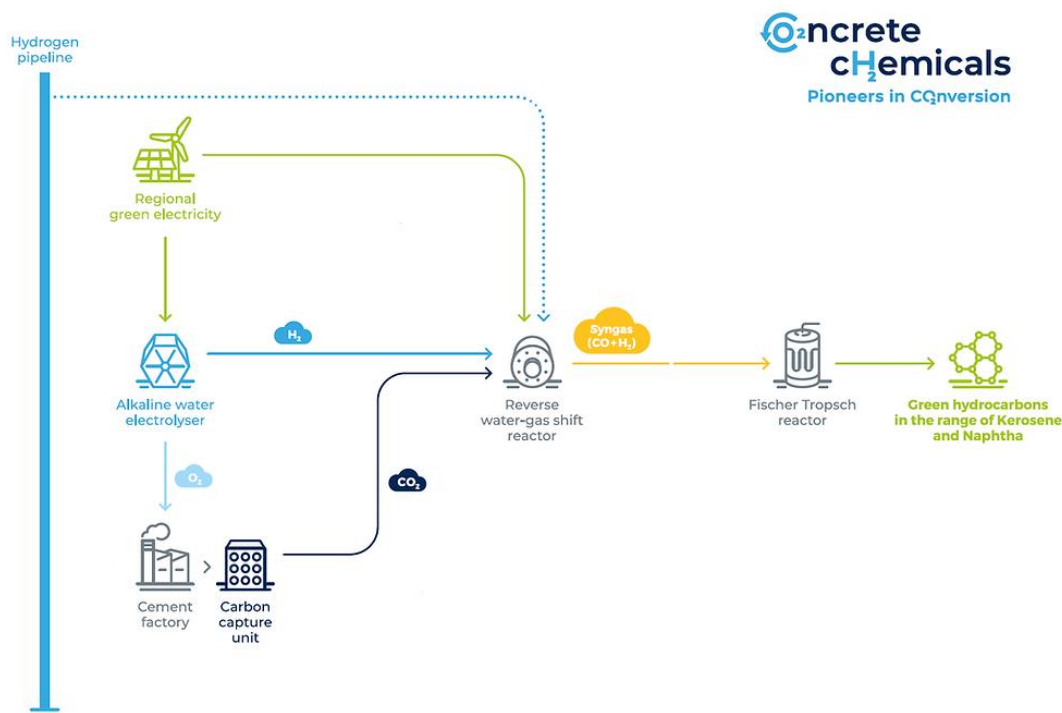


Figura 18. Proceso de producción de electrocombustible con captura de CO₂ en punto de emisiones [Concrete Chemicals]

Por su parte, la tecnología de producción de estos combustibles sostenibles sintéticos mediante reactores termosolares da nuevos pasos hacia su industrialización, incluidos los acuerdos de distribución a las aerolíneas⁶⁷.

Alemania, con sus incentivos a la producción, lidera el desarrollo de los electrocombustibles⁶⁸. A nivel global, su papel se espera que deje de ser testimonial con producciones relevantes alrededor de 2030.

6.4.2. Mandatos e Incentivos

Existen dos enfoques principales a la hora de promocionar la introducción del SAF en la aviación comercial, incluyendo el desarrollo de la capacidad de producción, que en líneas generales se aplican de forma contrapuesta a ambos lados del Atlántico. Si en Europa se opta por mandatos obligatorios de uso por parte de las aerolíneas (RefuelEU⁶⁹ [1]), contando con forzar una demanda que genere oferta, en EE. UU. la estrategia consiste en incentivar económicamente a las empresas involucradas. La Figura 19 refleja sobre el mapa esta diversidad de caminos para conseguir un mismo objetivo.

⁶⁷ <https://www.flightglobal.com/flight-international/does-efuel-production-have-a-bright-future-for-aerospace/148517.article>

⁶⁸ <https://www.euractiv.com/section/aviation/news/germany-charges-ahead-in-decarbonising-domestic-flights-with-new-e-fuel-roadmap/>

⁶⁹ [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI\(2022\)698900](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2022)698900)

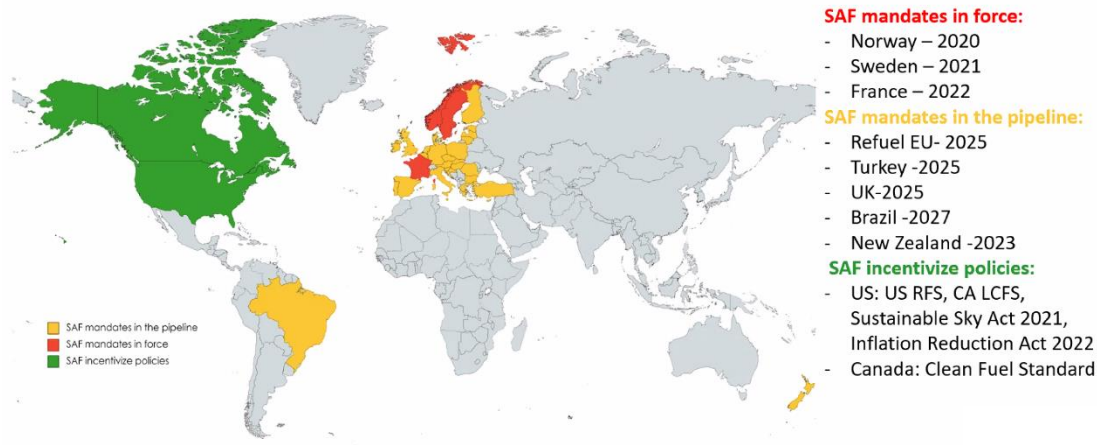


Figura 19. Países con mandatos e incentivos para la producción y uso de SAF [IATA]

En Europa, además de la normativa de la Unión Europea cuya entrada en vigor se espera en breve, a mediados de 2022 Francia y Suecia tenían ya en funcionamiento mandatos del 1% en sus vuelos comerciales, con un 0,5% en Noruega. Aunque en general esta estrategia se presupone eficaz, resulta fundamental el control y análisis de procedencia de la materia prima empleada para generar los biocombustibles, y evitar así daños medioambientales colaterales⁷⁰.

Mientras tanto, en EE. UU., se lanzaba una hoja de ruta para cubrir los objetivos del *US SAF Gran Challenge*, que busca producir unos 11 millones de litros en 2030, multiplicando esta cifra por un factor de 10 para 2050 [14].

Otros países se han autoimpuesto también objetivos para la introducción del SAF, como Japón que busca alcanzar un 10% para 2030⁷¹.

6.4.3. Ciclo de vida y tecnologías

Como ya se indicó anteriormente, el potencial descarbonizador de cada combustible SAF viene condicionado por un estudio riguroso e integral de su impacto medioambiental, desde su producción hasta su consumo final. Es lo que se conoce como el análisis de ciclo de vida, que contabiliza las emisiones asociadas no solo de CO₂, sino también de otros contaminantes [15].

En el caso de los biocombustibles, el aspecto clave es el origen de la materia prima utilizada en su elaboración. A nivel europeo, y tras años de debate al respecto, en 2022 el Parlamento Europeo se pronunció claramente para descartar los biocombustibles provenientes de soja, con un impacto sobre el uso del suelo bien conocido, calificándolo como un agente de deforestación⁷². La Figura 20 muestra el origen de los biocombustibles consumidos en Europa durante la pasada década.

⁷⁰ <https://www.transportenvironment.org/discover/the-good-bad-and-the-ugly-of-saf-mandates/>

⁷¹ <https://www.greenairnews.com/?p=2908>

⁷² <https://www.euractiv.com/section/biofuels/news/eu-lawmakers-vote-to-blacklist-soy-biodiesel-over-sustainability-concerns/>

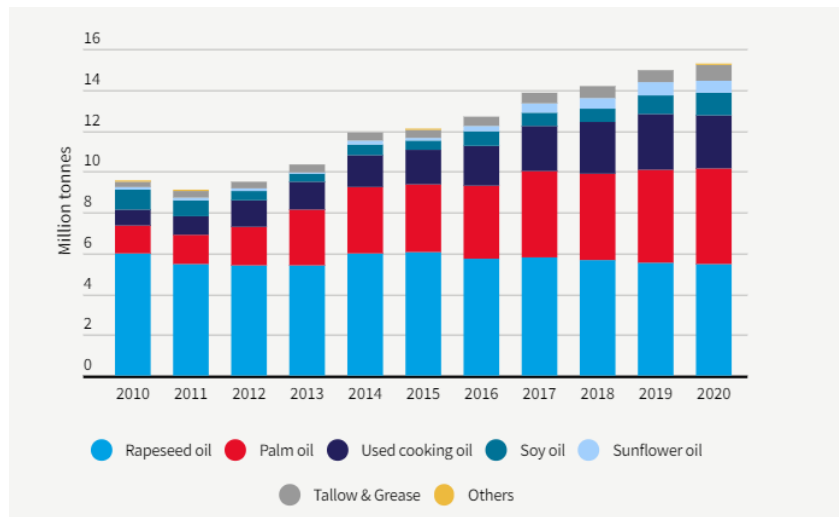






Figura 20. Procedencia de los biocombustibles consumidos en Europa [T&E]

Como ya se ha señalado, los procesos aprobados para la producción de SAF se han expandido en los últimos años, con tecnologías buscando acceder a nuevas materias primas y recursos para incrementar la capacidad de producción. La Figura 21 muestra las características de los principales tipos de biocombustible y PtL.

					
	HEFA	Alcohol-to-jet ⁱ	Gasification/FT	Power-to-liquid	
Opportunity description	Safe, proven, and scalable technology	_____	Potential in the mid-term, however significant techno-economical uncertainty	_____	Proof of concept 2025+, primarily where cheap high-volume electricity is available
Technology maturity	Mature	_____	Commercial pilot	_____	In development
Feedstock	Waste and residue lipids, purposely grown oil energy plants ⁱⁱ Transportable and with existing supply chains Potential to cover 5%-10% of total jet fuel demand	_____	Agricultural and forestry residues, municipal solid waste ⁱⁱⁱ , purposely grown cellulosic energy crops ^{iv} High availability of cheap feedstock, but fragmented collection	_____	CO ₂ and green electricity Unlimited potential via direct air capture Point source capture as bridging technology
% LCA GHG reduction vs. fossil jet	73%-84% ⁱⁱ	_____	85%-94% ^{vi}	_____	99% ^{vii}

i. Ethanol route; ii. Oilseed bearing trees on low-ILUC degraded land or as rotational oil cover crops; iii. Excluding all edible oil crops; iv. Mainly used for gas./FT; v. As rotational cover crops; vi. Excluding all edible sugars; vii. Up to 100% with a fully decarbonized supply chain

Source: CORSIA; RED II; De Jong et al. 2017; GLOBIUM 2015; ICCT 2017; ICCT 2019; E4tech 2020; Hayward et al. 2014; ENERGINET renewables catalogue; Van Dyk et al., 2019; NRL 2010; Umweltbundesamt 2016

Figura 21. Principales métodos de producción de SAF [Clean Skies for Tomorrow]

A pesar de ello, en la actualidad y en el corto plazo se prevé que siga dominando claramente el biocombustible producido mediante el proceso HEFA, como queda claro en la Figura 22.

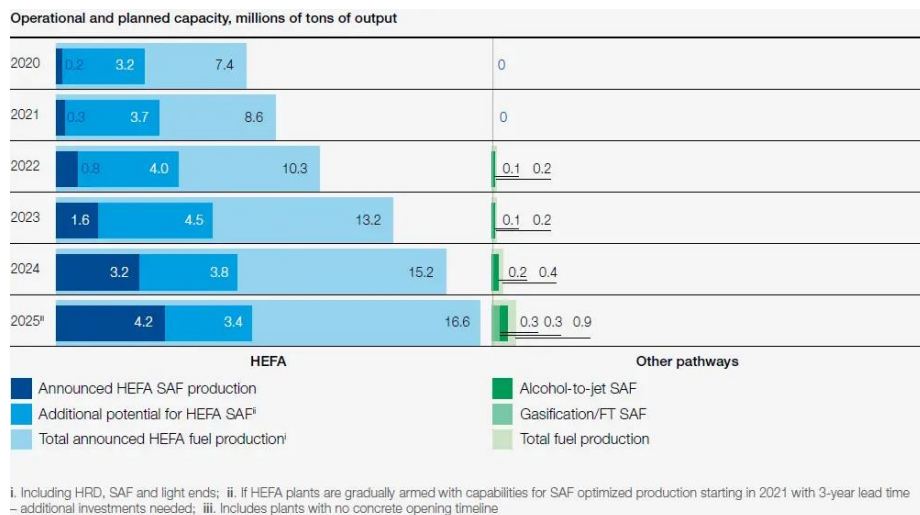


Figura 22. Expectativas de producción de los diferentes tipos de biocombustibles hasta 2025 [Leeham news]

Uno de los procesos que despiertan más expectativas es el alcohol-to-jet (ATJ), con plantas industriales en producción a partir de 2023⁷³, y que podrán aprovechar más tipos de materias primas de origen sostenible. Además, esta tecnología permite también añadir la captura de carbono desde industrias carbointensivas para la producción de SAF⁷⁴.

Los residuos de todo tipo, incluido los sólidos urbanos, son una de las materias primas con mayor proyección, y que se pueden transformar mediante el proceso conocido como gasificación/FT. En resumen, el campo de tecnologías para la producción de SAF es muy amplio, y sigue creciendo con nuevas innovaciones como la conversión de residuos plásticos en combustibles sostenibles⁷⁵, o el diseño de microbios para procesar de forma biológica CO₂ capturado y obtener hidrocarburos. Este último ejemplo muestra la estrategia de algunas aerolíneas, apostando a muchas vías de descarbonización para asegurarse una posición de ventaja en el futuro⁷⁶.

Por otro lado, es interesante reseñar otras iniciativas industriales que se centran en producir combustibles fósiles con un menor impacto medioambiental. Ejemplos de ello son el Coprocesado, que permite la descarbonización parcial de los combustibles de aviación al refinar conjuntamente petróleo y materia orgánica, por ejemplo, aceites usados⁷⁷. Y en una línea similar, los procesos de hidrotreatmento (con hidrógeno) reducen los compuestos aromáticos y sulfuros en el queroseno convencional, lo que redundará en una menor creación de estelas de condensación. El porcentaje mínimo exigido de aromáticos en el queroseno de aviación se sitúa en el 8%, y estudios experimentales sitúan el porcentaje habitual entre el 16 y el 20%, lo que da una idea del margen de mejora medioambiental, algo que ya ha sido propuesto para ampliar la legislación europea RefuelEU [16]. Además, todos estos procedimientos permiten aprovechar la infraestructura existente, mientras se avanza en la reducción del impacto neto de los combustibles de aviación producidos.

Un aspecto clave en el éxito de cada una de estas vías de producción de SAF es el coste de producción. Frente a la clara ventaja actual del HEFA, se esperan progresos en las otras

⁷³ <https://www.lanzajet.com/news-and-insights/>

⁷⁴ <https://www.greenairnews.com/?p=2501>

⁷⁵ <https://thebusinesstravelmag.com/virgin-group-to-reuse-plastic-waste-for-lower-carbon-fuel/>

⁷⁶ <https://www.cemvita.com/news/turning-carbon-dioxide-into-sustainable-fuel-united-and-oxy-low-carbon-ventures-announce-collaboration-with-biotech-firm-to-create-new-fuel-sources>

⁷⁷ <https://www.bp.com/en/global/air-bp/news-and-views/press-releases/bp-refinery-in-lingen-starts-production-of-saf.html>

tecnologías, particularmente en los electrocombustibles, actualmente los más costosos de producir⁷⁸. Por supuesto, el coste de producción del queroseno de origen fósil que se muestra en la Figura 23 depende totalmente de los precios del petróleo, pero sirve como referencia.

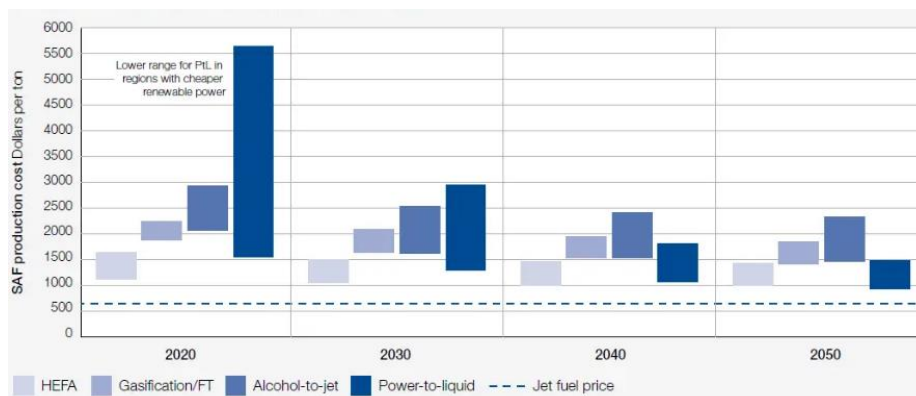


Figura 23. Rangos de costes de producción de SAF frente al queroseno de origen fósil. Evolución estimada para las diferentes vías [Leeham news]

6.4.4. Ensayos con SAF

Durante 2022 se continuó expandiendo el abanico de motores y aeronaves en los que se llevaron a cabo pruebas con combustibles 100% SAF. A pesar de ser perfectamente comparables al queroseno convencional en cuanto a su composición de hidrocarburos, los SAF suelen contener un porcentaje menor de compuestos aromáticos, lo que supone por una parte una ventaja desde el punto de vista de las estelas de condensación, como ya se ha señalado, pero por otra complica el mantenimiento de los sellantes de depósitos y circuitos de combustible⁷⁹.

Conviene recordar que actualmente el uso de mezclas de hasta el 50% está plenamente certificado (ASTM), y que los porcentajes de SAF disponible en los próximos años hacen que esto no suponga ninguna limitación en el medio plazo. Sin embargo, la industria aeronáutica sigue dedicando esfuerzos para demostrar que tanto los diseños en servicio, como sobre todo los nuevos modelos de motores y aviones en desarrollo, son compatibles con combustibles 100% sostenibles.

Entre la multitud de pruebas en diferentes modelos durante el pasado año, se puede destacar como ejemplo el primer vuelo con 100% SAF en un motor del modelo A380 de Airbus⁸⁰ (completando pruebas anteriores en otros modelos) o, entre los fabricantes de motores, las pruebas en tierra de GE con su modelo Passport⁸¹.

⁷⁸ <https://leehamnews.com/2023/01/27/bjorns-corner-sustainable-air-transport-part-54-sustainable-aviation-fuel-feedstocks/>

⁷⁹ <https://leehamnews.com/2023/01/13/bjorns-corner-sustainable-air-transport-part-53-sustainable-aviation-fuel/>

⁸⁰ <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2022-03-first-a380-powered-by-100-sustainable-aviation-fuel-takes-to-the>

⁸¹ <https://www.gearospace.com/press-release/business-general-aviation/ge-aviation-completes-testing-passport-engine-using-100>



Figura 24. Futuro ATR EVO, 100% compatible con SAF

Otro ejemplo del rápido progreso en este sentido fueron las pruebas en el ATR 72-600, en una primera fase solo con uno de los dos motores consumiendo SAF⁸², y más adelante en un vuelo realizado con combustible sostenible en todos los propulsores⁸³. Estas pruebas allanan el camino a la plena compatibilidad de este combustible, como el mismo fabricante anuncia para su futuro modelo ATR EVO.

En el campo de la investigación, y como ya se señaló anteriormente, se siguen desarrollando campañas de vuelo destinadas a la comprobación experimental de las emisiones en aeronaves propulsadas con SAF, incluyendo su potencial para mitigar efectos no-CO₂⁸⁴. Cabe recordar que una proporción del 50% de combustible sostenible puede conducir a una reducción del 30% del impacto de las estelas de condensación [2].

6.5. AVIACIÓN ELÉCTRICA

La aviación eléctrica sigue superando etapas en su desarrollo hacia la entrada en servicio de sus primeros modelos comerciales. Así, en 2022 destaca el primer vuelo del Eviation Alice, un avión regional 100% eléctrico a baterías, con un alcance previsto de 460 km para nueve pasajeros⁸⁵. Con una tecnología convencional de ion-litio, las baterías suponen aproximadamente la mitad del peso de la aeronave, pero contribuyen desde el punto de vista estructural. Este vuelo supone un hito de primer orden, no solo para el proyecto sino para la aviación eléctrica en su conjunto. Eviation afirma tener más de 300 pedidos confirmados, y su objetivo es comenzar las operaciones comerciales entre 2025 y 2026, según las variantes⁸⁶.

⁸² <https://www.atr-aircraft.com/presspost/atr-successfully-performs-test-flights-with-100-saf-in-one-engine/>

⁸³ <https://www.greenairnews.com/?p=3224>

⁸⁴ <https://www.dlr.de/en/media/videos/video-volcan-project>

⁸⁵ <https://www.flyingmag.com/breaking-eviations-alice-electric-demonstrator-flies-for-the-first-time/>

⁸⁶ <https://www.eviation.com/>



Figura 25. Primer vuelo del Eviation Alice [David Honan]

6.5.1. Tecnología

El progreso de la aviación eléctrica, quizás aún más que el resto de la aviación depende sustancialmente de la evolución de la tecnología involucrada. Y en concreto de las baterías y su energía específica, que en el caso del Alice se mantiene en el límite convencional, alrededor de los 260 W·h/kg.

No obstante, durante 2022 se produjeron anuncios que hacen pensar que por fin se podría hacer realidad la promesa de superar esta barrera, y conseguir más energía sin el lastre de peso que limita la autonomía de las aeronaves eléctricas actuales. En esta dirección apuntan avances que extenderían la capacidad del ion-litio hasta los 450 W·h/kg y carga rápida⁸⁷, o las baterías de estado sólido de litio de hasta 500 W·h/kg desarrolladas tanto en Japón⁸⁸ como por la NASA⁸⁹, con litio y grafeno y una mayor seguridad de operación. El modelo experimental X57⁹⁰ podría ser utilizado como banco de pruebas de esta última.

Más allá de estos valores se sigue trabajando en otras tecnologías como las baterías de aluminio-aire⁹¹, con energías específicas de hasta 1350 W·h/kg, aunque sin posibilidad de recargarlas in situ. La compañía de aviación eléctrica Wright Electric parece apostar por esta vía para solucionar la limitación de alcance y capacidad de este tipo de aeronaves. En cualquier caso, estos anuncios abren realmente la puerta a posibilidades mucho más ambiciosas de propulsión eléctrica con baterías.

⁸⁷ <https://verticalmag.com/features/explaining-amprius-extreme-fast-charge-battery-technology/>

⁸⁸ <https://www.sciencedaily.com/releases/2022/01/220120140724.htm>

⁸⁹ https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2022-10-12/nasa-bateria-increible-500wh-triple-capacidad_3504748/

⁹⁰ <https://www.nasa.gov/specials/X57/>

⁹¹ <https://energypost.eu/can-aluminium-air-batteries-outperform-li-ion-for-evs/>

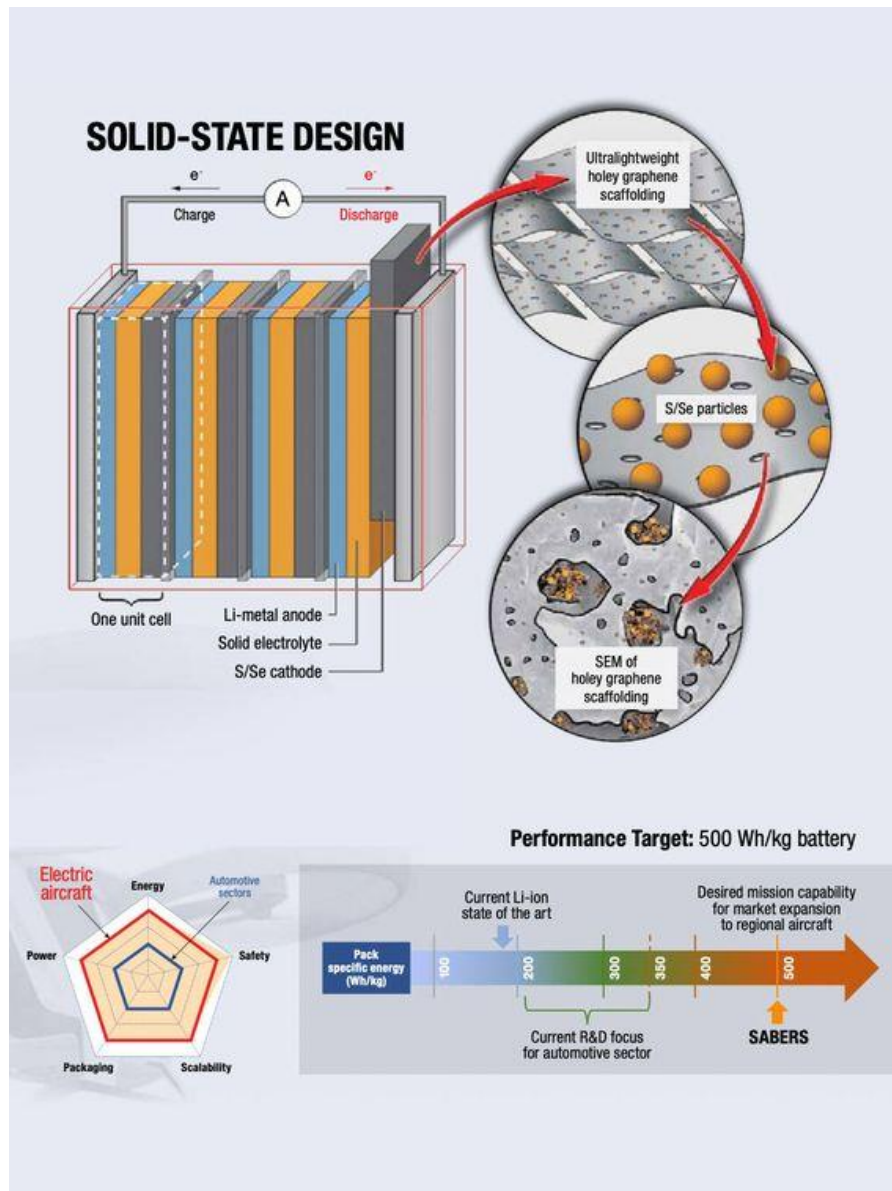


Figura 26. Tecnología de estado sólido de la batería SABERS [NASA]

Respecto a la electrificación de sistemas en las aeronaves, que permite reducir peso y emisiones, se sigue progresando tanto en la investigación de base respecto a sistemas electromecánicos⁹², como en su aplicación real en casos como los timones de dirección de la familia de los Airbus A320. El conocido como “E-rudder” reducirá aproximadamente 40 kg por aeronave⁹³.

Las grandes empresas en el sector de la propulsión también se están posicionando claramente con nuevos desarrollos para la aviación eléctrica. La británica Rolls-Royce creó en 2022 Electrical, su filial encargada de llevar adelante sus diferentes proyectos con soluciones híbridas, o su demostrador PGS1 con hasta 2 MW de potencia⁹⁴.

⁹² <https://www.clean-aviation.eu/media/news/electrifying-actuation-systems-for-greener-flights-with-reprise>

⁹³ Flight International, Julio de 2022.

⁹⁴ Flight International, Julio de 2022.



PGS1 de Rolls-Royce [Flight International]

Otra propuesta interesante para la motorización híbrida, anunciada el año pasado, es el concepto STEP-tech⁹⁵, de Collins y Pratt & Whitney (Figura 27). Este sistema turboeléctrico presume de una concepción escalable para adaptarse a diferentes tipos de necesidades.

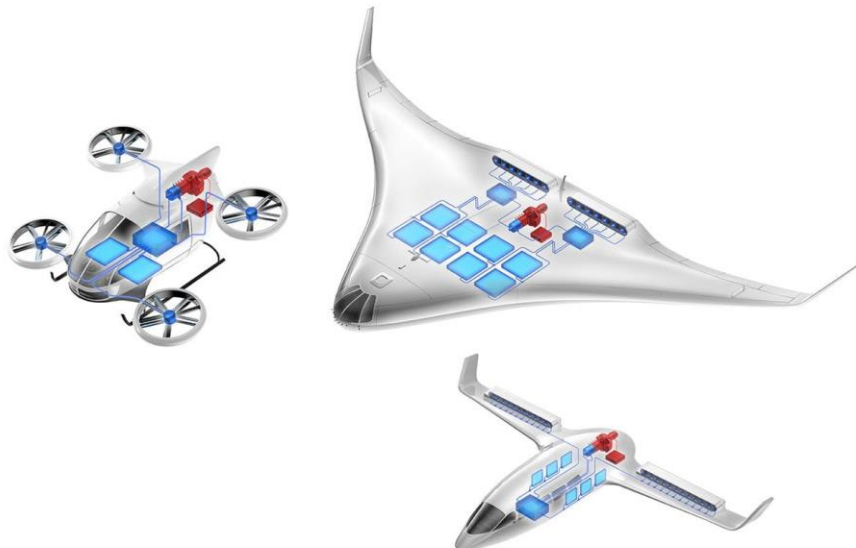


Figura 27. Sistema de propulsión híbrida escalable STEP-tech [Collins]

Por su parte, General Electric realizó pruebas de condiciones de crucero para sus sistemas eléctricos de alto voltaje y potencia, como parte del programa de NASA para el ensayo en vuelo de un tren de propulsión electrificado (EPFD⁹⁶). Es interesante destacar que todos estos anuncios se produjeron en la Feria Aeronáutica de Farnborough, en su primera edición postpandemia, y en la que la aviación sostenible ocupó un lugar destacado.

La investigación más avanzada en propulsión eléctrica también sigue su curso con apoyo institucional tanto en EE. UU., a través de la agencia ARPA-E⁹⁷, como en Europa bajo el

⁹⁵ <https://www.collinsaerospace.com/news/news/2022/07/pratt-whitney-collins-expand-leadership-hybrid-electric-propulsion-technology-with-new-step-tech>

⁹⁶ <https://www.nasa.gov/feature/glenn/2022/nasa-ge-complete-historic-hybrid-electric-propulsion-tests>

⁹⁷ <https://arpa-e.energy.gov/technologies/programs/ascend>

paraguas de Clean Aviation. Además, surgen propuestas más ambiciosas desde start-ups como el motor eléctrico superconductor de alta eficiencia Forerunner⁹⁸.

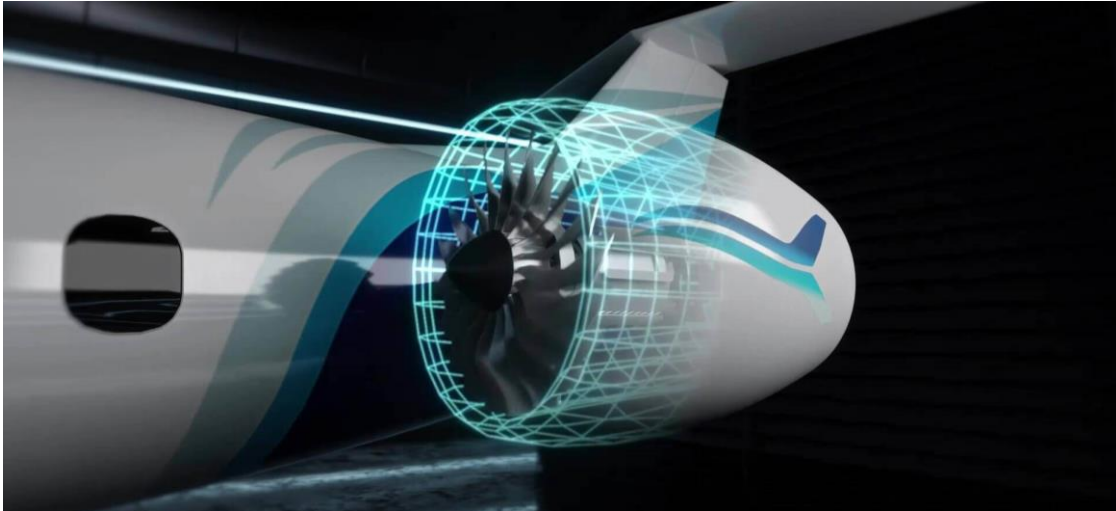


Figura 28. Propulsor eléctrico Forerunner [MakoAeroespace]

De nuevo, como se apuntó para los combustibles sostenibles, y de igual forma para la aviación con hidrógeno, los cálculos de ciclo de vida son fundamentales a la hora de evaluar con rigor el impacto de las diferentes alternativas. La aviación eléctrica debe responder con soluciones sostenibles tanto a la fabricación de sus componentes, en particular de las baterías, como a los procesos de extracción de las materias primas necesarias como el litio, o al reciclado tras el fin de su vida operativa⁹⁹.

6.5.2. Híbridos

Las soluciones híbridas presentan numerosas ventajas, optimizando las diferentes características de los tipos de motorización disponibles (en serie o en paralelo), pero siempre con el desafío de una mayor complejidad y peso [1].

En 2022 el proyecto de Aura Aero ERA (avión regional eléctrico) recabó numerosos compromisos de compra por parte de diferentes aerolíneas¹⁰⁰, y un acuerdo crítico para el programa como es la suma de SAFRAN para la motorización. Se trata de un modelo híbrido en serie para 19 pasajeros, que alcanzará unos 1.800 km con una operación híbrida, y alrededor de 460 km en modo puramente eléctrico. El primer vuelo está planeado para 2024.

⁹⁸ <https://mako-aerospace.com/forerunner/>

⁹⁹ <https://leehamnews.com/2022/10/10/pontifications-total-life-cycle-impacts-missing-from-nearly-all-ecoaviation-discussion/>

¹⁰⁰ <https://www.futureflight.aero/news-article/2022-10-05/aura-aero-gathers-more-commitments-electric-regional-aircraft>



Figura 29. Modelo híbrido en serie de 19 pax. ERA [Aura Aero]

Pratt & Whitney Canada, por su parte, continúa con el programa para desarrollar un híbrido en paralelo basado en el modelo Dash 8-100 (Figura 30), que espera ensayar en vuelo en 2024¹⁰¹.

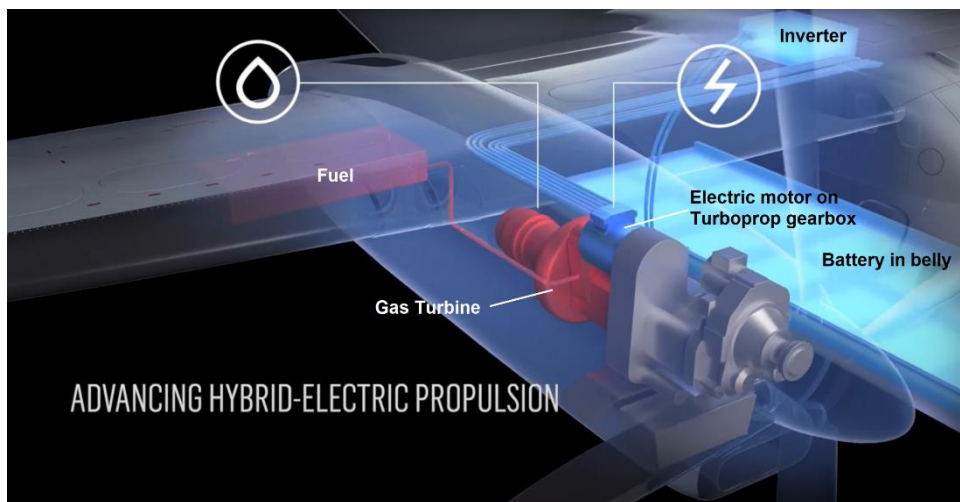


Figura 30. Proyecto híbrido en paralelo de P&WC

El ATR EVO ya mencionado, con una capacidad similar alrededor de 70 pasajeros, podría también incorporar algún tipo de hibridación suave para ayudar durante el despegue y subida. Un grado de hibridación mucho más complejo, y con mayor potencial de ahorro de combustible, es el propuesto en el proyecto SUSAN¹⁰² de la NASA (Figura 31). En este diseño el turbofán trasero no solo proporciona empuje, sino también electricidad para alimentar los motores eléctricos bajo las alas. Sin embargo, no todo son avances en el campo de los híbridos, con proyectos como el STOUT de Embraer suspendido hasta encontrar nuevos socios y clientes¹⁰³.

¹⁰¹ <https://www.futureflight.aero/news-article/2022-05-19/h55-supply-battery-system-pratt-whitneys-hybrid-electric-regional-aircraft>

¹⁰² <https://www1.grc.nasa.gov/aeronautics/eap/airplane-concepts/susan/>

¹⁰³ Flight International, Julio de 2022.

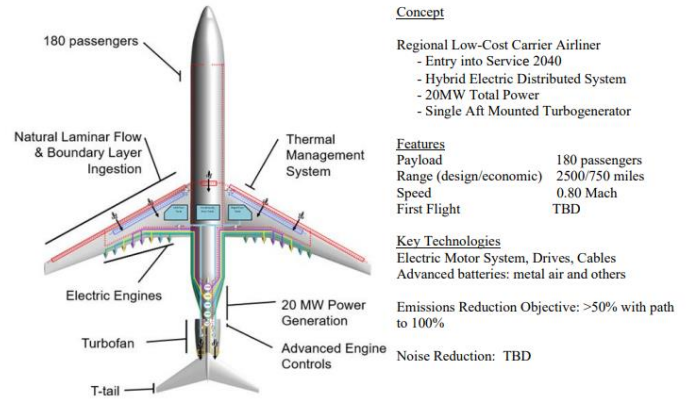


Figura 31. Proyecto híbrido SUSAN [NASA]

En el segmento de la aviación general y regional, con modelos con menos capacidad, destacan las propuestas de VoltAero, con su familia Cassio, y Ampaire con el Eco Caravan. El Cassio 330 (Figura 32) monta motores eléctricos para el taxi, despegue y subida, mientras confía en un motor de combustión interna para el crucero¹⁰⁴. La entrada en servicio (EIS) de este modelo se prevé para 2024. Esta filosofía de propulsión híbrida en paralelo también se aplica en el Eco Caravan, aunque en este caso remotorizando un modelo con una larga trayectoria en el mercado, y con un ahorro en consumo previsto de hasta el 70%. Con una EIS similar a su competidor Cassio, el Eco Caravan completó su primer vuelo en noviembre de 2022¹⁰⁵ (Figura 33). Ampaire planea extender esta estrategia de remotorización al modelo de mayor capacidad Eco Otter.



Figura 32. Híbrido paralelo Casio 330 [VoltAero]

¹⁰⁴ <https://leehamnews.com/2022/10/10/voltaeros-cassio-hybrid-plane-is-mild/>

¹⁰⁵ <https://www.futureflight.aero/news-article/2022-11-18/ampaires-hybrid-electric-eco-caravan-makes-first-test-flight>



Figura 33. Primer vuelo del Eco Caravan [Ampaire]

6.5.3. Aviación con baterías

Además del decisivo hito del primer vuelo del Alice de Eviation ya mencionado, la aviación con baterías también realizó otros progresos significativos durante 2022, como el vuelo de prueba del DHC-2 Beaver “ePlane” de Harbour Air, con una duración de 24 minutos, para unir Vancouver y Victoria en Canadá¹⁰⁶ (Figura 34). Cabe también mencionar, en este apartado, el primer vuelo del helicóptero Robinson R44, con propulsión 100% eléctrica con baterías en junio del pasado año¹⁰⁷.



Figura 34. DHC Beaver “ePlane” [Harbour Air]

Uno de los proyectos de aviación comercial con baterías que más atención había recibido hasta ahora, de la mano de Heart Aerospace, modificó completamente su diseño el año pasado, aumentando su capacidad de 19 a 30 asientos. El nuevo ES-30¹⁰⁸, además, incorpora ahora turbinas de gas adicionales para aumentar su autonomía hasta los 400 km, lo que lo convierte en un híbrido en serie. Si su operación se realizase solo con baterías, su alcance se reduciría a la mitad. Este giro en el diseño, y la renovada confianza de numerosas aerolíneas e inversores

¹⁰⁶ <https://harbourair.com/harbour-airs-all-electric-aircraft-operates-first-point-to-point-test-flight/>

¹⁰⁷ <https://www.futureflight.aero/news-article/2022-06-23/tier-1-achieves-first-flight-electrified-robinson-r44-helicopter>

¹⁰⁸ <https://heartaerospace.com/es-30/>

por el modelo, muestran el difícil equilibrio de la viabilidad empresarial en la aviación sostenible disruptiva, y las limitaciones de las baterías actuales para satisfacer aeronaves de una capacidad más significativa.



Figura 35. Modelo híbrido en serie ES-30. EIS para 2028 [Heart Aerospace]

Para superar estas limitaciones, el modelo Wright Spirit podría confiar en las baterías de aluminio-aire ya descritas. Anunciado a finales de 2021, el proyecto modificará un BAE146 para equipar motores eléctricos, transportando 100 pasajeros en trayectos de una hora de vuelo¹⁰⁹. Resulta interesante destacar la similitud de este proyecto con el E-Fan X de Airbus, Rolls-Royce y Siemens, cancelado en 2020.

En una línea similar, la española Dante Aeronautical también proyecta remotorizar aeronaves regionales con propulsión eléctrica, para lo que recibió el apoyo financiero de Air Nostrum y Volotea a finales de 2022¹¹⁰.

¹⁰⁹ <https://www.greenairnews.com/?p=2187>

¹¹⁰ <https://www.futureflight.aero/news-article/2022-12-20/spanish-airlines-back-plans-convert-regional-aircraft-electric-propulsion>



Figura 36. Proyecto 100% eléctrico Wright Spirit para 100 pax. EIS 2026 [Wright Electric]

El panorama de la aviación eléctrica es realmente diverso, con proyectos que se salen de los diseños convencionales. Ejemplos de ello son algunas propuestas como un hidroavión eléctrico con 19 plazas¹¹¹; o incluso un ekranoplano¹¹², pensado para volar a poca altura sobre el mar aprovechando el efecto suelo, y con capacidad para 12 pasajeros (Figura 37). En 2022 realizó el primer vuelo de prueba con un modelo reducido (un cuarto) del diseño final.



Figura 37. Ekranoplano eléctrico Viceroy para 12 pax y 300 km de alcance [Regent]

Un campo actualmente en ebullición es el de las aeronaves eléctricas de despegue y aterrizaje vertical (eVTOL). Multitud de empresas de todo tipo, desde start-ups a los grandes actores del sector, siguen desarrollando sus proyectos con más o menos madurez. Estas aeronaves, junto con alguna propuesta híbrida de despegue corto¹¹³, conforman lo que se ha venido a llamar la movilidad aérea avanzada (AAM¹¹⁴). El concepto apela a un potencial mercado de desplazamientos sin emisiones intraurbanos y de corto recorrido con pocos pasajeros, aunque

¹¹¹ <https://www.futureflight.aero/news-article/2022-11-08/swiss-start-unveils-plans-and-seeks-backers-electric-seaplane>

¹¹² <https://www.greenairnews.com/?p=3000>

¹¹³ <https://www.electra.aero/>

¹¹⁴ <https://www.futureflight.aero/news-article/2022-12-19/another-pivotal-year-advanced-air-mobility-draws-close>

también se deba confirmar la sostenibilidad de estas propuestas¹¹⁵, sin hablar de su capacidad para beneficiar a un público general.

El pasado año se presentó el diseño definitivo de algunos de los programas más avanzadas (p. ej. el Midnight de Archer¹¹⁶), se avanzó en propuestas de vuelo autónomo (Wisk), se acordaron respaldos industriales (Joby¹¹⁷) y se firmaron multitud de acuerdos de precompra (p. ej. Lilium¹¹⁸).



Figura 38. eVTOL Midnight para 4 pax y 180 km de alcance [Archer]

La viabilidad para certificar cualquiera de estos modelos no está garantizada, y depende no solo de su solidez técnica, sino del respaldo financiero del que dispongan¹¹⁹. Uno de los aspectos que añaden incertidumbre a este proceso es la fluidez del entorno regulatorio, con la FAA cambiando la base de certificación en EE.UU. durante 2022¹²⁰, y EASA todavía finalizando la correspondiente en Europa (SC-VTOL). Además, hay que tener en cuenta la complejidad añadida para la gestión y regulación del tráfico aéreo, especialmente dentro de áreas urbanas, dada la incorporación de todo tipo de drones que previsiblemente compartirán el espacio aéreo con estas nuevas aeronaves y los helicópteros. La seguridad no es un factor negociable y, tratándose de un concepto tan novedoso, queda mucho camino por recorrer.

6.6. HIDRÓGENO

El hidrógeno es, a todas luces, uno de los grandes vectores hacia la aviación sostenible del futuro. Su enorme energía específica (Figura 39) elimina la problemática fundamental de las baterías, aunque deba superar sus limitaciones por el volumen de almacenamiento necesario, el desarrollo de la logística para suministrarlo en los aeropuertos, y alcanzar una producción suficiente de hidrógeno verde, realmente sostenible, que mantenga las nuevas aeronaves (Figura 40) [1].

¹¹⁵ <https://leehamnews.com/2022/11/11/bjorns-corner-sustainable-air-transport-part-45-evtol-how-green>

¹¹⁶ <https://www.futureflight.aero/news-article/2022-11-18/archer-details-motor-and-battery-design-midnight-evtol-air-taxi>

¹¹⁷ <https://www.futureflight.aero/news-article/2022-10-11/delta-backs-joby-investment-and-plans-airport-rides-passengers>

¹¹⁸ <https://lilium.com/newsroom-detail/lilium-partners-saudia>

¹¹⁹ <https://aviationweek.com/aerospace/evtol-certification-who-are-leaders>

¹²⁰ <https://www.futureflight.aero/news-article/2022-05-11/faa-denies-media-report-stunning-overhaul-evtol-aircraft-certification>

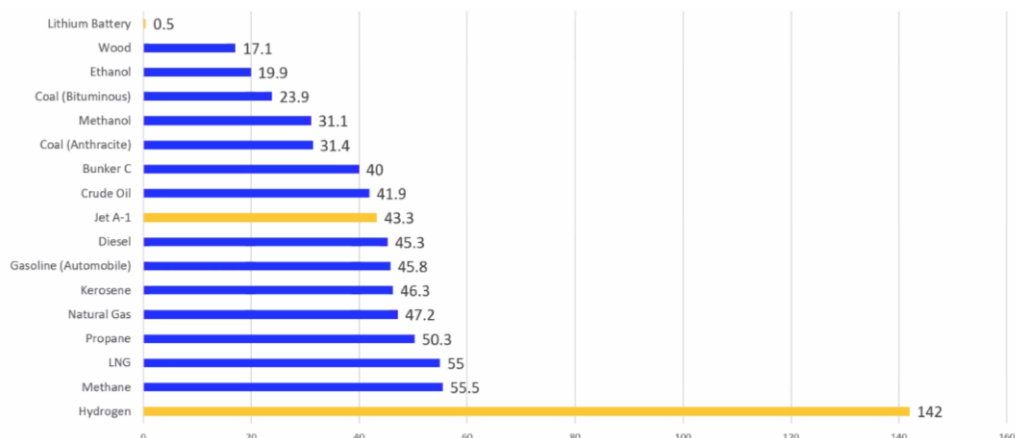


Figura 39. Energía específica (MJ/kg) de diferentes combustibles y baterías [IATA]

El uso del H2 en aviación sostenible cubre muchas posibilidades, desde el uso obvio como combustible, hasta su papel en la producción de SAF, o incluso para la reducción del impacto de combustibles fósiles (hidrotratamiento). El diseño de aeronaves impulsadas por hidrógeno permite también muchas opciones, con un activo debate sobre qué soluciones se adaptan mejor a cada segmento de la aviación¹²¹. Las principales disyuntivas son, por una parte, entre la combustión directa del H2 en reactores turbofanés, similares a los que equipan la mayoría de la aviación comercial actual, o su uso para alimentar pilas de combustible que alimenten motores eléctricos, de manera equivalente a las baterías pero sin sus problemas de peso. Por otra, el almacenamiento de este gas en las propias aeronaves se puede realizar en tanques con el H2 comprimido o licuado. Si la primera posibilidad es más sencilla técnicamente, su capacidad es menor y el peso aumenta, mientras que la segunda requiere de temperaturas criogénicas, con la complejidad añadida para todos los sistemas de combustible.

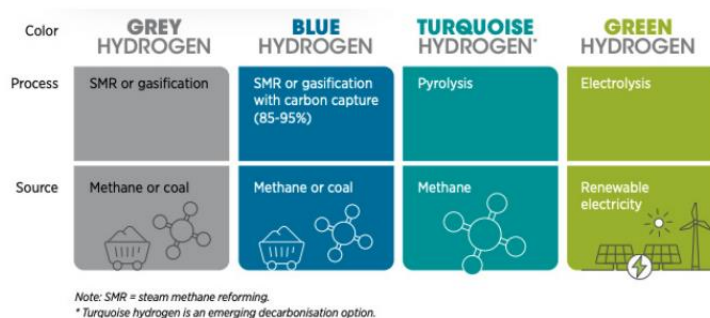


Figura 40. Algunas de las vías de producción de H2: gris, azul, turquesa y verde [IRENA]

En cualquier caso, y sean cuales sean las decisiones de los programas más relevantes en este sector, el avance de la aviación de hidrógeno parece imparable a la vista de los progresos en 2022. Resulta significativo que, en marzo del año pasado, el proyecto británico UK FlyZero que cuenta con participación de la industria y respaldo gubernamental, en sus conclusiones tras el estudio sistemático de opciones para descarbonizar la aviación en 2050, señalase al hidrógeno líquido como el combustible óptimo para llevarlo a cabo¹²². Esta conclusión parece respaldada por otro estudio de ICCT sobre su aplicación a la aviación de corto y medio alcance [18]. Como ya se ha dicho, el debate está abierto, pero el H2, en cualquiera de sus formas, parece que está ineludiblemente ligado al futuro de la aviación [17].

¹²¹ Flight International. Marzo, 2022.

¹²² <https://www.greenairnews.com/?p=2799>

6.6.1. Visión de futuro

Uno de los actores principales de la industria aeronáutica mundial, la europea Airbus, se ha erigido en un puntal del hidrógeno como propulsor de aviación. Desde el lanzamiento de su programa ZEROe en 2020, la compañía no ha dejado de tejer acuerdos con proveedores¹²³, fabricantes¹²⁴, aerolíneas¹²⁵, aeropuertos¹²⁶, entidades de investigación y todo tipo de actores, en el conocido como ecosistema del H2.

Esta visión para el futuro sostenible de la aviación contrasta con el de su gran competidor, Boeing, que apunta a los grandes desafíos asociados a la implantación del H2 en la aviación comercial¹²⁷, y retrasa la puesta en servicio de aeronaves de gran tamaño propulsadas por hidrógeno hasta el 2050. Su apuesta por el SAF para la descarbonización, por el contrario, sí que es también secundada por el fabricante europeo, con una estrategia más diversificada.

Esta competición entre el SAF y el hidrógeno abarca aspectos energéticos y de coste (ver la Figura 41, presentada por una compañía del sector de H2), pero también de beneficios medioambientales. Si la gran mayoría de SAF no consigue eliminar el 100% de las emisiones netas de CO2, y solo una parcial reducción de los efectos no-CO2, el hidrógeno puede presumir de facilitar vuelos realmente con cero emisiones, siempre que su producción también lo sea.

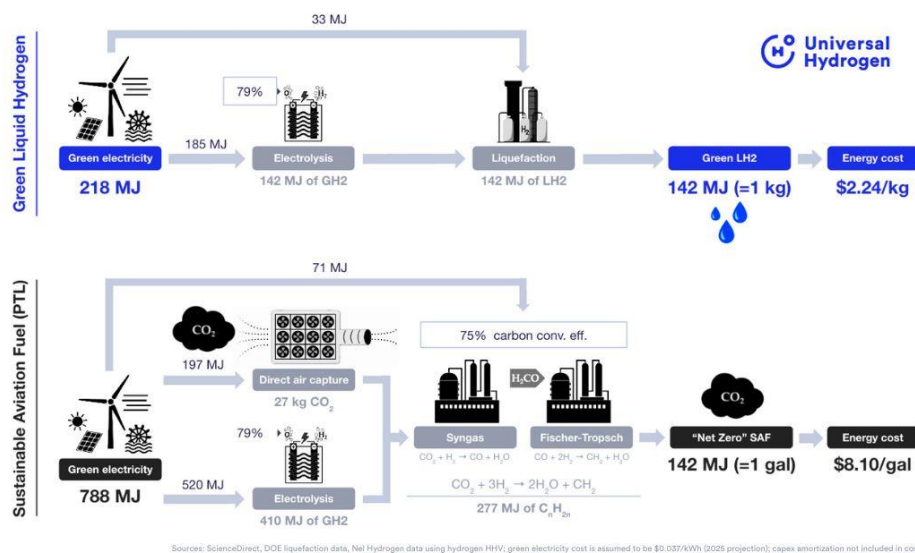


Figura 41. Comparativa de eficiencia energética y económica SAF vs. H2 [Universal Hydrogen]

La única salvedad sería la incertidumbre sobre la generación de óxidos de nitrógeno y estelas de condensación en motorizaciones con combustión de hidrógeno, que emite mucha más agua que la del queroseno, pero sin hollín o partículas sólidas, por lo que su impacto se prevé mucho menor [19]. Este posible impacto negativo forma parte de la argumentación de Boeing sobre

¹²³ <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2022-04-airbus-kawasaki-heavy-industries-partner-to-study-use-of-hydrogen>

¹²⁴ <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2022-02-airbus-and-cfm-international-to-pioneer-hydrogen-combustion>

¹²⁵ <https://www.upstreamonline.com/hydrogen/delta-air-lines-airbus-work-toward-hydrogen-fuelled-aircraft/2-1-1187403>

¹²⁶ <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2022-02-airbus-signs-agreement-to-study-hydrogen-hub-in-singapore>

¹²⁷ <https://www.ainonline.com/aviation-news/air-transport/2022-06-23/boeing-preaches-pragmatism-setting-sustainability-priorities>

el H₂, y de hecho Airbus lo está investigando a través de su proyecto Blue Condor¹²⁸ (Figura 42), con el que realizará ensayos en vuelo con combustión de hidrógeno y queroseno para poder comparar los efectos no-CO₂ en condiciones de vuelo comercial.



Figura 42. Planeador del proyecto Blue Condor, equipado con motor a reacción [Airbus]

El resultado de esta confrontación de visiones puede que dependa del progreso de algunas tecnologías clave asociadas al H₂, como por ejemplo el desarrollo de tanques ligeros de hidrógeno líquido¹²⁹. Otro desafío fundamental es toda la cadena de distribución del mismo, para el que a las soluciones convencionales de hidroductos y depósitos, se unen además ideas más disruptivas como la del dirigible H₂ Clipper. Este dirigible, propulsado también por hidrógeno, podría llegar a transportar hasta 250 t de H₂ criogénico. Su empresa promotora, centrada en soluciones logísticas, firmó en 2022 un acuerdo de colaboración con la Fundación Hidrógeno de Aragón¹³⁰.



Figura 43. Proyecto de dirigible destinado al transporte de H₂ [H₂ Clipper]

Por último, y a modo de ejemplo de la evolución de las soluciones técnicas en los proyectos, la empresa H₂Fly, una de las pocas con un modelo operativo alimentado por hidrógeno (HY4), cambiará el almacenamiento en la pequeña aeronave desde el gas comprimido a tanques criogénicos. El proyecto europeo HEAVEN¹³¹, bajo el que se llevará a cabo esta modificación, también busca desarrollar un nuevo tren de propulsión por pilas de combustible para, de forma conjunta, servir de prototipo para propulsar diferentes clases de aeronaves.

¹²⁸ <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2022-07-how-blue-condor-will-accelerate-airbus-first-hydrogen-powered-test-flights>

¹²⁹ <https://newatlas.com/aircraft/hypoint-gtl-lightweight-liquid-hydrogen-tank/>

¹³⁰ <https://www.eleconomista.es/energia/noticias/11769436/05/22/La-Fundacion-del-Hidrogeno-de-Aragon-y-H2-Clipper-firman-un-acuerdo-para-el-transporte-de-esta-tecnologia.html>

¹³¹ <https://heaven-fch-project.eu/about-us/>

Por último, todas estas innovaciones necesitarán un mantenimiento especializado y de servicios adaptados en el aeropuerto. Para evaluarlo, la compañía Lufthansa Technik, entidades de investigación y el aeropuerto de Hamburgo instalarán de forma experimental en un A320 depósitos de H₂, pilas de combustible y todos los sistemas necesarios para su repostaje¹³².

6.6.2. Pilas de combustible

Las pilas de hidrógeno parecen haber logrado una posición de ventaja en el uso temprano del hidrógeno para aviación, combinando las ventajas de peso del H₂ con las cero emisiones de la aviación eléctrica. Numerosos proyectos están en marcha para su aplicación, incluyendo ya ensayos en vuelo.

El tipo de pilas de combustible mejor adaptado para un uso aeronáutico es el de membrana de intercambio de protones (PEM), en sus variantes de baja (más maduro) y alta temperatura (en desarrollo, pero con mayor potencial)¹³³.

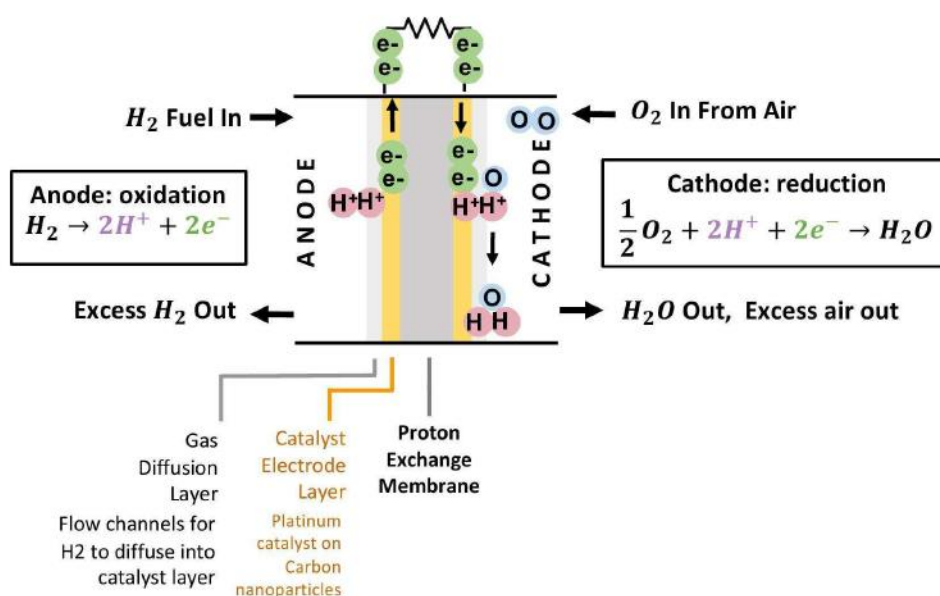


Figura 44. Funcionamiento de una pila de H₂ PEM [NASA]

Una de las compañías más activas durante 2022 en el campo de la aviación con pilas de hidrógeno fue ZeroAvia. Desde sus primeros ensayos en vuelo en un Piper M-class en 2020, su estrategia pasa por el desarrollo de trenes de propulsión completos para remotorizar aeronaves ya certificadas y de uso extendido entre las aerolíneas. El siguiente paso en este camino fue la remotorización de un Dornier 228 (19 pax.), cuyo primer vuelo se completó en

¹³² https://www.hibridosyelectricos.com/coches/lufthansa-reconvierte-airbus-a320-probar-hidrogeno-aviones_64199_102.html

¹³³ <https://leehamnews.com/2022/05/13/bjorns-corner-sustainable-air-transport-part-19-fuel-cell-propulsion-systems>

enero de 2023. Otros modelos seleccionados para acometer esta reconversión, y con acuerdos comerciales firmados, son el Caravan¹³⁴, la serie CRJ¹³⁵, Dash 8-400¹³⁶ y ATR 72¹³⁷.



Figura 45. Primer vuelo del Dornier 228 con un motor eléctrico alimentado por pilas de H2 [ZeroAvia]

Esta evolución llevaría a conseguir aeronaves de cero emisiones con capacidad para unos 80 pasajeros, lo que supone un salto cuantitativo muy importante. Para hacerlo posible, la compañía sigue desarrollando su propulsor ZA2000 con capacidad de más de 2 MW de potencia. Para completar estos avances, también cerró contratos para el suministro de pilas de hidrógeno avanzadas¹³⁸, el diseño de soluciones de repostaje de hidrógeno, tanto fijas como móviles¹³⁹, además de incorporar nuevos inversores¹⁴⁰.

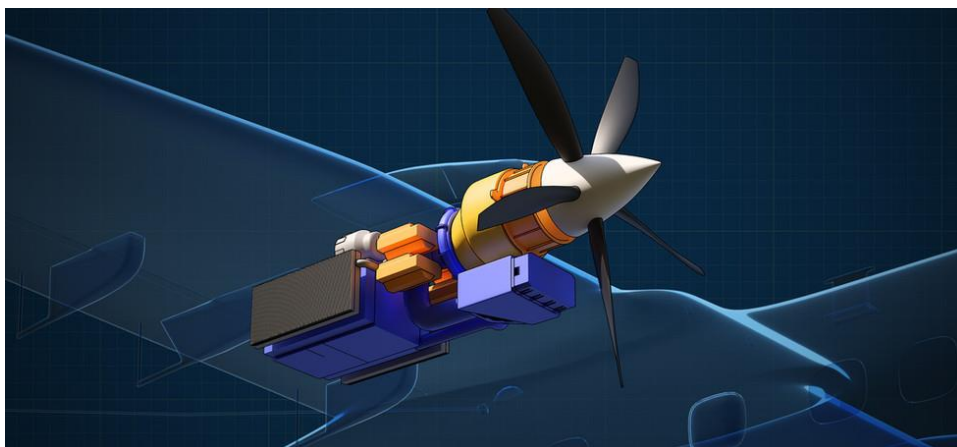


Figura 46. Integración de motor eléctrico con pilas de hidrógeno [ZeroAvia]

El otro gran protagonista en la aviación con pilas de hidrógeno durante 2022 fue Universal Hydrogen. Durante el pasado año puso a punto la remotorización parcial de un Dash 8-300 con capacidad para 40 pasajeros (el prototipo consiguió completar su primer vuelo en marzo de

¹³⁴ <https://www.zeroavia.com/news/textron-aviation-agreement>

¹³⁵ <https://actualidad aeroespacial.com/zeroavia-avanza-en-el-desarrollo-de-los-motores-electricos-de-hidrogeno-para-aviones-regionales/>

¹³⁶ <https://www.aviacionline.com/2021/12/de-havilland-canada-y-zeroavia-trabajaran-en-el-desarrollo-de-motores-sin-emisiones-para-los-aviones-dash-8-400>

¹³⁷ <https://www.aviacionline.com/2021/11/zeroavia-y-asl-airlines-colaboraran-para-propulsar-aviones-atr-72-de-carga-con-hidrogeno-y-electricidad/>

¹³⁸ <https://www.zeroavia.com/news/powercell-mou>

¹³⁹ <https://www.greenairnews.com/?p=2981>

¹⁴⁰ <https://www.zeroavia.com/united-airlines>

2023), además de realizar pruebas de su concepto de repostaje mediante contenedores en un ATR 72.



Figura 47. Prueba de repostaje mediante contenedores de hidrógeno [Universal Hydrogen]

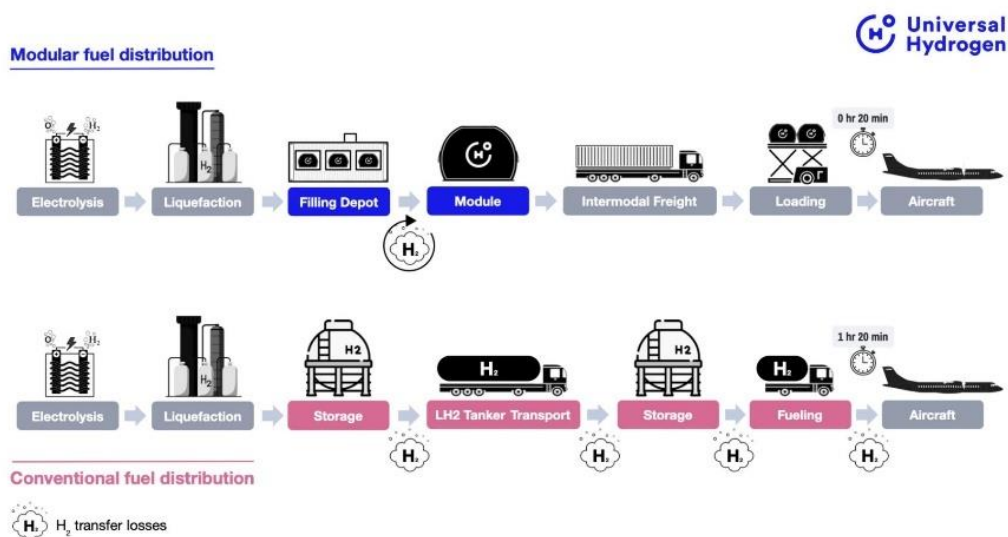


Figura 48. Comparativa entre sistemas de distribución convencional de H₂ y mediante contenedores [Universal Hydrogen]

Al igual que su competidora, Universal Hydrogen también sigue cerrando acuerdos para el desarrollo de su propulsor¹⁴¹, contratos con aerolíneas¹⁴² e inversores¹⁴³.

Otras compañías con similares programas en desarrollo son Deutsche Aircraft con el Dornier 328, o Cranfield Aerospace con el Britten-Norman Islander¹⁴⁴. Incluso grandes actores de la

¹⁴¹ <https://www.businesswire.com/news/home/20220315006284/en/Universal-Hydrogen-and-H3-Dynamics-Announce-Hydrogen-Aviation-Partnership>

¹⁴² <https://simpleflying.com/connect-airlines-atr-hydrogen-conversion/>

¹⁴³ <https://www.greenairnews.com/?p=3512>

¹⁴⁴ <https://www.futureflight.aero/news-article/2022-11-03/aircraft-finance-and-leasing-group-signs-cranfields-hydrogen-powered>

industria apuestan por desarrollar sus propios trenes de propulsión con pilas de H2 como GKN o MTU¹⁴⁵.



Figura 49. Pruebas en tierra de un propulsor eléctrico con pilas de H2 de 1 MW de potencia [Universal Hydrogen]

El programa ZEROe de Airbus, para la introducción de una aeronave propulsada por hidrógeno en 2035, también cuenta con una opción propulsada por pilas de combustible. Actualmente esta motorización se encuentra en desarrollo y será puesta a prueba en ensayos de vuelo planeados para 2026¹⁴⁶.



Figura 50. Ensayo en vuelo de la propulsión con pilas de H2 prevista para 2026 [Airbus]

6.6.3. Combustión directa

La propulsión por combustión de H2 tiene una larga historia en la aviación, incluidos ensayos en vuelo [1]. Desde este punto de vista, su aplicación en aeronaves actuales no supone un gran desafío desde el punto de vista de la propulsión, con motores turbofanés muy similares a los

¹⁴⁵ Flight International. Diciembre, 2021.

¹⁴⁶ <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2022-11-airbus-prepares-for-its-first-megawatt-class-hydrogen-fuel-cell-engine>

actuales. Frente a la opción de las pilas de hidrógeno, esto supone una ventaja ya que no tiene limitaciones de empuje, no depende del desarrollo de nuevos sistemas eléctricos de alta potencia, ni necesita disipar la gran energía térmica producida por las pilas de H₂¹⁴⁷. En la parte del debe se encuentran las incertidumbres medioambientales ya mencionadas respecto al NO_x y las estelas de condensación.

De nuevo Airbus, y su programa ZEROe, marcan el avance de esta tecnología para equipar la futura aviación sostenible. En febrero de 2022 anunció, de la mano de la constructora de motores CFM, el desarrollo y ensayo en vuelo de un turbofán de combustión de hidrógeno previsto para 2026¹⁴⁸. Junto con las ya mencionadas del propulsor con pilas de hidrógeno, estas pruebas de vuelo serán decisivas para que la empresa europea se decida por una de las tecnologías y diseños posibles para el futuro avión de pasajeros con hidrógeno de gran capacidad.

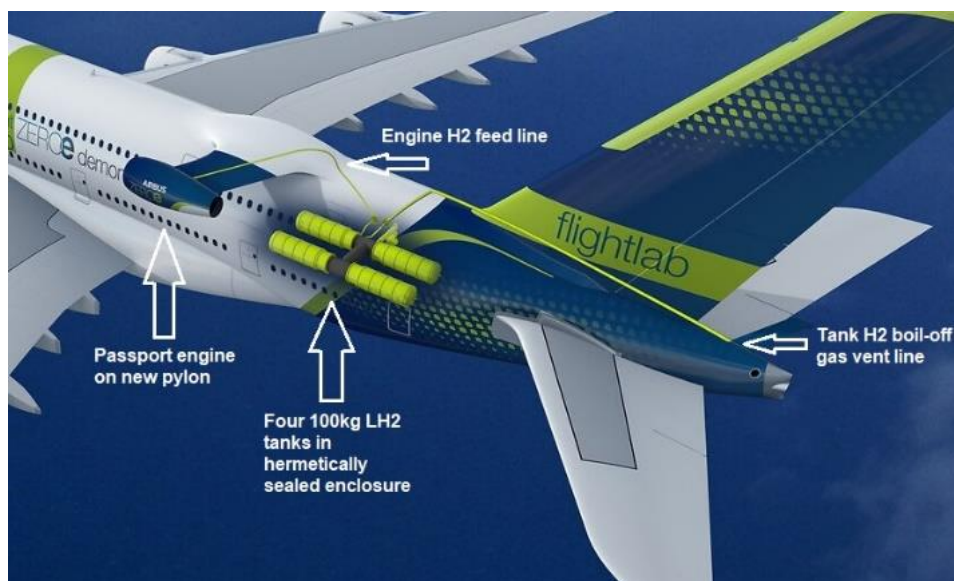


Figura 51. Ensayo en vuelo planeado del reactor de combustión de H₂ de CFM [Airbus]

Otra compañía que apuesta por las dos opciones propulsivas del hidrógeno es GKN, que lidera un proyecto para el desarrollo de tecnologías para turbofanés alimentados por H₂¹⁴⁹. Del mismo modo, Rolls-Royce también realiza progresos con la combustión de H₂. En noviembre de 2022, en colaboración con EasyJet, realizó un ensayo en tierra de su motor AE 2100 con este combustible¹⁵⁰.

A nivel de proyectos de investigación, entre otros, se podría destacar el proyecto LEAFINNOX de Clean Aviation. Su objetivo es desarrollar un nuevo proceso de combustión que reduce significativamente los óxidos de nitrógeno y las partículas sólidas emitidas. Los motores a reacción equipados con esta tecnología podrían usar tanto hidrógeno como SAF¹⁵¹.

Al otro lado del Atlántico también se investiga en este campo. A modo de ejemplo, el programa gubernamental ARPA-E financia el proyecto HySIITE de P&W, con un innovador sistema de combustión de hidrógeno con reinyección de agua que mejoraría su eficacia y reduciría

¹⁴⁷ Flight International. Marzo, 2022.

¹⁴⁸ <https://leehamnews.com/2022/02/22/airbus-and-cfm-reveal-zeroe-demonstrator-aircraft>

¹⁴⁹ <https://www.gknaerospace.com/en/newsroom/news-releases/2021/gkn-aerospace-leads-new-swedish-national-project-on-hydrogen-propulsion/>

¹⁵⁰ <https://www.greenairnews.com/?p=3656>

¹⁵¹ <https://clean-aviation.eu/media/news/a-new-100-hydrogen-combustor-for-aviation>

dramáticamente las emisiones de NOx. La entrada en servicio prevista de la versión final de este motor sería también en 2035¹⁵².

7. CONCLUSIONES

El camino hacia la aviación sostenible, tan necesaria en nuestro tiempo de emergencia climática, es sin duda irreversible, como demuestran los compromisos firmes alcanzados en 2022, tanto dentro de la industria como a nivel gubernamental e internacional.

Estos objetivos, con mayor o menor intensidad, se ven además plasmados en políticas y normativas que, junto a la concienciación de los pasajeros, hacen que ningún actor relevante del sector aeronáutico pueda permanecer al margen.

El año pasado se continuó con la avalancha de anuncios de proyectos y acuerdos de precompra de SAF. Sus vías de producción se siguen ampliando y consolidando, constatándose el salto industrial que era necesario para que esta solución cumpla el papel protagonista que se le presupone en la descarbonización de la aviación.

Junto al avance de tecnologías que reducen el impacto medioambiental, durante 2022 se realizaron grandes progresos en los proyectos de cero emisiones, tanto en la aviación eléctrica como en la propulsada por hidrógeno con pilas de combustible. Crece el número de compañías que están convirtiendo en realidad lo que solo hace unos años era tachado como ejercicios de marketing.

Por otra parte, se incorporaron al abanico de estrategias de descarbonización nuevas opciones como la captura directa de CO₂, aunque no se debe subestimar los desafíos técnicos y de certificación que afronta la compensación en todas sus variantes.

A modo de resumen, y siguiendo la tendencia de los últimos años, las estrategias para mitigar y eliminar las emisiones de las aeronaves no dejan de ampliarse y de avanzar en su introducción en la industria. Y esta realidad parece marcar las decisiones de muchos actores en el sector: diversificar sus planteamientos de sostenibilidad, tanto en base a su adecuación para diferentes segmentos, como por la madurez en su desarrollo.

Esto no significa que no quede muchísimo trabajo por realizar, sobre todo con el tráfico aéreo en plena recuperación tras la pandemia, pero sí que la aviación sostenible comienza a ser algo menos de promesa y mucho más de realidad.

¹⁵² <https://arpa-e.energy.gov/technologies/projects/hydrogen-steam-and-inter-cooled-turbine-engine-hysite>

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] O. Castro Álvarez y E. Martín Santana. *La sostenibilidad medioambiental en el sector aeronáutico*. COIAE, 2022.
- [2] Klöwer, M. et al 2021. *Quantifying aviation's contribution to global warming*. Environ. Res. Lett. 16 104027
- [3] *The U.S. national blueprint for transportation decarbonization*. DOE/EE-2674. January 2023. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-01/the-us-national-blueprint-for-transportation-decarbonization.pdf>
- [4] Eurocontrol. Objective Skygreen. Think Paper #16. *Reducing aviation emissions by 55% by 2030: Can it be done – and if so, what are the extra costs of decarbonisation measures?*. 10 May 2022. <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-think-paper-16-reducing-aviation-emissions-55-by-2030>
- [5] European Regions Airline Association. *Green and sustainable flying*. Second edition. November 2022.
- [6] OACI. *Informe de factibilidad de un objetivo ambicioso a largo plazo (LTAG) de reducción de las emisiones de CO2 de la aviación civil internacional*. Comité sobre la protección del medioambiente y la aviación (caep). Marzo, 2022.
- [7] ICCT Report. *Vision 2050: aligning aviation with the Paris agreement*. Junio, 2022. <https://theicct.org/publication/global-aviation-vision-2050-align-aviation-paris-jun22/>
- [8] IPCC 2022. *Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*
- [9] Comisión Europea. *Informe de la Comisión al Parlamento europeo y al Consejo relativo al funcionamiento del mercado europeo del carbono en 2021 en virtud del artículo 10, apartado 5, y del artículo 21, apartado 2, de la Directiva 2003/87/CE*. 14 de diciembre de 2022.
- [10] OXERA. *Short-haul flying and sustainable connectivity*. Marzo, 2022.
- [11] X. S. Zheng y D. Rutherford. *Aviation climate finance using a global frequent flying levy*. ICCT. Septiembre, 2022.
- [12] Eurocontrol. *Does taxing aviation really reduce emissions?* Aviation Sustainability Unit. Think Paper #7. Octubre de 2020.
- [13] R. Teoh, U. Schumann, A. Majumdar and M. E. J. Stettler. *Mitigating the Climate Forcing of Aircraft Contrails by Small-Scale Diversions and Technology Adoption*. Environmental Science & Technology 2020 54 (5), 2941-2950
- [14] Gobierno de EEUU. *SAF Grand Challenge Roadmap. Flight Plan for Sustainable Aviation Fuel*. Septiembre de 2022.
- [15] National Academies of Sciences. *Current Methods for Life Cycle Analyses of Low-Carbon Transportation Fuels in the United States*. The National Academies Press, 2022.
- [16] CE Delft. *Potential for reducing aviation non-CO2 emissions through cleaner jet fuel*. Febrero, 2022.
- [17] FlyZero. *Our vision for zero-carbon air travel. Realising zero-carbon emission comercial flight*. ATI, FZO-ALL-REP-0004. Marzo, 2022.

- [18] J. Mukhopadhaya y D. Rutherford. *Performance analysis of evolutionary hydrogen-powered aircraft*. ICCT. Enero, 2022.
- [19] Fuel Cells and Hydrogen 2 & Clean Sky 2. *Hydrogen-powered aviation: A fact-based study of hydrogen technology*. 2020.