



COIAE

La sostenibilidad medioambiental en el sector aeronáutico

ADENDA 2025



Informe del Colegio Oficial de Ingenieros
Aeronáuticos de España

Mayo 2026

Autores:

Óscar Castro Álvarez
Juan Sebastián Montero
Antonio Mota Sandoval
Javier Díaz Díez
Emilio Campos Álvarez
Encarna Martín Santana



Contenido

1.	PRÓLOGO	2
2.	LA AVIACIÓN SOSTENIBLE EN CONTEXTO	3
2.1.	INTRODUCCIÓN	3
2.2.	HACIA LA DESCARBONIZACIÓN	6
2.3.	MÁS ALLÁ DEL CO ₂	9
3.	ACCIONES, INNOVACIÓN Y TECNOLOGÍA	10
3.1.	COMPENSACIÓN DE EMISIONES Y MEDIDAS ECONÓMICAS.....	10
3.2.	NAVEGACIÓN, OPERACIONES, AEROPUERTOS Y RUIDO.....	14
3.3.	MEJORAS GRADUALES Y DE DISEÑO EN AERONAVES.....	18
3.4.	COMBUSTIBLES SOSTENIBLES	22
3.5.	AVIACIÓN ELÉCTRICA	25
3.6.	HIDRÓGENO	31
3.7.	BIBLIOGRAFÍA	35
3.8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36



1. PRÓLOGO

Continuando con la labor divulgativa iniciada en 2022, el Colegio Oficial de Ingenieros Aeronáuticos de España (COIAE) presenta esta nueva adenda con el objetivo de revisar el estado de la sostenibilidad medioambiental en la aviación comercial, recogiendo los acontecimientos y avances más relevantes producidos a lo largo de 2025.

Si los años anteriores estuvieron marcados por un notable optimismo en torno a los nuevos desarrollos tecnológicos, 2025 ha ofrecido una visión más pragmática de la transición energética del sector. A lo largo del año se ha producido un reajuste del mercado: diversas iniciativas vinculadas a la propulsión disruptiva, especialmente en los ámbitos del hidrógeno y de determinados proyectos de movilidad eléctrica, han experimentado retrasos significativos en sus calendarios o, en algunos casos, cancelaciones derivadas de dificultades de viabilidad técnica y financiera. Lejos de representar un retroceso, este escenario pone de manifiesto la verdadera magnitud y la complejidad técnico-económica que implica transformar una industria altamente regulada, intensiva en capital y sometida a exigentes requisitos de seguridad. A pesar de este necesario ejercicio de realismo frente a las previsiones iniciales, el compromiso del transporte aéreo con la meta de alcanzar las emisiones netas cero en 2050 permanece inalterable. Ante los retos de escalabilidad que presentan las tecnologías más disruptivas, los actores del sector están redirigiendo buena parte de sus recursos hacia soluciones con mayor viabilidad a corto y medio plazo.

En esta adenda se analiza cómo la innovación gradual en la eficiencia de las aeronaves y la optimización constante de las operaciones, tanto en vuelo como en el entorno aeroportuario, siguen constituyendo factores esenciales para contener el impacto ambiental derivado del crecimiento sostenido de la demanda de pasajeros. Al mismo tiempo, los combustibles sostenibles de aviación (SAF) consolidan su papel como herramienta prioritaria e indispensable durante esta década, aunque su adopción masiva y el necesario salto cualitativo hacia los combustibles sintéticos, o eSAF, continúan dependiendo de marcos de apoyo público más decididos que permitan cerrar la actual brecha de costes. Otro aspecto destacable del último año es la mayor madurez alcanzada en la comprensión de la huella ambiental de la aviación. El sector mira ya de forma decidida más allá del CO₂, situando en el centro de la agenda investigadora y regulatoria la mitigación de los efectos asociados a las estelas de condensación y a otros gases y emisiones no CO₂. Todo ello se produce en un contexto económico cada vez más exigente, marcado por la consolidación de sistemas como el EU ETS y CORSIA, así como por el intenso debate internacional sobre la aplicación de nuevas tasas medioambientales.

Con esta nueva actualización, el COIAE mantiene firme su objetivo de ofrecer a la sociedad y a los profesionales una herramienta de consulta rigurosa, técnica y veraz. Se trata de una radiografía actualizada que permite evaluar sin sesgos los avances reales que la industria aeronáutica está realizando en su largo, complejo e ineludible camino hacia la descarbonización.



2. LA AVIACIÓN SOSTENIBLE EN CONTEXTO

2.1. INTRODUCCIÓN

El progreso en las actuaciones medioambientales de la aviación comercial continúa con aeronaves cada vez más respetuosas, tanto en niveles de ruido como en las emisiones producidas. Este avance va de la mano con las normativas, cada vez más exigentes, del **Anexo 16 (Vol. I, II y III)** al Convenio sobre Aviación Civil Internacional (Convenio de Chicago). Así, en 2025 se celebró una nueva reunión del Comité para la Protección Medioambiental de la Aviación (CAEP) de la **OACI**ⁱ, donde se acordó una doble exigencia integrada con estándares actualizados de certificación de ruidoⁱⁱ y emisionesⁱⁱⁱ de aeronaves. Para los nuevos diseños de aeronaves, la norma **CAEP/13** exigirá una reducción del **10%** en emisión de CO₂ para las aeronaves más grandes a partir de 2032^{iv}.

En esta progresión desempeñan un papel fundamental las mejoras incrementales en la eficiencia de las aeronaves (ver secciones 3.2 y 3.3), un complemento indispensable del avance tecnológico disruptivo (ver secciones 3.5 y 3.6) y de los combustibles sostenibles (ver sección 3.4) en el camino hacia la descarbonización.



Ilustración 1. Propuesta de diseño del programa ZEROe de Airbus (Fuente Airbus)

Por otra parte, el año 2025 se inició con una serie de noticias en las que diferentes actores de la futura aviación sostenible anunciaban un retraso en sus planes de entrada en servicio de nuevas tecnologías, cuando no se trató directamente de cierres de proyectos^v. En la primera categoría entra el programa **ZEROe** de **Airbus**, con su propuesta de propulsión con hidrógeno, que cambia de década para situar su entrada en servicio a mediados de los 2040. Un caso similar es el modelo **EVO** de **ATR**, retrasado para reevaluar la motorización^{vi}.

En la categoría de los cancelados, o puestos en hibernación, en 2025 encontramos los proyectos eVTOL de **Lilium** y **Airbus NextGen**^{vii}, y el único desarrollo de avión regional 100% eléctrico que



haya alcanzado la fase de ensayos en vuelo: el **Eviation Alice**^{viii}. Además, **Textron**, la compañía matriz de la única aeronave eléctrica certificada (el **Velis Electro** de **Pipistrel**), anunció la disolución de su división de propulsión eléctrica^{ix}. Esta ola de malas noticias en la aviación sostenible también alcanzó a proyectos de investigación y desarrollo como el motor **WET** de **MTU**, pero uno de especial relevancia: el programa marco de nuevas tecnologías **X-66**, liderado por la **NASA** y **Boeing**^x. En este último caso se explica por el cambio de administración en EE. UU. y su rechazo a considerar cuestiones de sostenibilidad medioambiental.

A pesar de todo, al considerar el conjunto de la industria aeronáutica, se puede constatar que permanece el compromiso y el trabajo para descarbonizar la aviación comercial, aunque sea con enfoques renovados. **Airbus** lanzó en 2025 iniciativas de reducción de emisiones con proyectos de microhibridación^{xi}, y para la mitigación de las estelas de condensación. En la misma línea, Nueva Zelanda, tras abandonar su iniciativa de aviación con cero emisiones, lo ha reemplazado por diferentes proyectos para promocionar la aviación eléctrica y con hidrógeno, además de un programa de captura de CO₂^{xii}.

Los últimos datos de tráfico aéreo, correspondientes a 2024, confirman su continuo aumento y, de la mano, el de las emisiones en la aviación comercial, que recuperaron los niveles previos a la pandemia del COVID^{xiii} (ver Ilustración 5). Esta senda de crecimiento supone un elemento clave a considerar en cualquier estrategia de sostenibilidad en el sector^{xiv}. La gestión de la demanda se ha relacionado, a menudo, con la concienciación medioambiental de los viajeros, preocupación reflejada en las encuestas, aunque junto con la reticencia a asumir cualquier sobrecoste^{xv}. La introducción en la Unión Europea del sistema de etiquetado de emisiones en billetes de avión (**EU Flight Emissions Label**), inaugurado en 2025 por **Air France-KLM**, podría permitir la canalización de esta inquietud a la hora de elegir las alternativas más sostenibles^{xvi}.

Por otra parte, el sector sigue preocupado por una percepción sobredimensionada de la contribución de la aviación al efecto invernadero frente a otros sectores^{xvii} y, en particular, otros medios de transporte más contaminantes, como se aprecia en la Ilustración 2.

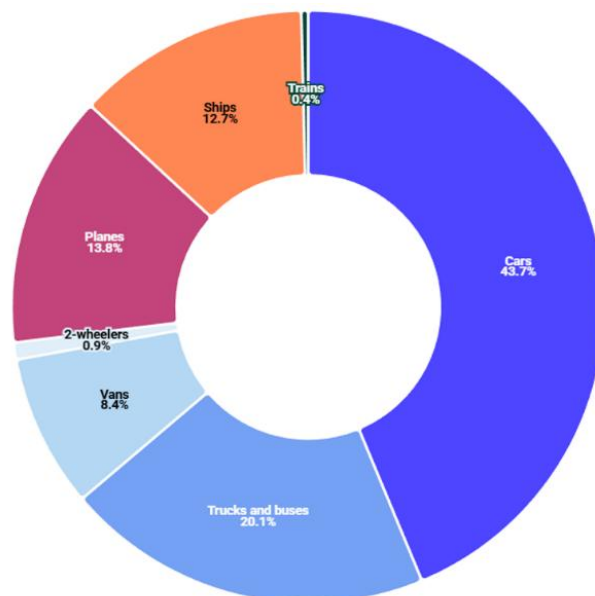


Ilustración 2. Desglose de las emisiones de CO₂ del sector del transporte en Europa en 2024 (Fuente: T&E)



En este ambiente de cambio y reanálisis se celebró en septiembre de 2025 la **42ª Asamblea** de la **OACI**, la organización de Naciones Unidas que gestiona la aviación civil internacional. En ella la delegación estadounidense se pronunció en contra de la asignación de recursos en iniciativas medioambientales y de sostenibilidad^{xviii} y, en particular, contra cualquier tipo de tasas sobre la aviación de negocios o clases premium dirigidas a financiar proyectos de descarbonización (ver 3.1.3 para más información sobre estas propuestas). Cabe destacar que, también el año pasado, EE. UU. se opuso con éxito a la aprobación de un acuerdo de limitación de emisiones en la organización equivalente del tráfico marítimo internacional (**OMI**)^{xix}.

El resultado final de la asamblea, por el contrario, mantuvo la unidad y el rumbo del sector hacia un futuro sostenible en la aviación internacional, sin cambiar los ambiciosos compromisos de medioambientales establecidos, y lanzando nuevas iniciativas como la plataforma **Finvest@ETAF**, que conectará inversores con proyectos de descarbonización y producción de combustible sostenible de aviación (**SAF**)^{xx}.

En resumen, en un año de incertidumbre, se puede concluir que la voluntad y compromiso de la aviación comercial con un futuro sostenible se mantiene a pesar de todo. La magnitud de la transformación y los proyectos en marcha parecen aguantar el pulso de un contexto geopolítico claramente desfavorable, aunque ello implique adaptarse a soluciones menos disruptivas, pero más pragmáticas, y con beneficios medioambientales a corto plazo. Sirva de ejemplo el continuo incremento en el volumen de negocio del reciclado de las grandes aeronaves antiguas, con diseños mucho menos eficientes en cuanto a emisiones (Ilustración 3), superando ya las 600 unidades anuales según la *Aircraft Fleet Recycling Association*.



Ilustración 3. Reciclaje de aeronave comercial (Fuente: Air Salvage International)



2.2. HACIA LA DESCARBONIZACIÓN

Tras un período de relativo consenso, durante 2025 se pudo constatar la vuelta del debate sobre cuál es la estrategia más eficiente para alcanzar el objetivo de cero emisiones netas para 2050. Las dificultades prácticas a la hora de hacer la realidad las promesas de algunas tecnologías de propulsión disruptivas podrían respaldar un enfoque mayor en las mejoras incrementales^{xxi}, la expansión del SAF y la eliminación del impacto de otras emisiones más allá del dióxido de carbono^{xxii}. Si bien es cierto que, junto a esta reorientación hacia logros más asequibles en el corto y medio plazo, también han surgido voces que pedían revisar los ambiciosos objetivos de reducción de emisiones^{xxiii}.

El propio combustible sostenible de aviación, una herramienta fundamental en prácticamente todas las rutas de descarbonización propuestas, tampoco se ha librado de ver en tela de juicio sus credenciales medioambientales y de viabilidad práctica^{xxiv}. Sin duda no se debería rehuir el debate basado en hechos sólidos y datos contrastados, ya que ello contribuirá a seguir siempre una estrategia optimizada y anclada en la realidad. La urgencia de la crisis climática, y la valentía necesaria para abordarla, no pueden estar nunca en conflicto con un análisis profundo a la hora de elegir el mejor camino hacia la aviación sostenible.

Uno de los aspectos más cuestionados en el camino hacia una aviación sin emisiones netas de CO₂ es la viabilidad económica. El valor total de este proceso es difícil de estimar, pero se manejan cifras que lo sitúan por debajo de lo que costó el desarrollo de las energías solar y eólica, y durante un plazo de inversión más prolongado^{xxv}. Una de las vías de financiación que se sugieren para cubrir este presupuesto es la eliminación de las exenciones de impuestos sobre el combustible de aviación de origen fósil.

El impacto económico de las medidas de mejora medioambiental en aviación también se analiza desde el punto de vista de las aerolíneas, con estudios que ponen en duda el modelo de negocio de algunas de ellas, en particular las *Low Cost*, ante la introducción en 2025 de normativa europea como la del mandato de uso de SAF^{xxvi}. A pesar de la mayor concienciación en general, como ya vimos con anterioridad, la subida de los billetes podría no ser aceptable para una parte importante de los potenciales pasajeros.

En este punto, resulta conveniente recordar la composición del impacto medioambiental de la aviación desglosado por tipo de emisiones, aeronave y distancia del vuelo, como se muestra en la Ilustración 4 en base a datos europeos. Como se puede apreciar, las grandes aeronaves comerciales son responsables de más del **96%** de las emisiones de CO₂, dividiéndose casi a partes iguales entre los segmentos de pasillo único y las de doble. En gran medida este reparto encaja también con la de vuelos intraeuropeos e intercontinentales, y explica la relativa reorientación, ya mencionada, de los esfuerzos de descarbonización hacia la introducción del SAF y la mejora de eficiencia del grueso del transporte aéreo, en detrimento de soluciones tecnológicas disruptivas que se verían limitadas, por el momento, a segmentos marginales.



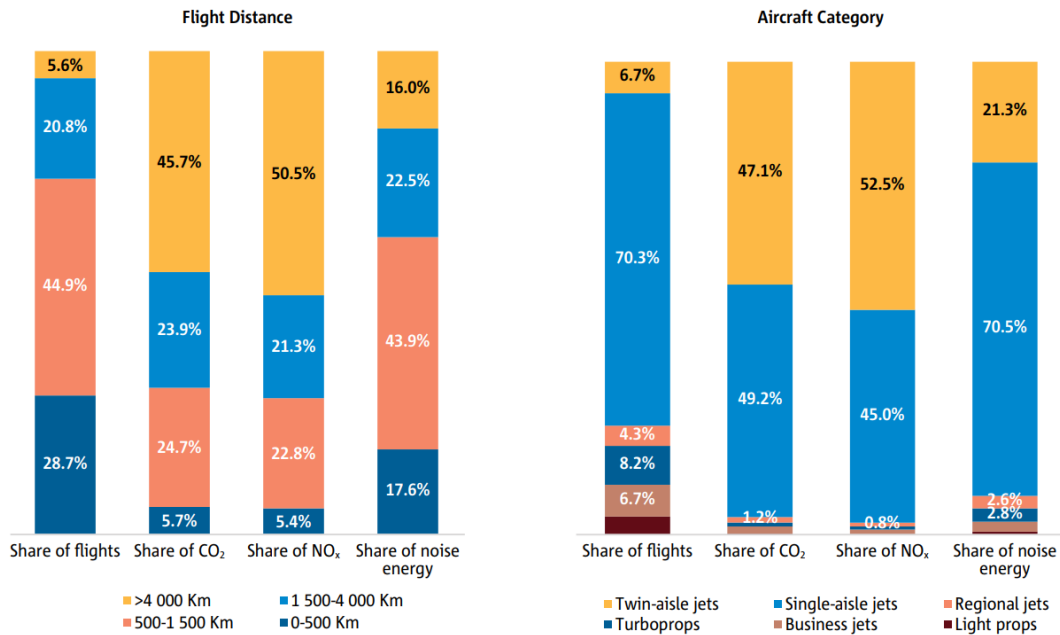


Ilustración 4. Desglose de emisiones de la aviación europea en 2023 (Fuente: EASA [4])

Esta visión del camino para alcanzar el compromiso de emisiones netas cero de CO₂ de la aviación europea para 2050 se refleja en las estimaciones actualizadas del peso de las diferentes soluciones de descarbonización [5]. En la Ilustración 5 se puede apreciar este papel destacado de las mejoras en eficiencia y la introducción del SAF, así como el de las medidas económicas, tanto de forma directa (por ejemplo, mediante el sistema de gestión de emisiones EU ETS), como indirecta a través de la contención de la demanda.

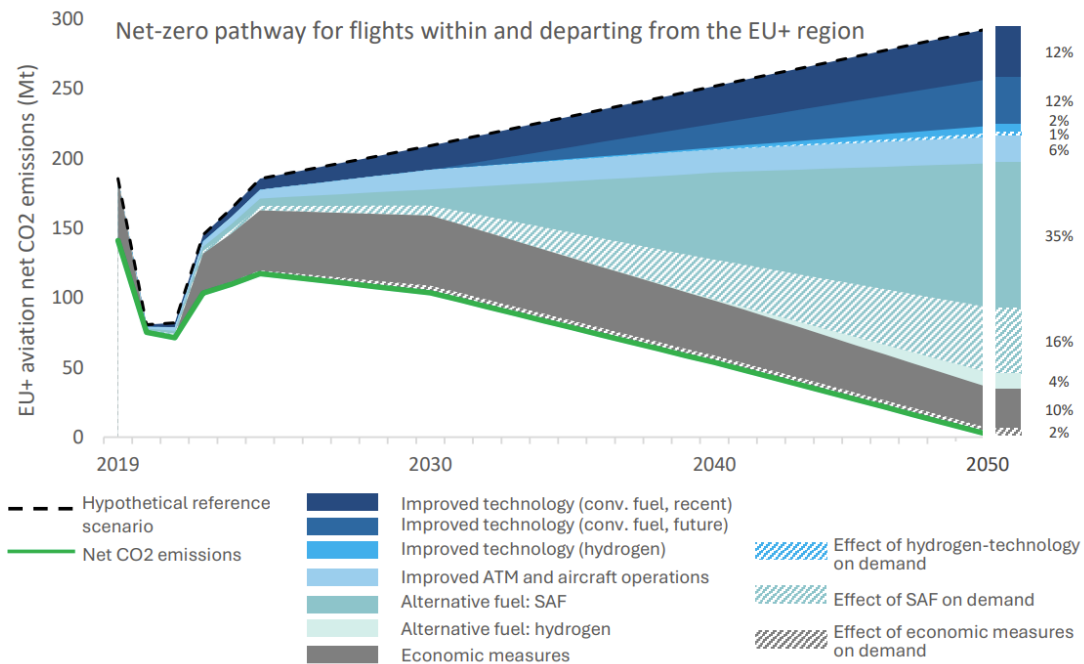


Ilustración 5. Hoja de ruta hacia el objetivo de neutralidad en CO₂ para 2050 (Fuente: Destination 2050 [5])



En enero de 2025 se publicó la 4ª edición del **Informe Ambiental de la Aviación Europea** (EAER) elaborado por la Agencia de Seguridad Aérea de la Unión Europea (EASA) con el apoyo de la Comisión Europea, la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) y EUROCONTROL que analiza los avances en la reducción de ruido y emisiones acordados a nivel de la Unión Europea y la OACI (con datos hasta 2023) en todas las áreas que influyen en los mismos [4]. El informe repasa los retos del sector, el camino a seguir en estas áreas, los últimos conocimientos científicos para mitigar el ruido y las emisiones, así como proyecciones a futuro del tráfico aéreo y su impacto ambiental. EASA también publicó en 2025 la 14.ª edición del Plan Europeo de Seguridad en la Aviación (EPAS) estableciendo la hoja de ruta estratégica para la seguridad aérea y la protección ambiental en Europa^{xxvii}.

Por otra parte, pensando en el medio y largo plazo, continúa el trabajo de investigación y desarrollo de las tecnologías que revolucionen la aviación comercial, con potencial para eliminar las emisiones de efecto invernadero. En ese terreno, la **Unión Europea**, frente al cambio de rumbo ya mencionado en EE. UU., continúa apoyando esta vía con el programa **Clean Aviation**, que en 2025 resolvió los 12 proyectos seleccionados para su tercera fase, y que movilizarán un total de **945 M€**, de los que aproximadamente un tercio son fondos públicos europeos^{xxviii}.

Además, también a finales del año pasado se lanzó la cuarta fase^{xxix}, todavía abierta a propuestas, en un esfuerzo continuado por conseguir un salto cualitativo de reducción de emisiones (**30%** respecto a niveles de 2020), incluida la aviación propulsada con hidrógeno. El esfuerzo europeo en I+D para promover un transporte medioambientalmente sostenible se concreta en proyectos como el **Path2Zero**^{xxx}, con el que colaboramos desde el Comité de Sostenibilidad del **COIAE**.

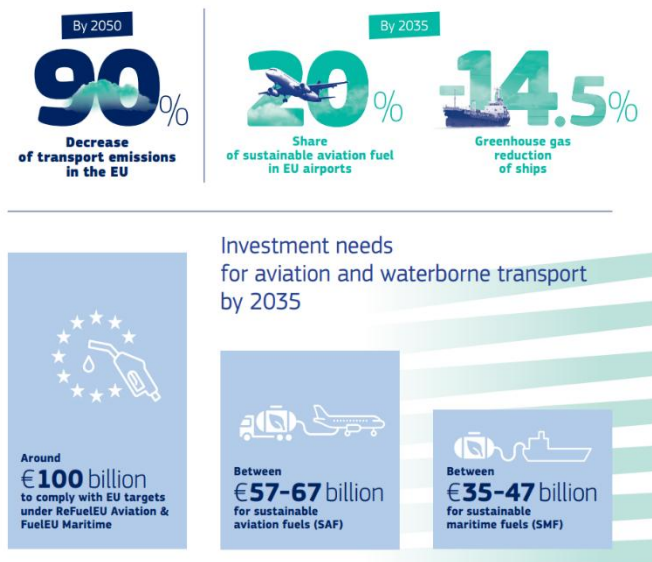


Ilustración 6. Principales hitos del Plan de Inversiones en Transporte Sostenible de (Fuente: CE)

Este contraste entre ambas orillas del Atlántico queda aún más claro con el lanzamiento por parte de la Comisión Europea del **Plan de Inversiones en Transporte Sostenible (STIP)**^{xxxi}, a finales del año pasado. El objetivo es acelerar la transición energética de la aviación y el transporte marítimo, avanzando en su descarbonización, para lo que se espera movilizar **2.900 M€**. Entre las medidas más destacadas se encuentra la puesta en marcha de mecanismos públicos para intermediar en los contratos de **eSAF**, aportando confianza para las inversiones en producción (*double-sided auctions*). Esta

versión sintética del combustible sostenible de aviación, que no depende de biomasa para su elaboración, no parecía avanzar adecuadamente hacia las cuotas señaladas dentro del mandato **RefuelEU**. La producción de otros combustibles sostenibles, incluido el hidrógeno verde, también se verá beneficiada. Esta estrategia se completa con medidas que incluyen la promoción de la innovación tecnológica, y la iniciativa para reforzar el mercado de emisiones **EU ETS**.



2.3. MÁS ALLÁ DEL CO₂

Durante los últimos años se ha avanzado, de manera clara, hacia la comprensión del impacto medioambiental de la aviación más allá de las emisiones de dióxido de carbono. Los efectos de las estelas de condensación, los óxidos de nitrógeno (NO_x) y otras emisiones se están incluyendo al fin en las evaluaciones de sostenibilidad en el transporte aéreo. En este sentido, nuevas herramientas de uso abierto incluyen estos elementos, como al **Travel Impact Model** de Google^{xxxii}, o el **ATP-DEC** de la Universidad de Surrey^{xxxiii}, proporcionando una información más precisa y completa para pasajeros, aerolíneas e incluso organismos regulatorios.

Por otra parte, esto no significa que no se siga investigando interacciones todavía no bien modelizadas, como la de las partículas materiales en suspensión con cirros de origen natural^{xxxiv}, o la formación de las propias estelas de condensación (*contrails*) en aeronaves propulsadas con SAF, incluyendo mediciones en vuelo como en los proyectos **A4Climate**^{xxxv}, de ámbito europeo, o **Crystal**, una colaboración de **Airbus** con entidades canadienses lanzado en 2025^{xxxvi}.

De hecho, el constructor europeo anunció también el año pasado el proyecto **PACIFIC**, una investigación similar de la mano del fabricante de motores **Rolls&Royce**, para evaluar el potencial del combustible sostenible de aviación en la mitigación de la formación de *contrails*^{xxxvii}, que podría situarse alrededor del **25%**^{xxxviii}.

Otra de las vías identificadas para resolver el impacto climático de las estelas de condensación es la del desvío de trayectorias (*avoidance*) para evitar las zonas atmosféricas de supersaturación en hielo (**ISSR**), clave en su formación. Diversos estudios^{xxxix} y pruebas de gestión de tráfico real^{xl} avalan esta estrategia, en la que el consumo de combustible adicional debido al cambio de ruta se ve compensado ampliamente, en términos medioambientales, por la reducción de *contrails*. De hecho, esta es una de las acciones con mayor potencial para reducir, de manera significativa y a corto plazo, la contribución de la aviación al calentamiento global^{xli}. Así, en un ensayo realizado con vuelos de la ruta París-Valladolid, el beneficio medioambiental del desvío de la ruta directo se cifró en hasta un 40%^{xlii}.

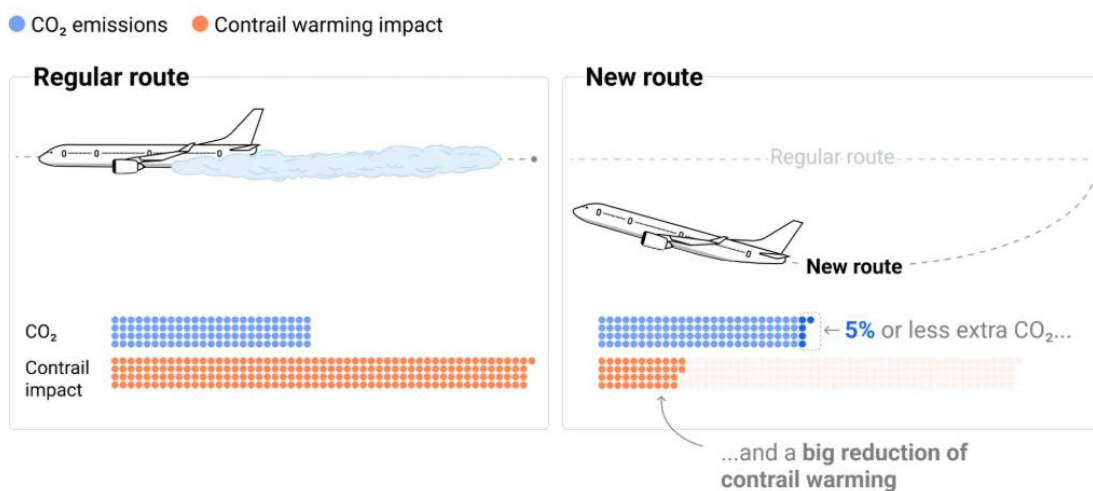


Ilustración 7. Evaluación de estrategia de desvío de rutas para mitigar las estelas de condensación. (Fuente: T&E)



También el Reino Unido, a través de su agencia **ATI**, anunció en noviembre de 2025 los primeros proyectos en ser financiados mediante su **Non-CO2 Programme**^{xliii}, lo que demuestra el creciente interés en este problema.

De hecho, en lo que supuso un gran hito a nivel europeo, también en 2025 entró en vigor la obligación de seguimiento, notificación y verificación (**MRV**) de los efectos Non-CO₂ en la aviación intracomunitaria^{xliiv}, para lo que se proporcionó a las aerolíneas la herramienta **NEATS**. Este es un paso fundamental para la futura inclusión de este tipo de emisiones dentro del paraguas del sistema **ETS**.

3. ACCIONES, INNOVACIÓN Y TECNOLOGÍA

3.1. COMPENSACIÓN DE EMISIONES Y MEDIDAS ECONÓMICAS

3.1.1. Compensación

Durante el último año, y frente las dudas que suscitan otras vías más consolidadas^{xliv}, se constató el aumento de interés sobre las medidas de compensación de emisiones basadas en la captura de CO₂. No en vano, durante la **COP30**^{xlvi} se presentó el primer registro global de instalaciones de almacenaje de dióxido de carbono^{xlvii}. A pesar de la innegable promesa que representa como herramienta de compensación, no se puede obviar que muchos de estos proyectos utilizan la inyección de CO₂ bajo tierra para facilitar la extracción de petróleo, lo que degradaría su saldo neto de emisiones de carbono.

En cualquier caso, los beneficios medioambientales del **CCS** (*carbon capture and storage*) se pueden desarrollar en paralelo con el resto de las estrategias de descarbonización^{xlviii}. La investigación para el reciclado de CO₂ en combustible continúa, con la aparición de nuevas vías tecnológicas, algunas de ellas desarrolladas en España^{xlix}.

3.1.2. CORSIA y EU ETS

2025 fue un año de transición en la evolución de los dos principales esquemas de compensación de emisiones de aviación. Por un lado, **EU ETS**, el sistema *cap and trade* europeo, continuó en su reducción de los permisos de emisión gratuitos a las aerolíneas, con el incremento de coste asociado, y que se eliminarán completamente en 2026.

Por otro, el mecanismo de *offsetting* **CORSIA** (recogido en el Anexo 16 Vol. IV de Convenio de Chicago), que cubre las emisiones en vuelos internacionales bajo la supervisión de la **OACI**, avanzó en su implementación con la recopilación de los datos referentes al primer año de su primera fase (2024-2026), en el que ya participan la mayoría de los países del mundo, aunque con algunas ausencias significativas (ver Ilustración 8). Este es un hito fundamental, ya que confirmó la funcionalidad del sistema de monitorización, comunicación y verificación de emisiones (**MRV**), así como el Registro Central de Emisiones de CORSIA (**CCR**).



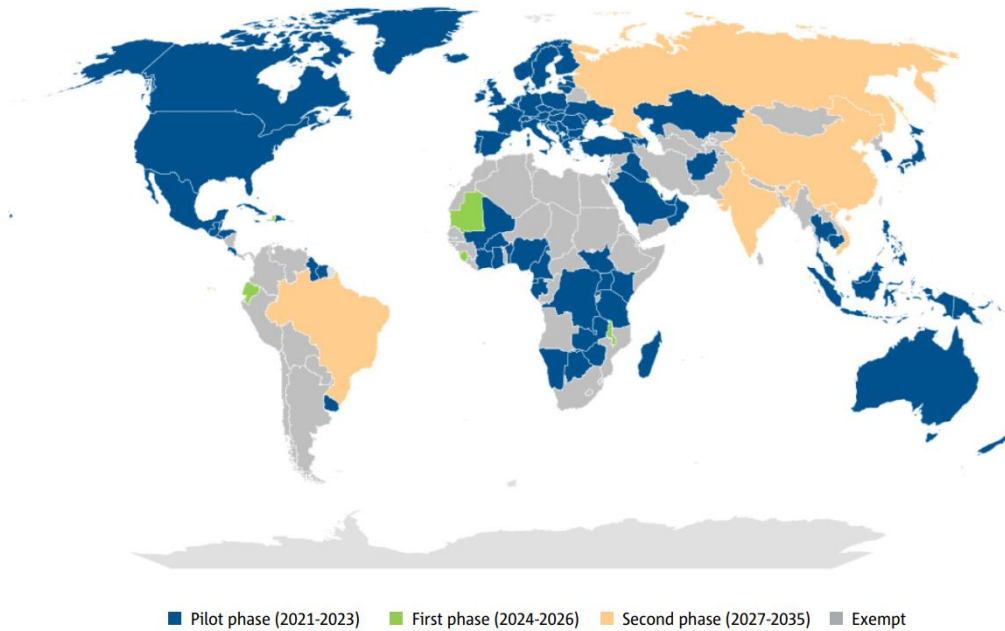


Ilustración 8. países participantes en el sistema de compensación de emisiones CORSIA. (Fuente: EASA)

En 2025, 128 países comunicaron de forma voluntaria sus emisiones correspondientes a 2024, que superaron en un **15%** el umbral establecido de **361 Mt CO₂** (85% de las emisiones registradas en 2019, ver [2]), y que son las primeras que deberán empezar a ser compensadas dentro del sistema **CORSIA** a partir de finales de 2027ⁱ. De forma anual, OACI y los países participantes comunicarán a las aerolíneas sus obligaciones de compensación en base a los datos recibidos. La Organización Internacional de Transporte Aéreo (**IATA**) estima que el coste de esta primera fase de compensaciones superará los **4.000 millones de dólares**ⁱⁱ. A pesar de esta estimación, y en lo que concierne a las emisiones de la aviación europea, la exigencia del sistema EU ETS supera con creces a CORSIA, estimándose que se cubriría un volumen de emisiones siete veces mayor si se hubiese aplicado a los vuelos extracomunitarios en vez de la normativa de OACIⁱⁱⁱ.

Esta comparativa cobra aún más importancia ya que se produce a las puertas de la revisión del acuerdo transitorio que coordina la aplicación de EU ETS y CORSIA en Europa (decisiones *stop-the-clock* y *clear-cut*) en julio de 2026. Cabe recordar que, bajo este marco, las emisiones intraeuropeas permanecen sujetas únicamente a EU ETS, mientras que los vuelos que salgan del espacio europeo deben cumplir con los requerimientos CORSIA.

Numerosas voces reclaman más ambición medioambiental para extender el innegable éxito de la normativa europea a todos los vuelos que despeguen de suelo comunitario, sea cual sea su destino. La recaudación de EU ETS permanece en el espacio económico europeo y sirve para financiar políticas de descarbonización, promoción de la energía renovable y adaptación al cambio climático. En el otro lado de la balanza, hay que considerar la mayor carga económica que supondría para las aerolíneas, además de que pondría a la EU en una ruta de colisión con OACI, y en especial con algunos de sus países miembros, en particular EEUU^{liii}.

Por otra parte, se ha identificado una preocupante falta de créditos de emisiones admisibles (*Eligible Emission Units, EEU*) dentro de CORSIA^{liv}, lo que podría poner en riesgo la viabilidad del sistema. Las **EEU**, en unidades de una tonelada de dióxido de carbono, se generan con proyectos



de descarbonización convenientemente certificados, y su adquisición por parte de las aerolíneas permite compensar las emisiones de aviación. La falta de oferta podría disparar su cotización, que según algunos analistas podría alcanzar hasta los **50 dólares**, recortando significativamente los beneficios de las compañías ya en 2026^{lv}. Los mecanismos *cap-and-trade* como EU ETS funcionan de forma diferente, poniendo un límite total, distribuido entre los diferentes sectores industriales incluidos en el sistema (industria y generación eléctrica, aviación y transporte marítimo). Se establece entonces un mercado interno con subastas en las que las compañías adquieren los derechos de emisiones necesarios.

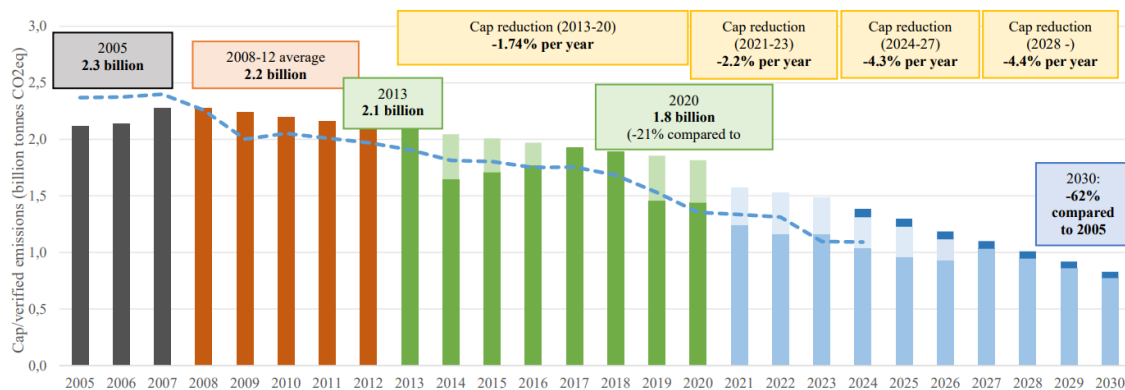


Ilustración 9. EU ETS. Límite total (barras) frente a emisiones verificadas (línea). Cambios debido a la progresiva reducción del total, pero también por la inclusión de nuevos sectores (p. ej. transporte marítimo en 2024) ([6])

El precio de estos emisiones ofertados por el sistema (ver Ilustración 10), resulta también un aspecto clave a la hora de motivar a la descarbonización de las empresas, pero sin provocar una excesiva carga económica. Para ello se establecen mecanismos de estabilidad, que inyectan o retiran créditos según sea necesario.

Si, como ya se ha señalado, la medida transitoria de proveer un número de créditos de emisión gratuitos a la aviación ya está llegando a su fin, **EU ETS** comenzó en 2025 a promocionar el uso de **SAF**^{lv}. En total se han reservado 20 millones de unidades para subvencionar la compra de combustible sostenible por parte de las aerolíneas.

Mediante este mecanismo se cubrirá al menos el **50%** del coste, llegando al **70%** para los biocombustibles avanzados, y hasta el **95%** en el caso del e-SAF. Esta iniciativa pone de relieve tanto la flexibilidad y capacidad del sistema EU ETS, como el desafío económico que supone introducir los combustibles sostenibles en el transporte aéreo.



Global ETS prices

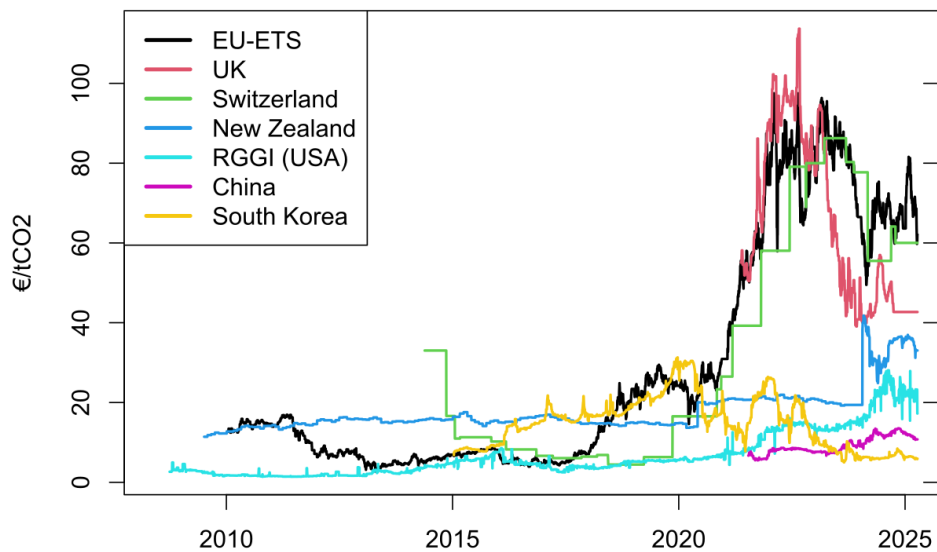


Ilustración 10. Evolución de precios en diferentes mercados de emisiones. (Fuente: Wikipedia)

3.1.3. Medidas políticas y gestión de demanda

El combustible de aviación ha estado tradicionalmente libre de impuestos en lo que supone de hecho, como se argumenta desde ciertos sectores, un subsidio encubierto al compararse con otros medios de transporte. Más aún, la necesidad de recabar fondos para financiar la transición hacia una aviación sostenible ha puesto el foco en diferentes posibilidades para abordar esta reforma [13]. Entre otros organismos, el propio **Fondo Monetario internacional** ha sugerido implementar un sistema de imposición efectivo, por ejemplo, mediante las emisiones, que ayude a esta transformación. Ni que decir tiene, propuestas de este cariz han encontrado fuertes reticencias dentro de ciertos miembros de **OACI**^{lvii}.

Una de las propuestas que generó más revuelo en 2025 fue la **Global Solidarity Levies Task Force**^{lviii}, presentada en Sevilla en junio del año pasado, y respaldada por países como España y Francia^{lix}. Bajo el principio de que “quien más contamina, debe pagar más”, propone impuestos para clases preferentes y la aviación privada. Estos sectores de la aviación comercial contribuyen proporcionalmente muy por encima de la media a las emisiones contaminantes, lo que justificaría esta penalización.

De fondo, además, se encuentra el debate sobre la gestión de la demanda, aunque no hay evidencia de que las tasas a la aviación impacten significativamente en el volumen de tráfico aéreo de pasajeros^{lx}. En este ámbito, durante 2025 prosiguió el debate y las iniciativas sobre la prohibición de vuelos domésticos con alternativa ferroviaria rápida, cuya efectividad medioambiental fue cuestionada aquí con anterioridad [3]. De hecho, el anteproyecto de **Ley de Consumo Sostenible** en España incluye esta posibilidad^{lxi}, respaldada de forma entusiasta por organizaciones ecologistas^{lxii}. También se ha puesto en cuestión recientemente uno de los principales argumentos para continuar con la expansión del tráfico aéreo: el aumento del volumen de pasajeros en una región no genera directamente crecimiento económico^{lxiii}.



3.2. NAVEGACIÓN, OPERACIONES, AEROPUERTOS Y RUIDO

3.2.1. Navegación y operaciones

La mejora continua en la eficiencia energética durante las operaciones de las aeronaves, ya sean durante el vuelo, en las fases de despegue, aproximación y aterrizaje, o en la fase de rodadura en o ya en el aeropuerto, ha contribuido de manera decisiva a contener el nivel de emisiones e impacto climático de la aviación en un contexto de crecimiento continuo del tráfico aéreo. El **Observatorio de Seguridad, Eficiencia y Sostenibilidad de las Operaciones Aéreas**, constituido por el gestor estatal de la navegación aérea en España (ENAIRE) junto con el Colegio de Pilotos de la Aviación Comercial (COPAC) y la Asociación Profesional de Controladores de Tránsito Aéreo (APROCTA), constató una reducción media de 120 kg de emisiones de CO₂ por vuelo en los seis primeros meses de 2025^{lxiv}. Este dato supone una disminución total de 356 toneladas de emisiones en este periodo, debido a la incorporación progresiva de nuevos procedimientos de vuelo, y las buenas prácticas profesionales de pilotos y controladores, que han contribuido a la mejora de la eficiencia y sostenibilidad de los vuelos.

Así también lo corrobora un informe publicado en 2025 por la compañía de análisis en aviación **Cirium**^{lxv}. En concreto los datos muestran una mejora del **7,4%** en la eficiencia de consumo de combustible por kilómetro y asiento en los últimos 6 años. Este dato es el resultado de comparar los picos de emisiones en 2019 y 2025, cuando se batió el récord diario debido a la aviación comercial (Ilustración 11). Por último, señalar que la intensidad de carbono media reflejada se compara muy positivamente respecto al transporte por carretera [1].

Date	CO ₂ Emissions (mt)	Flights	Avg. Flight Distance (km)	Avg. Air Min.	Avg. Flt. Weighted AC Age (yrs)	Avg. Seats	ASK (m)	CO ₂ /ASK (g)
02-Aug-19	2.520	99,327	1,579	136	9.9	167	31,825	79.2
18-Jul-25	2.523	103,009	1,626	138	11.6	175	34,420	73.3
% Diff	+0.1%	+3.7%	+3.0%	+1.3%	+16.7%	+4.4%	+8.2%	-7.4%

Ilustración 11. Comparativa entre picos de emisiones de aviación e intensidad de CO₂ en 2019 y 2025. (Fuente: Cirium)

Esta mayor eficiencia en el transporte aéreo se cimienta en gran medida en la renovación de las flotas, pero también en otros factores como la expansión de sistemas informáticos que ayudan a monitorizar y optimizar las operaciones de las aeronaves.

Del lado de los aeropuertos también se están introduciendo herramientas de este tipo, como la presentada el año pasado por el grupo suizo **Assaia**, y que será instalada de forma inicial en el aeropuerto de Copenhague^{lxvi}. Este sistema, basado en cámaras e IA, recogerá el uso real de las APU en aeronaves en tierra, proporcionando potencia eléctrica en cabina. Con los datos recabados se podrán implementar mejoras y modificaciones de los protocolos, con el fin de mejorar el acceso a tomas de energía y reducir las emisiones.



En el viejo continente no se puede dejar de mencionar en este ámbito el camino lento, pero constante, hacia la integración del cielo único europeo. Además de la continuidad de la financiación para programas de mejora en la gestión aérea, el consorcio **SESAR** publicó su **Hoja de ruta 2025** para guiar la organización del tráfico de aeronaves hacia el **Cielo Digital Europeo**, con un amplio respaldo de la industria^{lxvii}.

En octubre, la Junta de Revisión del Desempeño (PRB) del **Cielo Único Europeo** (SES) publicó su Informe Anual de Seguimiento de 2024^{lxviii}, en el que se analiza el desempeño de los servicios de navegación aérea del SES en comparación con los objetivos revisados tras la pandemia de COVID-19, y las restricciones de tráfico que afectaron gravemente a la aviación europea y mundial.

En lo que respecta a España, en septiembre se adoptó el Plan de Rendimiento de España para el cuarto periodo de referencia 2025-2029 (ESPP4) elaborado por AESA^{lxix}. Tras una evaluación del proyecto de este plan por parte de la Comisión Europea, se incorporan las actualizaciones del mismo para dar cumplimiento de forma completa a los requisitos establecidos en el Reglamento de aplicación, incluyendo la evaluación del rendimiento y de tarificación en el cielo único.

3.2.2. Aeropuertos

Las instalaciones de torres digitales remotas están revolucionando las operaciones de control del tráfico aéreo, mejorando la eficiencia operativa, la seguridad y la flexibilidad de los ANSP^{lxx}, la gestión del tráfico aéreo y reduciendo las emisiones de carbono. Esto se consigue ya que permiten prestar el servicio de control de aeródromos de uno o varios aeropuertos, pero desde una ubicación remota, como el caso de la torre remota digital en el aeropuerto de Budapest o el centro de torres remotas, ubicado en Bodo, Noruega^{lxxi}.

El Aeropuerto de Helsinki, en Finlandia, y el Aeropuerto Internacional Rajiv Gandhi, en India, obtuvieron el nivel 5, el más alto, del Programa ACA^{lxxii}. Esto indica que ambos lograron reducir más del 90% de sus emisiones directas (Alcance 1 y 2). A nivel nacional, tres aeropuertos españoles de Aena han alcanzado en nivel 4 tras la última evaluación a la que se han sometido los nueve que ya participaban en este programa. Estos fueron los de Barcelona-El Prat, Madrid-Barajas, y Palma de Mallorca-Son San Juan. Los otros siete han mantenido su anterior nivel^{lxxiii}.

Finalmente, entre la multitud de iniciativas para mejorar la sostenibilidad a nivel aeroportuario, cabe destacar por su originalidad la de la empresa **Catalsys**, proponiendo el suministro de amoníaco verde como vector energético. Este compuesto, fácilmente transportable, se descompondría después parcialmente en hidrógeno, y la mezcla se utilizaría en generadores eléctricos. Mirando a largo plazo, este sistema podría servir incluso para el repostaje de aeronaves^{lxxiv}.

3.2.3. Ruido

En 2025 OACI publicó la recomendación de nuevas normas **CAEP/13** ya mencionadas. Para aeronaves subsónicas, a partir del 1 de enero de 2029 las normas propuestas en el nuevo Capítulo 16 exigirán un margen adicional de 6 decibelios de ruido percibido efectivo (EPNdB) para las más grandes aeronaves y 2 EPNdB para las pequeñas, en comparación con las normas actuales del Capítulo 14. Las futuras aeronaves supersónicas deberán cumplir con límites de ruido equivalentes a los del Capítulo 14 a partir de 2029. Ambos conjuntos de normas serán



aplicados por los gobiernos nacionales como requisitos de aeronavegabilidad únicamente para las nuevas certificaciones de tipo^{lxv}. En cualquier caso, cabe destacar la continua mejora en las prestaciones de ruido con las sucesivas normativas OACI (Anexo 16 Vol. I) según muestra la Ilustración 12. Conviene recordar que las principales fuentes de ruido en aviación provienen del sistema de propulsión y de la célula (Ilustración 13).

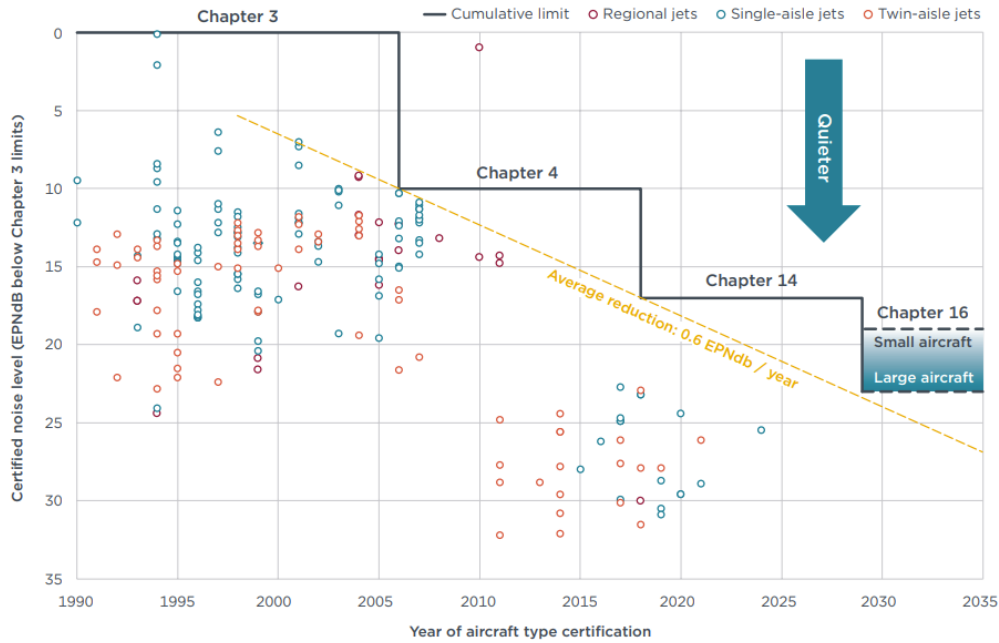


Ilustración 12. Reducción de los límites de ruido para certificación de aeronaves desde 1990 (Fuente: ICCT)

En la investigación para desarrollar tecnologías de reducción de ruido en los últimos años, destacan las iniciativas siguientes:

- Importantes esfuerzos realizados en todos los programas de investigación para proporcionar soluciones de reducción de ruido de célula, con el fin de complementar las previstas reducciones de ruido de los motores. Esto es coherente con la importancia, ahora muy significativa, de las fuentes de ruido de célula en condiciones de aproximación.
- Un renovado empeño en tecnologías de revestimientos acústicos de motores para adaptarse a las futuras limitaciones de integración de motores y góndolas (fuentes de baja frecuencia, espacio disponible reducido, requisitos de bajo peso).

Entre los avances tecnológicos más recientes para mitigar el ruido de célula, una estrategia emergente es el empleo de materiales porosos en las superficies aerodinámicas. Se aplica sobre todo a los bordes de ataque y salida de los dispositivos hipersustentadores, aunque puede emplearse en general en cualquier perfil. Un ejemplo práctico es el de las alas con control de circulación, que ofrecen un aumento significativo de la sustentación, y donde el material poroso en la parte final del flap contribuye al control del ruido [7].

Otras vías de investigación incluyen la biomímesis, o ingeniería inspirada en la naturaleza, para aprovechar las características de las plumas de la lechuza común, capaz de un vuelo sorprendentemente silencioso, y generar así estrategias de reducción de ruido en perfiles aerodinámicos [8]. De este modo, replicando su configuración, se demostró que aletas montadas aguas arriba del borde de salida pueden ser eficaces para reducir el ruido aerodinámico [9].



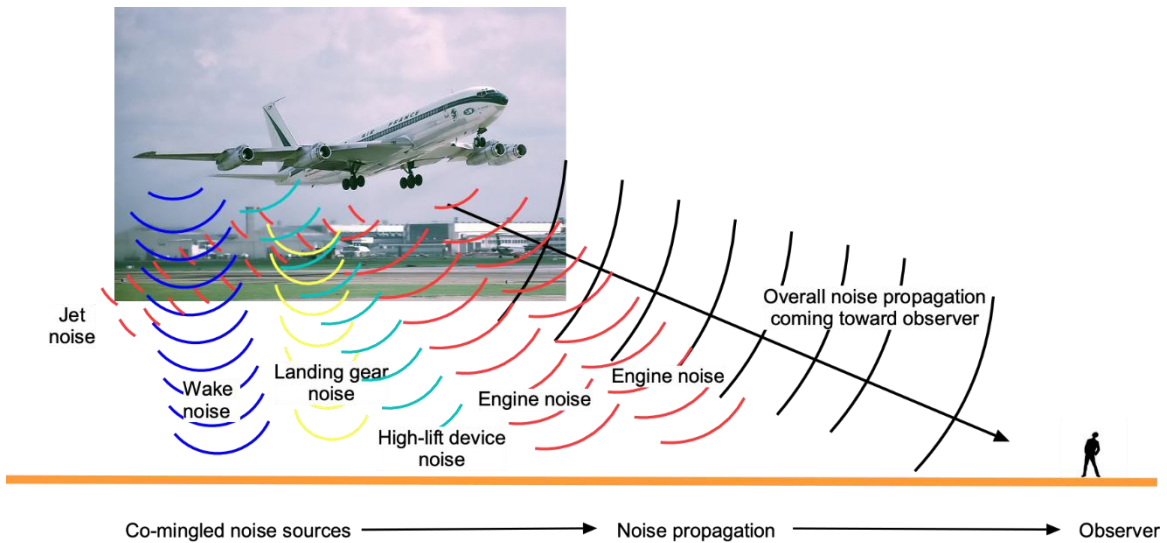


Ilustración 13. Generación de ruido en operaciones de aterrizaje o despegue (Fuente: Embry-Riddle)

En lo referente al ruido de motor, los nuevos turbofanos de ultra alta relación de derivación (**UHBR**) supondrán cambios importantes en la arquitectura convencional desde la perspectiva del ruido. El espectro de frecuencias del fan se ampliará, con una reducción drástica en la frecuencia de los tonos, mientras que el ruido de banda ancha seguirá siendo significativo en frecuencias más altas. Las góndolas de próxima generación también tendrán una menor relación longitud-diámetro del revestimiento, con el fin de reducir el peso, por lo que los amortiguadores acústicos deben ser más eficientes para mantener el nivel de ruido actual.

Una solución prometedora consiste en paneles microperforados para la reducción de ruido tonal, de banda ancha y de baja frecuencia. Se trata de un diseño innovador y en continua mejora [10], que aborda las limitaciones en ancho de banda de los absorbentes tradicionales, gracias a una estructura de panel compacta y ligera que utiliza profundidades de cámara variables, y una porosidad única por cámara.

Por último, hay que destacar los avances con **metamateriales**^{lxxvi}, compuestos artificiales que se escalan a un tamaño menor que la longitud de onda, y que han demostrado un enorme potencial en diferentes aplicaciones para el control del ruido en aeronaves [11]. Existen diferentes vías para explotar este nuevo paradigma de mitigación, que incluye la absorción o reducción del ruido, pero también su reflexión hacia direcciones inocuas para los receptores.

Entre los proyectos multidisciplinarios que han abordado el problema del ruido en la aviación recientemente podemos mencionar **AERIALIST**^{lxxvii}, centrado en la aplicación de metamateriales, y **ARTEM**^{lxxviii}, en el que se exploraron diferentes conceptos de atenuación. Ambos se lanzaron dentro del programa europeo de investigación e innovación **Horizon 2020**.



3.3. MEJORAS GRADUALES Y DE DISEÑO EN AERONAVES

3.3.1. Innovación gradual

Como ya se ha señalado, la mejora continua en la eficiencia de las aeronaves de pasajeros, tomando de referencia la introducción de los motores a reacción, ha sido un factor determinante a la hora de contener las emisiones de CO₂ en aviación ante el continuo aumento del tráfico aéreo. A modo de referencia puede tomarse la cifra del **1,3%** anual en reducción del consumo específico, resultado de promediar los avances de las últimas décadas [12]. En términos absolutos, se puede tomar el dato de emisiones medias de dióxido de carbon en 2025 del conglomerado de aerolíneas IAG: **77,5 gCO₂/pax·km**, valor claramente inferior al del transporte particular por carretera [1].

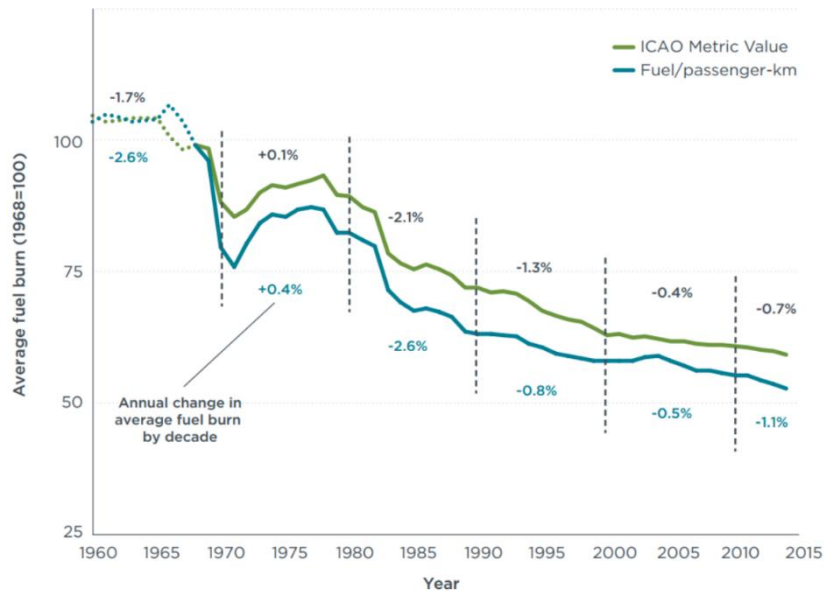


Ilustración 14. Evolución del consumo medio de combustible en aeronaves nuevas 1960-2014 (Fuente: ICCT)

Este logro se ha producido, principalmente, gracias a mejoras graduales, tanto en la propulsión como en la aerodinámica y el uso de nuevos materiales, cada vez más ligeros, en las estructuras. Las mejoras graduales son así fundamentales para seguir mejorando las actuaciones medioambientales de las aeronaves. Este progreso se ha visto reflejado en las normativas OACI ya mencionadas, cada vez más restrictivas respecto a las emisiones contaminantes, y cuya última reglamentación (**CAEP/13**), supone un acicate para continuar con este proceso continuo de incremento en la eficiencia energética. La nueva normativa, que varía en función del peso máximo al despegue de la aeronave, tiene dos niveles de exigencia en cuanto a emisiones de CO₂ (Ilustración 15), una de aplicación para los modelos en producción, y la otra para nuevos diseños. De entre las grandes empresas constructoras, **Airbus** lleva la delantera en la certificación con vistas a la fecha límite impuesta en el Anexo 16 Vol.III (CAEP/10) para aeronaves actualmente en construcción en 2028. Por otra parte, en la parte que toca a nuevos diseños, desde que la regulación correspondiente entró en efecto en 2020 no se ha certificado ningún nuevo modelo [4]. De hecho, la innegable mejora gradual en eficiencia se topa con un período de más de 20



años donde no han prosperado diseños a partir de cero. Este hecho, comprensible ante el creciente esfuerzo económico y de certificación que requiere, supone un claro impedimento para la transición hacia conceptos más sostenibles^{lxxix}.

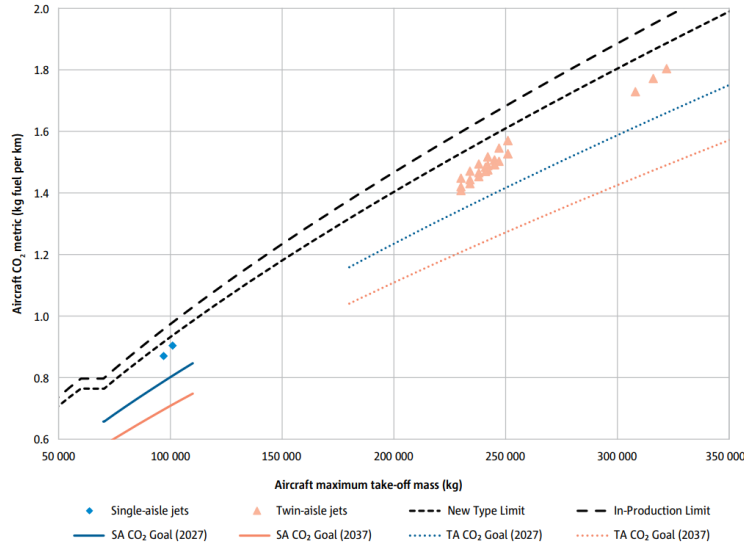


Ilustración 15. Aeronaves en producción certificadas frente a normativa de emisiones OACI [4] (Fuente: EASA)

Esta lógica de renovar modelos existentes es la que anima el proyecto **D328eco**, centrado en la sostenibilidad y el uso de SAF. La compañía alemana **Deutsche Aircraft** sigue progresando en la actualización de este viejo diseño, con la presentación del primer prototipo completo en 2025^{lxxx}, y los ensayos de vuelo programados para iniciarse en 2026.

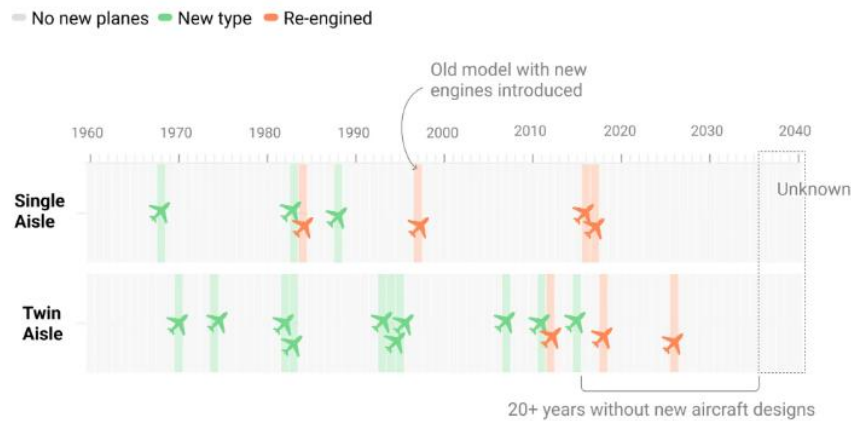


Ilustración 16. Introducción de nuevos diseños de aeronaves comerciales desde los 60s (Fuente: T&E)



Este parón en nuevos proyectos en los últimos años no significa que no haya multitud de propuestas sobre la mesa en consideración (ver una muestra en Ilustración 17). Tanto los constructores dominantes como numerosas start-ups siguen buscando el concepto y nicho de mercado adecuado, tanto para el éxito comercial como para un nuevo salto en actuaciones medioambientales. En el caso de la compañía europea **Airbus**, el reajuste en su apuesta por la propulsión con H₂ ha abierto la posibilidad de lanzar un nuevo diseño convencional, profundizando las mejoras estructurales, de propulsión y la plena adaptación al SAF^{lxxx}.



Ilustración 17. Algunas de las propuestas consideradas para nuevos diseños de aeronaves^{lxxxii} (Fuente: Leeham Co.)

Los avances graduales en la reducción de emisiones toman múltiples formas, desde sistemas de taxi en tierra con motores eléctricos en el tren de aterrizaje, una idea ya explorada en el pasado pero que toma de nuevo fuerza^{lxxxiii}, hasta recubrimientos avanzados para las superficies externas de los aviones. En 2025 continuó la expansión de la “piel de tiburón”^{lxxxiv}, que reduce la resistencia aerodinámica, pero también la introducción de un nuevo tipo de pintura ligera, con la consiguiente disminución de peso total^{lxxxv}. En ambos casos, la disminución del consumo de combustible implica directamente menos dióxido de carbono liberado en la atmósfera.

3.3.2. Nuevos diseños

Los grandes saltos en eficiencia energética se producen habitualmente con la introducción de nuevos conceptos en la configuración de la aeronave, en su propulsión, o en la aerodinámica del conjunto. A modo de ejemplo vamos a describir tres proyectos de aviación sostenible en estos ámbitos que fueron noticia, aunque con diferente fortuna, en 2025. El primero de ellos busca introducir un tipo de arquitectura de aeronaves con reconocidas ventajas de eficiencia, pero con muy difícil aplicación en aviación comercial: el ala volante o integrada con el fuselaje^{lxxxvi}. La compañía **JetZero** lleva años progresando en su programa, y recabando apoyos dentro y fuera de la industria^{lxxxvii}.





Ilustración 18. JetZero ha recibido inversiones y pedidos de compañías como United Airlines (Fuente: JetZero)

En 2025 completó con éxito el hito del *Critical Design Review*, donde la viabilidad técnica del diseño es comprobada en detalle^{lxxxviii}. La capacidad de la aeronave estaría por encima de los 200 pasajeros, y un alcance de 9.200 km. La reducción en emisiones prevista, cuando se compara con un avión equivalente convencional, podría alcanzar un asombroso **50%**.

Otro concepto también conocido desde hace tiempo es el de la mejora en eficiencia de la propulsión al inyectar agua en el flujo de aire de los motores. El salto en sostenibilidad que proponía la compañía de motores **MTU** con su *Water-Enhanced Turbofan (WET)* provenía de recuperar el agua procedente de la combustión del queroseno, y reintroducirlo al inicio del ciclo. Esta solución no solo reduciría el consumo (**10-15%**)^{lxxxix} y, por tanto, el CO₂, sino que mitigaba otras emisiones como los óxidos de nitrógeno, e incluso la producción de estelas de condensación.

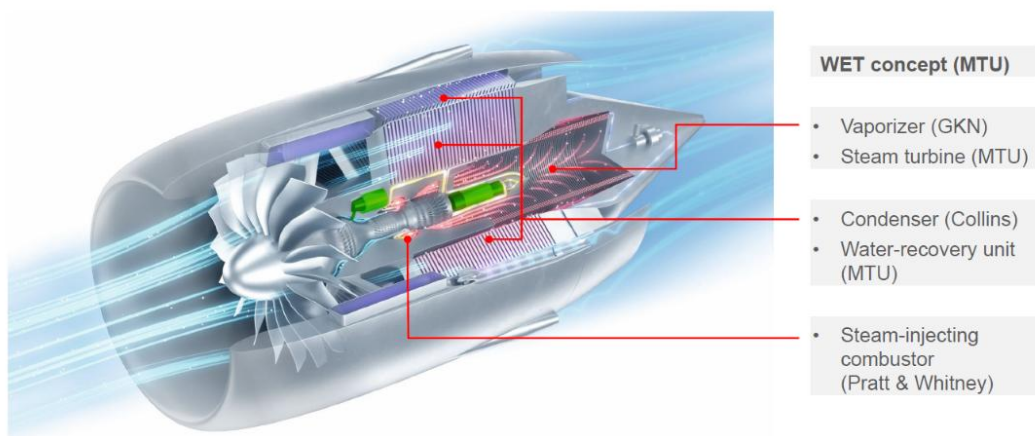


Ilustración 19. Concepto de turbofán con recuperación de agua WET de MTU (Fuente: Leeham Co.)



A pesar de estas ventajas, y del apoyo de financiación pública europea^{xc}, el fabricante alemán canceló el proyecto el año pasado, en una decisión motivada en que la mejora en eficiencia no compensa el desarrollo y certificación de una arquitectura de motor ciertamente compleja, además de un aumento en peso. Curiosamente, como veremos en la sección 3.6.3, una estrategia de diseño muy similar sí parece realmente prometedora para el caso de la propulsión por combustión de hidrógeno.

Por último, la compañía **Otto Aviation** continúa su desarrollo de modelos que buscan una aerodinámica con capa límite laminar pasiva, producto directamente de las formas en el diseño. La significativa reducción en resistencia, y por lo tanto en consumo y emisiones, podría alcanzar el **35%**, de acuerdo con los resultados en túnel de viento, en su nueva propuesta para aviación de negocios^{xci}.



Ilustración 20. Modelo Phantom 3500 de Otto Aviation, sin ventanas para mantener flujo laminar (Fuente: Fly-news)

3.4. COMBUSTIBLES SOSTENIBLES

3.4.1. Contexto

El análisis de la información sectorial publicada durante 2025 permite identificar el estado real de madurez de los combustibles sostenibles de aviación, e interpretar las dinámicas observadas en el mercado. El **SAF**^{xcii} constituye actualmente la principal palanca disponible para la descarbonización del transporte aéreo a corto y medio plazo. Gracias a su carácter *drop-in* se puede utilizar en las aeronaves e infraestructuras existentes, siempre que su calidad y sostenibilidad se acrediten mediante esquemas de certificación y trazabilidad reconocidos a nivel internacional^{xciii}.

El marco regulatorio vigente en la Unión Europea incluye el reglamento **ReFuelEU Aviation**^{xciv}, que establece mandatos crecientes de incorporación de combustibles sostenibles de aviación, comenzando con un **2 %** en **2025** y alcanzando el **70 %** en **2050** (Ilustración 21). El reglamento incorpora además un submandato específico para combustibles sintéticos (**eSAF**), y se



complementa con el Sistema Europeo de Comercio de Derechos de Emisión (**EU ETS**) y con la Directiva de Energías Renovables (**RED III**). A pesar de ciertas dificultades y críticas por su entrada en vigor en 2025, en parte debido al complejo contexto internacional, la Comisión Europea sigue plenamente comprometida con esta medida clave para la descarbonización de la aviación comercial en Europa^{xv}.

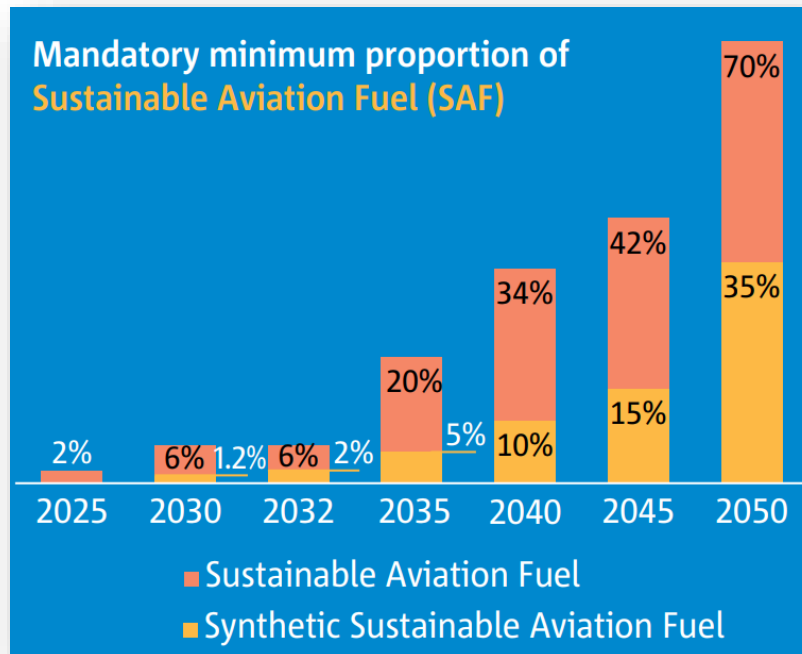


Ilustración 21. Mandato para la incorporación de SAF en la Unión Europea (Fuente [4])

A nivel mundial, el ambicioso objetivo de alcanzar un **10%** de SAF en 2030, autoimpuesto por la propia asociación internacional de aerolíneas (**IATA**), también se puso en cuestión debido al bajo ritmo de incremento de la producción^{xvii}. Esta postura de IATA se alinea con las reticencias ya comentadas en cuanto a los requisitos de sostenibilidad y compensación de emisiones para las aerolíneas, aunque sin renunciar a alcanzar el objetivo último de una aviación internacional neutra en emisiones de carbono para 2050.

Finalmente, el año 2025 confirma el avance regulatorio y tecnológico de los combustibles sostenibles de aviación, pero también pone de manifiesto desafíos estructurales: limitaciones en la escalabilidad del **bioSAF**, inmadurez comercial de los **electrocombustibles (efuels)**, y tensiones de coste en la cadena de valor. Una combinación equilibrada de mandatos, incentivos económicos, coherencia regulatoria y sistemas de trazabilidad robustos será determinante para consolidar la transición del transporte aéreo hacia un modelo climáticamente sostenible.

3.4.2. Biocombustibles

Durante el año pasado el SAF utilizado comercialmente fue mayoritariamente del tipo biocombustible, producido a partir de aceites de cocina usados (**UCO^{xviii}**) y grasas animales. Dentro del BioSAF, la ruta **HEFA** domina actualmente la producción. No obstante, diversos



análisis publicados durante 2025 alertan de una escalabilidad limitada (*tipping point*) en un horizonte de medio plazo, debido a la falta de disponibilidad sostenible de materias primas^{xcviii}, y en el contexto de una demanda creciente debido a los mandatos regulatorios. En paralelo, comienzan a consolidarse rutas post-HEFA, como el *Alcohol to Jet (ATJ)*, con el hito crucial de la puesta en marcha de su producción a escala comercial a partir del etanol^{xcix}. Este logro constituye una señal positiva en la transición hacia rutas alternativas, ampliando el abanico potencial de materias primas, y mejorando la resiliencia del conjunto del sistema de suministro.

En resumen, el **bioSAF** se consolida como la única solución disponible a escala comercial en el corto plazo, con un uso mayoritario de materias primas residuales. Esta realidad confirma que, pese al interés creciente en combustibles sintéticos, el cumplimiento inmediato de los mandatos depende casi exclusivamente de rutas biológicas ya maduras, con una elevada concentración geográfica del suministro, y una dependencia significativa de importaciones de materia prima. Esta situación refuerza la necesidad de diversificar rutas y materias primas para evitar cuellos de botella estructurales en el sistema.



Ilustración 22. Inauguración de la planta industrial de ATJ de Lanzajet (Fuente GreenAir)

3.4.3. Electrocombustibles

En cuanto a los combustibles sintéticos, considerados esenciales para cumplir los objetivos de descarbonización del sector aéreo a largo plazo, su avance en 2025 fue todavía muy modesto, aunque con logros significativos^c. También conocidos como *Power-to-Liquid fuels (PtL)*, su implantación continúa en una fase muy incipiente todavía, sin volúmenes comerciales, a pesar del elevado número de proyectos anunciados a nivel europeo y global^{ci}. Su despliegue se encuentra condicionado por costes elevados de producción, y por dependencias críticas de suministro de CO₂, hidrógeno sostenible y electricidad de origen renovable. El consenso sectorial apunta a la necesidad de mecanismos públicos específicos que permitan reducir riesgos y cerrar la brecha de costes. En esta línea se encuentra el ya mencionado mecanismo europeo para apoyar la producción de eSAF (Sección 2.2), lanzado a finales del año pasado.



Es interesante constatar que el desarrollo de un sector potente de producción de electrocombustibles se puede abordar como una oportunidad, no solo en términos medioambientales, sino también en cuanto a la competitividad e independencia energética para el viejo continente^{ci}. Así, durante 2025 hubo una proliferación de anuncios de proyectos de eSAF en Europa, impulsados por los submandatos incluidos en **ReFuelEU Aviation**, aunque todavía mayoritariamente en fases piloto o de demostración, con escalas reducidas y ausencia de plantas industriales que permitan, por ahora, una contribución relevante al mix de combustible de aviación.

Por último, como se ya indicó, parece imponerse un mensaje ampliamente compartido por la industria y diversos analistas: el despliegue efectivo de los *efuels* requerirá mecanismos específicos de apoyo público que permitan cerrar la brecha de costes frente al queroseno convencional y reducir los riesgos asociados a proyectos de primera generación. Sin estos instrumentos, la toma de decisiones finales de inversión continuará siendo limitada, comprometiendo la disponibilidad futura del eSAF necesario para cumplir los objetivos a partir de 2030.

3.5. AVIACIÓN ELÉCTRICA

3.5.1. Contexto

La aviación eléctrica se refiere al uso de sistemas de propulsión eléctrica —alimentados por baterías, pilas de combustible o configuraciones híbridas— para sustituir o complementar los sistemas tradicionales de propulsión de aeronaves basados en derivados del petróleo.



Ilustración 23. Propuesta de modelo híbrido-eléctrico EVIO para transporte regional (Fuente Evio Aero)

Este campo emergente abarca una amplia gama de tipos de aeronaves, desde pequeños vehículos eVTOL^{ciiii}, hasta aeronaves de ala fija de mayor tamaño. Cabe señalar que el pequeño **Pipistrel Velis Electro**, primer modelo eléctrico certificado ya en 2020, lleva vendidas más de 150



unidades. Así, estas tecnologías ofrecen el potencial de alternativas más silenciosas, limpias y eficientes, con aplicaciones en redes de transporte tanto urbanas como regionales. A medida que los avances en almacenamiento de energía, electrónica y materiales ligeros continúan acelerándose, la aviación eléctrica va generando expectativas en el sector de la aviación ligera y de corto radio de acción. A lo largo de 2025 se han producido notables progresos en este segmento, particularmente en el sector de las aeronaves de despegue y aterrizaje vertical (lo que se ha venido a llamar popularmente como “taxis eléctricos”), impulsados por las iniciativas para la movilidad eléctrica urbana. Cabe también señalar que el año 2025 ha venido marcado por importantes crisis y desafíos en el sector, entre los que cabe recordar los casos ya mencionados de la congelación del proyecto eléctrico de **Eviation**^{civ} y la quiebra de **Lilium**, sometida a graves problemas de liquidez y que acabó con la liquidación de la compañía. Por cierto, su unidad de producción de baterías fue adquirida después por la compañía **Vaeridion**, lo que refuerza su proyecto de avión regional eléctrico **Microliner**, actualmente en desarrollo con la colaboración de **Deutsche Aircraft**^{cv}.



Ilustración 24. Propuesta de modelo regional eléctrico Microliner de Vaeridion (Fuente AIN)

Aunque otras empresas del sector están sufriendo igualmente de falta de financiación, se debe destacar que, en otros casos, particularmente en proyectos estadounidenses, sí se sigue recibiendo un gran apoyo de inversión^{cvi}, incluso desde el sector militar. El respaldo económico y cierta holgura en la liquidez disponible es clave para mantener los trabajos de ingeniería y preparación para la producción, a la espera de poder certificar las aeronaves y comenzar a entregar los primeros ejemplares a los clientes. Un síntoma de esta incertidumbre en el ámbito de la aviación eléctrica fue la ya referida reorganización dentro del conglomerado aeronáutico **Textron**, propietario de la marca **Pipistrel**, que desmanteló su división de aviación eléctrica, repartiendo sus activos entre otras áreas^{cvi}.

3.5.2. Baterías

La aviación eléctrica siempre ha estado condicionada por el lento avance en el desarrollo de baterías de alta densidad energética, anclándose en el estándar de 250 W·h/kg de las unidades de ion litio actuales. Esta limitación impide la expansión de sus prestaciones (carga de pago –



radio de acción) frente a aeronaves con propulsión convencional. Con todo, durante el último año volvieron a producirse noticias positivas, que incluyen no solo resultados de laboratorio sino, muy importante, también desarrollos comerciales.

De hecho, el límite de energía específica parece haberse superado en baterías para uso aeronáutico, y así lo atestigua la puesta en el mercado de la versión mejorada del modelo **SiCore** de **Amprius Technologies**, que alcanza nominalmente los **450 W·h/kg**. Además, la compañía experta en baterías anunció que las prestaciones de esta unidad, en cuanto a potencia y velocidad de descarga, la hacen idónea para aplicaciones de aviación eléctrica^{cviii}.

En la misma línea, la compañía de propulsores eléctricos **Magnix** sigue progresando en la capacidad de su familia de baterías **Samson**. Si en 2024 debutó con un modelo con una energía específica de 300 W·h/kg, en 2025 sorprendió con el anuncio de una versión de **400 W·h/kg**^{cix}.

Para terminar con los avances en este ámbito, ahora a nivel de investigación, el **MIT** anunció un nuevo concepto de batería de **metal-aire**, basada en sodio líquido, que podría revolucionar la aviación eléctrica, con pruebas de laboratorio que arrojaron una energía específica consistente con **1.000 W·h/kg** a nivel de sistema completo^{cx}. Si bien la capacidad de esta arquitectura es bien conocida desde hace tiempo, los problemas aparecían a nivel práctico por la dificultad para recargar los dispositivos.

En este nuevo enfoque del grupo del MIT, el **sodio** simplemente se renueva una vez consumido, lo que convertiría el sistema realmente en una pila de combustible. Esto aportaría un beneficio adicional, ya que las emisiones consistirían en óxidos de sodio, que se combinaría con el CO₂, retirándolo así de la atmósfera. Los investigadores, que argumentan que el sistema sería inherentemente seguro, ya están dando los siguientes pasos para su lanzamiento a nivel industrial, incluida la cadena de suministro del metal, ampliamente disponible en la naturaleza.



Ilustración 25. Ensayo de sistema eléctrico sodio-aire para la creación de corriente eléctrica (Fuente MIT)

Otro logro alcanzando el año pasado vino de la mano de la compañía suiza **H55**, que completó con éxito en diciembre las pruebas de certificación de su módulo de batería de propulsión bajo supervisión de la **EASA**, en lo que supone un hito para la aviación eléctrica^{cxii}. Con una duración



de más de 6 meses, estos ensayos confirman la seguridad de las baterías ante casos de fallo, y su funcionamiento seguro bajo cualquier condición operativa. Este modelo está destinado para su instalación en el proyecto de categoría **CS23** de **BRM Aero**. Por último, en un anuncio que se produjo en la feria aérea de París del año pasado, **Dovetail Electric Aviation** y **Engineered Fluids** presentaron su colaboración para producir un sistema de refrigeración de baterías mediante inmersión, que reduciría considerablemente el peso y volumen necesario para el control térmico de las mismas^{cxii}.

3.5.3. Motores

Durante 2025 se produjeron diversos avances en el ámbito de los propulsores eléctricos para aviación. Probablemente el más significativo fue la certificación del motor **ENGINEUS 100** de **SAFRAN** (Ilustración 26). Con una potencia de hasta **125 kW** y dirigido para uso en aviones ligeros y movilidad urbana, facilitará la electrificación de aeronaves de hélice existentes. Este logro es el resultado de una colaboración de cuatro años con **EASA**, durante el que se consolidaron las normativas y requisitos que deberán cumplir este tipo de motorización eléctrica en aviación^{cxiii}.



Ilustración 26. Propulsor eléctrico de aviación ENGINEUS de SAFRAN (Fuente SAFRAN)

Al otro lado del Atlántico, la compañía **Magnix** anunció el desarrollo de los motores **Helistorm**, con una potencia estimada de **330 kW** y alta velocidad de giro, ya que su objetivo es la electrificación de modelos de helicópteros^{cxiv}. Subiendo en potencia, **Collins Aerospace** también anunció una familia de motores eléctricos de hasta **1 MW**. Finalmente, el rango más alto lo ocupa la compañía **Wright Electric**, con un modelo de **2,5 MW** desarrollado en colaboración con **ARPA-e** y **NASA**, actualmente en pruebas en tierra, y que se podría ensayar en vuelo con un modelo Hércules.



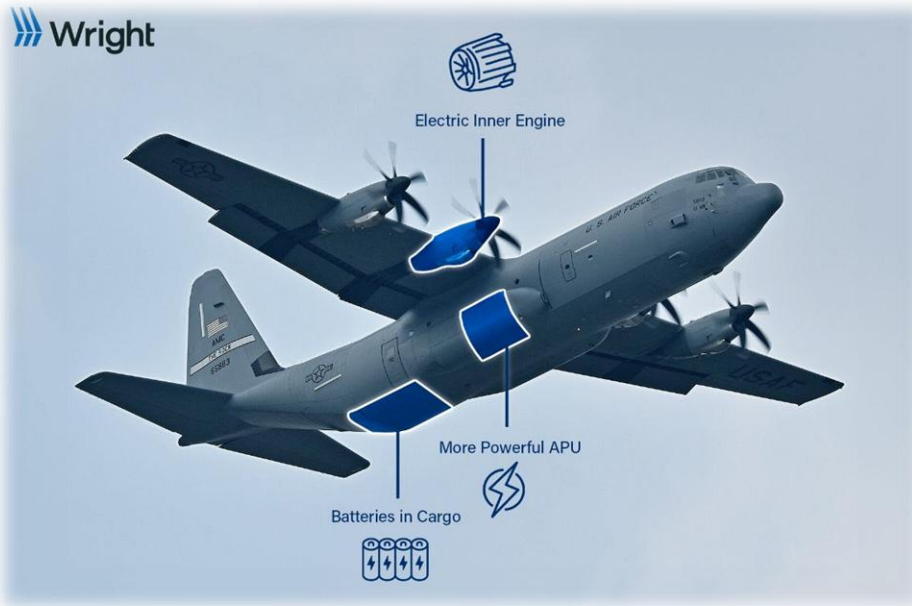


Ilustración 27. Propuesta para ensayar el motor eléctrico WN2500 en un C-130 Hércules
(Fuente Wright Electric)

3.5.4. eVTOL

El sector de los “aerotaxis”, a pesar de los desafíos financieros, experimentó un claro progreso durante 2025, logrando una serie de hitos comerciales y regulatorios tangibles:

- La autoridad aeronáutica estadounidense FAA publicó guías completas para la certificación de aeronaves *powered-lift* en julio, estableciendo el marco operativo para su despegue comercial definitivo. Empresas líderes como **Joby** y **Archer Aviation** completaron fases críticas de su certificación. Joby, por ejemplo, superó los 9.000 km en vuelos de prueba durante este año, y finalizó los manuales de operación y mantenimiento requeridos para la autorización final de inspección de tipo (**TIA**).
- Los modelos de los fabricantes chinos de eVTOL, **EHang** y **AutoFlight**, junto con la avioneta eléctrica **RX4E**, certificaron sus aeronaves, y cuentan con certificados de operador aéreo comercial en China. No obstante, se debe señalar que las normas de certificación en China no son asimilables a las occidentales de EASA o FAA.
- Primeros Vuelos con Pasajeros: **Beta Technologies** logró realizar el primer vuelo de su aeronave **ALIA** transportando pasajeros entre East Hampton y el aeropuerto de Nueva York JFK, marcando un avance hacia el servicio comercial.
- Infraestructura de Vertipuertos: se han acelerado los planes para redes de carga modular en ciudades como Nueva York y Los Ángeles. En Madrid el Ayuntamiento elaboró un documento sobre movilidad aérea urbana^{CXV}.
- Otra empresa importante del sector eVTOL en Europa como **Volocopter** fue adquirida en marzo de 2025 por el grupo chino Wanfeng (propietario de Diamond Aircraft), lo que evitó su desaparición, aunque fue sometida a un profundo proceso de reestructuración que incluyó el despido de gran parte de su plantilla.



3.5.5. Propulsión Híbrida

En el campo híbrido-eléctrico, donde se combinan propulsión y/o almacenaje eléctricos con unidades alimentadas por hidrocarburos [1], los diseños giran en torno a la economía operativa y las aplicaciones comerciales. Aunque, en general, su maduración está siendo más discreta, siguen produciendo anuncios de nuevos proyectos como el avión regional de **EVIO** (Ilustración 23). Lanzado a finales de 2025. Esta *start-up* canadiense cuenta con el respaldo industrial de **Boeing** y **Pratt & Whitney**, así como el de diversas aerolíneas^{cxvi}.

En cuanto a los proyectos de aviones regionales de tipo híbrido, se lanzaron algunos otros modelos como el de **Cormorant**^{cxvii}, el **SY30J Pangea**^{cxviii} y el **Smartflyer SF-1**^{cxix}. Además de estas iniciativas emergentes, algunos proyectos parecen mantener una dirección firme hacia el uso comercial, como en el caso de la compañía **Electra Aero**. En 2025 duplicó su plantilla, amplió sus instalaciones y presentó una solicitud de certificado de tipo a la **FAA** para su avión híbrido-eléctrico **EL9 Ultra Short** de nueve pasajeros. La compañía estadounidense avanza hacia la finalización del diseño, con el objetivo de realizar su primer vuelo en 2027.

En este sector también se produjeron sorpresas, como la decisión de **Heart Aerospace** para desplazar su sede de Suecia a Los Angeles^{cxx}. La empresa sueca desarrolla el modelo **ES-30**, uno de los proyectos más prometedores en aviación comercial híbrida. Este movimiento cobra sentido ante el contraste de inversión disponible entre EE. UU. y Europa, ya mencionado.

Otra compañía europea, **Elysian**, continuó durante 2025 con los trabajos de definición de su modelo **E9X**, incorporando a la española Aernnova para el diseño estructural^{cxxi}. Si bien el concepto es de una aeronave comercial eléctrica alimentada por baterías, la reserva de autonomía obligatoria estaría cubierta por un turbogenerador convencional.

En lo referente a motorización híbrida de gran capacidad, **GE Aerospace** completó a finales de 2025 las pruebas del sistema de propulsión híbrido-eléctrico basado en el turbofán **Passport**. Este paso fundamental se enmarca entre los diversos proyectos de la compañía para avanzar en las tecnologías para futuros motores de aeronaves de fuselaje estrecho^{cxxii}.



Ilustración 28. Banco de pruebas en tierra de un sistema propulsor híbrido-eléctrico de GE
(Fuente General Electric)



Por lo demás, se observaron retrasos en diferentes proyectos respecto a las fechas previstas para los primeros vuelos de los prototipos, como es habitual. A modo de ejemplo, el constructor europeo **ATR** anunció que su prototipo híbrido-eléctrico ATR 72-600 volará en 2029, y la fecha de decisión de su nuevo diseño **ATR EVO** no será antes del 2030^{cxxiii}. En el caso del proyecto de **Eve Air Mobility** (respaldado por Embraer) se retrasó también su objetivo de certificación comercial hasta 2028 para poder completar su programa de pruebas de vuelo.

3.6. HIDRÓGENO

3.6.1. Promoción y suministro

La introducción del hidrógeno renovable [1] como combustible en aviación, con el consabido avance medioambiental al eliminarse completamente la emisión de CO₂, ha estado en primera fila en los esfuerzos por alcanzar una aviación sostenible durante los últimos años^{cxxiv}. La empresa aeroespacial europea **Airbus** ha liderado, en gran medida, este camino. Su visión incluía la creación de un ecosistema que cubriese la producción, distribución y aplicación aeronáutica del H₂. Tras un período de estudio de las diferentes soluciones técnicas, se procedería con el exigente proceso de certificación, todo dentro del programa **ZEROe**.



Ilustración 29. Diseño con pilas de H₂ del programa ZEROe de Airbus (Fuente Airbus)

Sin embargo, en 2025 este plan sufrió un serio revés al anunciarse un retraso considerable en sus planes de implementación, postponiendo su adopción en aeronaves comerciales por lo menos hasta la década de los 2040^{cxxv}. En la práctica esto supone que el nuevo diseño del fabricante europeo, esperado para la próxima década, tendrá una propulsión basada en hidrocarburos, aunque posiblemente con un alto grado de innovación y completamente adaptada al SAF.

Si bien las dificultades eran sobradamente conocidas, este cambio de dirección genera cierta incertidumbre sobre la orientación de los esfuerzos de descarbonización de la aviación^{cxxvi} y el papel de los diferentes actores involucrados para conseguirlo^{cxxvii}.



Uno de los principales escollos para la adopción del hidrógeno en el transporte, no sólo en aviación, sino también en el enorme sector del transporte de mercancías por carretera, está siendo la falta de producción sostenible. De hecho, frente al objetivo de la UE de contar en 2025 con una capacidad de electrólisis de **6 GW** para producir hidrógeno verde, la realidad es que solo se han alcanzado **308 MW** [14], y las expectativas para 2030 no son halagüeñas^{cxxxviii}. El coste de producción del H₂ renovable todavía cuadruplica al de origen fósil, lo que explica que se haya producido un cierto enfriamiento de las iniciativas industriales^{cxxxix}.

Una vez más, es fundamental romper estas dinámicas con apoyo gubernamental, como el ofrecido por la UE con la asignación, en 2025, de **992 M€** para proyectos de producción de hidrógeno renovable a través de un nuevo concurso de financiación organizado por **European Hydrogen Bank**. Cabe señalar que, de los 15 proyectos seleccionados, 8 están localizados en España, donde también se avanza en la misma dirección desde iniciativas privadas como **ALL4Zero**^{cxxx}.

Este esfuerzo por promocionar el hidrógeno verde se extiende a otros países como el Reino Unido, donde se exploran alternativas tecnológicas de producción^{cxxxi}, mientras se amplía la financiación para la investigación y desarrollo de transporte aéreo propulsado por este vector energético renovable. La segunda fase del **Hydrogen Challenge Program** fue confirmada en febrero del año pasado^{cxxxii}.

3.6.2. Pilas de Combustible

La alternativa de propulsión eléctrica alimentada por pilas de hidrógeno es una de las más prometedoras para una aviación de emisiones cero, resolviendo la limitación en autonomía de las aeronaves con baterías. Un ejemplo de aplicación comercial es el acuerdo de la compañía **ZeroAvia** con el consorcio noruego **ODIN**, por el que se remotorizarán 15 Cessna Grand Caravan con sus propulsores de hidrógeno **ZA600** para establecer una red de vuelos sostenible en Noruega. Este proyecto, financiado con fondos recaudados por **EU ETS**, incluirá además toda la infraestructura logística necesaria en tierra^{cxxxiii}. La compañía estadounidense también está estudiando la aplicación de sus motores en el modelo de dirigible de carga de **Airlander**^{cxxxiv}.

Las dificultades financieras mencionadas anteriormente también podrían extenderse a las empresas aeronáuticas implicadas con el hidrógeno, desde la propia **ZeroAvia** que sufre para conseguir nueva inversión^{cxxxv}, hasta las dificultades de **Cranfield Aerospace**, que detuvo su desarrollo de un tren propulsor para el modelo **Islander**, reorientando sus esfuerzos hacia el campo de los drones^{cxxxvi}.

En este entorno tan complejo para que las iniciativas industriales disruptivas prosperen, resulta fundamental que programas como **Clean Aviation** de la Unión Europea sirvan para completar la investigación y desarrollo de los nuevos conceptos sostenibles. Dentro del sector de la propulsión con pilas de hidrógeno, el proyecto **Newborn** sigue progresando hacia sus objetivos de validación de todos los elementos del tren motor para 2026^{cxxxvii}. Después de esto, las empresas que integran el consorcio esperan poder continuar hasta los ensayos en vuelo en 2028.



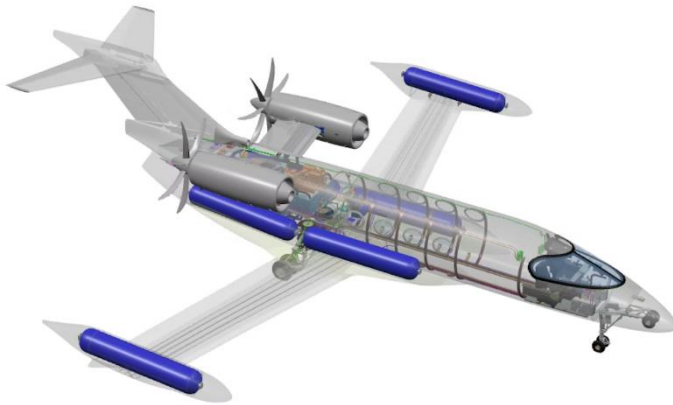


Ilustración 30. Diseño del modelo BYA-1 con la disposición de los tanques de H₂ comprimido. (Fuente Beyond Aero)

Otras empresas aeronáuticas que trabajan con propulsores eléctricos por hidrógeno pueden dividirse entre las que persiguen una estrategia de remotorización de modelos existentes (por ejemplo, la australiana **Stralis**^{cxxxviii}), y las que parten de cero con diseños nuevos que puedan optimizar las ventajas de esta solución. Este último caso es el de **Beyond Aero**, con su avión de negocios **BYA-1** (Ilustración 30).

Una característica interesante de este proyecto es su apuesta por el uso de tanques de hidrógeno comprimido (700 bar) en lugar de la solución criogénica. Aunque disminuye la capacidad de almacenaje, parece que los aspectos prácticos de operación han prevalecido, dada la simplicidad de trabajar con combustible a temperatura ambiente. En octubre la empresa asentada en Toulouse anunció el inicio de ensayos en tierra de un prototipo de propulsor a escala real^{cxxxix}. Merece la pena destacar que esta empresa adquirió instalaciones, datos de ensayo y toda la cartera de patentes de la extinta **Universal Hydrogen**.

3.6.3. Combustión Directa

2025 se inició con un hito importante en el uso de la combustión directa de hidrógeno para propulsión aeronáutica, al realizarse los primeros ensayos en tierra de un motor turbohélice diseñado para aeronaves ligeras^{cxl} alimentado por este combustible en estado líquido.



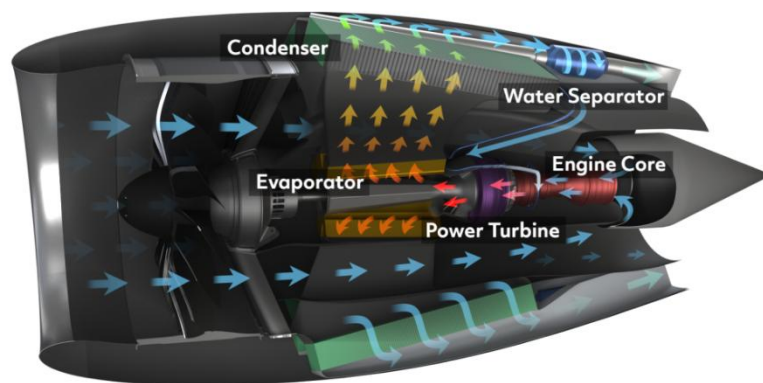
Ilustración 31. Ensayos en tierra de un motor turbohélice alimentado por H₂ (Fuente: BeautyFuel)

Este trabajo se encuadra dentro el proyecto **BeautHyFuel**, financiado por el gobierno francés para el desarrollo de sistemas motores aéreos alimentados por H₂, y que cuenta con los principales actores industriales del país galo. Sin embargo, el mayor avance en este tipo de propulsión llegó poco después con la llegada de los resultados de ensayos en banco del proyecto **HYSITE**^{cxli}, un

turboreactor de aviación alimentado por H₂ con recuperación e inyección de agua. Según la empresa **Pratt & Whitney**, este diseño demostró una eficiencia **35%** superior al equivalente motor de queroseno^{cxlii}. Este salto de ahorro energético es fundamental, ya que podría justificar



el enorme coste de desarrollo, pero sobre todo el de la adecuación del suministro y gestión del hidrógeno en aviación. La clave está en la mejora de la actuación del sistema con la aportación de H_2O al flujo de aire de entrada, mencionado anteriormente. Si bien este efecto ya era bien conocido, ahora se aprovecha de forma continua y en gran proporción (hasta un 20% de vapor de agua^{cxliii}) gracias a su recuperación tras la combustión mediante un complejo sistema de condensación, separación y evaporación. Además, con esta mezcla se mejora la estabilidad de la llama de hidrógeno, siempre un desafío, y se aprovecha el menor tamaño del núcleo para permitir relaciones de derivación extremas, de hasta **50:1**, con la consiguiente mejora en eficiencia.



*Ilustración 32. HYSIITe. Turborreactor de H_2 con recuperación e inyección de agua
(Fuente: Pratt & Whitney)*

La gestión del calor es otro aspecto importante de esta arquitectura, ya que se utiliza tanto para producir el vapor de agua de la mezcla como para el calentamiento del hidrógeno líquido criogénico antes de su combustión, pero también mediante el enfriado por agua de las etapas intermedias de compresión, todo lo cual mejora la gestión energética del motor.

Por último, y un aspecto de gran importancia, los resultados demostraron que la combustión con agua elimina prácticamente las emisiones de óxidos de nitrógeno (**99.3%**), uno de los principales inconvenientes de la combustión de hidrógeno. Así, el **HYSIITe** resolvería este problema, mejorando significativamente la eficiencia global, y potencialmente mitigando, además, la creación de estelas de condensación.

Este proyecto está financiado por la agencia gubernamental estadounidense **ARPA-e**, y su horizonte de introducción comercial se sitúa a largo plazo, en 2 o 3 décadas. Esto se debe a la novedad y complejidad de la tecnología involucrada, además de requerir, como ya vimos, de todo un entorno industrial de producción y distribución de hidrógeno renovable.



3.7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] O. Castro Álvarez y E. Martín Santana (2022). **La sostenibilidad medioambiental en el sector aeronáutico**. COIAE. (<https://coiae.es/wp-content/uploads/2022/11/Informe-sostenibilidad-2022-espanol.pdf>)
- [2] O. Castro Álvarez. (2023) **La sostenibilidad medioambiental en el sector aeronáutico. Adenda 2022**. COIAE. (https://coiae.es/wp-content/uploads/2023/12/Informe-Aeronautica-Sostenible-2022_Adenda.pdf)
- [3] O. Castro Álvarez et al. (2025) **La sostenibilidad medioambiental en el sector aeronáutico. Adenda 2024**. COIAE. (https://coiae.es/wp-content/uploads/2025/06/Informe-Aeronautica-Sostenible_Adenda-2024.pdf)
- [4] **European Aviation Environmental Report 2025**. EASA, EEA, Eurocontrol. 2025. (<https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2025-01/eurocontrol-easa-eaer-2025.pdf>)
- [5] **A Route to Net Zero European Aviation. Road Map 2025-2050**. Destination 2050. Febrero, 2025. (https://www.destination2050.eu/wp-content/uploads/2025/02/DESTINATION_2050_Roadmap_2025.pdf)
- [6] **Report From the Commission to the European Parliament and the Council on the functioning of the European carbon market in 2024**. Comisión Europea. Diciembre, 2025. (https://climate.ec.europa.eu/document/download/ddc1b1de-652b-49ed-8f15-d9fa8badd39f_en?filename=com_2025_735_en.pdf)
- [7] V. Ananthan et al. (2023). **Effects of localized application of porous material on trailing-edge noise of a circulation-controlled wing**. International Journal of Heat and Fluid Flow. 103:109209.
- [8] J. W. Jaworski y N. Peake (2020). **Aeroacoustics of Silent Owl Flight**. Annual Review Fluid Mechanics. 52:395-420. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010518-040436>.
- [9] V. Ananthan y R. Akkermans (2023). **Trailing-edge noise reduction using bio-inspired finlets**. Journal of Sound and Vibrations. 549:117553.
- [10] J. Wang y G.J. Bennett (2024). **Ultra-broadband sound absorption in a compact multi-chamber micro-perforated panel absorber with varying depths**. AIP Advances 14.015009. <http://dx.doi.org/10.1063/5.0187328>.
- [11] H. BU y J. Zhou (2025). **Perspectives on acoustic metamaterials for noise control in aerospace applications**. Chinese Journal of Aeronautics. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2025.103965>
- [12] A. Kharina y D. Rutherford (2015). **Fuel efficiency trends for new commercial jet aircraft: 1960 to 2014**. International Council on Clean Transportation. (https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/ICCT_Aircraft-FE-Trends_20150902.pdf)
- [13] E. Posada, V. Culbert y A. Wendenburg (2025). **Fossil Fuel Subsidy Reform in Aviation and Shipping**. International Institute for Sustainable Development. (<https://www.iisd.org/publications/report/fossil-fuel-subsidy-reform-aviation-shipping>)



- [14] **European hydrogen markets 2025. Monitoring Report.** European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators (ACER). Diciembre, 2025.
(<https://www.acer.europa.eu/sites/default/files/documents/Publications/ACER-2025-European-hydrogen-markets.pdf>)

3.8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ⁱ Organización de Aviación Civil Internacional

ⁱⁱ <https://theicct.org/publication/the-international-civil-aviation-organizations-caep-13-aircraft-noise-standards-may25>

ⁱⁱⁱ <https://theicct.org/publication/icao-caep-13-co2-standards-dec25>

^{iv} Medida con respecto a la norma vigente CAEP/10

^v <https://leehamnews.com/2025/02/18/another-one-bites-the-dust-alternative-energy-gives-way-to-realities/>

^{vi} *Flight International*, marzo de 2025.

^{vii} <https://www.airline92.com/industria-aeronautica/innovacion-tecnologia/airbus-detiene-desarrollo-aeronave-despegue-aterrizaje-vertical/>

^{viii} <https://www.ainonline.com/aviation-news/air-transport/2025-02-18/aviation-pauses-alice-electric-aircraft-while-seeking-new>

^{ix} <https://www.ainonline.com/aviation-news/futureflight/2025-10-17/textron-pulls-plug-eaviation-division>

^x <https://fly-news.es/aviacion-comercial/aviones/aviones-experimentales/nasa-y-boeing-cancelan-el-x-66/>

^{xi} <https://www.ainonline.com/aviation-news/futureflight/2025-01-13/airbus-taps-bae-micro-hybridization-energy-storage>

^{xii} <https://www.greenairnews.com/?p=8253>

^{xiii} <https://www.transportenvironment.org/articles/airline-emissions-2024>

^{xiv} <https://www.transportenvironment.org/articles/down-to-earth>

^{xv} <https://www.greenairnews.com/?p=7118>

^{xvi} <https://www.greenairnews.com/?p=7665>

^{xvii} <https://www.preferente.com/noticias-de-transportes/noticias-de-aerolineas/la-aviacion-se-fija-como-meta-recuperar-la-imagen-de-su-impacto-ambiental-346409.html>

^{xviii} <https://www.greenairnews.com/?p=8084>

^{xix} <https://anave.es/la-omi-aplaza-un-ano-la-adopcion-del-net-zero-framework-y-retrasa-la-regulacion-global-de-las-emisiones-del-transporte-maritimo/>

^{xx} *Flight International*, noviembre de 2025.

^{xxi} <https://www.greenairnews.com/?p=6814>

^{xxii} <https://leehamnews.com/2025/07/18/bjorns-corner-air-transport-route-to-2050-part-31/>

^{xxiii} <https://aviationweek.com/air-transport/airlines-lessors/iatas-walsh-expects-airlines-re-evaluate-net->



zero-target

^{xxiv} <https://carbontracker.org/reports/fuel-disclosure/>

^{xxv} <https://aviationweek.com/special-topics/sustainability/iata-report-sees-decarbonization-transition-costing-47t>

^{xxvi} <https://aviaciondigital.com/saf-impacto-precios-vuelos/>

^{xxvii} <https://aviaciondigital.com/epas-2026-estrategia-seguridad-easa/>

^{xxviii} <https://www.clean-aviation.eu/eu945-million-for-new-clean-aviation-initiatives-12-groundbreaking-projects-selected>

^{xxix} <https://www.clean-aviation.eu/eu3295-million-in-eu-funding-clean-aviation-announces-its-call-4-for-proposals>

^{xxx} <https://path2zero.eu/>

^{xxxi} https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/clean-transport/sustainable-transport-investment-plan_en

^{xxxii} <https://travelimpactmodel.org/>

^{xxxiii} <https://www.greenairnews.com/?p=7995>

^{xxxiv} <https://www.imperial.ac.uk/news/263793/earth-cooling-research-piloted-imperial-aerospace-engineers/>

^{xxxv} <https://www.ainonline.com/aviation-news/air-transport/2025-11-27/falcon-20e-tails-german-airliners-assess-contrails>

^{xxxvi} <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2025-03-airbus-launches-study-on-non-co2-aircraft-emissions-with-canadian>

^{xxxvii} www.ainonline.com/aviation-news/aerospace/2025-03-25/study-targets-clarity-mitigating-contrail-climate-impact

^{xxxviii} *Flight International*, agosto de 2025.

^{xxxix} <https://www.nature.com/articles/s41586-025-09198-2>

^{xl} <https://leehamnews.com/2025/04/04/bjorns-corner-air-transport-route-to-2050-part-16/>

^{xli} <https://www.transportenvironment.org/articles/contrail-avoidance>

^{xlii} <https://www.greenairnews.com/?p=6783>

^{xliii} <https://www.ainonline.com/aviation-news/futureflight/2025-11-05/uk-ati-allocates-funding-tackle-non-co2-aircraft-emissions>

^{xliv} <https://www.miteco.qob.es/es/cambio-climatico/temas/comercio-de-derechos-de-emision/operadores-aereos-mrva-impactos.html>

^{xlv} <https://carbonmarketwatch.org/2025/11/07/carbon-markets-and-the-global-south-opportunity-or-exploitation/>

^{xlvi} Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

^{xlvii} <https://imperialcollegelondon.github.io/The-London-Register-of-Subsurface-CO2-Storage/>

^{xlviii} <https://skynrq.com/wp-content/uploads/2025/09/A-false-choice-between-carbon-removals-and-e-SAF-1.pdf-1.pdf>

^{lix} <https://www.qciencia.com/conece-o-cinbio/converte-co2-metanol-alternativas-a-combustibles-fosiles/>

^l https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/CORSIA/Newsletter/CORSIAnewsletter_DEC2025_v3.pdf

^{li} <https://www.greenairnews.com/?p=8325>



-
- lii <https://www.transportenvironment.org/state-of-european-transport/state-of-transport-2025/aviation>
- liiii <https://www.carbone4.com/en/international-aviation-will-the-eu-restart-the-clock>
- liv <https://www.greenairnews.com/?p=7648>
- lv <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/The-CORSIA-liability-challenge-the-dangers-of-delay.html>
- lvi https://climate.ec.europa.eu/news-other-reads/news/eu-allocates-eu100m-worth-ets-allowances-help-airlines-buy-sustainable-aviation-fuels-2025-09-17_en
- lvii <https://www.greenairnews.com/?p=7169>
- lviii <https://solidaritylevies.org/>
- lix <https://aviaciondigital.com/impuesto-jets-privados-francia-espana>
- lx <https://www.transportenvironment.org/articles/new-study-aviation-taxes-charges-and-fees-have-limited-impact-on-passenger-numbers>
- lxi <https://www.dsca.gob.es/es/comunicacion/notas-prensa/ley-consumo-sostenible-prohibe-publicidad-vuelos-cortos-combustibles>
- lxii <https://www.transportenvironment.org/articles/t-e-greenpeace-and-10-organisations-call-on-the-eu-to-maintain-the-law-promoting-alternatives-to-short-haul-flights>
- lxiii <https://www.transportenvironment.org/articles/new-analysis-debunks-the-assumption-that-air-passenger-growth-drives-economic-growth>
- lxiv <https://www.copac.es/el-observatorio-de-seguridad-eficiencia-y-sostenibilidad-de-las-operaciones-aereas-constata-una-reduccion-de-120-kilogramos-por-vuelo-de-emisiones-de-co2/>
- lxv <https://www.greenairnews.com/?p=8161>
- lxvi <https://www.greenairnews.com/?p=7990>
- lxvii <https://www.sesarju.eu/news/leading-industry-players-rally-behind-future-focused-model-european-atm>
- lxviii https://eu-single-sky.transport.ec.europa.eu/news/prb-annual-monitoring-report-2024-2025-10-14_en
- lxix https://www.transportes.gob.es/aviacion-civil/estrategia-de-navegacion-aerea/plan_rendimiento_espana_cuarto_periodo
- lxx *Air Navigation Service Provider o Proveedor de Servicios de Navegación Aérea*
- lxxi <https://airtraffic.indragroup.com/es/blog/asi-opera-el-mayor-centro-de-torres-digitales-remotas-del-mundo>
- lxxii <https://a21.com.mx/aeropuertos/2025/06/25/logran-aeropuertos-de-helsinki-y-hyderabad-el-nivel-mas-alto-en-gestion-de-carbono>
- lxxiii <https://fly-news.es/sostenibilidad/nueve-aeropuertos-de-aena-renuevan-su-certificacion-del-airport-carbon-accreditation/>
- lxxiv <https://www.ainonline.com/aviation-news/air-transport/2025-02-13/ammonia-proposed-fuel-source-airport-and-aircraft-power>
- lxxv https://theicct.org/wp-content/uploads/2025/05/ID-358-%E2%80%93-Noise-standard_ICAO_final.pdf
- lxxvi <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/6/971>
- lxxvii *AdvancEd aiRcraft-noise-Allaviation devlceS using meTamaterials*
<https://cordis.europa.eu/project/id/723367/es>
- lxxviii *Tecnologías de reducción del ruido de las aeronaves e impacto ambiental relacionado*



<https://cordis.europa.eu/project/id/769350>

lxxxix <https://www.transportenvironment.org/articles/weak-aircraft-innovation-undercutting-aviations-green-transition>

lxxx <https://www.ainonline.com/aviation-news/air-transport/2025-05-28/deutsche-aircraft-rolls-out-first-d328eco-regional-prototype>

lxxxix <https://www.greenairnews.com/?p=7006>

lxxxix <https://leehamnews.com/2025/07/17/whats-the-next-new-aircraft/>

lxxxix <https://www.ainonline.com/aviation-news/air-transport/2025-12-16/green-taxi-targets-hybrid-electric-airliner-taxiing-2027>

lxxxix <https://fly-news.es/sostenibilidad/vueling-primera-piel-de-tiburón-en-sus-airbus-a320vueling-primera-en-usar-piel-de-tiburón-airbus-a320>

lxxxix <https://aviaciondigital.com/easyjet-pintura-liqera-sostenibilidad>

lxxxix *Blended-wing-body*

lxxxix <https://leehamnews.com/2025/09/17/jetzero-ceo-lands-a-silicon-valley-mindset-at-u-s-chamber-of-commerce-global-aviation-summit>

lxxxix <https://www.ainonline.com/aviation-news/futureflight/2025-06-16/jetzeros-blended-wing-body-airliner-nears-critical-design>

lxxxix <https://leehamnews.com/2025/03/14/bjorns-corner-air-transport-route-to-2050-part-13>

xc <https://www.clean-aviation.eu/switch>

xc <https://fly-news.es/aviacion-comercial/aviones/phantom-3500-lujo-eficiente-sin-ventanas>

xc *Sustainable Aviation Fuels*

xc <https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/eaer/sustainable-aviation-fuels/figures-and-tables>

xc https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/environment/refueleu-aviation_en

xc <https://www.greenairnews.com/?p=7338>

xc <https://www.greenairnews.com/?p=8262>

xc *Used Cooking Oil*

xc <https://www.greenairnews.com/?p=7472>

xc <https://www.greenairnews.com/?p=8219>

c <https://www.greenairnews.com/?p=7515>

ci <https://www.transportenvironment.org/topics/planes/saf-observatory/spotlight-on-e-kerosene>

cii <https://www.transportenvironment.org/articles/unlocking-e-safs-potential-for-the-eu-competitiveness-and-energy-independence>

ciii *electric Vertical Take-Off and Landing.*

civ <https://www.ainonline.com/aviation-news/air-transport/2025-02-18/aviation-pauses-alice-electric-aircraft-while-seeking-new>

cv <https://www.ainonline.com/aviation-news/air-transport/2025-09-24/deutsche-aircraft-backs-vaeridions-electric-regional>

cvi <https://www.ainonline.com/aviation-news/aerospace/2025-11-04/financial-gulf-widens-between-electric-aviation-contenders>



- cvii <https://www.ainonline.com/aviation-news/futureflight/2025-10-17/textron-pulls-plug-eaviation-division>
- cviii <https://www.ainonline.com/aviation-news/futureflight/2025-04-30/amprius-launches-higher-energy-sicore-batteries-aircraft>
- cix <https://aerospacelglobalnews.com/news/magnix-showcases-next-gen-battery-during-paris-air-show>
- cx <https://news.mit.edu/2025/new-fuel-cell-could-enable-electric-aviation-0527>
- cxii https://www.airframer.com/news_story.html?report=36439
- cxiii <https://www.ainonline.com/aviation-news/futureflight/2025-06-12/immersion-cooling-could-deliver-lighter-safer-batteries>
- cxiiii <https://aeromarket.com.ar/easa-certifica-el-primer-motor-electrico>
- cxv <https://www.ainonline.com/aviation-news/business-aviation/2025-03-07/magnix-confirms-plans-helicopter-electric-motors>
- cxvi <https://plataforma-aeroespacial.es/2025/10/20/libro-blanco-de-la-movilidad-aerea-urbana-de-madrid/>
- cxvii <https://www.ainonline.com/aviation-news/futureflight/2025-12-30/evio-pitches-strong-hybrid-airliner-path-profitable-regional>
- cxviii <https://www.ainonline.com/aviation-news/futureflight/2025-04-28/cormorant-prepares-start-testing-hybrid-electric-demonstrator>
- cxix <https://theaircraftcompany.org/#ouraircraft>
- cxix *Flight International*, marzo de 2025.
- cxx <https://www.greenairnews.com/?p=7240>
- cxxi *Flight International*, agosto de 2025.
- cxvii <https://actualidadaeroespacial.com/ge-aerospace-prueba-con-exito-un-sistema-de-motor-electrico-hibrido-de-fuselaje-estrecho-en-una-prueba-en-tierra>
- cxviii *Flight International*, marzo de 2025.
- cxviiii <https://www.ainonline.com/aviation-news/futureflight/2025-01-01/fueling-future-engine-makers-bet-hydrogen-power>
- cxv <https://www.aviacionline.com/la-tecnologia-no-esta-madura-airbus-demora-el-desarrollo-de-sus-proyectos-de-propulsion-por-hidrogeno>
- cxvii *Flight International*, junio de 2025.
- cxviii <https://www.transportenvironment.org/articles/airbus-hydrogen-plane-crash-time-for-a-reality-check>
- cxviiii <https://elperiodicodelaenergia.com/solo-el-17-de-los-proyectos-de-hidrogeno-de-la-ue-se-materializaran-en-2030/>
- cxvix <https://www.autobild.es/noticias/giro-180o-repsol-cancela-proyecto-planta-hidrogeno-verde-puertollano-falta-viabilidad-1471458>
- cxv <https://all4zero-hub.com/>
- cxv <https://www.imperial.ac.uk/news/262253/uk-led-breakthrough-offers-path-stable-low-cost/>
- cxvii <https://www.ainonline.com/aviation-news/air-transport/2025-02-03/uk-expands-work-launch-hydrogen-powered-air-transport>
- cxviii <https://www.ainonline.com/aviation-news/futureflight/2025-11-06/zeroavia-receives-eu214-million-deliver-norwegian-cargo>





^{cxixiv} <https://www.ainonline.com/aviation-news/futureflight/2025-11-11/zeroavia-and-hybrid-air-vehicles-study-hydrogen-electric>

^{cxixv} <https://www.flightglobal.com/engines/2025/09/zeroavia-warns-of-funding-shortfall-beyond-first-quarter-of-2026-amid-series-d-investment-push/>

^{cxixvi} <https://aviationweek.com/aerospace/advanced-air-mobility/cranfield-pauses-hydrogen-islander-pivots-uas>

^{cxixvii} <https://www.ainonline.com/aviation-news/aerospace/2025-10-06/project-newborn-team-targets-hydrogen-flights-2028>

^{cxixviii} <http://www.ainonline.com/aviation-news/air-transport/2025-04-02/stralis-sources-hydrogen-fuel-tanks-aircraft-conversion>

^{cxixix} <https://www.ainonline.com/aviation-news/business-aviation/2025-10-01/beyond-aero-achieves-tr16-hydrogen-propulsion-system>

^{cxli} <https://www.ainonline.com/aviation-news/futureflight/2025-01-14/hydrogen-fueled-small-turbine-ground-test-success>

^{cxlii} <https://arpa-e.energy.gov/programs-and-initiatives/search-all-projects/hydrogen-steam-and-inter-cooled-turbine-engine-hysite>

^{cxliii} <https://www.ainonline.com/aviation-news/futureflight/2025-01-28/pratt-whitney-hydrogen-engine-projects-shows-promise-steam>

^{cxliiii} *Flight International*, marzo de 2025.

