COIAE

LA SOSTENIBILIDAD MEDIOAMBIENTAL EN EL SECTOR AERONÁUTICO

ADENDA 2024

Informe del Colegio Oficial de Ingenieros Aeronáuticos de España

Autores:
Óscar Castro Álvarez
Juan Sebastián Montero
Antonio Mota Sandoval y
Javier Díez Díez

Índice

1. **PRÓLOGO** 3

2. INTRODUCCIÓN: LA AVIACIÓN SOSTENIBLE EN CONTEXTO 5

2.1. INTRODUCCIÓN 5

2.2. CAMINOS HACIA LA DESCARBONIZACIÓN 6

2.3. IMPACTO NO DERIVADO DEL CO2 9

3. ACCIONES, INNOVACIÓN Y TECNOLOGÍA 12

3.1. COMPENSACIÓN DE EMISIONES Y MEDIDAS ECONÓMICAS 12

3.2. NAVEGACIÓN, OPERACIONES y AEROPUERTOS 18

3.3. MEJORAS DE EFICIENCIA GRADUALES Y DE DISEÑO 22

3.4. COMBUSTIBLES SOSTENIBLES 25

3.5. AVIACIÓN ELÉCTRICA 30

3.6. HIDRÓGENO 39

4. BIBLIOGRAFÍA 49

4.1. Recursos literarios 49

4.2. Recursos online 50

1. PRÓLOGO

Continuando con el camino emprendido en 2022 cuando el COIAE publicó su informe sobre el estado del arte de la sostenibilidad medioambiental en el sector aeronáutico que se ha ido actualizando año a año, se presenta la adenda que recoge los avances hacia la sostenibilidad producidos durante el año 2024.

El camino hacia la sostenibilidad del sector aeronáutico se caracteriza por el innegable compromiso de todos sus actores, que se ha materializado en compromisos exigentes relacionados con las reducciones de emisiones de CO2, que están exigiendo un importante esfuerzo de la industria en innovación y tecnología, ya que la gran mayoría de las palancas necesarias para la descarbonización corresponden a nuevas tecnologías, nunca utilizadas en la aviación, como la utilización de nuevos combustibles sostenibles, la propulsión eléctrica o el hidrógeno.

La fijación de compromisos y su asunción, requiere de un seguimiento continuo de los avances que se van produciendo que pueda dar credibilidad a que se avanza adecuadamente en el cumplimiento de los objetivos comprometidos.

Las adendas anuales al documento original, que elabora el COIAE, quieren poner el foco en trasladar a la sociedad estos avances con la intención de que el lector pueda hacerse una idea real de la viabilidad del cumplimiento de los compromisos de descarbonización del sector.

Quizá lo más destacable de los hechos producidos en 2024, tiene que ver con el proceso natural de disminución de actores y proyectos en liza, así como la consolidación de áreas tecnológicas en las que centrar los esfuerzos de desarrollo, junto con el no suficiente empuje político y financiero, así como el convencimiento de que la propulsión por H2 requerirá de un horizonte mayor y que el desarrollo de baterías con mayor densidad energética, necesarias para hacer viable las operaciones comerciales eléctricas no parece que podrán estar disponibles en las fechas inicialmente previstas.

Por otro lado, sí se están produciendo importantes avances en la producción y utilización de SAF, que permiten ser optimistas cara al cumplimiento de los compromisos regulatorios del paquete FIt for 55. Así mismo, se ha avanzado de forma significativa en la implantación de mecanismos regulatorios y compensatorios, como la regulación Refuel/EU Aviation, EU ETS y CORSIA, mientras que, en la descarbonización de los aeropuertos, Aena ha adelantado su

compromiso de descarbonización en 10 años. Las áreas en las que se centran los esfuerzos de desarrollo, que no tienen que ver con el uso de nuevos combustibles, están bien definidas: mejoras en aerodinámica (alas más eficientes); mejoras operativas (aviónica colaborativa y cielo único europeo); y nuevas motorizaciones (open rotor) y se mantiene los esfuerzos en la aviación eléctrica, la aviación hibrida y las pilas de combustible.

El camino hacia la descarbonización parece estar bien trazado y se están produciendo avances significativos en aspectos clave, la información recogida en esta adenda permite validar las afirmaciones anteriores y facilita al lector hacerse una visión real de dónde estamos y de qué camino falta por recorrer.

2. INTRODUCCIÓN: LA AVIACIÓN SOSTENIBLE EN CONTEXTO

2.1. INTRODUCCIÓN

El 2024 fue un año complejo en el camino hacia una aviación comercial sostenible. Si, por una parte, se continuó con desarrollos regulatorios[i], tecnológicos e industriales para alcanzar los hitos de descarbonización comprometidos con anterioridad[3], por otra se vivieron retrocesos como los problemas económicos de diversas compañías a la vanguardia de la aviación sostenible, por ejemplo, Universal Hydrogen[ii] o Lilium, o el retraso en los planes de certificación como el *D328eco* de Deutsche Aircraft[iii].

Ilustración 1. Demostrador híbrido-eléctrico Ecopulse de Daher/Safran/Airbus (AIRBUS)

Dejando a un lado los esfuerzos de producción de combustible sostenible de aviación (SAF), en términos generales se podría hablar de una cierta racionalización de las iniciativas empresariales para la descarbonización de la aviación en base a nuevas tecnologías, con una disminución de actores y proyectos en liza[iv], a medida que se acerca el objetivo de la entrada en servicio. Dicho lo cual, y como se podrá apreciar en este informe, siguen surgiendo nuevos proyectos e iniciativas para alcanzar aeronaves comerciales sin emisiones de CO2.

El empuje político y financiero para seguir la senda de la sostenibilidad en la aviación resulta así más necesario que nunca, con una creciente constatación de los efectos del calentamiento global, que incluso podrían estar afectando directamente a la aviación con el incremento, en frecuencia e intensidad, de las turbulencias durante el vuelo[v]. En este

aspecto, la Unión Europea mantiene un claro papel de liderazgo[vi], que, como se verá más adelante, incluye la promoción de proyectos tecnológicos, mandatos para la gradual introducción de combustibles sostenibles, mejoras en la eficiencia del control aéreo o, también importante, manteniendo una vigilancia en el cumplimiento de la regulación de compensación de emisiones en Europa, y en la veracidad de los logros anunciados por actores de la industria aeronáutica[vii].

A nivel nacional, 2024 también fue un año de progreso en el campo de la descarbonización de la aviación. Además de los numerosos proyectos industriales aquí expuestos, también se constató la ampliación de iniciativas, como la Alianza por la Sostenibilidad del Transporte Aéreo en España[viii], o en el ámbito de investigación universitaria[ix].

2.2. CAMINOS HACIA LA DESCARBONIZACIÓN

Las hojas de ruta para descarbonizar la aviación, con la planificación de desarrollos tecnológicos e industriales que lo hagan posible, siempre ha contado con una gran diversidad de propuestas por parte de numerosas entidades y empresas que, en general, convergen en una neutralidad neta de emisiones para 2050 (ilustración 2). Sin embargo, frente al optimismo de los últimos años, en 2024 surgieron ciertas dudas sobre la viabilidad de algunos hitos intermedios en ese camino hacia la sostenibilidad medioambiental.

Este es el caso con el objetivo aspiracional establecido por **OACI** a finales del 2023, donde se buscaba alcanzar una reducción de la intensidad de carbono del 5% en los combustibles de aviación para 2030. El pasado junio, la asociación internacional de líneas aéreas (**IATA**) blandió la falta de acciones políticas decididas para promover la fabricación de SAF como obstáculo fundamental para conseguirlo[x].

De hecho, en un informe posterior volvió a poner de relieve las enormes diferencias entre las diversas hojas de ruta[xi], por ejemplo, en el papel del SAF, que podría variar desde un reducido 24% a asumir la responsabilidad casi total con un 70%, muy cercano a su propia predicción (Ilustración 2).

Merece la pena destacar en el plan de ruta de IATA, tanto la relevancia que otorga a la captura de carbono, que permitiría seguir con el modelo actual de negocio de las aerolíneas, como la falta de referencias a la gestión de la demanda, parte del debate actual sobre el impacto climático de la aviación, como se presentará más adelante.

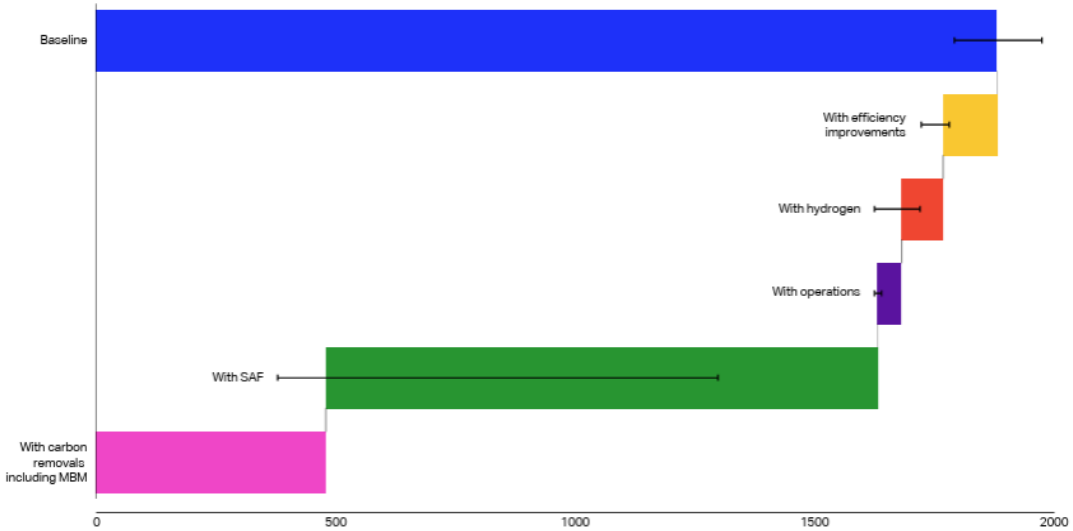

Ilustración 2. Distribución de reducciones en t_{CO2}, por tipo de acción, para neutralidad de emisiones de aviación comercial en 2050 (IATA)

Para completar las aportaciones de la patronal internacional de las aerolíneas en 2024, IATA publicó también una serie de guías de acción detallas, por ámbito de responsabilidad, que considera necesarias para alcanzar el objetivo de descarbonización en 2050 (Ilustración 3). De forma similar, la universidad de Cambridge publicó, también el año pasado, las cuatro medidas urgentes que considera fundamentales para lograrlo[xii]. Este plan de acción para corregir la dinámica de emisiones actual debería implementarse antes de 2030, e incluiría la promoción del SAF, mejoras de eficiencia, inversión en tecnologías disruptivas y abordar las estelas de condensación, una cuestión esta última que ido ganando relevancia en el debate sobre la aviación sostenible, y que se abordará en la siguiente sección.

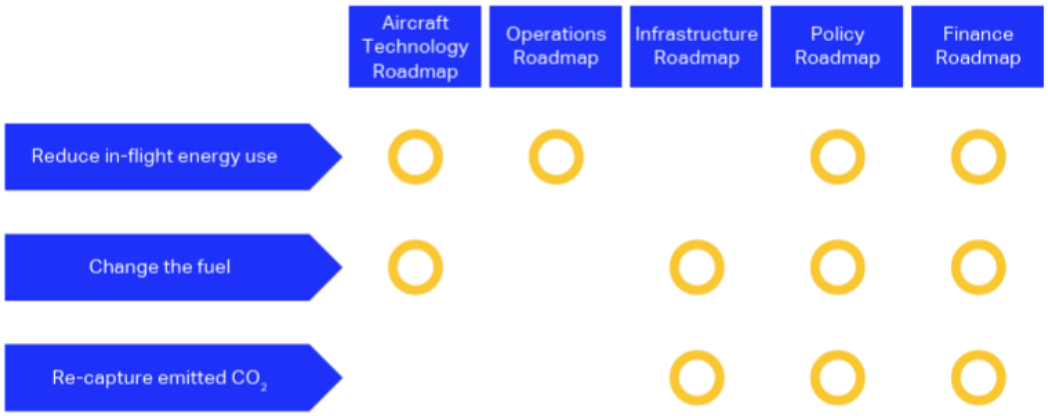

Ilustración 3. Hojas de ruta, por área de acción, propuestas para alcanzar la neutralidad de CO2 en la aviación comercial para 2050 (IATA)

Otro ejemplo de esta revisión de previsiones y compromisos respecto a la emisión de CO2 en la aviación comercial se produjo en agosto del año pasado, cuando Air New Zealand renunció a sus objetivos para 2030, aduciendo el lento progreso tanto en la disponibilidad de nuevas tecnologías en aeronaves, como en la expansión de la producción de SAF. A pesar de ello, la compañía anunció que sigue cooperando con el desarrollo de aeronaves con cero emisiones, y mantiene su compromiso de neutralidad de carbono para 2050[xiii]. Con todo, en términos generales, el trabajo para progresar en el camino hacia la aviación sostenible se ha mantenido, incluso acelerado, durante el año pasado. Ejemplos de ello son la reconfiguración del grupo de trabajo gubernamental en Reino Unido[xiv], el *Jet Zero Taskforce*, o los nuevos planes y compromisos del gobierno australiano[xv].

En este sentido, y como ya se ha señalado, uno de los ejes clave para descarbonizar la aviación es el desarrollo de nuevas tecnologías. La Unión Europea lleva muchos años apoyando financieramente la innovación y desarrollo necesarios, actualmente bajo el paraguas del programa ***Clean Aviation***[xvi]. Así, en diciembre pasado se publicó la tercera convocatoria, dotada con 305 millones de euros, para presentar proyectos de alto impacto en aviación regional y de corto-medio alcance, además de promocionar tecnologías de aplicación rápida (Ilustración 4).

Ilustración 4. Áreas de interés tecnológico para la tercera convocatoria de Clean Aviation (EU)

2.3. IMPACTO NO DERIVADO DEL CO2

Durante el pasado año se intensificó el debate sobre el impacto de los efectos negativos de las emisiones de aviación más allá del dióxido de carbono. El foco de atención se centró en las estelas de condensación o *contrails* (2). Si bien la cuantificación de su contribución al calentamiento global aún no está consolidada (3) no hay duda de su enorme relevancia, del mismo orden de magnitud que el CO2.

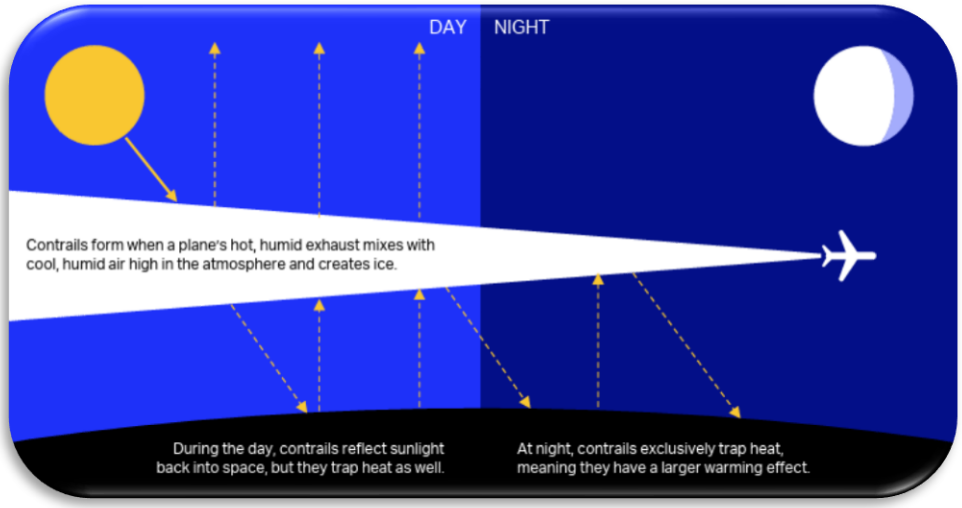

Ilustración 5. Mecanismos de impacto climático de las estelas de condensación durante el día y la noche (American Airlines)

En este contexto, la **UE** presentó en 2024 la normativa y herramientas para el seguimiento, notificación y verificación (MRV[xvii]) de todas las emisiones no relacionadas con el CO2, obligatorio para las aerolíneas en la Unión Europea a partir del 1 de enero de 2025[xviii]. El sistema *NEATS* permitirá una comunicación simplificada para cumplir con este requerimiento, que no estará sujeto a ninguna obligación financiera dentro del programa EU ETS por lo menos hasta una nueva revisión legislativa prevista para 2028.

Por medio de un informe en abril del pasado año, la asociación internacional de líneas aéreas se posicionó con claridad en contra de este requerimiento, aduciendo la necesidad de más investigación para comprender en profundidad los efectos climáticos de los *contrails*[xix]. Más aún, IATA prevenía de las implicaciones legales si la obligación incluía a todos los vuelos con salida o llegada en la UE, según estaba previsto, ya que entraría en el ámbito de competencia de CORSIA. En frente, una inusual alianza de organizaciones ecologistas y aerolíneas de bajo coste, con rutas aéreas principalmente intraeuropeas, argumentó que el éxito del MRV solo sería posible si este cubría todos los vuelos, tanto de corto como largo alcance, para poder entender así el impacto de cada sector de la aviación comercial[xx]. Finalmente, en julio del

año pasado la UE confirmó que se mantendría la obligación del seguimiento y notificación de emisiones más allá del CO2, aunque cedió en el alcance de aplicación, limitándolo a los vuelos intraeuropeos[xxi].

Por otra parte, en diciembre de 2024 una agrupación de 50 científicos especializados en aviación y cambio climático firmaron una carta en la que urgían a abordar la mitigación del calentamiento global producido por las estelas de condensación[xxii]. De acuerdo con un estudio de la organización Transport&Environment[xxiii], esto se podría alcanzar hasta en un 50% antes de 2040 si se implementasen las técnicas de predicción y cambio de ruta en un número muy limitado de vuelos, responsables del 80% del impacto (Ilustración 6). Para asegurar un beneficio neto positivo, en términos globales, se debe tener en cuenta el consumo adicional de combustible asociado a estas maniobras, con el consiguiente incremento en emisiones de dióxido de carbono.

De hecho, la tecnología y sistemas necesarios para gestionar rutas de vuelo que eviten la formación de estelas de condensación lleva ya tiempo en desarrollo, con resultados muy prometedores en diversos ensayos realizados en Europa, por ejemplo, los liderados por la empresa SATAVIA[xxiv], y en Estados Unidos de la mano de Google[xxv]. Con un consumo adicional mínimo en un número reducido de vuelos, y prácticamente sin coste para los usuarios, se confirmaron las reducciones previstas en el impacto climático por *contrails*.

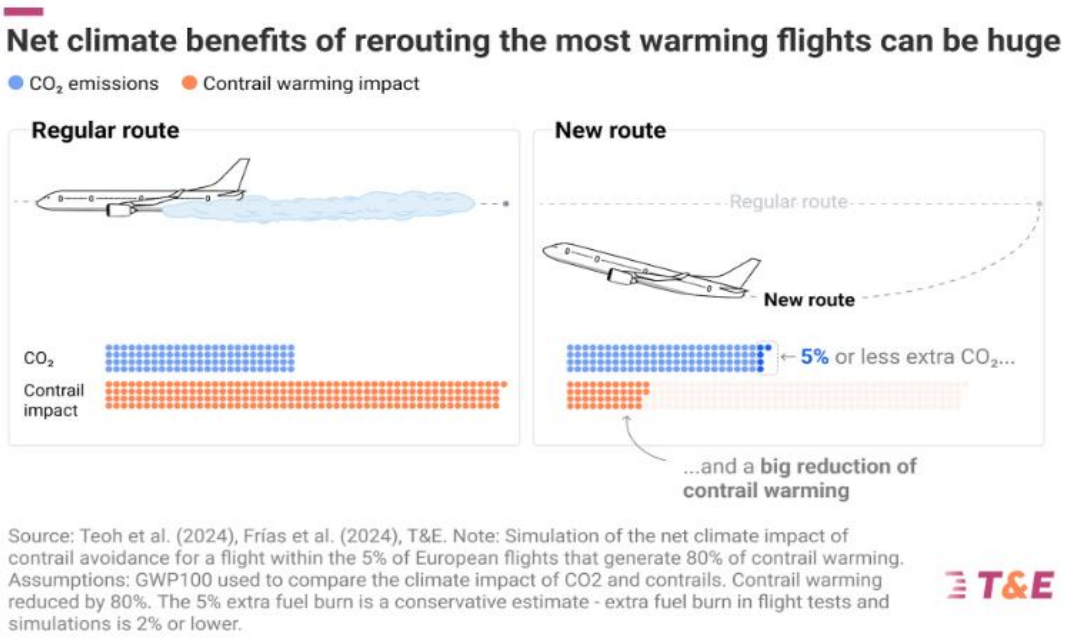

Ilustración 6. Cambio de ruta para evitar la formación de estelas de condensación (T&E)

Otras iniciativas lanzadas el año pasado en el ámbito de la mitigación de efectos no-CO2 incluyen un programa de financiación pública para la investigación en Reino Unido[xxvi], y diversos programas de ensayos en vuelo y toma de datos tanto en Estados Unidos como en Europa para mejorar la caracterización de las estelas[xxvii]. También se anunciaron evaluaciones para calibrar el potencial mitigador del SAF en este ámbito tanto en ensayos en tierra[xxviii], como también con prometedores resultados tras la realización de pruebas en vuelo[xxix].

Por último, cabe destacar la lista de aerolíneas comprometidas con la mitigación de los efectos de las estelas de condensación lanzada por la organización no gubernamental Blue Lines[xxx]. En ella se registran hasta 30 operadores con diferentes niveles de implicación, incluyendo la participación en ensayos o el establecimiento de objetivos de reducción.

3. ACCIONES, INNOVACIÓN Y TECNOLOGÍA

3.1. COMPENSACIÓN DE EMISIONES Y MEDIDAS ECONÓMICAS

3.1.1. Compensación

El objetivo último de la aviación sostenible es la de no emitir ni dióxido de carbono, ni otros elementos contaminantes o que contribuyan al cambio climático. Sin embargo, la urgencia de la crisis climática actual hace que la industria aeronáutica en su conjunto necesite desarrollar soluciones transitorias que limiten las emisiones netas durante ese largo camino. Es aquí donde la compensación entra en juego, retirando o evitando la emisión a la atmósfera, de forma fiable y validada, de cantidades equivalentes del CO2 debido a los vuelos comerciales.

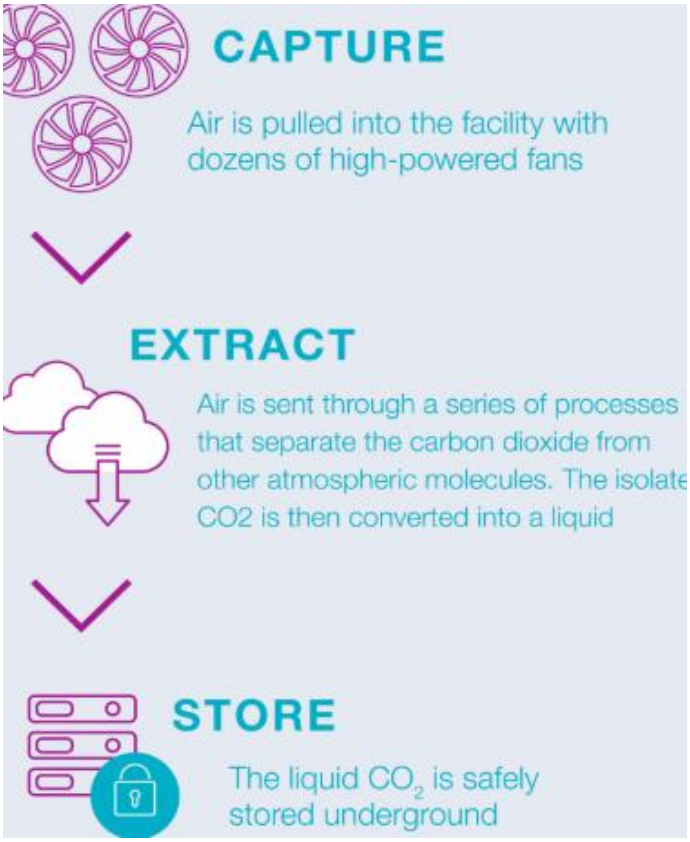

Ilustración 7. Oferta de compensación por captura y almacenaje de captura (Airbus)

Además de las opciones convencionales, en las que proyectos reducen emisiones en procesos industriales establecidos, o simplemente retiran el carbono mediante masas forestales, se está estableciendo un nuevo sector que directamente captura de la atmósfera el dióxido de carbono, almacenándolo de diversas formas (DACCS[xxxi]).

Airbus promueve este tipo de estrategias con la oferta de captura de carbono[xxxii], al que se han unido compañías como EasyJet en 2024.

La naturaleza de los proyectos de captura y compensación de CO2 se ha diversificado así de manera significativa, con proveedores que desarrollan diferentes líneas de acción. Este es el caso de CUR8, con el que British Airways firmó un acuerdo el septiembre pasado por los derechos de

compensación correspondientes a 33.000 t de dióxido de carbono[xxxiii]. Por otra parte, y como tendencia de fondo, el mercado de compensación convencional ha sufrido una reciente caída en la disponibilidad de créditos de calidad, generando una cierta desconfianza pública en esta estrategia de mitigación de las emisiones. Para contrarrestarlo, organismos como el **ICVCM**[xxxiv] promueven una serie de principios básicos para este tipo de proyectos (Ilustración 8), para asegurar la integridad y efectividad de los créditos de carbono.

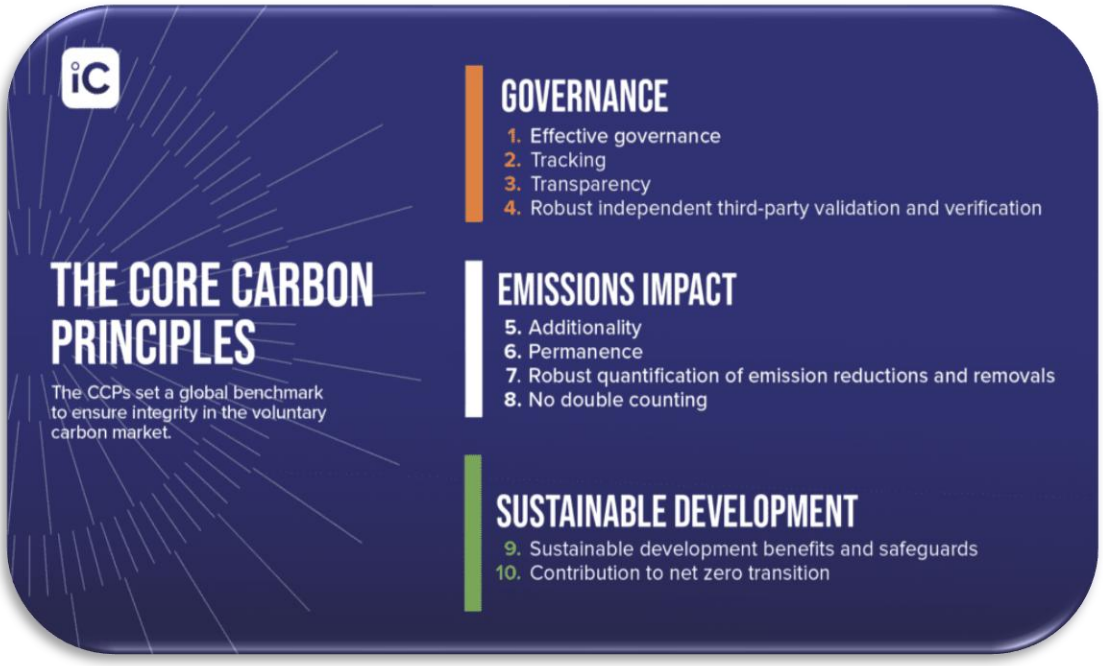

Ilustración 8. Los 10 principios fundamentales de ICVCM para la compensación de CO2 (ICVCM)

3.1.2. CORSIA y EU ETS

En 2024 se inició la fase I del esquema de reducción y compensación de emisiones de la aviación internacional **CORSIA** (O. Castro Álvarez 2, pág. 13) que, como la fase piloto previa, todavía es voluntaria para los países miembros de OACI. No obstante, hay que destacar que 126 países ya participaron el año pasado en este sistema de compensación de CO2, cubriendo un total de 670 operadores de aeronaves[xxxv].

Si bien, como ya se ha señalado, el mercado de créditos de carbono sufrió turbulencias recientemente, se espera una normalización de su funcionamiento para maximizar el impacto de CORSIA. Merece la pena resaltar, además, toda la normativa desarrollada para la cualificación de combustibles de aviación como sostenibles, de modo que puedan contribuir al cumplimiento de las obligaciones de compensación de las aerolíneas. El SAF, por definición, sustrae CO2 de la atmósfera durante su producción, lo que compensa, en

mayor o menor medida, las emisiones producidas después al emplearse en aviación.

Por su parte, el esquema **EU ETS**, también descrito ya en documentos anteriores (O. Castro Álvarez 1, pág. 17), es un sistema *cap-and-trade* que limita el total de emisiones de un conjunto de sectores intensivos en carbono en Europa, entre ellos el de la aviación comercial. De esta forma, las aerolíneas deben negociar con otras entidades para conseguir los permisos de emisiones que cubran sus operaciones intraeuropeas. Así, 2024 fue un año crucial para las compañías aéreas en relación con sus obligaciones respecto a EU ETS[xxxvi], con una reducción del 25% en los permisos de emisión gratuitos para las aerolíneas (que desaparecerán en 2026), y por la preparación de la monitorización de los efectos no-CO2 de la aviación, cuya obligatoriedad comenzó el 1 de enero de 2025. Finalmente, y como ya se ha señalado, este mandato de información no cubrirá a vuelos extraeuropeos, manteniendo la provisional demarcación frente a CORSIA.

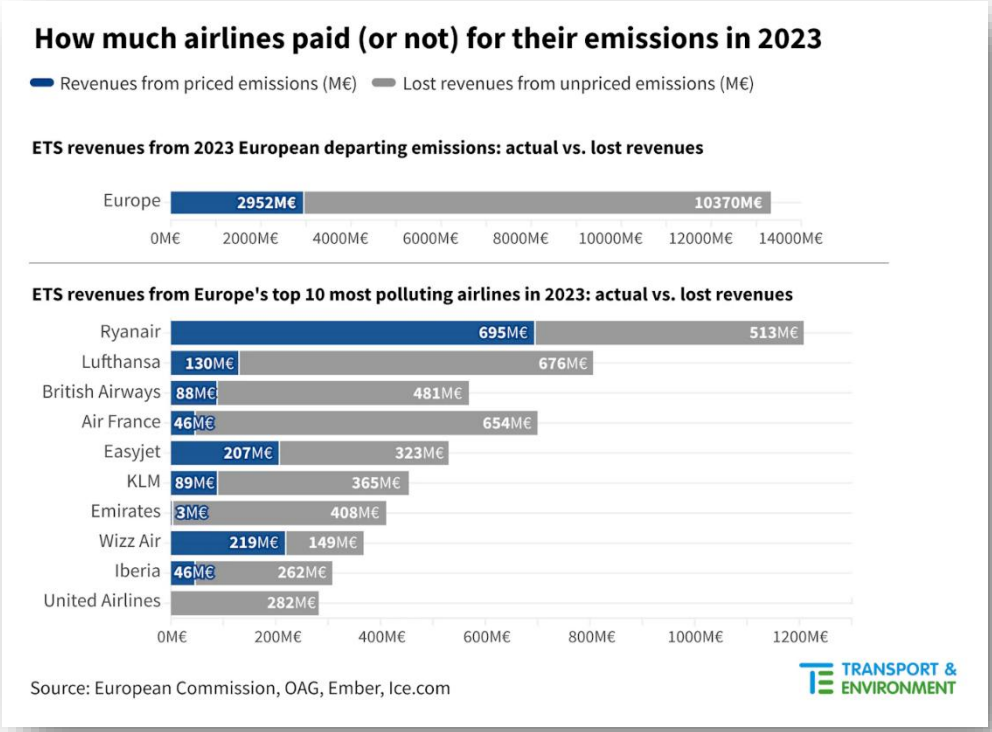

Ilustración 9. Análisis del porcentaje de emisiones de CO2 tasado a aerolíneas europeas bajo EU ETS (T&E)

En abril de 2024 la ONG dedicada al transporte sostenible T&E publicó un análisis del porcentaje de emisiones de CO2 de aerolíneas europeas realmente sujeto a tasas bajo el

programa EU ETS[xxxvii]. Este disminuye claramente para aquellas compañías con mayor volumen de vuelos extraeuropeos, actualmente no cubiertos por la normativa europea, como es el caso de las aerolíneas de bandera nacionales (Ilustración 9). El resultado total es que menos de un tercio de dichas emisiones supusieron una carga económica para los operadores en 2023, aunque ese porcentaje con seguridad irá aumentando en los próximos años, con la progresiva eliminación de los permisos de emisión gratuitos ya señalada.

3.1.3. Medidas políticas y gestión de demanda

La introducción de obligaciones para la compensación de emisiones de CO2 por parte de las aerolíneas (EU ETS, CORSIA), así como el mandato en Europa para el uso de SAF que comienza en 2025 (2% para ese año en todas las aeronaves que despeguen de suelo europeo), abrieron el debate del coste total de esas medidas, y de si se repercutirían sobre los pasajeros. En junio de 2024, en lo que podría indicar el camino de otras aerolíneas, el grupo **Lufthansa** anunció un recargo medioambiental en todos sus billetes con salida desde la UE, Suiza, Reino Unido y Noruega a partir del 1 de enero de 2025. Este incremento, que variará entre 1€ y 72€ según el tipo de vuelo, servirá para afrontar los sobrecostes relacionados con la introducción de combustible sostenible y el cumplimiento de las normativas de emisiones[xxxviii].

Este recargo no se debe confundir con la posibilidad de realizar contribuciones voluntarias que algunas aerolíneas ofrecen a sus pasajeros para compensar las emisiones de su vuelo. Esta última práctica motivó, el año pasado, una carta de la UE a 20 aerolíneas requiriendo que la información suministrada fuese rigurosa para evitar engaños, en lo que podría constituir *greenwashing* o *ecopostureo*[xxxix]. Relacionado con esta búsqueda de transparencia, la UE también aprobó en diciembre de 2024 la puesta en marcha de una etiqueta medioambiental informativa en los billetes de avión europeos, en la que se indicará claramente la cantidad de emisiones asociadas a cada vuelo[xl].

La cuestión de fondo es la de cómo financiar los sobrecostes por impuestos y normativas, y si podrían terminar reduciendo la demanda en el tráfico aéreo, situación temida por la industria, pero sin duda deseada por actores ecologistas. Cabe mencionar que el tráfico aéreo está creciendo de nuevo con fuerza, y se espera que recupere su nivel prepandemia para 2025. Tampoco hay que perder de vista que encarecer los billetes de avión dificultaría el acceso al transporte aéreo a los pasajeros con menos posibilidades económicas, y por tanto también a sus beneficios socioeconómicos, volviendo a los tiempos en los que se trataba de un medio de transporte elitista.

Para evitar este escenario, pero al mismo tiempo reducir el tráfico aéreo, y por tanto las emisiones de gases de efecto invernadero, una coalición de entidades ecologistas propusieron en octubre de 2024 una tasa de vuelos frecuentes (TVF)[xli]. Esta tasa se aplicaría

de forma progresiva a partir del tercer vuelo anual de cualquier pasajero, comenzando con un valor de 50€, y se iría incrementando hasta los 400€ a partir del noveno vuelo en un mismo año, con penalizaciones también para los vuelos de larga distancia o clases premium. El impacto de una medida de este tipo es objeto de discusión, así como el potencial de reducción de emisiones estimado. Además, esta tasa necesitaría solventar varias implicaciones legales, como por ejemplo las del hipotético registro centralizado de pasajeros que lo haría posible.

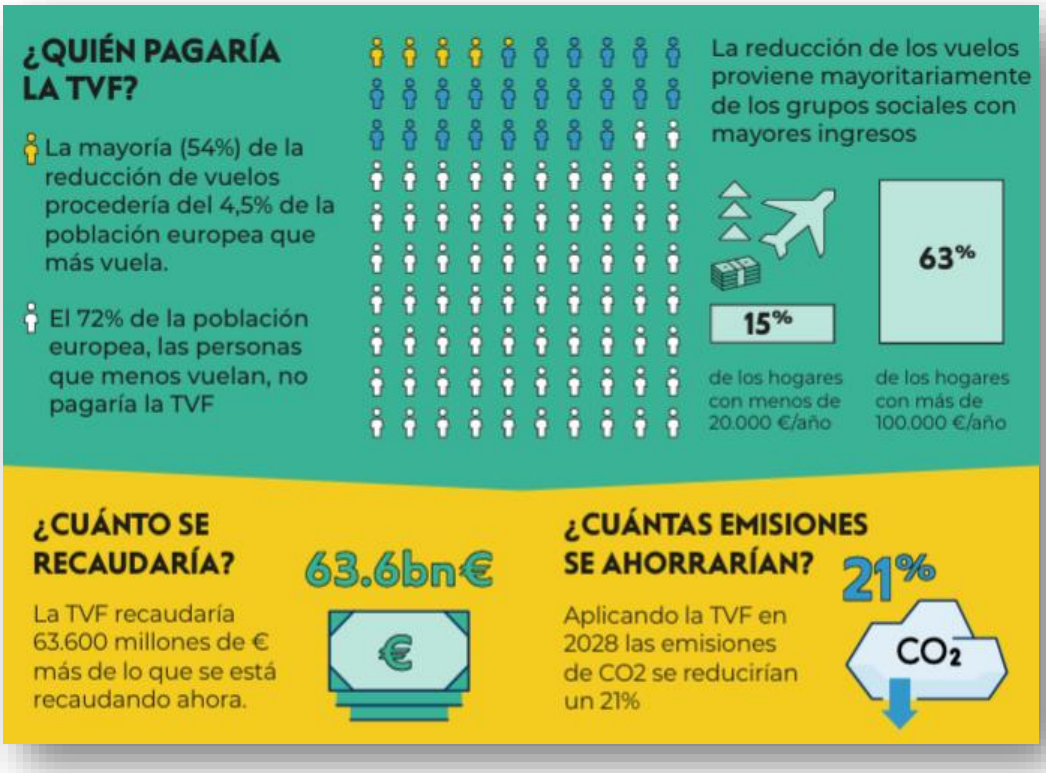

Ilustración 10. Datos básicos de la propuesta de Tasa a los Vuelos Frecuentes (Ecologistas en Acción)

La imposición directa de un impuesto al queroseno, que históricamente ha estado exento del mismo, también se debatió a nivel europeo durante 2024. Dicha tasa sería más sencilla en su aplicación, pero tendría un efecto indiscriminado sobre los pasajeros que lo pagarían, y con un impacto significativo sobre la economía[xlii]. Estas consecuencias, y la falta de unanimidad en los países de la UE para introducirlo, harán que probablemente la exención siga en vigor, al menos en el corto y medio plazo[xliii]. Para terminar con las medidas impositivas sobre el tráfico aéreo, hay que destacar la subida del 20% en el impuesto estatal sobre los pasajeros que despeguen desde Alemania a partir de mayo de 2024, que variaría entre los 15€ y 71€, según el destino[xliv].

Otra propuesta para reducir el tráfico aéreo que se lanzó el año pasado en España, esta vez desde el ámbito político, fue la de prohibir los vuelos domésticos con alternativa ferroviaria viable de menos de dos horas y media, dejando al margen algunas excepciones significativas[xlv].

La iniciativa legislativa acordada por los socios de gobierno en febrero de 2024, que todavía tiene que superar diferentes trámites, y de hecho no está claro cuándo podría llegar a entrar en funcionamiento si es que prospera, fue criticada desde diversos sectores por su impacto económico e ineficiencia medioambiental. Aun así, en septiembre pasado se presentó otra iniciativa legislativa similar que directamente prohibiría los vuelos de menos de una hora[xlvi].

Para analizar la eficiencia de dichas medidas, el **COIAE** publicó una versión actualizada de su informe sobre este tipo de propuestas. En este estudio se estimó el máximo beneficio potencial en menos del 0,7% de las emisiones de la aviación en España, y alrededor del 0,13% del CO2 emitido por el sector del transporte nacional (ver 4). Con estos valores, que ni siquiera tienen en cuenta las enormes emisiones asociadas a la construcción de la infraestructura ferroviaria de la alternativa, cabe preguntarse si no se estará ante otro tipo de *ecopostureo*, que sin embargo evita afrontar las medidas realmente necesarias para alcanzar una aviación medioambientalmente sostenible.

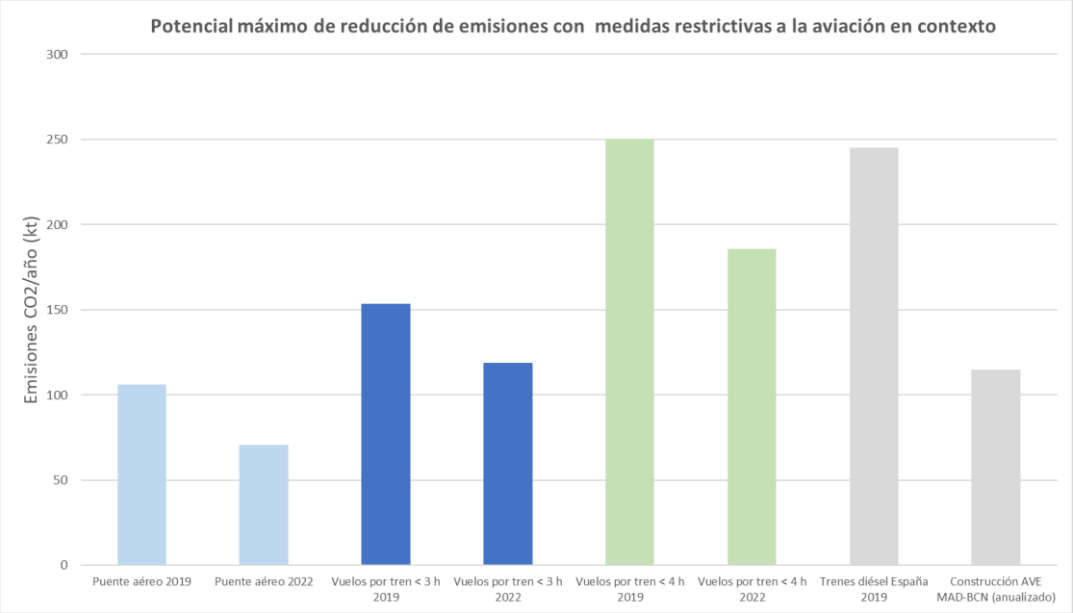

Ilustración 11. Potencial máximo de reducción de emisiones de CO2 con reemplazo de vuelos domésticos en España por alternativas ferroviarias en contexto (COIAE)

Ilustración 12. Mapa de las rutas aéreas en 2022 (Adam Symington).

Para dar contexto al debate, los datos de Aena correspondientes a 2024 indican un incremento del 9,2% en el número de pasajeros en España respecto al año anterior, valor consistente con el dato interanual de consumo de queroseno, el combustible de aviación, en agosto pasado, con una subida del 13%[xlvii]. Sin duda la aviación sigue en expansión tras la pandemia, y la gestión de este tirón en la demanda resulta un desafío en muchos aspectos, incluyendo el medioambiental.

3.2. NAVEGACIÓN, OPERACIONES y AEROPUERTOS

3.2.1. Navegación

En octubre de 2024 fue finalmente aprobada la reforma del **Cielo Único Europeo** por parte de la eurocámara[xlviii]. El objetivo es mejorar la gestión de los vuelos dentro del continente, reduciendo los costes, aumentando la capacidad, pero, muy importante, favoreciendo rutas optimizadas para menores emisiones a través de tasas reducidas.

Lanzado en 1999, el *Single European Sky* busca racionalizar la navegación aérea en un espacio geográfico reducido, con numerosos países y sus respectivos gestores de control de tráfico aéreo. Tras muchos retrasos y reticencias por parte de algunos estados, en principio debido a la relativa cesión de soberanía, y sin alcanzar la extensión de reforma demandada por algunas aerolíneas, el camino hacia la reducción de hasta un 10% de emisiones de CO2 está ahora abierto. **EuroControl** jugará un papel central en este nuevo escenario[xlix]. La optimización del trayecto es, obviamente, una herramienta para reducir consumo y

emisiones. Sirva de ejemplo el vuelo de prueba de la aerolínea SAS desde Copenhague a Los Ángeles, que alcanzó una mejora del 20% en consumo de combustible, en gran parte debido a seleccionar una ruta a mayor latitud[l].

A escala nacional, **ENAIRE**, gestora de navegación aérea en España, ha lanzado su programa *Fly Clean*, que busca racionalizar el tráfico y rutas que vuelan las aerolíneas para incrementar la eficiencia global[li]. Además, en 2024 participó en la 14ª Conferencia de Navegación Aérea de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), donde se propulsaron medidas para una navegación medioambientalmente más eficiente, por ejemplo, reduciendo las distancias de separación longitudinal entre aeronaves.

Esta distancia entre aeronaves es además el pilar del programa GEESElii, continuador del fello'fly de Airbus. Respaldado por financiación de la Unión Europea, durante tres años se realizarán ensayos con diferentes aerolíneas en los que aeronaves comerciales volarán en formación, como los gansos durante la migración, para beneficiarse de la energía de la estela del avión líder, y disminuir su consumo (ilustración 13). Si *fello'fly* demostró ahorros de combustible de hasta el 10%, ahora el objetivo de *GEESE* es desarrollar todos los procedimientos operativos para enlazar de forma eficiente y segura aeronaves comerciales en vuelos de larga distancia.

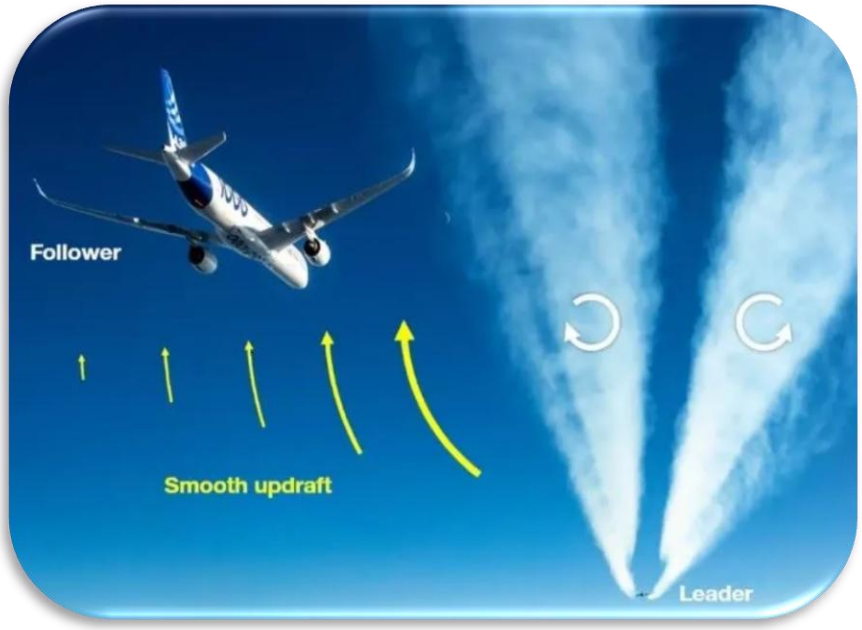

Ilustración 13. Mecanismo de recuperación de la energía de estela (Wake Energy Retrieval) objetivo del programa GEESE (Airbus)

3.2.2. Operaciones

Las operaciones de una aeronave, desde que deja la terminal del aeropuerto hasta su llegada a destino, presenta numerosas oportunidades para optimizar las actuaciones, reduciendo el consumo y las emisiones asociadas.

En la actualidad las aerolíneas buscan exprimir estas oportunidades con equipos y software diseñados para informar a los pilotos sobre las mejores alternativas. Un ejemplo de ello son los procedimientos operativos verdes (*Green Ops*) de la aerolínea **Emirates**, que busca optimizar parámetros como el centro de gravedad, la disposición de los flaps o la técnica de frenado para incrementar la eficiencia[liii] (Ilustración 14).

Entre las aerolíneas españolas, a modo de ejemplo, **Air Europa** utiliza el sistema *Opticlimb*, con funciones parecidas. Volotea, por su parte, llegó a un acuerdo el octubre pasado para introducir el sistema de reducción de consumo *Descent Profile Optimization* (DPO) de Airbus, con un funcionamiento similar, aunque centrado únicamente en la fase de descenso[liv].

La gestión de una flota comercial también abre oportunidades para mejorar la eficiencia, con herramientas como *SkyBreathe*, que utiliza los datos de las operaciones para ahorrar, teóricamente, hasta un 5% el consumo conjunto de combustible. En España Air Nostrum introdujo este software en 2024[lv], uniéndose a más de 60 aerolíneas en el mundo.

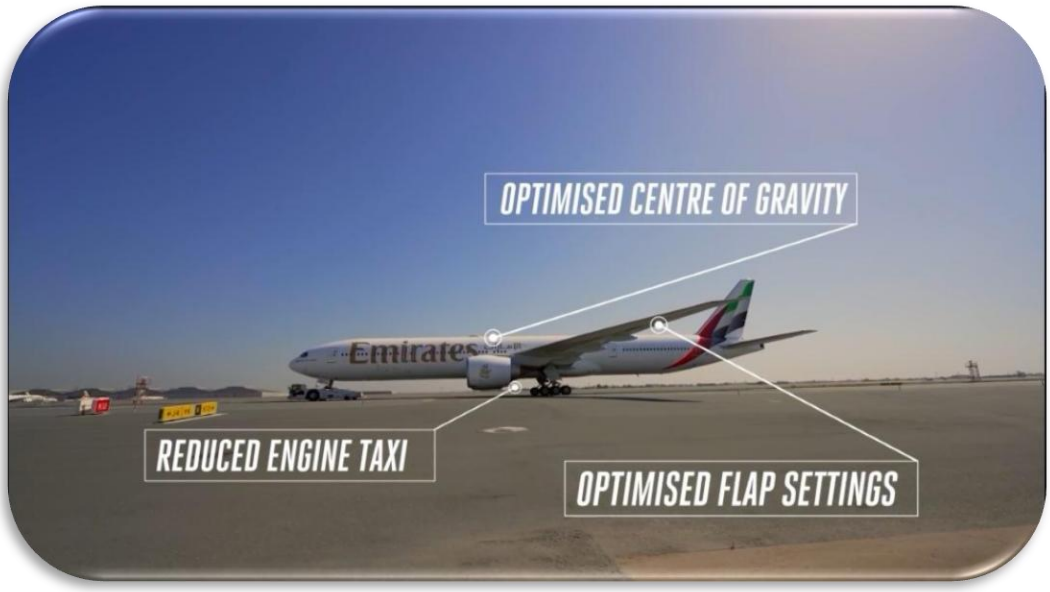

Ilustración 14. Parámetros controlados por el sistema Green Ops de Emirates para reducir consumo (A21)

3.2.3. Aeropuertos

El tráfico aéreo en España, tras la interrupción de la pandemia, ha vuelto a batir récords, apuntando a que en 2025 se alcancen los 300 millones de pasajeros transitando por los aeropuertos españoles[lvi]. Estos datos, positivos en la parte económica, ponen sin embargo de manifiesto la necesidad de acelerar en el camino hacia la reducción de emisiones en el sector.

En esta dirección, el operador de aeropuertos españoles **Aena** anunció en 2024 que adelanta 10 años su objetivo de aeropuertos neutros en emisiones de CO2, situándolo ahora en su Plan Estratégico para 2030. Para ello, se está promoviendo la reducción tanto de emisiones propias (alcance 1 y 2) con acciones como la implantación de centrales fotovoltaicas (Valencia), o la transición a iluminación LED en plataformas (Reus); así como las de terceros (alcance 3), por lo que fue premiada el año pasado[lvii]. Una de las estrategias más sencillas para mejorar la sostenibilidad medioambiental de los aeropuertos consiste en la descarbonización de la flota de plataforma, que integran todos los vehículos del lado aire asistiendo a las aeronaves y mantenimiento de pista[lviii].

La apuesta por una aviación más sostenible basada en el hidrógeno también tiene una parada fundamental en los aeropuertos, que no solo deberán asegurar la disponibilidad de este combustible, sino que podrían convertirse en centros para su producción y distribución. Los primeros pasos ya se están dando, como muestra la adquisición de electrolizadores en el aeropuerto de Lleida, donde se aprovechará el parque fotovoltaico existente para producir H2 verde[lix].

Muchos aeropuertos están explorando esta introducción del hidrógeno en sus operaciones, como es el caso en los de Bruselas (parte de su programa de sostenibilidad *Stargate*[lx]) o Bristol[lxi], donde el año pasado se lanzaron proyectos piloto con procedimientos y estaciones de recarga para los vehículos de asistencia.

Airbus, el gran defensor del papel del hidrógeno en la futura aviación sostenible, también trabaja en colaboración con aeropuertos y otras entidades para asegurar su disponibilidad y la madurez de las operaciones de recarga. Este es el objetivo del proyecto *Goliat*, lanzando en 2024[lxii], además del programa *Hydrogen Hub at Airports*[lxiii] (Ilustración 15) con acuerdos con entidades aeroportuarias y otros actores por todo el mundo.

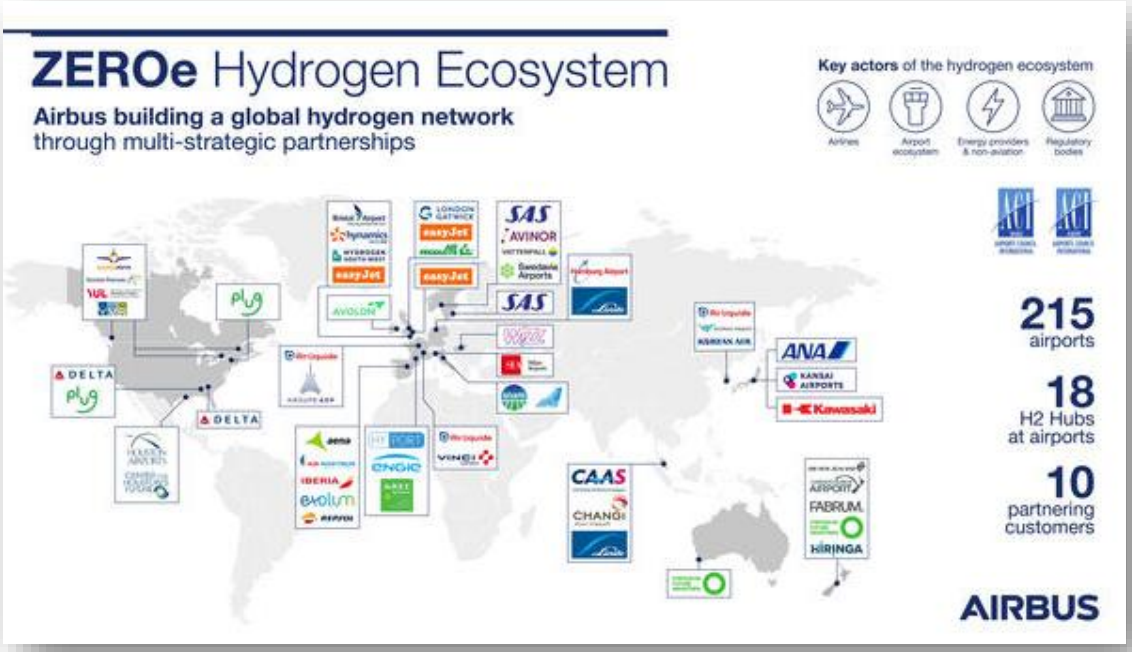

Ilustración 15. Aeropuertos y entidades participantes en los programas de Airbus para la introducción y disponibilidad del H2 en aeropuertos (Airbus)

3.3. MEJORAS DE EFICIENCIA GRADUALES Y DE DISEÑO

El continuo progreso en la reducción de emisiones por kilómetro y pasajero de la aviación comercial, aproximadamente con mejoras del 2% anual 1, se ha conseguido en su mayor parte gracias a optimizaciones en el diseño de los motores, los materiales empleados y la aerodinámica en general. Esto no significa que, en el camino hacia la neutralidad de emisiones, no sean necesarios cambios fundamentales en el concepto de diseño de las aeronaves, o en el sistema y combustible de propulsión, sino que todos los esfuerzos, de mayor o menor calibre, deben ir en la misma dirección.

El impacto de las mejoras graduales en la reducción de emisiones se pone de manifiesto con la renovación de las flotas, al introducir aeronaves modernas. En un estudio realizado por la empresa de análisis Cirium, comparando las emisiones específicas por asiento y kilómetro en vuelos de salida desde Adolfo Suárez Madrid-Barajas en los primeros trimestres de 2019 y 2024, se concluyó que su valor medio se redujo un 10%, hasta los 73 gCO2/asiento·km[lxiv].

La Ilustración 16 muestra los datos agrupados por tipo de aeronave, número de vuelos y emisiones específicas. Como se puede apreciar, el completo reemplazo de los *A340-600* por

nuevos *A350-900*, o la incipiente sustitución de antiguos *A320* por sus versiones modernizadas *A320/A321neo,* redujeron significativamente las emisiones específicas de CO2.

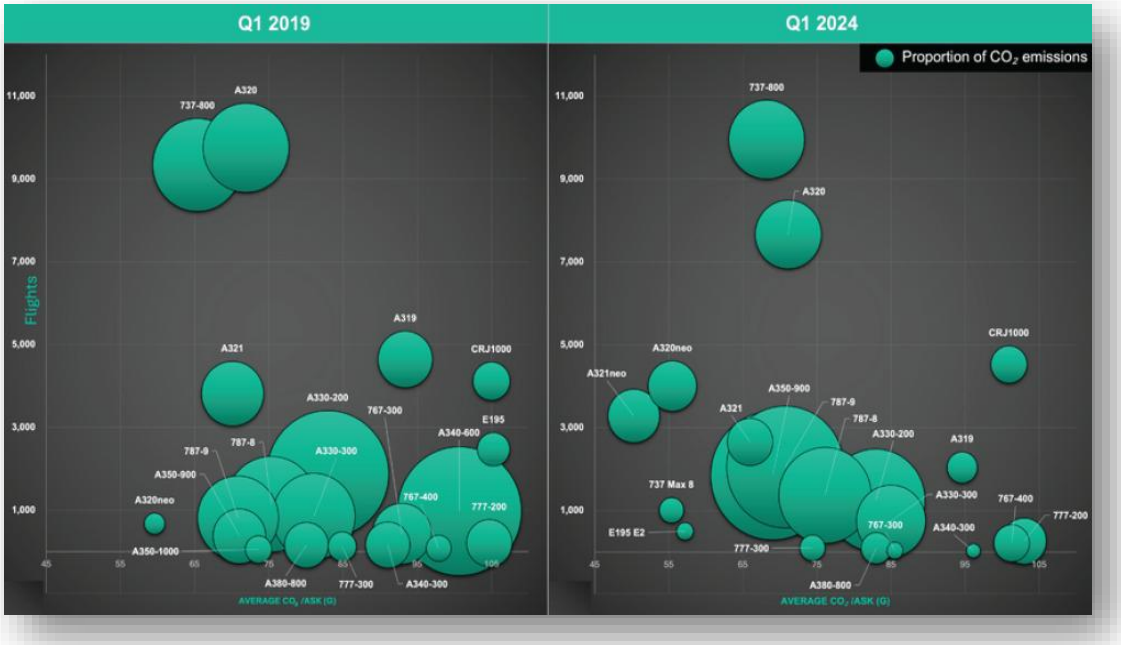

Ilustración 16. Comparativa de emisiones por tipo de aeronave en vuelos desde Madrid-Barajas en Q1 2019 y 2024 (Cirium)

En términos absolutos, el número de operaciones en Madrid-Barajas en 2024 aún se encuentra por debajo de los niveles de 2019, aunque transitaron por el aeropuerto un 7,2% más de pasajeros[lxv], lo que recalca la necesidad de esta mejora continua en la eficiencia medioambiental del transporte aéreo.

Es el caso de iniciativas como el sistema *Taxibot*, una solución sostenible para el remolque de aviones durante la fase de taxi, entre la pista y la terminal. Consiste en un vehículo de remolque híbrido semirrobótico que evita tener que utilizar la potencia del motor del avión durante el rodaje, ahorrando consumo, emisiones y ruido. Desde 2024 está en fase de pruebas en el aeropuerto de Bruselas[lxvi].

A este tipo de mejoras graduales pertenece también el sistema de recubrimiento *AeroShark*, que se aplica sobre el fuselaje de las aeronaves y reduce en un 1% el consumo de combustible, y por tanto las emisiones, en trayectos de larga distancia. Aprobado su uso un año antes, en 2024 se extendió su aplicación a aerolíneas como LATAM o ANA.

Ilustración 17. Sistema Taxibot remolcando una aeronave durante el rodaje (Aeropuerto de Bruselas)

Por otra parte, la ambición de mayores reducciones en las emisiones es la que guía el diseño del X-66, el avión experimental de **NASA** y **Boeing**, entre otros participantes, lanzado a principios de 2024 con apoyo gubernamental de los EE.UU.

Este demonstrador se construirá a partir de un MD-90, y contará con toda una serie de mejoras para la reducción del consumo. En particular, el diseño de ala apuntalada ultralarga podría reducir las emisiones hasta en un 10%[lxvii]. Las pruebas en túnel de viento (Ilustración 18) finalizadas el año pasado así parecen confirmarlo. El potencial de esta configuración también está siendo estudiado en el proyecto europeo *HERWINGT*, financiado dentro del programa *Clean Aviation*, y que incluye otras modificaciones del diseño del ala. El objetivo de mejora es incluso mayor en este caso, hasta el 15%, teniendo en cuenta la optimización en la estructura, sistemas y aerodinámica[lxviii]. El proyecto entró en 2024 en la fase de construcción de diversos demostradores tecnológicos.

Un cambio de diseño aún mayor es el propuesto por la compañía estadounidense **JetZero**, dejando atrás el paradigma de fuselaje cilíndrico y ala, para explorar un concepto más integrado (*Blended-wing Body*, Ilustración 19). El ahorro en combustible en este caso, comparado con una aeronave de 200 pasajeros actual, podría alcanzar un impresionante 50%[lxix]. También se está valorando la posibilidad de que la propulsión se consiga utilizando hidrógeno como combustible[lxx]. Este tipo de diseño ha sido ya estudiado en el pasado, incluyendo aeronaves de uso militar y

Ilustración 18. Pruebas de túnel de viento del X-66, con alas apuntaladas (NASA)

constructores como Airbus, y su desarrollo necesitará superar enormes problemas técnicos (por ejemplo, a la hora de diseñar una cabina presurizada sin las ventajas de una sección circular). Sin embargo, la propuesta de JetZero está despertando el interés de diversas aerolíneas, además del de inversores. En abril de 2024 la compañía consiguió el permiso de la Administración de Aviación Federal en EE.UU. (FAA) para realizar vuelos experimentales con un modelo a escala.

Ilustración 19. Diseño propuesto por JetZero con una configuración de ala integrada en un fuselaje ancho (JetZero)

En el extremo de la reducción de emisiones gracias a diseños alternativos se encuentra la propuesta para volver a convertir a los dirigibles en una alternativa viable de transporte aéreo. Sin pretender reemplazar a las aeronaves convencionales, dadas sus obvias limitaciones en velocidad, diferentes compañías están avanzando en sus proyectos de dirigibles, algunos incluso con pruebas de vuelo durante el año pasado[lxxi].

3.4. COMBUSTIBLES SOSTENIBLES

En 2024 el sector de los combustibles sostenibles de aviación (SAF) experimentó un crecimiento significativo debido a la creciente presión para reducir la huella de carbono de la industria aeronáutica. La regulación ***RefuelEU Aviation***, que entró en vigor en 2025, desempeñará un papel crucial en este crecimiento. Esta normativa establece que las

aerolíneas deben utilizar un porcentaje mínimo de SAF en sus operaciones dentro de la Unión Europea. La normativa *RefuelEU Aviation* es una parte fundamental del paquete de medidas *Fit for 55* de la Unión Europea, diseñado para cumplir con los objetivos climáticos de la UE para 2030. Su objetivo principal es promover el uso gradual de combustibles sostenibles de aviación (SAF) en los aeropuertos de la UE, reduciendo las emisiones de CO2 de la aviación. En dicha normativa, se establecen unos % mínimos de combustible sostenible:

- A partir de 2025, los proveedores de combustible de aviación deben asegurar que el combustible disponible para los operadores de aeronaves en los aeropuertos de la UE contenga un mínimo del 2% de SAF, aumentando este porcentaje progresivamente hasta alcanzar el 70% en 2050.
- Además, a partir de 2030 se requerirá un mínimo del 0,7% de combustibles sintéticos de aviación, incrementándose hasta el 35% en 2050.

La industria de la aviación se está preparando para cumplir con estos nuevos requisitos, invirtiendo en tecnologías de producción de SAF, y optimizando sus operaciones para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, se están explorando nuevas fuentes de materias primas para la producción de SAF, como la biomasa y los residuos agrícolas, para asegurar una oferta sostenible y suficiente.

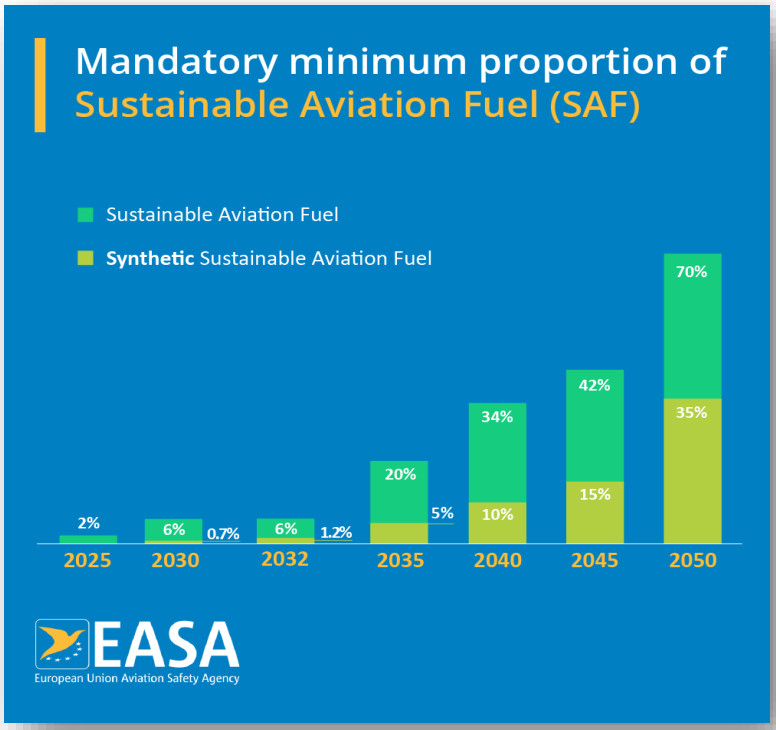

Ilustración 20. Mandato SAF de RefuelEU Aviation (EASA)

A finales de 2024, la **EASA** publicó su informe "Estado del mercado de SAF en la UE en 2023" 5 , cuyos principales contenidos fueron:

- Los precios de referencia para los diferentes tipos de combustibles elegibles bajo la Regulación (UE) 2023/2405.
- Una evaluación de la capacidad de producción de SAF en la UE.
- Un análisis de las tendencias emergentes en el mercado de producción de SAF.

A modo de resumen, EASA considera que la capacidad de producción anunciada se espera que cumpla con el mínimo del 6% requerido para 2030. Sin embargo, hace hincapié en la necesidad de actuar rápidamente si queremos llegar a cumplir con el mínimo del 0,7% de combustible sostenible sintético para ese mismo año.

Para cerrar esta breve introducción, y en lo que refiere a la situación actual del SAF en España, cabe destacar la iniciativa de la Embajada del Reino Unido y el Colegio de Ingenieros Aeronáuticos de España, que publicaron en junio de 2024 un informe detallado sobre posibles colaboraciones, tanto en producción como en normativas, entre ambos países 6.

3.4.1. Acuerdos y asociaciones clave

Para conseguir cumplir los objetivos de porcentajes y descarbonización, es fundamental que los distintos actores se coordinen. A continuación, se presentan algunos ejemplos de este alineamiento con acuerdos comerciales alcanzados, a lo largo de 2024, entre aerolíneas y productores de SAF:

Alianza de Compradores de Aviación Sostenible (SABA)

En abril de 2024, SABA anunció un acuerdo histórico[lxxii] para comprar certificados de SAF, involucrando a empresas como Deloitte, JetBlue y World Energy. Con estos contratos multianuales, que incluyen casi 850.000 galones de SAF, se contribuye a la financiación de nuevas plantas de producción y se envía un mensaje a la industria, posibilitando la firma de nuevos acuerdos.

IAG y Twelve

En febrero de 2024, IAG (*International Airlines Group*, compañía matriz de Iberia y British Airways) firmó un acuerdo para la adquisición de 980 millones de litros de eSAF con Twelve[lxxiii], alcanzando un tercio de su objetivo para 2030.

3.4.2. Producción

Por otro lado, a pesar de las incertidumbres, la industria sigue apostando por la construcción de nuevas plantas. A nivel nacional, **Repsol** comenzó la producción a gran escala de

combustibles renovables en Cartagena, la primera planta de la Península Ibérica[lxxiv]. La nueva refinería tiene capacidad para fabricar 250.000 toneladas anuales de combustibles renovables, a partir de residuos, como el aceite de cocina usado, que se pueden utilizar en aviones, barcos, autobuses, camiones o coches, permitiendo evitar la emisión de 900.000 t de CO2 anuales.

Ilustración 21. Planta de producción de SAF en Cartagena (Repsol)

A nivel internacional, en Estados Unidos se encuentra la instalación industrial de **Phillips 66** en Rodeo, California. Esta planta surge de la reconversión de una refinería convencional para la producción de combustibles renovables, incluyendo SAF. La instalación ya comenzó a procesar únicamente materias primas renovables, y produce aproximadamente 30.000 barriles diarios de diésel renovable. Para finales del segundo trimestre de 2024 los planes eran aumentar la producción a más de 50.000 barriles al día de combustibles renovables, incluyendo SAF[lxxv]. Este caso sirve de ejemplo del significativo avance en los planes de producción de SAF en Estados Unidos, que los posiciona para lograr el objetivo de más de 11 millardos de litros de SAF para 2030[lxxvi], propuesto por el *US SAF Grand Challenge*. No obstante, el cambio de gobierno a principios de 2025 ha generado una gran incertidumbre sobre la continuidad de las políticas relacionadas con la sostenibilidad medioambiental.

Las consecuencias de un futuro regulatorio incierto, y por tanto de las condiciones de mercado en el que operar, podrían explicar decisiones como las de la compañía petrolera **Shell**, que en julio de 2024 pausó la construcción de su planta de SAF y diésel renovable en los Países Bajos. A pesar de lo avanzado del desarrollo, con planes de inicio de producción para ese mismo año, la compañía decidió revisar la planificación para "controlar costos y optimizar la secuencia del proyecto", con el consecuente retraso[lxxvii]. Supone un gran ejemplo de las dificultades y desafíos que siguen existiendo actualmente para alcanzar una producción industrial de SAF.

3.4.3. Datos y Proyecciones

Para finalizar esta sección, se desglosa a continuación algunos datos de producción de SAF y proyecciones a futuro, extraídos del comunicado de **IATA** *Disappointingly Slow Growth in SAF Production*[lxxviii]:

- En 2024 la producción de SAF alcanzó 1 millón de toneladas (1,3 millardos de litros), el doble de la producción de 2023.
- El SAF representó el 0,3% de la producción global de combustible para aviones y el 11% de la capacidad global de combustible renovable.
- Se espera que en 2025 la producción de SAF alcance 2,1 millones de toneladas (2,7 millardos de litros), representando el 0,7% de la producción total de combustible para aviones, y el 13% de la capacidad global de combustible renovable.

Los principales desafíos a futuro son:

- Establecer una mayor claridad gubernamental. La ausencia de un mensaje claro en torno a los posibles apoyos, sanciones, incentivos, etc. está dificultando la inversión de las compañías petroleras en nuevas plantas de producción.
- Reducir los subsidios a los combustibles fósiles, y aumentar los incentivos para la producción de energías renovables.
- Aumentar el co-procesamiento en refinerías existentes (2, pág. 26).
- Las refinerías producen además otros tipos de combustibles sostenibles (p. ej. Gasolina o Diesel). La penalización de los motores de combustión en otros medios de transporte puede tener consecuencias también para la aviación.
- Diversificar la producción de SAF utilizando diferentes métodos certificados, e investigar nuevas rutas de producción.
- Crear un marco global de contabilidad para SAF: existen múltiples registros y cadenas de sostenibilidad, lo que lleva a confusión.

3.5. AVIACIÓN ELÉCTRICA

La aviación eléctrica continúa avanzando en el sector de los aviones pequeños y en el desarrollo de tecnologías relativas a la propulsión híbrida. En el año 2024 hubo una actividad muy relevante, tanto a nivel de desarrollo de producto como a nivel comercial, para impulsar la madurez de las soluciones más viables, y asegurar la financiación de cara a la culminación de los proyectos.

El principal sector de desarrollo de la aviación eléctrica está siendo el de los vehículos de despegue y aterrizaje vertical, los llamados **eVTOL**[lxxix], pensados para aplicaciones de movilidad aérea urbana en rutas de corta distancia (hasta 100 km de alcance). Hasta la fecha, las inversiones en este nuevo segmento de la aviación superan los 12.000 millones de euros a nivel mundial.

3.5.1. Aeronaves de Propulsión Eléctrica

Las aeronaves de propulsión eléctrica siguen avanzando lentamente, con una orientación práctica en los sectores de movilidad aérea urbana y de aviación general, y más en concreto para las operaciones de formación y entrenamiento, sin grandes demandas en cuanto a radio de acción. Dadas las limitaciones actuales en la densidad energética de las baterías, los aviones pequeños para vuelo de corta duración, y radio de acción limitado, son los candidatos ideales para la introducción de esta nueva tecnología.

Algunos hitos recientes alcanzados en este sector, todavía emergente, son los siguientes:

Ilustración 22. Prototipo eVTOL de Joby

A) Joby ha seguido con el desarrollo y certificación de su modelo *S4*, un vehículo diseñado para el servicio de taxi aéreo con capacidad para un piloto y cuatro pasajeros. El vehículo cuenta con seis rotores accionados por motores eléctricos, dos fijos y cuatro basculantes. La compañía declara unos objetivos de diseño de 240 km de radio de acción, y una carga de pago de 450 kg. Actualmente se encuentra en fase de certificación con la FAA, con el objetivo de obtener la certificación de tipo antes de finales del 2026. Joby ha anunciado el comienzo de operaciones precomerciales en los Emiratos Árabes Unidos en 2026.

Ilustración 23. Modelo Midnight de Archer

B) Archer Aviation declaró en diciembre de 2024 haber alcanzado la capacidad para iniciar la fase de preproducción de su modelo *Midnight* en su planta de Covington en Georgia (EE.UU.). El *Midnight* es un aerotaxi para cinco personas incluido el piloto. Al igual que Joby, Archer pretende realizar operaciones precomerciales en los Emiratos Árabes Unidos en 2026.

C) Beta Technologies continúa con el desarrollo en paralelo de sus dos modelos eléctricos: un avión de despegue convencional (*ALIA CX300*) y otro de despegue vertical eVTOL (*ALIA 250*). Ambos modelos tienen una gran comunalidad. El *ALIA 250* realizó su primer vuelo tripulado de transición en abril de 2024.

Por otra parte, en noviembre pasado se completó el primer vuelo del modelo *CX300*. La empresa tiene como objetivo conseguir la certificación de la FAA para el *ALIA CX300* para 2025, y en su página web declara tener una cartera de pedidos de 600 unidades con clientes como USAF, US Army, Amazon, UPS, Air New Zealand, etc. En noviembre la compañía anunció la incorporación de capital de diversos inversores por un importe de 318 millones de dólares.

Ilustración 24. ALIA CX300 y ALIA 250 de Beta Technologies

D) Vertical Aerospace, ubicada en el Reino Unido, ha proseguido durante los últimos meses con los vuelos de prueba de su prototipo *VX4*.

Ilustración 25. Prototipo del modelo VX4 de Vertical Aerospace

E) Volocopter realizó vuelos de demostración en París durante el periodo olímpico, si bien de forma limitada, pero que permitieron mostrar el uso de este tipo de aeronaves en entornos urbanos.

Ilustración 26. Vuelo de prueba del modelo VoloCity en Versalles (Volocopter)

Ilustración 28. Vuelo del modelo eVTOL de eHang con control remoto

F) En China, **eHang** sigue liderando la aplicación práctica de los modelos eVTOL, en este caso con una aeronave no tripulada para 2 pasajeros, de la que ya se han fabricado más de 200 unidades.

Ilustración 27. Modelo Prosperity de AutoFlight

G) También en China, **AutoFlight** consolida su portfolio con dos modelos de aviones eléctricos: el *Prosperity*, con capacidad para 4 pasajeros y un piloto; y el *Carry On*, una aeronave autónoma de carga. Autoflight consiguió el certificado de tipo del modelo *Carry All* de las autoridades civiles chinas (CAAC) en marzo de 2024, y anunció también el de producción del *Prosperity* en diciembre de 2024. También ha anunciado la venta de 12 unidades (incluyendo ambos tipos) en Emiratos Árabes Unidos por un valor unitario de 1,8 millones de dólares.

Ilustración 29. Modelo eDA-40 de Diamond

H) Diamond anunció que espera certificar con EASA su avión eléctrico *eDA-40* en 2025. El año pasado este modelo fue evaluado por Lufthansa Aviation Training y por AirBaltic Airlines que firmó una carta de intención de compra por 3 unidades.

I) La compañía **Dufour** utiliza su avión totalmente eléctrico *Aero 1* como plataforma de ensayo de tecnologías para sus futuros productos de propulsión híbrida *Aero 2* y *Aero 3*.

Ilustración 30. Avión acrobático Aero 1 de Dufour

J) El avión *Integral E* desarrollado por **Aura Aero**, realizó su primer vuelo el 3 de diciembre de 2024 desde Toulouse, con un motor eléctrico *ENGINeUS* de 100 kW proporcionado por Safran. Este avión es un entrenador biplaza destinado a aeroclubes y escuelas de formación de pilotos, y cuenta con cierta capacidad acrobática. Dispone de una batería de iones de litio de la que se espera una autonomía de una hora, necesitando 30 minutos de tiempo para su recarga. El motor dispone de una electrónica de control integrada, y un sistema de refrigeración propio. El avión va equipado con el sistema de distribución y protección eléctrica *GENeUSGRID*, también de Safran, que gestiona la alimentación eléctrica al motor de acuerdo con sus necesidades.

Ilustración 31. Modelo Integral E de Aura Aero

3.5.2. Aeronaves de Propulsión Híbrida

La compañía suiza **Dufour**, como ya se ha indicado, está desarrollando dos modelos de propulsión híbrida: el *Aero 2*, avión no tripulado para transporte de carga, y el *Aero 3* destinado al transporte de viajeros. Ambos aviones responden a una configuración similar para operaciones eVTOL con ala convertible. Las especificaciones anunciadas para el *Aero 2* son un peso máximo de 208 kg, con una carga de pago de 40 kg y un radio de acción de 400 km. Para el *Aero 3*, su peso máximo al despegue será de 2.800 kg, con una carga de pago máxima de 700 kg, y un radio de acción de hasta 1.000 km. Los prototipos del *Aero 2* han realizado diferentes ensayos en vuelo de desarrollo (incluyendo vuelos de transición de configuración) y de demostración de integración de sensores. Por su parte, el *Aero 3* se encuentra en una fase de diseño preliminar.

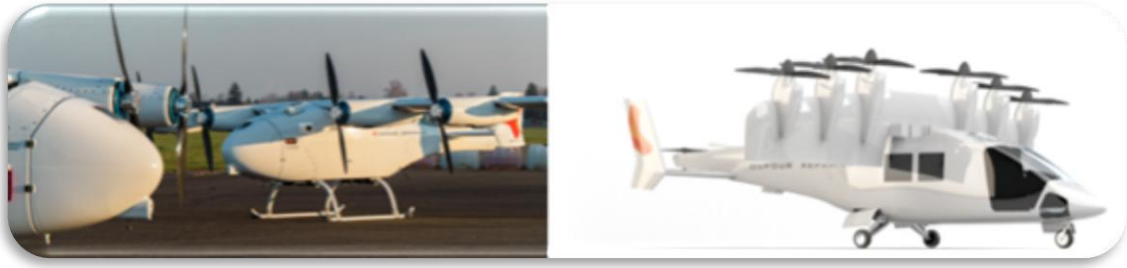

Ilustración 32. Diseños Aero 2 (izq.) y Aero 3 (dcha.) de Dufour

Ilustración 33. Diseño STOL EL9 de Electra

El **Electra** *EL9* es un modelo STOL[lxxx] de nueve pasajeros que parte de la tecnología conseguida con el demostrador prototipo biplaza *EL2 Goldfinch*. El avión está propulsado por 8 motores eléctricos, dispone de un paquete de 4 baterías y un generador eléctrico accionado por una turbomáquina convencional. Anuncia un radio de acción de 330 millas a plena carga, y un alcance máximo en vacío de 1.100 millas.

Se espera certificar bajo la normativa Parte 23 de la FAA en el año 2029, con un primer vuelo en el 2027. La compañía declara que dispone de 2.100 pedidos de 52 operadores por un valor de 8 millardos de dólares.

La compañía sueca **Heart Aerospace** continúa el desarrollo de su avión comercial de 30 asientos denominado *ES-30*. La compañía ofrece un radio de acción de 400 km con propulsión híbrida, que podría extenderse a 800 km reduciendo el pasaje a 25 viajeros, y de 200 km con propulsión puramente eléctrica. La compañía sueca declara que dispone de 250 pedidos, con otras 120 opciones de compra y 190 cartas de intención de este modelo.

Ilustración 34. Modelo ES-30 de Heart Aeroespace

El fabricante ha desarrollado un modelo experimental denominado *X-1*, que empezó a utilizar desde noviembre de 2024 para hacer ensayos en tierra, y que hará su primer vuelo a mediados del año 2025. Heart operará dicho aparato desde el aeropuerto internacional de Plattsburgh en Champlain Valley, Nueva York.

Ilustración 35. Prototipo X-1 de Heart Aeroespace

Adicionalmente, la compañía sueca prevé un segundo prototipo *X2* para el año 2026 con propulsión híbrida. El desarrollo del *X1* ha sido financiado en parte por subvenciones

proporcionadas por la agencia sueca de innovación Vinnova. La compañía sueca tiene como objetivo conseguir la certificación del *ES-30* en el año 2029. Heart ha promovido un proyecto de investigación en Suecia denominado *ELISE* junto con Braathens Regional Airlines, SAS y el operador aeroportuario nacional para el desarrollo de la infraestructura que la aviación eléctrica demandará en los aeropuertos del futuro. Los procedimientos ensayados en el aeropuerto de Säve en Gotemburgo han incluido la verificación y prueba del procedimiento de carga eléctrica, evaluación de los procesos de carga, procedimientos de embarque y desembarque de pasajeros y carga, y experiencia en soporte terrestre y pautas de mantenimiento.

La compañía ha presentado dos solicitudes de diseño en la UE, y una solicitud de patente para un nuevo diseño de integración de la góndola de motor en el ala que, según Heart, mejorará significativamente las características de vuelo del *ES-30*, permitiéndole operar en pistas más cortas.

VoltAero localizado en Francia (Saint Agnant) junto al aeropuerto de Rochefort, ha anunciado el desarrollo de tres versiones de su modelo *Cassio*, así como la finalización de sus instalaciones en esa localidad para producir 150 aviones al año.

Ilustración 36. Diseño Cassio 600 de VoltAero

Los modelos *Cassio* tendrán una capacidad para transportar entre 5 y 12 pasajeros. El *Cassio 330* contará con 5 plazas y 330 kW de potencia, el *Casio 480* dispondrá de 6 asientos y el *Casio 600* tendrá una capacidad de 12 asientos y 600 kW de potencia. Estos modelos están orientados al transporte regional comercial, taxi aéreo, chárter y vuelos privados y utilitarios.

Los radios de acción se sitúan entre los 200 y los 1.200 km, dependiendo de cargas y configuraciones. El sistema de propulsión se basa también en motores eléctricos Safran *ENGINeUS* y motores de combustión de Kawasaki Motors. Los modelos se certificarán para cumplir con la norma EASA CS23 como avión monomotor, sin que conste una fecha concreta de compromiso para ese hito.

ATR ha anunciado la fase del estudio de viabilidad para el nuevo modelo *EVO*, con un objetivo de conseguir una reducción de consumo de un 20%, y una entrada en servicio en el año 2030. El concepto de diseño se basa en usar un nuevo y eficiente motor térmico convencional combinado con un motor eléctrico alimentado desde baterías, con la idea de optimizar el dimensionado del núcleo del motor térmico con el uso de potencia eléctrica, alcanzando así la máxima eficiencia energética del sistema propulsivo. Como ya se señaló anteriormente, a principios de 2025 ATR anunció un retraso de 5 años en los planes de desarrollo del *ATR EVO*.

Ilustración 37. Diseño EVO de ATR

General Electric (GE) confirmó en noviembre pasado el éxito de un ensayo de una planta motriz híbrida *Turboshaft Electrification Project* de un megavatio de potencia, bajo un contrato de investigación y desarrollo promovido por el ejército de Estados Unidos por importe de 5,1 millones de dólares. El proyecto consiste en combinar un turboeje convencional *CT7* con un motor eléctrico diseñado por GE, junto con la necesaria electrónica de potencia. Este proyecto se enmarca dentro del conjunto de proyectos promovidos por la

NASA bajo el programa *Electrified Powertrain Flight Demonstration*, cuyo objetivo es desarrollar una planta propulsora híbrida para la aviación comercial regional a finales de la presente década.

Ilustración 38. DHC Dash 7 modificado por Magnix para el programa Electrified Powertrain Flight Demonstration

3.6. HIDRÓGENO

3.6.1. Suministro y Promoción

La introducción del hidrógeno como combustible es una de las vías más directas hacia la aviación sostenible, siempre, por supuesto, que su generación también lo sea, lo que se etiqueta como hidrógeno verde. Este código de colores (ver Ref. 1, pág. 66) sirve para identificar su origen y proceso de producción, aunque lo que subyace, y así recoge la **taxonomía del H2** de la Unión Europea[lxxxi], es el total de emisiones correspondiente al ciclo de vida completo del combustible. Este marco regulatorio, en el que se incluyen conceptos como el *low-cargon hydrogen*, están recogidos en un artículo de abril de 2024 (Ref. 7), donde se aboga también por la consideración de opciones adicionales como la del hidrógeno

turquesa, generado por pirólisis de metano, precisamente en base a su ciclo de vida completo (Ilustración 39).

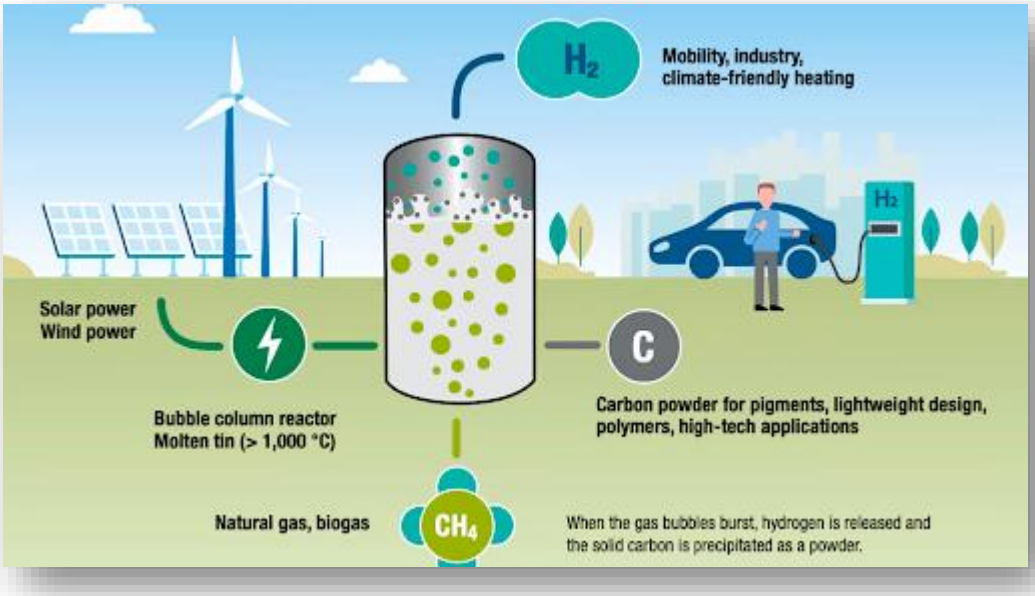

Ilustración 39. Proceso de generación de hidrógeno turquesa para minimizar su impacto medioambiental (Fastech)

El año pasado también se produjeron avances en otra vía para obtener este combustible sin impacto de emisiones, y que se identifica con la etiqueta de hidrógeno blanco[lxxxii]. Se trata aquí de la localización y explotación de bolsas de este elemento formadas por procesos geológicos naturales, almacenadas en el subsuelo. La localidad de Monzón, en Aragón, alberga uno de estos proyectos de extracción comercial en fase de estudio[lxxxiii].

Alcanzar un modelo de transporte aéreo que dependa de hidrógeno limpio requerirá, en cualquier caso, de un apoyo económico e institucional considerable para asegurar su disponibilidad. En este sentido, en 2024 se concedieron las primeras ayudas del **Banco Europeo del Hidrógeno**[lxxxiv] a siete proyectos de hidrógeno verde, de los cuales dos se sitúan en España[lxxxv], a través de la primera convocatoria de su fondo de innovación[lxxxvi]. Cabe reseñar que dicho fondo se financia con los ingresos del sistema EU ETS, y busca superar la brecha entre los costes de generación sostenible y el precio actual del hidrógeno en los mercados. En diciembre pasado se lanzó la segunda convocatoria con un total de 1.200 millones de euros.

Este apoyo gubernamental no se limita a Europa, sino que en otros países como Reino Unido[lxxxvii] o Japón también apuestan decididamente por una aviación propulsada por hidrógeno, en el ciclo completo desde su suministro en aeropuertos, hasta el desarrollo de aeronaves específicamente diseñadas para ello[lxxxviii].

En lo que respecta a España, el **CDTI**, a través del Programa Tecnológico Aeronáutico (PTA) subvencionó proyectos como el CLAH2RENH3CE, para desarrollar tecnologías de almacenaje y distribución de hidrógeno. Así mismo, un grupo de operadores energéticos y aeroportuarios firmaron en julio de 2024 un acuerdo con Airbus para estudiar la creación en España[lxxxix] del primer hub de hidrógeno (Ilustración 40), parte del programa *Hydrogen Hub at Airports* mencionado anteriormente.

También se debe destacar en nuestro país el trabajo de la **Alianza para el Uso del Hidrógeno Verde en la Aviación**, que agrupa a los principales actores del sector, con sus cuatro grupos de trabajo: producción de hidrógeno, su suministro a los aeropuertos, contribución a la fabricación de combustibles sintéticos para la aviación y tecnologías de H2 en aeronaves[xc].

Ilustración 40. Programa Hydrogen Hub at Airport de Airbus, para crear centros integrados de generación y distribución de hidrógeno en aeropuertos (Airbus)

Por último, hay que destacar el enorme esfuerzo que será necesario para establecer el marco regulador, así como el cumplimiento del mismo para la certificación tanto de la parte de suministro de tierra como, sobre todo, de las aeronaves propulsadas con hidrógeno. Este aspecto, en ocasiones no considerado, va a ser clave para generar una aviación sostenible que genere confianza, y que no ponga en riesgo los estándares de seguridad de la aviación comercial. EASA, la principal autoridad regulatoria aeronáutica en Europa, celebró a finales del año pasado el primer encuentro dedicado a la certificación de aviones alimentados con H2[xci].

3.6.2. Pilas de Combustible

La compañía **ZeroAvia** ha continuado sus progresos con su avión demostrador basado en el *Dornier 228*, completando 14 vuelos de ensayo a lo largo del año 2024. Por otro lado, la compañía ha establecido su línea de productos de planta motriz en base a tres categorías denominadas *ZA600* para aviones de 10 a 20 pasajeros, y 600 kW de potencia; *ZA2000* para aviones regionales de 40 a 80 pasajeros, y de 2 a 5 MW de potencia; y *ZA2000RJ* para aviones regionales de 90 pasajeros.

Así mismo, ha establecido un calendario de disponibilidad de estos productos que fija los siguientes objetivos: *ZA600* disponible en el 2026, *ZA2000* para el 2028 y *ZA2000RJ* para el 2030. La compañía ha declarado que en el año 2024 inició el proceso para la certificación del *ZA600* ante las autoridades estadounidenses (FAA)[xcii] y británicas (CAA).

En 2024 Zeroavia publicó un informe denominado *Scaling Hydrogen– Electric Propulsion for Large Aircraft* 8 en el que detalla su visión sobre la viabilidad de motorizar aeronaves comerciales de gran tamaño en base a pilas de hidrógeno.

Por último, en julio del año pasado la compañía aérea estadounidense American Airlines firmó un acuerdo de compra condicional con ZeroAvia para 100 motores eléctricos de hidrógeno destinados a impulsar aviones regionales[xciii]. American Airlines viene financiando ZeroAvia desde 2022.

Ilustración 41. Dornier 228 modificado por ZeroAvia para el ensayo de la propulsión eléctrica con pilas de H2

Universal Hydrogen, tras su histórico vuelo en el año 2023 con un Dash 8 modificado con pilas de hidrógeno como energía propulsiva, y haber realizado una primera prueba en su Iron Bird en tierra con su sistema de propulsión de pila de combustible de un megavatio en

febrero de 2024xciv, cerró y liquidó sus actividades comerciales al haber consumido la caja disponible y no conseguir apoyos financieros adicionale[sxcv]. Su doble objetivo de desarrollar un sistema de contenedores de H2 para repostar directamente aeronaves, y a la vez una planta motriz embarcada, parece haber excedido sus capacidades.

El plan de negocios de Universal Hydrogen se construyó sobre la premisa de que no había suficiente infraestructura de reabastecimiento de hidrógeno en los aeropuertos, y que la tecnología existente era demasiado lenta para abastecer de combustible a los aviones de manera eficiente. La empresa se promocionó como una solución plug-and-play que no necesitaba apenas acondicionamiento de los aeropuertos, y tenía como objetivo 2026 para la entrada en servicio de su producto. Recaudó alrededor de 100 millones de dólares en financiación de socios de renombre, como Airbus Ventures, American Airlines, JetBlue Ventures, GE Aviation y Toyota Ventures, pero han sido insuficientes para cumplir sus objetivos.

Joby Aviation, empresa de vanguardia en el sector eVTOL, ha modificado uno de sus prototipos del modelo S4 para instalar un depósito de hidrógeno de 40 kg, y una célula de combustible de su subsidiaria alemana H2Fly. La compañía anunció que en Julio de 2024 realizó con dicho prototipo un vuelo de 523 millas. Este proyecto para el uso de hidrógeno como combustible está siendo financiado por el programa Agility de la USAF.

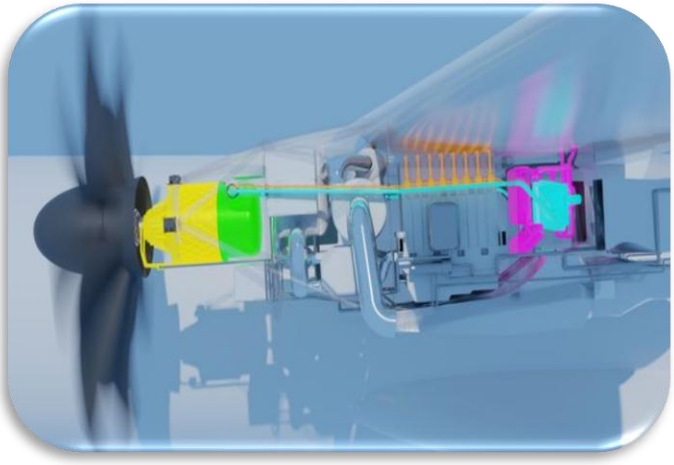

Ilustración 42. Sistema de propulsión eléctrico superconductor Cryoprop de Airbus UpNext (Airbus)

La compañía europea **AIRBUS** ha declarado haber completado una primera fase de sus ensayos sobre pila de hidrógeno en sus instalaciones de Ottobrunn, alcanzando una potencia máxima de 1,2 MW.

Dicha pila de combustible está siendo desarrollada por una empresa subsidiaria de AIRBUS, Aerostack GmbH, participada además por la empresa alemana ElringKlingerAG. Por su parte **UpNext**, filial propiedad al 100 % de Airbus, ha lanzado un nuevo demostrador denominado *Cryoprop* para acelerar el desarrollo de tecnologías en superconducción para su uso en sistemas de propulsión eléctrica alimentados por hidrógeno[xcvi]. El demostrador integrará y desarrollará un sistema superconductor de dos

megavatios refrigerado por hidrógeno líquido mediante un circuito de recirculación de helio. A tal efecto, ha firmado un acuerdo de colaboración con Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation[xcvii].

H3 Dynamics. Dentro de la iniciativa *Clean Aviation* de la Unión Europea, el proyecto *Hypotrade*, liderado por Honeywell y Pipistrel, busca desarrollar un sistema de propulsión eléctrico alimentado por hidrógeno para aviones regionales. Para este propósito, H3 Dynamics ha sido seleccionado como proveedor para las pilas de combustible de hidrógeno del demostrador tecnológico.

Ilustración 43. Concepto Miniliner para 19 pasajeros de Pipistrel (AIN)

El proyecto tiene como objetivo diseñar y construir un tren de propulsión de 500 kW destinado a aeronaves de la categoría CS-23 de EASA. El plan prevé que las pruebas en tierra comiencen en 2026, seguidas de las pruebas de vuelo en 2030. Pipistrel (filial de Textron eAviation), proporcionará un avión de demostración de 19 plazas, conceptualmente denominado *Miniliner*, para las pruebas de vuelo[xcviii]. Adicionalmente, H3 colabora con AIRBUS para el desarrollo de una APU[xcix] de 500 kW destinada a aviones de fuselaje ancho, tipo *A330*[c].

Sirius Aviation, una compañía suiza, presentó en enero de 2024 el diseño del *Sirius Jet*, un avión VTOL de negocios de propulsión eléctrica por hidrógeno[ci]. La compañía pretende certificar y poner en servicio el avión para 2028 ofreciendo dos variantes: una diseñada para uso privado y otra para servicios de aero-taxi comercial. El *Sirius Business Jet*, de uso privado, tendrá capacidad para un piloto y hasta tres pasajeros, y una autonomía de vuelo prevista de 1.850 km; mientras que el *Sirius Millennium Jet*, podrá acomodar cinco pasajeros y

transportarlos hasta un máximo de 1.050 km. Ambas versiones tienen un techo operativo de 9.000 m y una velocidad de crucero de 520 km/h. El sistema de propulsión consiste en 28 motores eléctricos de hélice carenada, 20 de los cuales están montados en el ala principal de la aeronave, y ocho en el canard. Otra característica de este avión será su bajo nivel de ruido: 60 decibelios a una distancia de 100 metros[cii].

Ilustración 44. Propuesta de VTOL propulsado por H2 de Sirius Jet (ahora Stellarjet)

Ilustración 45. Proyecto de remotorización con pilas de H2 de un Islander de Cranfield Aeroespace

Cranfield Aerospace Solutions, empresa dedicada principalmente a la modificación de aeronaves, anunció un proyecto para reconfigurar un Britten-Norman *Islander* de modo que sea propulsado por pilas de hidrógeno[ciii]. El *Islander* modificado incorporará dos sistemas propulsores integrados aprovechando las góndolas de motor del diseño original.

Cada sistema propulsor incluye una pila de combustible de 240 kW, un motor eléctrico y la correspondiente electrónica de potencia y control. La empresa ha comenzado la modificación de la góndola izquierda de un prototipo para realizar una primera batería de ensayos en tierra. Su intención es certificar la modificación del *Islander* vía STC[civ] en el año 2027. El avión modificado tendrá capacidad para 9 pasajeros y una autonomía de 400 km.

Piasecki Aircraft Corp está especializada en el diseño y construcción de aeronaves experimentales anunció el año pasado planes para comercializar un helicóptero PA-890 propulsado por hidrógeno para finales de esta década[cv]. El helicóptero podrá transportar un piloto y hasta siete pasajeros en vuelos de más de 375 km. Su carga útil será de 850 kg y el peso máximo de despegue de 3.300 kg.

El PA-890 contará con un rotor principal de cuatro palas, un ala de incidencia variable que gira hasta 90 grados durante la fase de vuelo estacionario, y un rotor de cola pivotante que proporciona control antipar y de guiñada. Al pasar al vuelo hacia adelante, el ala gira a una posición horizontal, proporcionando sustentación para descargar el rotor principal, mientras que el rotor de cola pivota para proporcionar propulsión horizontal. Al aliviarse las demandas de sustentación y empuje del rotor principal, se reducirá la velocidad de rotación del mismo.

Actualmente está desarrollando un banco de pruebas tipo *Iron bird* de 660 kW para su sistema de propulsión. El trabajo de desarrollo realizado hasta la fecha ha contado con el apoyo de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos a través de una colaboración con DARPA. La intención de la compañía es que el prototipo del helicóptero PA-890 pueda empezar a volar en el año 2028.

Ilustración 46. Modelo de helicóptero de rotación lenta PA-890 con propulsión por hidrógeno de Piasecki.

3.6.3. Combustión Directa

El funcionamiento de un motor de turbina de aviación, como los que equipan prácticamente todas las aeronaves comerciales de medio y largo alcance, parte de la combustión de hidrocarburos u otro elemento similar. Es esta combustión del queroseno el que produce, entre otras emisiones, el dióxido de carbono que contribuye al calentamiento global (ver Ref. 1, pág. 10).

La sustitución de hidrocarburos por hidrógeno en la cámara de combustión es una solución bien conocida, ensayada en vuelos en diversas ocasiones, que emitiría principalmente vapor de agua en vez de CO2. Aunque existen otros potenciales problemas de emisión asociados a la combustión de H2 (NOx, estelas de condensación), supondría un gran paso adelante hacia una aviación sostenible al atajar de golpe el mayor agente de cambio climático (Ref. 1, pág. 70). En noviembre de 2024 la

Ilustración 47. Cámara de combustión del motor PW127XT (Pratt & Whitney)

compañía **Pratt & Whitney Canada**, uno de los mayores fabricantes de motores de aviación en el mundo, anunció una serie ensayos con hidrógeno en su motor *PW127XT* como parte del proyecto *HyAdes*, financiado por el gobierno canadiense[cvi].

Además de iniciativas en desarrollo como el programa ***Zeroe*** de Airbus[cvii] (ver 1, pág. 71), que continuó su avance durante el año pasado con la inauguración de un centro tecnológico dedicado[cviii], nuevos proyectos exploran esta propulsión como el **Fokker** *Next Gen* anunciado en 2024. El mítico fabricante holandés vuelve después de décadas sin nuevos diseños, proponiendo un avión de entre 120 y 150 pasajeros, y un alcance de 2.500 km[cix], con entrada en servicio prevista para 2035. La Ilustración 48 muestra la localización propuesta para los tanques de hidrógeno líquido, un elemento clave dado el alto volumen necesario para este tipo de combustible.

Ilustración 48. Fokker F100 con los depósitos de H2 líquido en el fuselaje posterior (GreenAir[cx])

Un elemento clave en esta propuesta de Fokker es la anunciada compatibilidad de su diseño con diferentes tipos de combustible, pudiendo operar con el queroseno habitual en aviación hoy en día, incluso en su versión sostenible (SAF). Esta capacidad permitiría a la aeronave una gran flexibilidad operativa, en caso de que el suministro de hidrógeno no estuviese disponible en algunos aeropuertos, uno de los mayores desafíos para la introducción del H2 en aviación.

Otro de los desarrollos fundamentales de una aviación basada en el hidrógeno es su gestión y distribución en forma líquida, lo que implica temperaturas criogénicas. En este aspecto, la empresa **Rolls-Royce**, con su apuesta por el desarrollo de motores de aviación con combustión de H2, realizó a principios del año pasado ensayos con una bomba capaz de operar en estas difíciles condiciones[cxi] (Ilustración 49).

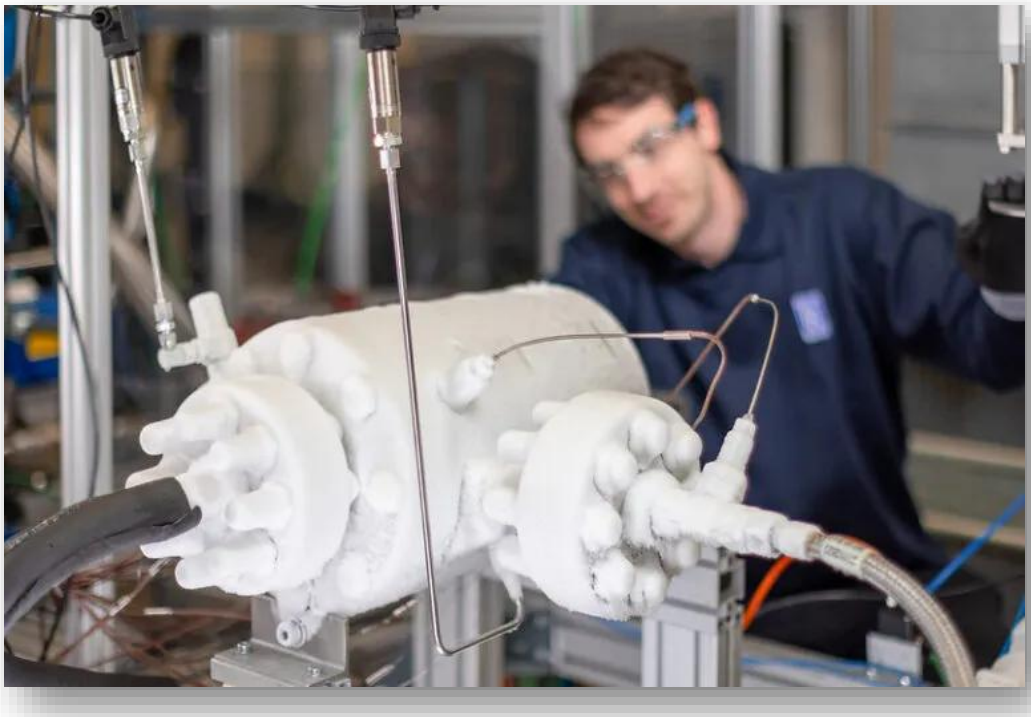

Ilustración 49. Bomba de H2 criogénico durante un ensayo (Rolls-Royce)

Por último, respecto al problema colateral del incremento de emisiones de NOx por la combustión de H2 ya mencionado, en octubre de 2024 un equipo de la Universidad de California publicó resultados que demuestran la efectividad de las zeolitas para incrementar de forma sustancial la reducción de los óxidos de nitrógeno en catalizadores tras la combustión de H2[cxii]. Aunque el objetivo inicial de este proyecto sean los motores de combustión interna de automoción, ejemplifica las posibilidades de mitigación en una tecnología del hidrógeno en pleno desarrollo.

4. BIBLIOGRAFÍA

4.1. Recursos literarios

1. O. Castro Álvarez y E. Martín Santana. **La sostenibilidad medioambiental en el sector aeronáutico**. COIAE, 2022

2. O. Castro Álvarez. **La sostenibilidad medioambiental en el sector aeronáutico. Adenda 2022**. COIAE, 2023.

3. E. Martín Santana y V. García Gómez. **La sostenibilidad medioambiental en el sector aeronáutico. Adenda 2023**. COIAE, 2024.

4. O. Castro Álvarez. **Estudio de la Efectividad Medioambiental de Medidas Restrictivas a los Vuelos Domésticos en España**. 2ª Edición. COIAE, diciembre de 2023.

5. **Estado del mercado de SAF en la UE en 2023.** EASA, 2024. (https://www.easa.europa.eu/en/newsroom-and-events/press-releases/easa-publishes-report-european-union-sustainable-aviation-fuels)

6. **La colaboración entre Reino Unido y España en materia de producción y regulación de SAF**. UK Embassy in Madrid – COIAE, junio de 2024. (https://coiae.es/informe-la-colaboracion-entre-reino-unido-y-espana-en-materia-de-produccion-y-regulacion-de-saf)

7. K. Talus, J. Pinto y F. Gallegos. **Realism at the end of the rainbow? An argument towards diversifying hydrogen in EU regulation.** The Journal of World Energy Law & Business, Volume 17, Issue 4, August 2024, Pages 217–233, 23 de abril de 2024.

8. **Scaling Hydrogen-electric Propulsion for Large Aircraft.** ZeroAvia, 2024. (https://zeroavia.com/wp-content/uploads/2024/08/ZeroAvia-Whitepaper-Scaling-hydrogen-electric-propulsion-for-large-aircraft-d.pdf)

4.2. Recursos online

[i] https://actualidadaeroespacial.com/la-faa-publica-la-norma-final-para-reducir-la-contaminacion-de-carbono-procedente-de-nuevos-aviones/

[ii] https://a21.com.mx/aeronautica/2024/07/02/cierra-universal-hydrogen-por-falta-de-fondos

[iii] https://www.ainonline.com/aviation-news/futureflight/2024-07-08/deutsche-aircraft-delays-service-entry-d328eco-regional

[iv] https://www.ainonline.com/aviation-news/futureflight/2024-10-08/mckinsey-says-urban-air-mobility-faces-untimely-cash-crunch

[v] https://www.elcorreo.com/sociedad/aviacion-cambio-climatico-vez-turbulencias-retrasos-desvios-20240714130353-ntrc.html

[vi] https://www.icao.int/Newsroom/Pages/ES/Encouraging-Europes-sustainable-aviation-leadership-to-support-ICAO-goals.aspx

[vii] *https://www.greenairnews.com/?p=5672*

[viii] https://www.transportes.gob.es/el-ministerio/sala-de-prensa/noticias/jue-04072024-1608

[ix] https://actualidadaeroespacial.com/aviation-group-y-urjc-impulsan-una-catedra-para-el-desarrollo-de-un-transporte-aereo-sostenible/

[x] https://www.greenairnews.com/?p=5741

[xi] https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/nz-roadmaps.pdf

[xii] https://report.aiazero.org/

[xiii] https://www.ainonline.com/aviation-news/futureflight/2024-08-01/air-new-zealand-keeps-electric-aircraft-plans-despite-net

[xiv] https://www.greenairnews.com/?p=6440

[xv] https://www.infrastructure.gov.au/sites/default/files/documents/awp-aviation-white-paper.pdf

[xvi] https://clean-aviation.eu/

[xvii] Monitoring, Reporting and Verification

[xviii] https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/comercio-de-derechos-de-emision/operadores-aereos-mrva-impactos.html

[xix] https://www.iata.org/en/pressroom/2024-releases/2024-04-30-01/

[xx] https://www.greenairnews.com/?p=5655

[xxi] https://www.transportenvironment.org/articles/eu-walks-back-on-key-aviation-climate-law-and-excludes-long-haul-flights-from-monitoring-scheme

[xxii] https://www.transportenvironment.org/uploads/files/Open-letter_-Addressing-contrails-is-a-no-regrets-decision-that-will-help-slow-climate-change_2024-11-22-140205_ggcq.pdf

[xxiii] https://www.transportenvironment.org/articles/aviation-reduce-contrail-warming-for-less-than-eur4-per-flight-new-study

[xxiv] https://www.einpresswire.com/article/701971248/satavia-reports-successful-contrail-management-trials-with-aircraft-operators-supported-by-uk-european-space-agencies

[xxv] https://sites.research.google/contrails/

[xxvi] https://www.ati.org.uk/funding/non-co2programme/

[xxvii] https://www.greenairnews.com/?p=6428

[xxviii] https://www.aerospacetestinginternational.com/news/engine-testing/pratt-whitney-to-test-saf-emissions-with-faa.html

[xxix] https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2024-06-worlds-first-in-flight-study-of-commercial-aircraft-using-100

[xxx] https://www.blue-lines.org/airline-index

[xxxi] Direct Air Carbon Capture and Storage

[xxxii] https://aircraft.airbus.com/en/services/operate/airbus-carbon-capture-offer

[xxxiii] *https://www.greenairnews.com/?p=6098*

[xxxiv] https://icvcm.org/core-carbon-principles/

[xxxv] https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx

[xxxvi] https://climate.ec.europa.eu/news-your-voice/news/2024-carbon-market-report-stable-and-well-functioning-market-driving-emissions-power-and-industry-2024-11-19_en

[xxxvii] https://www.transportenvironment.org/articles/low-cost-airlines-pollute-more-than-ever-latest-emissions-data-shows

[xxxviii] https://actualidadaeroespacial.com/lufthansa-introduce-un-recargo-en-los-billetes-por-costes-medioambientales/

[xxxix] https://www.europapress.es/turismo/nacional/noticia-bruselas-avisa-20-aerolineas-exponen-sanciones-ofrecer-tasas-extra-compensar-emisiones-20240430132826.html

[xl] https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/ip_24_6523

[xli] https://www.ecologistasenaccion.org/324941/una-tasa-a-los-vuelos-frecuentes-en-europa-reduciria-un-21-las-emisiones-del-transporte-aereo-y-generaria-74-100-millones-de-euros/

[xlii] https://elperiodicodelaenergia.com/impuesto-combustible-aviacion-ue-perjudicara-espana-reducir-gasto-turistico/

[xliii] https://www.reuters.com/business/aerospace-defense/eu-countries-mull-20-year-tax-holiday-jet-fuel-document-shows-2024-09-06/

[xliv] https://www.europapress.es/turismo/nacional/noticia-alemania-aumentara-20-impuesto-billetes-avion-partir-mayo-20240108182546.html

[xlv] https://actualidadaeroespacial.com/aprueban-la-reduccion-de-vuelos-domesticos-en-favor-del-ferrocarril-cuando-hay-una-alternativa-de-menos-de-25-horas/

[xlvi] https://www.eleconomista.es/actualidad/noticias/12985625/09/24/podemos-registra-una-iniciativa-para-prohibir-los-vuelos-de-menos-de-una-hora-y-evitar-la-ampliacion-de-el-prat-por-su-impacto-medioambiental.html

[xlvii] https://cincodias.elpais.com/companias/2024-10-02/el-tiron-del-trafico-aereo-lleva-a-maximos-historicos-la-demanda-de-queroseno-en-espana.html

[xlviii] https://actualidadaeroespacial.com/el-parlamento-europeo-aprueba-la-reforma-del-cielo-unico-europeo-para-mejorar-la-eficiencia-y-reducir-las-emisiones/

[xlix] *https://www.greenairnews.com/?p=5490*

[l] https://fly-news.es/sostenibilidad/sas-vuela-por-el-polo-un-20-por-ciento-mas-verde/

[li] https://www.hispaviacion.es/enaire-presenta-el-programa-green-sky-para-avanzar-hacia-una-aviacion-mas-sostenible/

[lii] https://cordis.europa.eu/article/id/451359-chasing-the-slipstream-for-more-efficient-flights/es

[liii] https://aviacionaldia.com/2024/06/asi-reducen-los-pilotos-de-emirates-el-consumo-de-combustible-y-las-emisiones-durante-las-operaciones.html

[liv] https://www.aerotendencias.com/aviacion-comercial/63727-volotea-mejora-eficiencia-uso-combustible/

[lv] https://aviaciondigital.com/air-nostrum-mejora-su-programa-de-eficiencia-de-combustible-con-openairlines/

[lvi] https://www.aena.es/es/prensa/aena-preve-superar-los-300-millones-de-pasajeros-en-2025-un-ano-antes---de-lo-esperado.html

[lvii] https://aviaciondigital.com/aena-ha-sido-premiada-por-su-compromiso-con-la-reduccion-de-emisiones/

[lviii] https://www.avionrevue.com/aeropuertos/aeropuerto-el-dorado-estrena-flota-de-plataforma-100-electrica/

[lix] https://aeroportlleida.cat/es/el-aeropuerto-de-lleida-alguaire-adquiere-la-maquinaria-para-producir-hidrogeno-verde/

[lx] https://www.greendealstargate.eu/

[lxi] https://www.bristolairport.co.uk/corporate/news-and-media/news-and-media-centre/2024/4/ground-breaking-bristol-airport-hydrogen-trial-next-critical-step-on-journey-to-achieving-zero-emission-aviation/

[lxii] https://research.airbus.com/en/products-systems/goliat

[lxiii] https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2024-09-developing-a-global-ecosystem-to-support-hydrogen-powered-flight

[lxiv] https://actualidadaeroespacial.com/importante-impacto-de-la-reduccion-de-emisiones-en-el-aeropuerto-de-barajas/

[lxv] https://www.aena.es/es/estadisticas/inicio.html

[lxvi] *https://www.brusselsairport.be/en/pressroom/news/brussels-airport-and-tui-test-the-taxibot*

[lxvii] https://www.nasa.gov/image-article/trans-sonic-truss-braced-wing-may-help-reduce-fuel-consumption/

[lxviii] https://herwingt-project.eu/home

[lxix] https://www.jetzero.aero/why-jetzero

[lxx] https://www.ainonline.com/aviation-news/futureflight/2024-09-06/easyjet-teams-jetzero-blended-wing-body-airliners

[lxxi] https://www.bbc.com/mundo/articles/c4gzpxxyw9go

[lxxii] https://flysaba.org/2024/04/17/sustainable-aviation-buyers-alliance-announces-historic-agreements-to-purchase-sustainable-aviation-fuel-certificates-to-grow-investment-in-clean-fuel-technologies/

[lxxiii] https://www.twelve.co/post/twelve-and-iag-sign-historic-long-term-multi-million-gallon-saf-offtake-agreement

[lxxiv] https://www.repsol.com/es/sala-prensa/notas-prensa/2024/repsol-comienza-produccion-gran-escala-combustibles-renovables-cartagena/index.cshtml

[lxxv] https://www.phillips66.com/refining/san-francisco-refinery

[lxxvi] https://www.greenairnews.com/?p=6249

[lxxvii] https://www.greenairnews.com/?p=5902

[lxxviii] https://www.iata.org/en/pressroom/2024-releases/2024-12-10-03/

[lxxix] Electric vertical take-off and landing

[lxxx] Short take-off and landing

[lxxxi] https://energy.ec.europa.eu/news/renewable-hydrogen-production-new-rules-formally-adopted-2023-06-20_en

[lxxxii] https://www.weforum.org/stories/2024/08/white-hydrogen-5-critical-questions-answered/

[lxxxiii] https://elperiodicodelaenergia.com/espana-peloton-cabeza-hidrogeno-natural-proyecto-helios-aragon-monzon-apunta-coste-extraccion-1-dolar-kilogramo/

[lxxxiv] https://www.miteco.gob.es/es/energia/hidrocarburos-nuevos-combustibles/hidrogeno/european-hydrogen-bank.html

[lxxxv] https://climate.ec.europa.eu/news-your-voice/news/winners-first-eu-wide-renewable-hydrogen-auction-sign-grant-agreements-paving-way-new-european-2024-10-07_es

[lxxxvi] https://climate.ec.europa.eu/news-your-voice/news/winners-first-eu-wide-renewable-hydrogen-auction-sign-grant-agreements-paving-way-new-european-2024-10-07_es

[lxxxvii] https://actualidadaeroespacial.com/informe-de-hia-para-que-el-reino-unido-lidere-la-carrera-de-la-aviacion-de-hidrogeno/

[lxxxviii] https://hidrogeno-verde.es/japon-aviacion-hidrogeno/

[lxxxix] https://www.europapress.es/turismo/nacional/noticia-airbus-aena-air-nostrum-iberia-exolum-repsol-estudian-crear-primer-hub-aeroportuario-hidrogeno-espana-20240709112511.html

[xc] https://www.energias-renovables.com/hidrogeno/alianza-para-el-uso-del-hidrogeno-20240229

[xci] https://www.easa.europa.eu/en/newsroom-and-events/press-releases/easa-holds-first-international-workshop-certifying-hydrogen

(*) https://zeroavia.com/wp-content/uploads/2024/08/ZeroAvia-Whitepaper-Scaling-hydrogen-electric-propulsion-for-large-aircraft-d.pdf

[xcii] En febrero de 2025 recibió el *issue paper G-1 stage 2* de la FAA.

[xciii] https://www.reuters.com/business/aerospace-defense/american-airlines-enters-provisional-deal-100-hydrogen-electric-engines-2024-07-02/

[xciv] www.ainonline.com/news-article/2024-02-28/universal-hydrogen-runs-first-ground-test-liquid-hydrogen-fuel-module

[xcv] https://www.avionrevue.com/aviacion-comercial/universal-hydrogen-en-liquidacion/

[xcvi]https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2024-05-airbus-takes-superconductivity-research-for-hydrogen-powered

[xcvii] https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2024-10-airbus-and-toshiba-to-partner-on-superconductivity-research

[xcviii] https://www.ainonline.com/aviation-news/futureflight/2024-08-27/eu-backed-clean-aviation-initiative-picks-hydrogen-fuel-cell

[xcix] Auxiliary Power Unit

[c] https://www.ainonline.com/aviation-news/air-transport/2024-05-16/airbus-prepares-start-testing-hydrogen-apu-a330-airliner

[ci] https://evtol.news/sirius-aviation-sirius-business-jet-concept-design

[cii] En enero de 2025 Sirius Jet realizó un cambio corporativo, convirtiéndose en Stellarjet.

[ciii] https://www.ainonline.com/aviation-news/futureflight/2024-07-10/new-funding-allows-cranfield-team-build-hydrogen-airliner

[civ] Supplemental type certificate

[cv] https://www.ainonline.com/news-article/2024-02-11/military-backing-piasecki-steps-development-hydrogen-powered-pa-890

[cvi] https://www.ainonline.com/aviation-news/aerospace/2024-11-07/hydrogen-combustion-test-start-pw127xt-turboprop-engine

[cvii] https://www.airbus.com/en/innovation/energy-transition/hydrogen/zeroe

[cviii] https://actualidadaeroespacial.com/airbus-abre-un-nuevo-centro-de-desarrollo-zeroe-en-alemania-para-tecnologias-innovadoras-de-hidrogeno/

[cix] https://www.fokkernextgen.com/blog/fokker-next-gen-and-airbaltic-sign-mou

[cx] https://www.greenairnews.com/?p=5680

[cxi] https://www.aerospacetestinginternational.com/news/electric-hybrid/rolls-royce-begins-testing-hydrogen-fuel-pump-systems.html

[cxii] https://www.ainonline.com/aviation-news/futureflight/2024-10-11/scientists-devise-cleaner-hydrogen-combustion-engines