LA SOSTENIBILIDAD MEDIOAMBIENTAL EN EL SECTOR AERONÁUTICO

COIAE

Informe del Colegio Oficial de Ingenieros Aeronáuticos de España.

Febrero de 2022.

II EDICIÓN

Autores:
D. Óscar Castro Álvarez, colegiado 5083
Dña. Encarna Martín Santana, colegiada 5056

Contenido

1. PRÓLOGO 3
2. RESUMEN EJECUTIVO 4
3. INTRODUCCIÓN Y OBJETO 7
4. IMPACTO AMBIENTAL DE LA AVIACIÓN EN CONTEXTO 10
5. HACIA UNA AVIACIÓN SOSTENIBLE 14
6. ACCIONES, INNOVACIÓN Y TECNOLOGÍA 17
6.1. COMPENSACIÓN DE EMISIONES Y MEDIDAS ECONÓMICAS 17
6.2. NAVEGACIÓN Y OPERACIONES 21
6.3. MEJORAS DE EFICIENCIA GRADUALES Y DE DISEÑO 30
6.3.1. Programas de desarrollo tecnológico 30
6.3.2. Propulsión 34
6.3.3. Aerodinámica 41
6.3.4. Estructuras y materiales 46
6.4. COMBUSTIBLES SOSTENIBLES 48
6.4.1. Biocombustibles 50
6.4.2. Electrocombustibles 54
6.5. AVIACIÓN ELÉCTRICA 56
6.5.1. Aviones más eléctricos 57
6.5.2. Híbridos 59
6.5.3. Baterías 62
6.6. HIDRÓGENO 66
6.6.1. Vector energético sostenible 66
6.6.2. Pilas de combustible 68
6.6.3. Combustión directa 70
6.7. RUIDO 72
7. CONCLUSIONES 82
8. BIBLIOGRAFÍA 85

1

PRÓLOGO

En 2020 el Colegio Oficial de Ingenieros Aeronáuticos de España publicó su primer informe sobre la sostenibilidad del sector aeronáutico. Nuestro Colegio, al igual que la totalidad del sector, está(n) muy comprometido(s) con el medio ambiente y por tanto, apostamos por un crecimiento sostenible del sector. Es más, este sector ha demostrado con datos y hechos que crece de manera sostenible, algo que ha quedado demostrado por la reducción de emisiones de CO_2 en los últimos años, o las investigaciones acerca del uso del hidrógeno para el futuro, entre otros muchos ejemplos.

Desde entonces, y como ya anunciábamos entonces, las iniciativas de todo tipo para acercarnos cada vez más a la aviación sostenible no han dejado de multiplicarse (fabricantes, operadores, empresas de aeropuertos y navegación, empresas de ingeniería...). Dada la aceptación del primer informe y con la intención de mantener actualizados los datos científicos, las propuestas a realizar y los desarrollos tecnológicos, el Colegio ha decidido publicar esta segunda edición.

A partir de esta segunda edición, se actualizarán de manera anual, con el fin de que este informe sea una referencia en el sector.

Recibid un cordial saludo,

Estefanía Matesanz

Decana del Colegio Oficial de Ingenieros Aeronáuticos de España

2

RESUMEN EJECUTIVO

- El objetivo principal de este informe es proporcionar información fiable y subrayar el gran compromiso del sector aeronáutico por el medio ambiente, siendo uno de los sectores con más iniciativas en curso para minimizar el impacto medioambiental.
- La mitigación del ruido y la reducción de emisiones contaminantes, a nivel local y las inductoras del efecto invernadero, son los principales desafíos para alcanzar una industria aeronáutica sostenible a nivel medioambiental. Minimizar la emisión de dióxido de carbono (CO_2) es el principal objetivo en este esfuerzo, aunque es necesario considerar también otros elementos, entre ellos los óxidos de nitrógeno (NOx) o la formación de estelas de condensación y nubosidad inducida. En 2018, la aviación comercial en su conjunto fue responsable del 2,4% de las emisiones de CO_2 a nivel mundial.
- La pandemia de la COVID-19, que ha golpeado con dureza la sociedad a escala global, ha supuesto un gran impacto para la industria de la aviación comercial, con consecuencias en el tráfico aéreo a largo plazo y una reducción coyuntural de las emisiones asociadas.

- Este esfuerzo se ha reforzado con compromisos como el del conjunto de la industria aeronáutica en Europa para la descarbonización completa en 2050, objetivo compartido ya por muchas otras empresas y entidades del sector.

- Para cumplir con estos ambiciosos objetivos el sector de la aviación está invirtiendo cuantiosos recursos en múltiples acciones, que cubren la compensación de emisiones, la mejora de las operaciones o la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías que reduzcan el ruido y las emisiones. En las últimas cuatro décadas la mejora en la eficiencia energética de las aeronaves comerciales ha sido superior al 60%. Una aeronave de última generación consume de media 3 litros de combustible por cada 100 pasajeros-km. Este valor, y por tanto las emisiones de CO_2 asociadas, es equivalente al de un automóvil compacto eficiente.

- El sistema europeo de compensación de emisiones (EU ETS) certificó la reducción de 193 millones de toneladas de emisiones de dióxido de carbono relacionadas con el tráfico aéreo entre 2013 y 2020. A nivel global, en enero de 2021 entró en funcionamiento la primera fase del marco regulador de compensación de emisiones CORSIA, lo cual, al incluir a la práctica totalidad de la aviación civil internacional, supone un primer paso fundamental para mitigar las emisiones de CO_2 provenientes de la aviación comercial. En 2021 la Comisión Europea ha propuesto la coordinación de estos dos esquemas de control de emisiones de CO_2, así como el refuerzo de las reducciones dentro del EU ETS.

- La renovación en infraestructuras y sistemas de control, tanto en vuelo como en aeropuertos, permite una coordinación y gestión más eficiente del tráfico aéreo, y la consiguiente reducción de emisiones y ruido. En Europa, cabe señalar ejemplos como la implementación del Cielo Único Europeo (SES), y su brazo tecnológico SESAR para el desarrollo e implantación del futuro sistema común de gestión del tráfico aéreo.

- El continuo desarrollo tecnológico de la construcción aeronáutica, con mejoras graduales en los sistemas de propulsión (por ejemplo, aumentando la relación de derivación), nuevos materiales estructurales (composites avanzados) e innovaciones aerodinámicas (entre otros, el aprovechamiento del flujo laminar) permite diseñar aviones cada vez más eficientes y menos contaminantes. A más largo plazo, diseños disruptivos que incluyan, por ejemplo, motores de rotores abiertos contrarrotatorios, alas atirantadas o alas volantes permiten prever futuras mejoras aún más significativas.
- Los combustibles sostenibles, tanto de origen biológico como sintético a partir de fuentes energéticas renovables, son ya una realidad y se presentan como una opción viable, en un horizonte temporal cercano, para reducir de forma efectiva el impacto medioambiental de la aviación, principalmente en lo referente a las emisiones de CO_2, aunque también con potencial para mitigar otros impactos como el de las estelas de condensación. Su gran ventaja consiste en que permiten mejorar la sostenibilidad de las aeronaves existentes (concepto drop-in), incluidas las que operan vuelos de alta capacidad y larga distancia. Para calcular su eficiencia medioambiental debe tenerse en cuenta su ciclo de vida completo, incluyendo los impactos directos e indirectos de su producción. La reciente iniciativa legislativa de la Comisión Europea, Fit for 55, podría proporcionar un gran impulso para su uso generalizado al proponer cuotas obligatorias de repostaje.
- La aviación comercial con propulsión eléctrica, que se espera empiece a entrar en servicio esta misma década para aeronaves regionales, es hoy en día la única vía para poder realizar vuelos con un impacto medioambiental cero, asumiendo que se usen suministros renovables y a falta de evaluar el ciclo de vida de los equipos empleados.
- Las configuraciones que incluyen motores eléctricos son muy variadas y flexibles, con múltiples posibilidades de hibridación con otras propulsiones para optimizar sus capacidades. El suministro eléctrico puede provenir de baterías o pilas de combustible. Las características de los motores eléctricos abren nuevas posibilidades y ventajas en el diseño de la aeronave (reducción de resistencia inducida, ingesta de capa límite, propulsión distribuida). Los principales escollos tecnológicos a superar son el incremento de la energía específica de las baterías y los sistemas de distribución de alta potencia, campos en los que se está avanzando con gran rapidez.
- La introducción del hidrógeno en la aviación como vector energético sostenible es una de las vías más prometedoras para la reducción drástica de emisiones de CO_2. Resulta particularmente interesante su aplicación para el segmento de la aviación comercial más contaminante: aeronaves de más de 100 pasajeros en distancias alrededor de los 2.000 km. Su desarrollo e implantación industrial cuenta con una fuerte promoción gubernamental en Japón y Europa, ya que resulta un elemento enormemente versátil en las estrategias de descarbonización. En el ámbito de la aviación es parte fundamental de la producción de combustibles sostenibles sintéticos, impulsa la propulsión eléctrica gracias a las pilas de combustible, y permite también su combustión directa en turborreactores. En la actualidad hay proyectos en marcha para su aplicación aeronáutica comercial en todas estas variantes.
- El hidrógeno soluciona el problema de autonomía de la propulsión eléctrica, superando al queroseno en energía específica por un factor de tres, lo que aligera el peso de combustible necesario. En su contra destaca que su densidad energética es como mínimo cuatro veces menor que el combustible convencional, lo que dificulta el diseño de la aeronave al requerir mucho más espacio para alojar los tanques presurizados o criogénicos (H_2 líquido). Si bien su combustión solo produce teóricamente agua, es necesaria más investigación sobre sus efectos medioambientales ya que libera el H_2O en altura (estelas de condensación y nubosidad inducida), así como continuar el desarrollo tecnológico para minimizar las emisiones de NOx asociadas.

- En el camino hacia la aviación medioambientalmente sostenible, más allá de los avances tecnológicos, resultará también imprescindible un marco regulatorio y de financiación que favorezca el desarrollo e implementación de estas soluciones sostenibles, de forma que sean competitivas frente a los combustibles fósiles.
- La reducción del ruido debido a las operaciones aéreas continúa de forma ininterrumpida, registrándose en las nuevas aeronaves una huella de ruido un 30-50% menor que la generación que sustituye. Los aviones actuales son un 75% más silenciosos que hace 50 años.

Alcanzar una aviación comercial sostenible a nivel medioambiental es un objetivo ambicioso, pero a nuestro alcance, para el que será necesario la implicación y el esfuerzo de toda la industria aeronáutica, gobiernos y organismos internacionales, así como el de los propios pasajeros. Existe un amplio abanico de medidas, estrategias y tecnologías para conseguirlo; y el camino más probable es el de la combinación de todas ellas según sus capacidades óptimas en diferentes marcos de tiempo. En un horizonte de 10 a 20 años sería factible alcanzar, a modo de ejemplo, una aviación civil en la que predominase la propulsión eléctrica e híbrida para el transporte regional y de corto alcance, motores de combustión de hidrógeno para rutas intermedias y de alta capacidad, y vuelos de larga distancia con combustibles sostenibles.

3 INTRODUCCIÓN Y OBJETO

El reto global de este siglo es lograr en todo el mundo un desarrollo que equilibre las consideraciones de índole social, económica y medioambiental, como queda reflejado en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU.

Este informe proporciona una visión del sector de la aviación civil con objeto de conocer su situación actual en el ámbito de la sostenibilidad medioambiental, las acciones y proyectos que se han llevado a cabo para mejorarla, así como las iniciativas propuestas que contribuirán a conseguir un futuro más sostenible para la aviación.

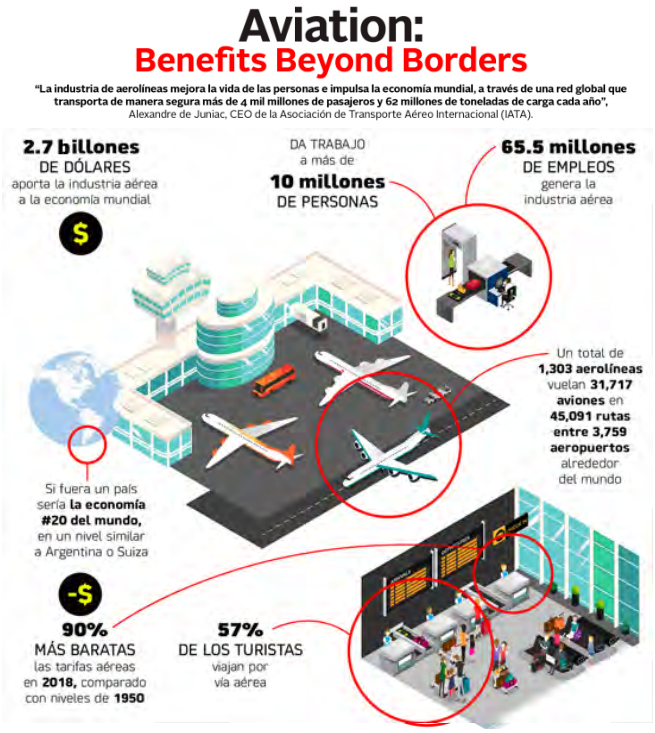

Figura 1. La industria aérea en números. Fuente: IATA/ATAG

El sector aeronáutico comprende a fabricantes de aeronaves, motores y equipos, compañías de transporte aéreo, organizaciones de navegación y control de tráfico aéreo, aeropuertos, organismos de certificación, centros de investigación y tecnología, y en general a todas las personas que trabajamos por y para la aeronáutica, contribuyendo en múltiples aspectos al crecimiento económico, al bienestar social y, particularmente, a forjar vínculos entre personas a nivel nacional e internacional.

La aviación civil es un motor global que contribuye de manera decisiva a mejorar nuestras vidas gracias a la creación de empleo y la rapidez de transporte y distribución, fomentando la competitividad, la cohesión territorial y la conectividad de nuestras sociedades. La aeronáutica genera además desarrollos tecnológicos de aplicación general, así como un significativo intercambio científico y cultural; todo esto mientras mantiene el mayor nivel de seguridad de todos los medios de transporte, y trabaja para minimizar su impacto medioambiental.

En la Figura 1 se muestra los datos de la industria de las aerolíneas del año 2018, durante el que se transportó de forma segura, a través de su red global, a más de 4.000 millones de pasajeros y 62 millones de toneladas de carga [1]. En España, en 2019, se transportaron por vía aérea 275,2 millones de pasajeros, y un total de 1,1 millones de toneladas de carga [2]. Esta actividad genera alrededor de 204.000 empleos (algo más del 1% del total) a través de unas 6.200 empresas [2].

Según datos de la Asociación de Aerolíneas Regionales de Europa (ERA), el sector de la aviación contribuye con 823.000 millones de dólares a la actividad económica de Europa, representando un 3,3 % de todo el empleo (12,2 millones de puestos de trabajo) y un 4,1 % del PIB de Europa. En términos globales, su contribución al PIB es de 2,7 billones de dólares, y 65,5 millones de empleos [22].

Por otra parte, todos estos beneficios tienen un coste en forma de impacto medioambiental debido al transporte aéreo que se puede clasificar, en función de su alcance, en efectos locales y efectos globales. Dentro del efecto local, centrado alrededor de los aeropuertos, se distingue el ruido, la contaminación de aire local y la afectación al espacio/paisaje. En los efectos globales cabe destacar el consumo de materiales no renovables y, sobre todo, las emisiones y su contribución al cambio climático.

1 IATA y ATAG. https://a21.com.mx/aerolineas/2018/10/08/beneficios-de-la-aviacion-infografia

2 Estadísticas de Aena. https://portal.aena.es/es/corporativa/estadisticas-trafico-aereo.html

Desde sus inicios el avión ha sufrido grandes transformaciones, a pesar de que si se compara un avión de los años 70 con uno de hoy su apariencia exterior apenas haya cambiado. Realmente la mayoría de los cambios han tenido lugar en su interior, en mejorar configuraciones estructurales de diseño, materiales, y especialmente en la electrónica y en la eficiencia de los motores.

A partir de la firma del Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNFCCC) en 1992, se produjo una creciente atención sobre la influencia de las actividades aeronáuticas en este problema global. Como respuesta, el desarrollo y evolución del sector de la aviación en general se ha enfocado en mejorar la vida de las personas e impulsar la economía mundial de una forma cada vez más sostenible, con la aplicación de nuevas tecnologías y procesos, nuevos combustibles y materiales que limiten su impacto medioambiental.

Figura 2. Proceso de reciclaje y recuperación de equipos en aviones

Este camino de la aviación hacia la mitigación y eliminación de las emisiones y otros efectos negativos, en el que se centra este informe, no agota en absoluto el análisis de la sostenibilidad de la industria aeronáutica. El análisis de ciclo de vida de todos los elementos necesarios para volar requeriría considerar muchos otros aspectos, como por ejemplo los procesos completos de producción de aeronaves, infraestructuras y combustibles; o la consideración de efectos secundarios o de "rebote" ante la introducción de nuevas medidas y tecnologías más sostenibles. En este sentido, y aunque supere nuestro objetivo, cabe destacar por ejemplo las acciones y proyectos de reciclado existentes en el sector aeronáutico, tanto a nivel de fabricación como de aeronaves que alcanzan el final de su vida operativa (proyecto *Sentry*[3] desarrollado dentro del programa de la Unión Europea *Clean Sky*), o el trabajo de empresas dedicadas a estas tareas fundamentales para la sostenibilidad de la aviación civil[4].

En el presente contexto resulta inevitable mencionar la crisis actual de la COVID-19, que ha golpeado con dureza la sociedad a escala global, tanto a nivel sanitario como económico, ralentizando muchas actividades fundamentales, y entre ellas el transporte aéreo. Su impacto sobre la industria aérea, más allá de las operaciones de las aerolíneas, afecta además a las actividades de investigación de los fabricantes. La cancelación de programas de I+D, como respuesta rápida en un primer momento ante la crisis, ha afectado también a algunos proyectos orientados hacia una aviación sostenible, como en el caso del E-Fan X [5].

Por otra parte, el enorme desafío de la pandemia actual también supone una oportunidad para destacar la necesidad de avanzar hacia una aviación aún más sostenible y respetuosa con el medio ambiente. Así lo reconoce la Unión Europea al condicionar las ayudas extraordinarias para la recuperación económica con proyectos compatibles con el *European Green Deal* [18], y su objetivo de alcanzar un continente descarbonizado en 2050. La reciente propuesta de legislación europea *Fit for* 55 [12], busca implementar medidas concretas que revolucionen el sector del transporte y, con objetivos intermedios en 2030, pavimenten el camino para cumplir los compromisos del Acuerdo de París contra el cambio climático.

3 https://cordis.europa.eu/project/id/632487/reporting/es
4 AELS, TARMAC Aerosave, Air Salvage International, etc.
5 https://www.airbus.com/newsroom/stories/our-decarbonisation-journey-continues.html

Archivo fotográfico

Figura 2. Fuente: Billipix, para Flight International, marzo 2021.

Diversos países también han ligado sus ayudas económicas extraordinarias a desarrollos sostenibles, como Francia y su apuesta por un avión con emisiones de carbono neutras para 2035[6]. La industria aeronáutica, siempre en continuo proceso de mejora y superación tecnológica, se encuentra en disposición de afrontar este desafío con éxito. Sirva como ejemplo la evolución del número de proyectos de aviación eléctrica en activo (Figura 3) hasta superar los 200 a finales de 2019[7].

Este camino hacia la aviación sostenible se sostiene en el corto plazo sobre mejoras operacionales, mitigación y compensación de emisiones, y desarrollos graduales de tecnologías consolidadas; pero también sobre innovaciones disruptivas, cambios revolucionarios y nuevas tecnologías en el largo plazo. La industria aeronáutica ya acometió con éxito cambios de este calado en el pasado, y en colaboración con organismos públicos y privados, y con la de los pasajeros y sociedad en general, está preparada para volverlo a conseguir.

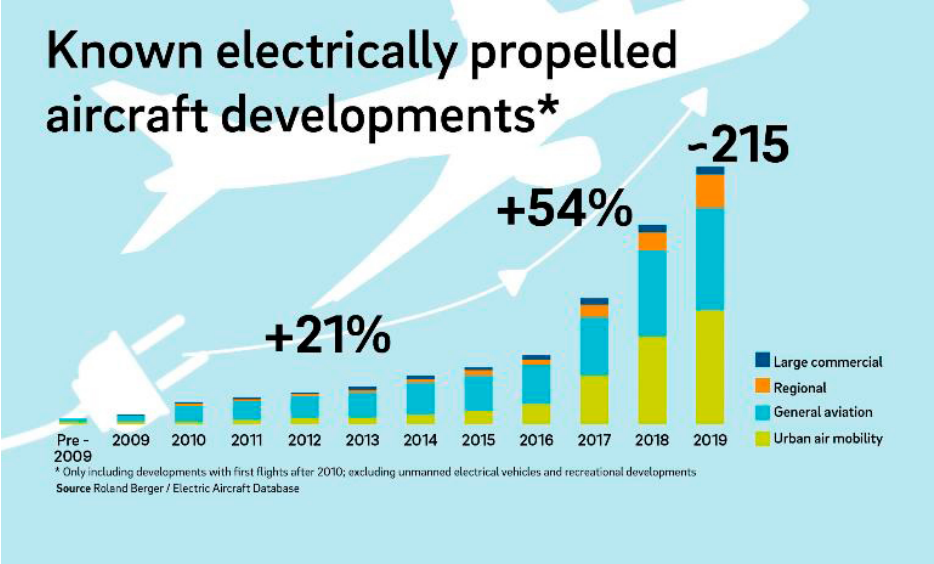

Figura 3. Evolución del número de proyectos de aviación con propulsión eléctrica por año.

Dada la importancia y visibilidad del impacto ambiental en el campo de la sostenibilidad, y en particular en todo lo relacionado con el cambio climático, este informe dará especial énfasis a los efectos de las operaciones de las aeronaves: las emisiones de gases y partículas, y el ruido. Primero se contextualizará la aviación respecto a otros sistemas de transporte y, posteriormente, se mostrarán los esfuerzos, avances y resultados que el sector aeronáutico está realizando para controlar y minimizar su impacto.

6 https://www.euractiv.com/section/aerospace/news/france-unveils-e15bn-in-aerospace-aid-sets-green-goals/

7 Roland Berger: https://www.rolandberger.com/en/Point-of-View/Electric-propulsion-is-finally-on-the-map.html

Archivo fotográfico

Figura 3. Fuente: Roland Berger

4 IMPACTO AMBIENTAL DE LA AVIACIÓN EN CONTEXTO

El impacto ambiental de la aviación, tanto en su vertiente de emisiones como de generación de ruido, ha sido un tema de estudio y mejoras por parte de la industria aeronáutica desde hace décadas. Sin embargo, fue a partir del grupo de trabajo sobre el cambio climático de la ONU (IPCC), en particular en su informe de 1999 [43], cuando alcanzó una gran relevancia pública, en sintonía con la creciente concienciación medioambiental.

El estudio de este fenómeno global tiene como una de sus principales tareas la evaluación de todas las emisiones de gases de efecto invernadero debido a actividades humanas, identificadas como la principal causa de este fenómeno [44]. A fin de comparar la intensidad e impacto de los diferentes tipos de emisiones y efectos se suele utilizar el concepto de forzamiento radiativo (RF), que es una medida de la influencia de cualquier factor en la alteración del balance energético del sistema tierra-atmósfera: el saldo entre la radiación solar entrante y la radiación infrarroja saliente, comparados con la era preindustrial (1750). A modo de ejemplo, la liberación de gases como el CO_2 en la atmósfera contribuye a capturar esta radiación térmica saliente, y produce un RF positivo que, por lo tanto, aumenta el efecto invernadero. El efecto albedo de las nubes durante el día, reflejando la luz solar y, consecuentemente, enfriando el planeta, produce un RF negativo. Recientemente se ha refinado este parámetro introduciendo el forzamiento radiativo efectivo (ERF), que captura de manera más precisa el efecto del saldo energético a nivel del suelo.

El impacto global de una actividad sobre el cambio climático puede así evaluarse como la resultante de todos los forzamientos radiativos que genera, tanto positivos como negativos. Para la aviación, una exhaustiva actualización de los datos ha confirmado recientemente una contribución neta correspondiente al 3,5% de la acción humana sobre el calentamiento global [49]. Esta evaluación incluye todas las emisiones de las aeronaves, así como las diferentes interacciones e impactos secundarios:

- Emisiones de gases inductores de efecto invernadero (GEI), principalmente CO_2 pero también NOx, SOx, hollín, hidrocarburos, vapor de agua y otros.
- Formación de estelas de condensación (contrails) y su posterior transformación en cirros (AIC).

Las interacciones de estas emisiones en las capas altas de la atmósfera son muy complejas, y de hecho son objeto de continuas investigaciones y las correspondientes actualizaciones de su impacto. Las partículas de hollín, por ejemplo, sirven de semilla para la formación de los microcristales que conforman las estelas de condensación en condiciones atmosféricas de frío y saturación (ISSR[1]). Modificando el número y tipo de estas partículas materiales emitidas, como veremos más adelante, abre posibilidades para mitigar el impacto de las estelas que, aunque todavía con una incertidumbre considerable, se estima que podría suponer alrededor de la mitad del ERF total de la aviación [6].

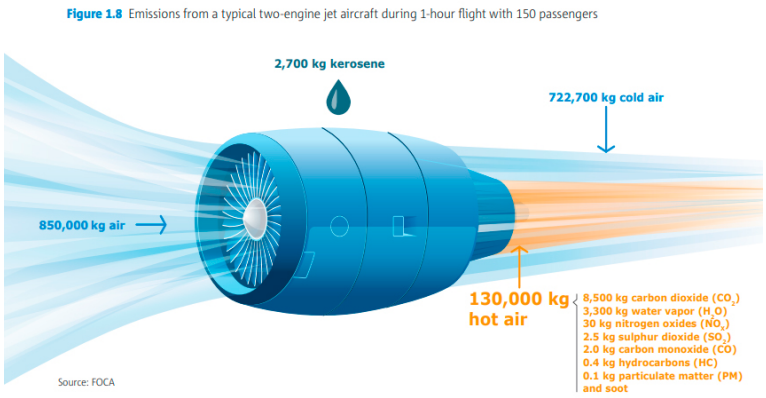

Figura 4. Consumo y emisiones tipo de una aeronave con 2 turbofanes en un vuelo de 1 hora y 150 pax

1 Ice supersaturated region

Archivo fotográfico

Figura 4. Fuente FOCA

Los óxidos de azufre representan, por su parte, un ejemplo de las incertidumbres pendientes por despejar. Actualmente se considera que contribuyen a enfriar la atmósfera, pero al mismo tiempo se reconoce que todavía hay efectos relevantes por comprender, como su interacción con la formación de nubes, al igual que ocurre con los aerosoles del hollín [49].

Un caso aún más evidente que muestra la complejidad de estas interacciones atmosféricas es el de los óxidos de nitrógeno (NOx), a los que se les atribuía tradicionalmente una doble acción respecto al efecto invernadero: por una parte claramente negativa al actuar de precursor del ozono (O_3), pero por otra eliminando metano (CH_4) de la atmósfera, un potente gas de efecto invernadero [48]. Sin embargo, recientemente se han identificado otros dos efectos: una disminución del ozono a largo plazo, y la reducción de H_2O, que en altura funciona como GEI. Estas dos nuevas interacciones, que enfrían la atmósfera, se vieron contrarrestadas a su vez por el paso al análisis ERF, que incrementa la efectividad de los NOx. Tras estas modificaciones, el efecto en conjunto de las emisiones de óxidos de nitrógeno se sigue considerando promotor del calentamiento global [49], aunque esto no ha cerrado el debate ni mucho menos. Dos nuevos estudios han generado cierta controversia al revisar el modelo actual para defender uno que el impacto del NOX es mucho peor de lo estimado hasta ahora [34], mientras otro argumenta que su efecto no es tan preocupante y su disminución no debería ser una prioridad. Es más, según sus estimaciones y dadas ciertas condiciones, en el futuro su impacto podría terminar por volverse positivo [71].

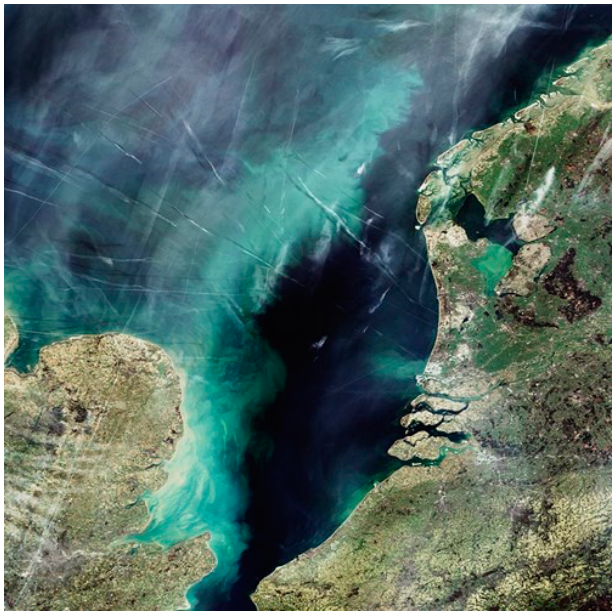

Figura 5. Estelas de condensación y nubosidad inducida sobre el Mar del Norte.

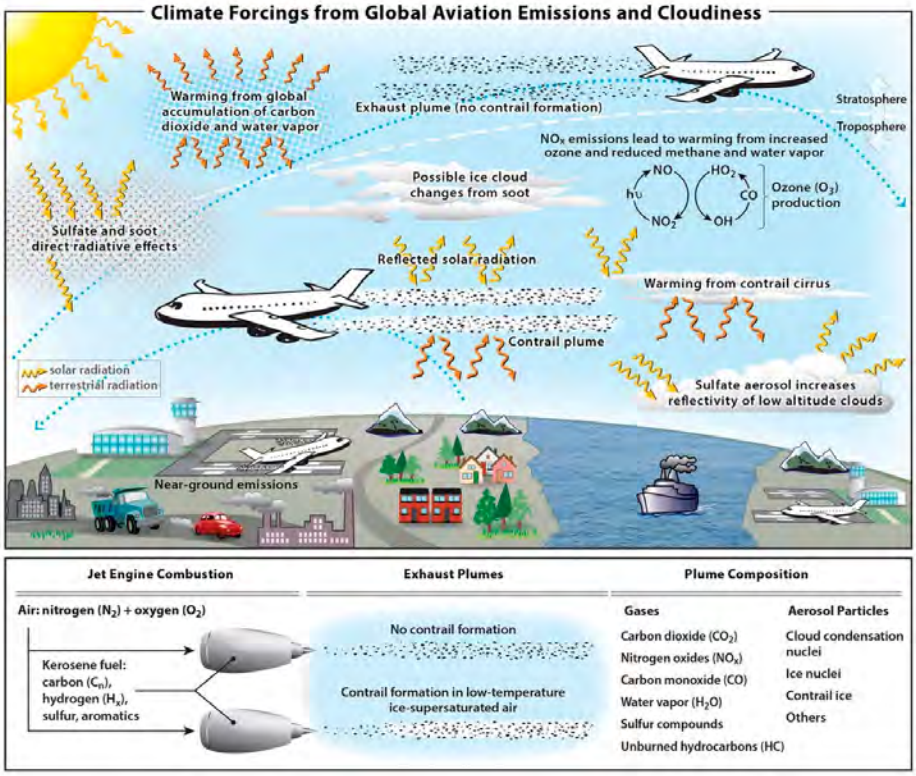

Figura 6. Esquema del impacto medioambiental de la aviación [49].

Por lo tanto, queda claro que la comprensión consolidada de los mecanismos por los que la aviación comercial influye en el cambio climático, más allá de los efectos del CO_2, es fundamental para avanzar hacia una aviación plenamente sostenible, y de hecho centra esfuerzos de investigación como el proyecto ACACIA [2] y numerosas revisiones científicas [21]. El conocimiento de los diferentes fenómenos implicados es el que permite orientar los esfuerzos de la industria, de forma más efectiva, para conseguir mitigar su impacto. Así, conviene también puntualizar que el valor directo de ERF expresamente se considera poco adecuado para guiar las estrategias de reducción de emisiones, al recoger efectos de larga y corta permanencia en la atmósfera sin la ponderación correspondiente [49].

2 www.acacia-project.eu

Archivo fotográfico

Figura 5. Fuente: ESA.

De acuerdo con este enfoque, y sin perder de vista el resto de mecanismos, nos centraremos ahora en el estudio de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), debido tanto a su importancia como al alto grado de confianza científica en la comprensión de su ciclo. Este gas de efecto invernadero de larga permanencia sigue siendo, de forma justificada, el objetivo prioritario de las acciones para conseguir una aviación más sostenible [71] y, de hecho, sirve además para comparar impactos medioambientales de todo tipo entre diferentes industrias y sectores.

En 2018, la aviación comercial en su conjunto fue responsable del 2,4% de las emisiones de CO_2 a nivel mundial [33]. A pesar del constante aumento del tráfico aéreo, antes de la llegada de la pandemia actual, esta cifra se mantuvo estable durante las últimas décadas (2,5% en 2005 [48]). Eso se puede explicar debido al aumento de las emisiones globales y, como veremos, a la mejora continuada en la eficiencia de las aeronaves. Contabilizando las emisiones de CO_2 por países, de acuerdo con el origen de los vuelos, destacan Estado Unidos (24%) y China (13%) como los dos mayores contribuyentes [33].

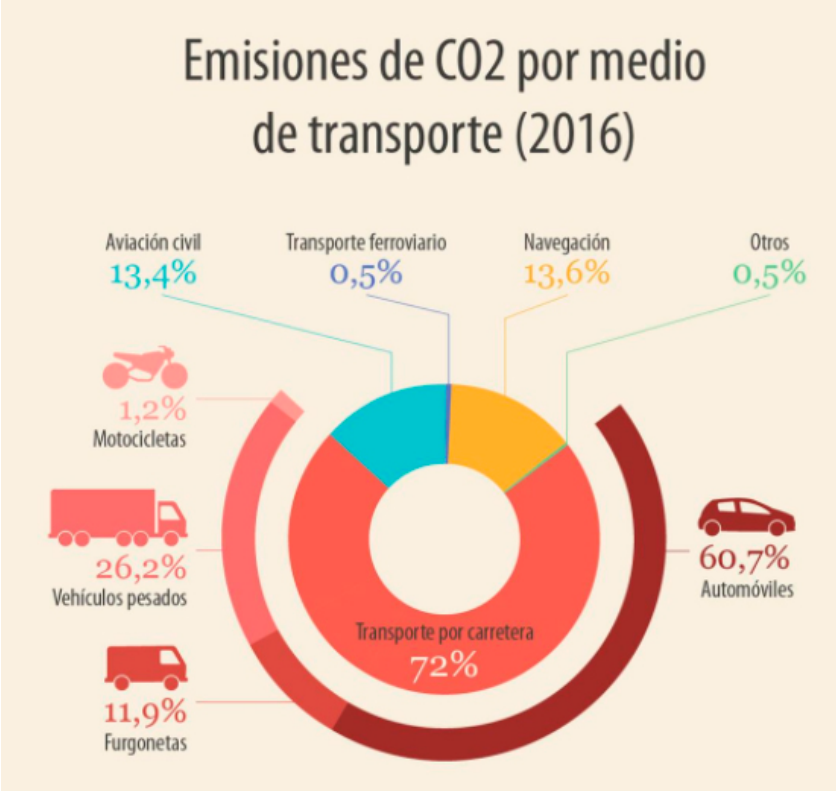

Figura 8. Contribución proporcional a las emisiones de CO2 por transporte en la UE.

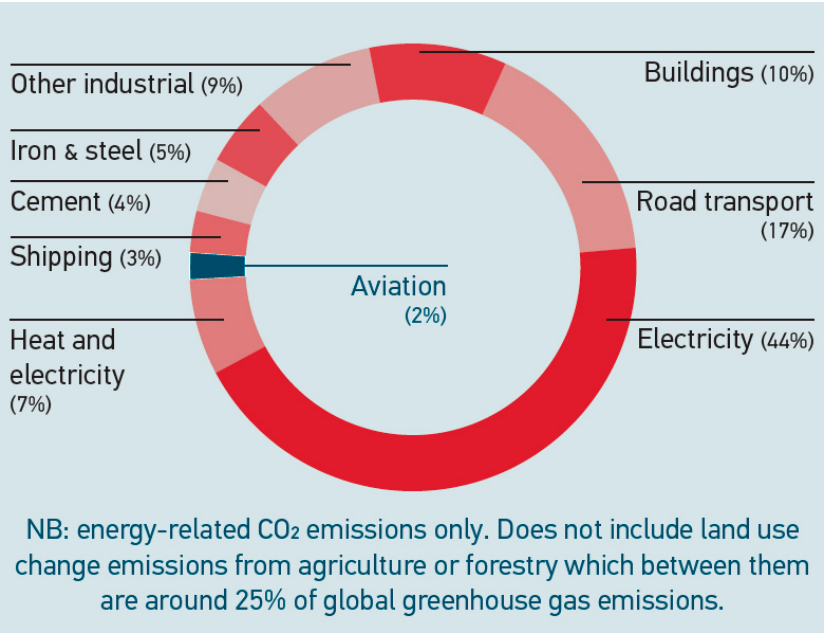

Figura 7. Contribución de CO2 debido a la aviación respecto al resto de emisores globales en 2014.

Para contextualizar estas cifras resulta útil compararlas con el impacto medioambiental del transporte por carretera, responsable del 17% de las emisiones globales de CO_2, como señala la Figura 7, o el del transporte por vía marítima con un 3% del total. Según el IPCC la contribución de todo el sector del transporte a nivel mundial es aproximadamente un cuarto del total de CO_2 emitido por actividades humanas en 2010, y su contribución ha crecido rápidamente superando el doble de la de 1970. Este preocupante incremento se debe en un 80% al transporte por vehículos en carretera [44].

La Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA), en sus estudios sobre las emisiones de CO_2 a nivel europeo, corrobora esta distribución del impacto en el sector del transporte (Figura 8).

Por otra parte, la Figura 9 detalla la importancia de los diferentes segmentos de la aviación según sus emisiones de CO_2. Como se puede apreciar, la mayor contribución de dióxido de carbono se concentra en aeronaves de entre 100 y 200 pasajeros en vuelos de hasta 2.000 km.

Archivo fotográfico

Figura 7. https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/aviations-impact-on-the-environment/
Figura 8. Agencia Europea del Medio Ambiente. https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20190313STO31218/emisiones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-infografia

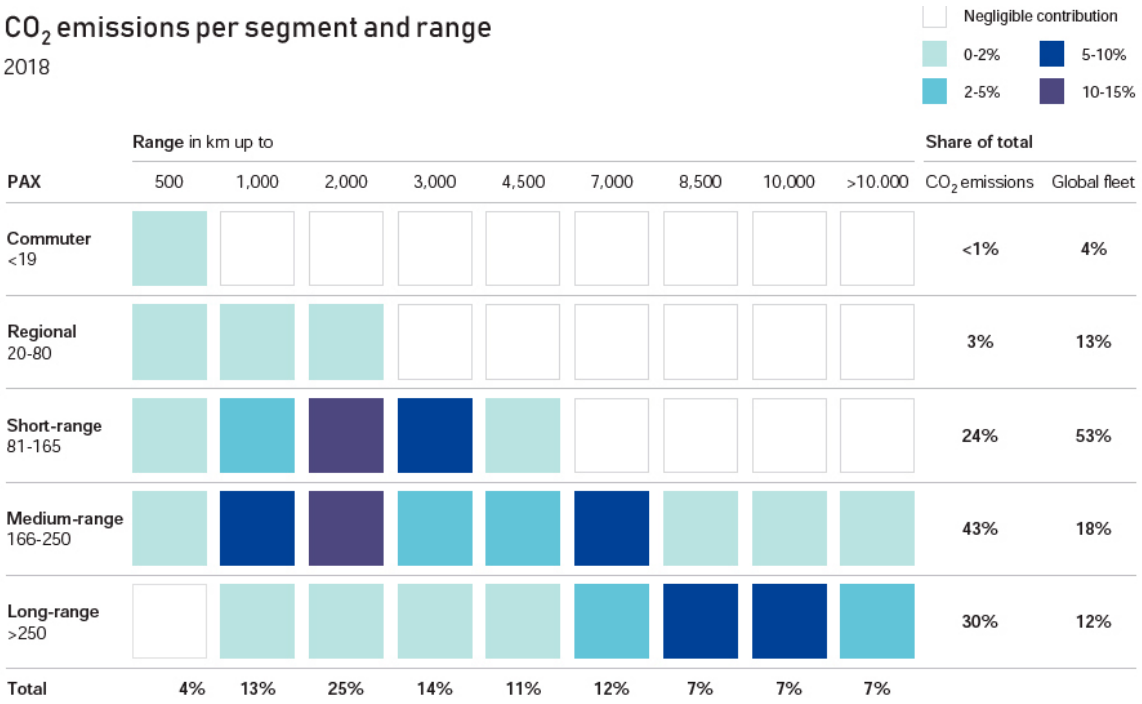

Figura 9. Contribuciones a las emisiones de CO2 en aviación según distancia y capacidad de los vuelos [28]

Las aeronaves comerciales de pasajeros han evolucionado constantemente durante décadas hacia una mayor eficiencia en su consumo energético por kilómetro y pasajero transportado. Durante un período de 40 años esta mejora se ha estimado en más de un 60% [48]. Pese a ello, las emisiones netas asociadas a la aviación comercial han experimentado un crecimiento constante durante los últimos años, producido fundamentalmente por el enorme incremento experimentado en el tráfico aéreo. Este crecimiento de las emisiones, estimado en un 5,7% anual entre 2013 y 2018 [33], se ha producido a pesar de la considerable mitigación por los avances tecnológicos en la industria aérea, como se aprecia en la Figura 10. La cantidad de combustible necesario por unidad básica de transporte (fuel intensity) ha descendido de forma continuada durante las últimas décadas. A modo de ejemplo, una aeronave de última generación, como el A350 o el 737Max, consume de media 3 litros de combustible por cada 100 pasajeros•km. A pesar de la gran diferencia en velocidad y alcance, este valor es equivalente al de cualquier automóvil compacto moderno[3].

Otra comparativa habitual se basa en la intensidad de emisión de carbono, que recoge el CO_2 emitido por pasajero y kilómetro recorrido. Según datos de 2018 [33], la media del transporte aéreo de pasajeros es de 88 gCO_2/pax•km, dato que incluye a las aeronaves más antiguas aún en servicio. Como referencia, los automóviles de nueva matriculación en Europa en 2019 emiten una media de 130,3 gCO_2/km[4], un valor en ascenso desde 2017 a pesar de la introducción de vehículos híbridos y eléctricos. Si se utiliza la ocupación de referencia habitual (1,5 personas por vehículo), el valor medio de intensidad de emisión de carbono para el transporte terrestre particular más moderno por carretera es de 87 gCO_2/pax•km. Las mejoras en eficiencia de las aeronaves comerciales, en un escenario sin cambios radicales de tecnología o configuración, se estima que rondan el 1-2% anual [44].

La incertidumbre actual hace difícil estimar el crecimiento futuro del tráfico aéreo, que sufre todavía tras el marcado parón de 2020 debido a la pandemia de la COVID-19, aunque las consecuencias se prevén que se extiendan a muy largo plazo (16% menor en 2050 [4]). Se ha estimado que, en el período entre abril y julio de 2020, la reducción de los vuelos supuso una caída del 78% en las emisiones asociadas a la aviación en Europa [23]. Sin embargo, con toda probabilidad, en pocos años el incremento en el tráfico hará que las emisiones vuelvan a superar el ritmo de las mejoras en consumo de combustible. Esto implica que, para revertir la tendencia y reducir las emisiones netas, resultaba imprescindible adoptar nuevas estrategias. A continuación, veremos cuál está siendo la respuesta del sector de la aviación civil a este reto formidable.

3 ATAG. https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/climate-action/efficient-technology

4 http://co2cars.apps.eea.europa.eu/

5 HACIA UNA AVIACIÓN SOSTENIBLE

La industria aeronáutica en su conjunto, incluyendo fabricantes, aeropuertos y líneas aéreas, es plenamente consciente de este desafío medioambiental, y lleva años trabajando en la búsqueda de soluciones. Así, la asociación ATAG[1], que reúne a los principales actores del sector, firmó en 2008 un compromiso de actuación contra el cambio climático[2]. Como resultado del mismo se establecieron 2 ambiciosos objetivos:

1. Una mejora media en la eficiencia del transporte aéreo del 1,5% anual, medida en CO_2 emitido por tonelada•km transportada (RTK), entre 2009 y 2020.
2. Establecer como límite máximo de emisiones netas de CO_2 el nivel alcanzado en 2020, comprometiéndose a un crecimiento CO_2-neutro a partir de ese año.

Las acciones necesarias para alcanzar estos objetivos son diversas, pero podrían agruparse en cuatro pilares que se revisarán en profundidad más adelante:

- Compensación de emisiones y medidas económicas.
- Modernización de infraestructuras y mayor eficiencia en las operaciones aeronáuticas.
- Continuo desarrollo de la eficiencia medioambiental en las aeronaves actuales, incluyendo la generalización de los combustibles sostenibles para aviación (SAF).
- Desarrollo de nuevas tecnologías de propulsión, principalmente la aviación eléctrica y la adopción del hidrógeno como combustible.

La intención es contener primero y reducir después, lo más rápidamente posible, la contribución neta de la aviación comercial a las emisiones de gas invernadero. En septiembre de 2020 ATAG publicó WayPoint2050 [4], un informe sobre los progresos realizados y los posibles escenarios para alcanzar el tercer objetivo a largo plazo. De hecho, la mejora en eficiencia de las aeronaves ha ido superando el 2% anual desde 2009 , y en enero de 2021 entró en funcionamiento el mecanismo de compensación de emisiones CORSIA, alineado con el segundo compromiso.

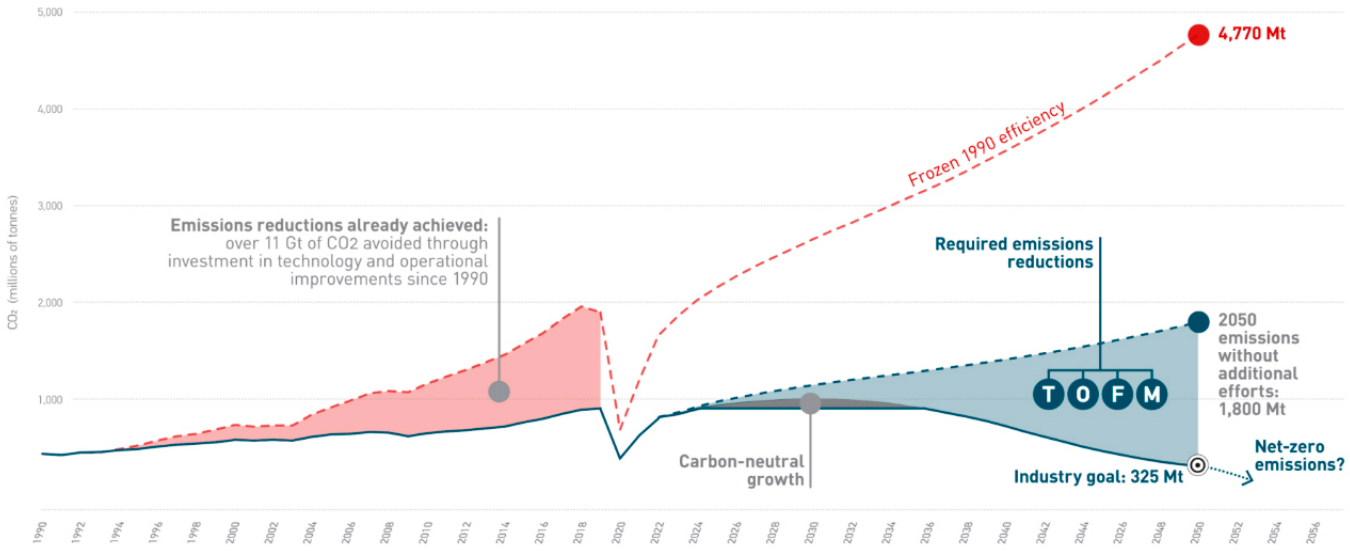

Figura 10. Evolución de las emisiones de CO2 debido al transporte aéreo, reducciones ya conseguidas (rosa) y proyectadas (azul). Fuente: www.IATA.org / Waypoint2050

1 Air Transport Action Group
2 ATAG. 3rd Aviation & Environment Summit. 22 de abril de 2008.

La OACI, organismo especializado de la ONU para la ordenación de la aviación civil internacional, acordó en 2016 lanzar este sistema internacional para limitar las emisiones netas de CO_2 para aerolíneas, fundamental en la estrategia de mitigación de emisiones en el corto plazo, y que ha sido aceptada por todos los actores del sector, incluida la asociación de aerolíneas IATA. Más adelante se revisará en detalle esta iniciativa.

Otro papel fundamental desarrollado por OACI es la implementación de una serie de normativas de obligado cumplimiento para la certificación de aviones y motores en relación al ruido, la calidad del aire local (NOx, restos de hidrocarburos, CO, partículas) y cambio climático (CO_2), lo que implica una certificación ambiental obligatoria a nivel mundial para la aviación civil.

En Europa, la industria de la aviación fue un paso más allá a principios de 2021, con el ambicioso objetivo presentado en el documento Destination 2050: alcanzar la neutralidad neta en emisiones de carbono para 2050 [54]. Para ello se evaluó el potencial de las diferentes estrategias en descarbonización, fundamentalmente incrementos en eficiencia (aeronaves y operaciones), y generalización de combustibles sostenibles (SAF e hidrógeno), sugiriendo un camino viable como refleja la Figura 11.

La Unión Europea, por su parte, es sin duda otro actor clave en el impulso hacia un transporte aéreo sostenible. En 2011 estableció su visión para la aviación comercial del futuro: *FlightPath* 2050 [13], con unos objetivos similares a los de ATAG, aunque ampliándolos al incluir las emisiones de NOx, el ruido y el reciclaje de aeronaves. Para alcanzar unos objetivos tan ambiciosos se lanzó el programa *Clean Sky 2*, continuación de una fructífera colaboración público-privada para financiar proyectos innovadores en el ámbito de la sostenibilidad. La continuidad de este esfuerzo está asegurada mediante iniciativas como *Clean Aviation* y los fondos *Horizon Europe*.

Por otra parte, en julio de 2021 la Comisión Europea presentó su propuesta legislativa *Fit for* 55, con la que busca alinear diferentes sectores económicos con el Pacto Verde Europeo para alcanzar una ambiciosa reducción del 55% en emisiones de CO_2 en 2030 respecto a los niveles de 1990. El transporte aéreo es una de las áreas implicadas, con un mandato para el suministro de combustibles sostenibles, la integración del mercado de emisiones EU ETS con CORSIA y cambios en el sistema de impuestos a los combustibles de aviación. Se revisarán estas iniciativas en las correspondientes secciones de este informe.

En Estados Unidos, los programas *CLEEN I y II*, gestionados por la autoridad federal aeronáutica (FAA),

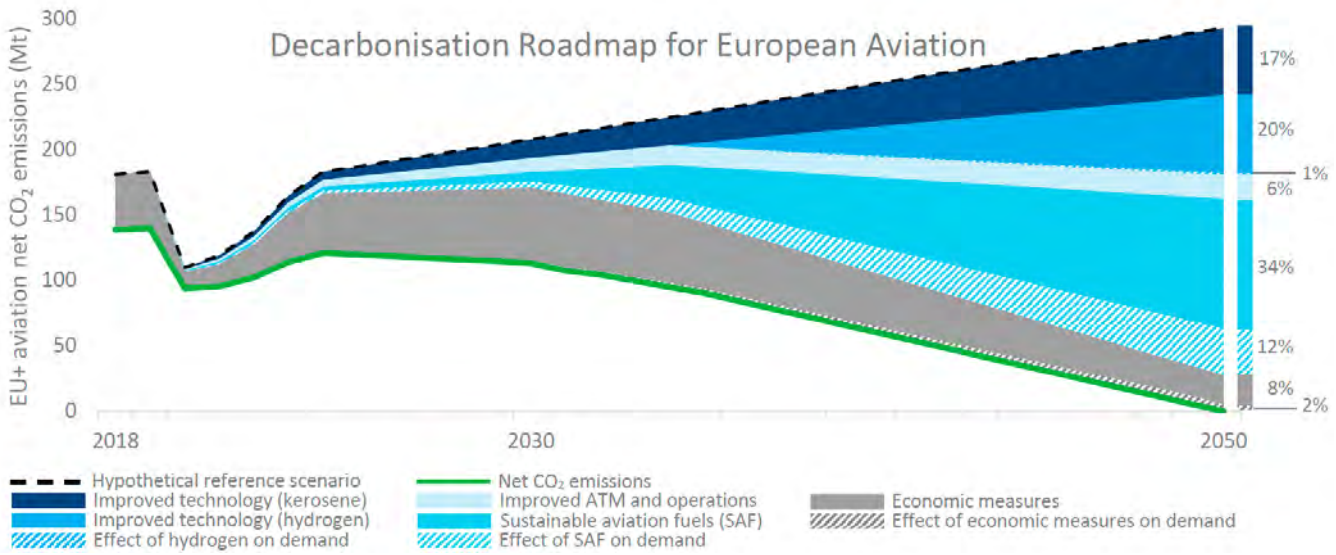

Figura 11. Destination 2050. Combinación de estrategias para la descarbonización de la aviación europea.

Este compromiso para alcanzar una aviación con cero emisiones netas de CO_2 en 2050 ha sido también asumido recientemente por IATA, que representa al conjunto de las aerolíneas mundiales, en su reunión de octubre de 2021 (*Fly Net Zero*) [3].

[3] https://www.iata.org/en/pressroom/2021-releases/2021-10-04-03/

se han desarrollado de manera similar a las iniciativas europeas para financiar la investigación en aviación sostenible, y tendrán continuidad con una tercera fase. Por su parte, la agencia federal NASA ha mantenido una actividad investigadora constante en este ámbito. Recientemente ha anunciado un programa intensivo para el desarrollo y ensayo de

tecnologías con vistas a una nueva generación de aeronaves más sostenibles. En septiembre de 2021 el gobierno estadounidense anunció un ambicioso programa con diferentes iniciativas para avanzar hacia una aviación descarbonizada en 2050. Además de fomentar la investigación en diferentes campos para desarrollar aeronaves con menos emisiones, incluido el desarrollo de baterías de mayor capacidad, el objetivo principal está en la promoción del combustible sostenible de aviación. Otros países también han lanzado acciones de este tipo como el Reino Unido, con los programas *Jet Zero* y el *Sustainable Aviation Group.*

En lo referente a otras emisiones e impactos de la aviación, más allá del CO_2, el conocimiento científico ha avanzado también en los últimos años aunque, como ya se ha señalado, sigue sujeto a un alto nivel de incertidumbre. Para una mejor comprensión de sus efectos, de las métricas que evalúan su impacto frente al CO_2 y del potencial de las medidas propuestas para su mitigación, como los beneficios por el uso de SAF, el hidrotratamiento del queroseno convencional o las desviaciones en rutas de vuelo, puede consultarse el informe exhaustivo de EASA de 2020 [21].

La economía circular y el ecodiseño son extensiones lógicas de las iniciativas en sostenibilidad dentro de la industria aeronáutica. A la aplicación de medidas alineadas con las 3 R originales (reduce, reutiliza, recicla), se añaden además ahora el rediseño y la reparación. Por citar algunos ejemplos, la empresa TARMAC AEROSAVE ha reciclado más de 135 aeronaves desde 2007, estimando que se recuperan materiales que cubren hasta un 92% del peso total de un avión [56]. También los aeropuertos se han sumado a este esfuerzo, como por ejemplo el de Gatwick, que alcanzó el certificado de erradicación de los residuos no-reciclables [56], o el compromiso de su asociación mundial (ACI) con la descarbonización para 2050 . En la sección 6.3.4 (Estructuras y materiales) se volverá a tratar estos conceptos con ejemplos de aplicación adicionales.

Figura 12. Propuestas del programa de investigación de NASA para la nueva generación de aeronaves.

La sociedad en la que vivimos se mueve inequívocamente hacia un mundo sostenible y respetuoso con el medio ambiente. Las iniciativas, programas y realidades palpables descritas en este apartado demuestran que la aviación civil no solo no se queda atrás en este empeño, sino que se compromete a ir más allá con objetivos muy ambiciosos. A continuación veremos con qué herramientas y tecnologías se propone alcanzarlos.

Figura 13. Ensayos en vuelo para evaluar el potencial del uso de SAF para la disminución de estelas (NASA-DLR).

Archivo fotográfico

Figura 12. Fuente: Nasa.

Figura 13. https://www.nature.com/articles/s43247-021-00174-y/figu-res/1

6 ACCIONES, INNOVACIÓN Y TECNOLOGÍA

6.1. COMPENSACIÓN DE EMISIONES Y MEDIDAS ECONÓMICAS

La industria aeronáutica siempre ha destacado por su capacidad de desarrollo tecnológico. El desafío medioambiental al que se enfrenta hoy en día le exige un nuevo esfuerzo de innovación técnica que, como veremos más adelante, ya está en marcha en múltiples direcciones y, lo más importante, empieza a dar sus primeros frutos.

Sin embargo, los tiempos de desarrollo necesarios para el diseño, fabricación y entrada en servicio de una nueva aeronave, sin contar la investigación tecnológica de base, son considerables. Además, la enorme flota comercial existente seguirá volando en su mayor parte durante los próximos años, incluso en el caso de que se empezase con su renovación de manera inmediata. Por todo ello, resultaba fundamental encontrar de manera urgente una solución a corto plazo para mitigar las emisiones debido a los vuelos comerciales. Los programas de compensación de emisiones son esa pieza transitoria que faltaba en el camino de la aviación hacia la sostenibilidad.

La posibilidad de que las emisiones de gases contaminantes producidas durante un vuelo comercial, normalmente centrándose en el CO_2 como referencia, se compensasen invirtiendo en proyectos que redujesen una cantidad de emisiones equivalente se lleva probando desde hace ya tiempo. De hecho, a día a hoy la mayor parte de las compañías aéreas ofrecen esquemas de este tipo, tanto a nivel individual para los pasajeros, o directamente compensan parte o el total de sus emisiones de dióxido de carbono[1]. El principal desafío en estas propuestas es la verificación de dichos proyectos de compensación, asegurando su adicionalidad y permanencia, evitando problemas como el *carbon leakage* o la doble contabilidad, además de la necesidad de aunar esfuerzos coordinados si se pretende que el beneficio sea global [6]. En este sentido, la propia industria de las aerolíneas ha puesto en servicio un sistema común para realizar compensaciones de emisiones de forma validada a través del *IATA's Aviation Carbon Exchange* [2].

Los compromisos de descarbonización realizados por numerosas aerolíneas y empresas de todo tipo se sustentan, además, en otras opciones de compensación como los esquemas *Book&Claim* [3], basados en la promoción del uso de combustibles sostenibles, o incluso iniciativas para la captura y almacenamiento del CO_2 directamente desde la atmósfera (DACCS) [4].

De esta manera, el mercado de *carbon offsets* voluntarios ha ido ganando complejidad, popularidad y volumen en los últimos años, y en él participan agentes de diferentes industrias. Actualmente existen numerosas agencias con gran relevancia a nivel mundial (7 de las cuales están aprobadas como elegibles dentro de CORSIA actualmente) que definen sus propios estándares para la monitorización y evaluación cuantitativa de los proyectos de compensación. De este modo se pretende asegurar que se cumplen los objetivos de emisiones y, en muchas ocasiones, también otro tipo de beneficios alineados con los ODS. Cabe destacar que los proyectos de compensación suelen dividirse en los de evasión (aquellos que evitan la emisión en un escenario usual si no se llevasen a cabo), y los de eliminación (aquellos que absorben gases de la atmósfera).

1 https://www.easyjet.com/en/sustainability

2 https://www.iata.org/en/programs/environment/carbon-offset/

3 https://boardnow.org/book-and-claim-explained-what-is-book-and-claim/

4 Direct air carbon capture and storage. https://www.reuters.com/article/united-arlns-climate-occidental/united-airlines-invests-in-carbon-capture-project-to-be-100-green-by-2050-idINKBN28K1NE

Pasando a los marcos obligatorios de limitación y compensación de emisiones, el sistema de comercio de derechos de emisiones de la Unión Europea (EU ETS [5]) incluye el sector de la aviación desde 2012, estableciendo el límite total de emisiones en base a la media de los años 2004-2006. Este esquema funciona bajo el principio *cap and trade*, que limita el máximo total de emisiones, asignando los derechos correspondientes a las aerolíneas, y les obliga a negociar con ellos o comprar créditos externos a la aviación si superan sus derechos de emisiones. Aunque en principio esta normativa obligatoria cubría todos los vuelos internos e internacionales con origen o destino en países del Espacio Económico Europeo (EEE), las presiones internacionales consiguieron suspender sus efectos sobre vuelos externos al EEE a la espera de que la OACI lanzase su propuesta a nivel global (decisión conocida como *stop-the-clock*). Los bajos precios de los créditos externos, que han permitido a las aerolíneas seguir aumentando sus emisiones, motivaron una serie de modificaciones del sistema en 2017 que consiguió revertir la situación, alcanzándose niveles alrededor de los 50€ por tonelada de CO_2 en la actualidad. Entre 2013 y 2020 este sistema certificó la reducción de 193 millones de toneladas de emisiones de CO_2 relacionadas con el tráfico aéreo [26].

Con la llegada de CORSIA, un esquema mundial de control, comercio y compensación de emisiones a partir de 2021, la necesaria integración o coordinación con EU-ETS supone un desafío político, normativo y operacional de máximo nivel. La propuesta de la Comisión Europea lanzada en julio de 2021 dentro del paquete legislativo *Fit for* 55 incluye mantener los vuelos intraeuropeos dentro de ETS, dejando la compensación de los exteriores para el sistema de OACI. Además, se refuerza el sistema europeo con una reducción acelerada del número total de permisos de emisión (4,2% anual), y la eliminación de las unidades básicas gratuitas a las aerolíneas a partir de 2026 [16].

CORSIA
PLAN DE COMPENSACIÓN Y REDUCCIÓN DE CARBONO PARA LA AVIACIÓN INTERNACIONAL

Figura 14. Iniciativa CORSIA de la OACI.

5 https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_es

En 2016 la OACI aprobó el lanzamiento de CORSIA [6], un sistema de compensación de emisiones de CO_2 producidas por la aviación comercial internacional. Este mecanismo se ha diseñado de forma que las aerolíneas de los países miembros de OACI, que cubren la abrumadora mayoría de los vuelos comerciales, puedan cumplir su compromiso de compensar las emisiones de dióxido de carbono que superen el nivel de 2019. El sistema contabiliza el CO_2 emitido por cada aerolínea, y obliga a que estas adquieran los derechos de emisión correspondientes, originados en proyectos de descarbonización en otros sectores, donde la reducción de emisiones sea más sencilla y eficiente. Como se recordará, esta propuesta materializa uno de los pilares de acción medioambiental propuestos por ATAG en 2008.

Sin duda la clave del éxito de esta iniciativa estará en la robustez de su sistema de control, y en la capacidad de asegurar que estas acciones de descarbonización sean realmente efectivas. Por ejemplo, se deberá asegurar que dichas reducciones no se habrían producido de no haber mediado el mecanismo de compensación. En esta línea, en 2019 la OACI emitió una norma con criterios para definir la elegibilidad de los proyectos de compensación (EUC) [58] y constituyó un comité técnico para su evaluación (TAB). CORSIA entró en funcionamiento el 1 de enero de 2021 y, antes de la pandemia de la COVID-19, se preveía que permitiese mitigar alrededor de 2.500 millones de toneladas de CO_2 hasta 2035 [22].

El programa se desarrollará en tres fases, y aunque en las dos primeras la participación sea voluntaria, la respuesta internacional ha sido muy positiva, como se observa en la Figura 15. Al menos el 77% del tráfico aéreo mundial estará dentro de CORSIA a partir de 2021. Además, la participación en este esquema será obligatoria para todos los países miembros de OACI a partir de 2027 [7], con algunas excepciones marginales para países pequeños o poco desarrollados. Cada estado será el responsable de monitorizar las emisiones de las aerolíneas con vuelos que partan desde su territorio con destino internacional. El cálculo de la cantidad de CO_2 que cada aerolínea debe compensar

6 https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx

7 CORSIA tiene rango normativo como parte del Anexo 16 del Convenio sobre Aviación Civil Internacional (Convenio de Chicago).

Archivo fotográfico

Figura 14. Fuente: OACI.

se realizará en base a factores de crecimiento de tráfico y a las emisiones reales de dicha aerolínea. Esto es importante ya que fomentará la modernización de las flotas para evitar dichas compensaciones.

En 2020, y tras un proceso no exento de debate [8], OACI decidió cambiar el baremo máximo de emisiones, pasando de usar la media de los años 2019-2020 a considerar solo los datos de 2019. Esta medida se

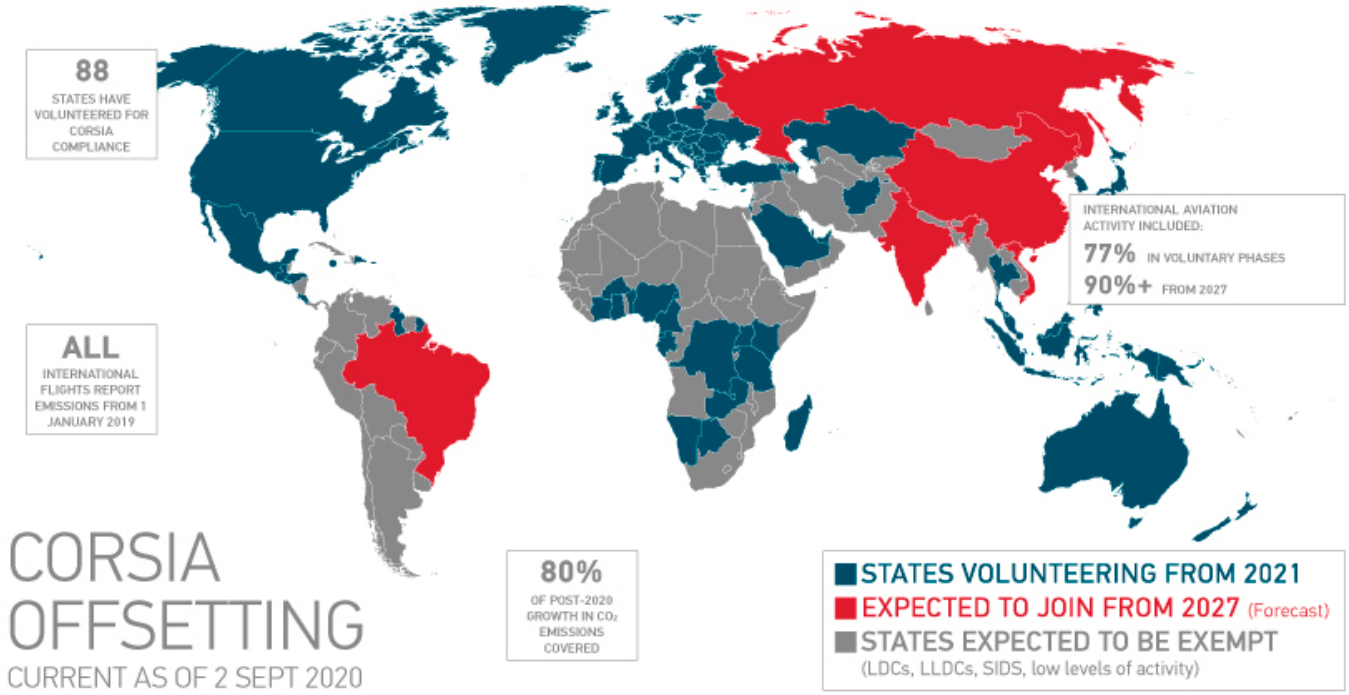

Figura 15. Países incorporados a CORSIA por etapas.

Las aerolíneas deberán saldar sus cuentas de emisiones cada tres años, participando en el mercado de compensación de emisiones al superar sus niveles máximos asignados. Además, se podrá descontar obligaciones gracias al uso de combustibles sostenibles que, como veremos más adelante, reducen las emisiones netas de CO_2.

Figura 16. Ejemplo de proyecto para la compensación de emisiones usuarios aprenden el uso de biogás generado mediante una instalación local de digestión anaeróbica.

justificó en el impacto de la pandemia de la COVID-19 en el tráfico aéreo en 2020, que distorsionaría el cálculo de emisiones ante la anómala disminución de vuelos[9]. Como resultado, la propia Comisión Europea reconoce que la introducción de CORSIA no exigirá compensaciones reales por parte de las aerolíneas por lo menos hasta 2024 [15].

Las principales críticas a este sistema de compensación se centran, por consiguiente, en que no sea más ambicioso a la hora de frenar el aumento bruto de emisiones de CO_2 procedentes de la aviación, limitando su aplicación a vuelos internacionales y emisiones que superen el límite propuesto. Por otra parte, se aboga por la inclusión de otros gases y efectos negativos medioambientales asociados a

8 https://www.icsa-aviation.org/wp-content/uploads/2020/07/ICSA-Statement-on-Revision-of-CORSIA-Baseline.pdf

9 https://www.icao.int/Newsroom/Pages/ES/ICAO-Council-agrees-to-the-safeguard-adjustment-for-CORSIA-in-light-of-COVID19-pandemic.aspx

Archivo fotográfico

Figura 15. https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/climate-action/offsetting-emissions-corsia/corsia/who-volunteers-for-corsia/

Figura 16. https://www.goldstandard.org/projects/sichuan-rural-poor-household-biogas-poa

la aviación. La experiencia del sistema europeo EU ETS, a pesar de sus diferencias, sirve para confirmar que sí se pueden conseguir reducciones directas en las emisiones con este tipo de herramientas, aunque necesitan un diseño preciso y una actualización constante para asegurar su eficacia. En este sentido será muy importante la revisión de CORSIA prevista por la OACI para 2022. Este esquema, sin duda mejorable, supone un primer paso necesario para asegurar la transición hacia una aviación civil sostenible.

En el terreno de las medidas económicas, se ha desarrollado también un intenso debate sobre la efectividad de la introducción de tasas o impuestos, tanto sobre las emisiones como directamente a los combustibles de aviación, a la hora de reducir su impacto sobre el medio ambiente [23]. De hecho, la histórica exención de impuestos sobre el queroseno de uso aeronáutico podría llegar a su fin en la Unión Europea si se aprueba la reforma del EU ETD (Energy Taxation Directive), también dentro de la reciente propuesta legislativa de la Comisión. La imposición sería proporcional al impacto medioambiental del combustible y aplicaría solo a vuelos intraeuropeos, con una exención para los vuelos de mercancías y un período de transición de 10 años. Se plantean diferentes opciones con una tasa media de 0,33 €/L, sobrecoste importante que no aplicaría a los combustibles sostenibles promocionando así su competitividad [14], y que se prevé que las aerolíneas reviertan en los billetes.

Otras medidas políticas que han ocupado el debate público recientemente son las restricciones de vuelos domésticos con alternativas ferroviarias viables, de una efectividad medioambiental cuestionable [7], o las cuotas obligatorias de repostaje de combustibles sostenibles que se revisará en el capítulo correspondiente.

6.2. NAVEGACIÓN Y OPERACIONES

Las operaciones en el contexto del sector de la aviación incluyen:

- Las operaciones aéreas: proceso de programación, el vuelo propiamente dicho y el mantenimiento de la aeronave.
- Las operaciones aeroportuarias: actividades en el aeródromo y sus alrededores, como la asistencia en tierra, el uso de sistemas basados en tierra y la gestión del movimiento en tierra.
- Las operaciones de gestión del tráfico aéreo (ATM): actividades que tienen un impacto directo en el vuelo de la aeronave, el flujo de tráfico y la forma en que se utiliza el espacio aéreo.

Las mejoras operacionales son una gran oportunidad para mejorar la huella medioambiental del transporte aéreo, e incluyen una amplia variedad de medidas que tienen por objeto hacer más eficientes estas operaciones, pero el total potencial de estas medidas no siempre es conseguido debido a conflictos entre requerimientos de seguridad, ambientales, económicos o de capacidad.

En todo el mundo, tanto en las aerolíneas como en los aeropuertos, se está trabajando arduamente para reducir sus emisiones, lográndose grandes avances como son las inversiones en compensación de carbono, la sustitución de vehículos terrestres diésel y de gasolina por alternativas eléctricas, e incluso el desarrollo de sus propias fuentes de combustible renovables. Algunos aeropuertos ya han reducido sus emisiones de CO_2 de infraestructura fija en más del 50% desde 1990 [26]. Los avances en el control del tráfico aéreo están desempeñando un papel clave para hacer que los vuelos sean más limpios y ecológicos por tener el potencial de hacer que los viajes sean mucho más directos, pasando menos tiempo en el aire.

CIELO ÚNICO EUROPEO (SES)

Esta iniciativa, SES, se lanzó en 1999 para mejorar el rendimiento de la gestión del tráfico aéreo (ATM) y los servicios de navegación aérea (ANS) mediante un mejor diseño, planificación, gestión e integración del espacio aéreo europeo (entre los Estados miembros, el uso civil y militar y las tecnologías). Como resultado del SES se reducen tiempos de vuelo (debido a trayectos más cortos y menos demoras) y, en consecuencia, se reducen costes de vuelo y emisiones de aeronaves. Los beneficios del SES, una vez completado alrededor de 2030-2035, es triplicar la capacidad del espacio aéreo, reducir en un 50% los costes de ATM, mejorar diez veces la seguridad y reducir el impacto ambiental de la aviación en un 10% en comparación con el 2004[1].

Respecto a la propuesta de una revisión del SES presentada por la Comisión europea en el año 2013 conocida como paquete *European Sky 2+*[2] , el 22 de septiembre de 2020, la Comisión propuso una actualización del marco regulador del SES [3] con el fin de proporcionar una gestión del tráfico aéreo más sostenible y resistente en consonancia con el "*European Green Deal*", cuyas negociaciones en el Consejo se habían estancado desde 2015. Desde la sesión plenaria del parlamento de julio del 2021, los colegisladores iniciaron negociaciones con las posiciones del Parlamento y Consejo muy diferenciadas[4].

La Empresa Común SESAR JU (*Single European Sky ATM Research Joint Undertaking*) fundada por CE y Eurocontrol, creada en 2007, gestiona la dimensión tecnológica e industrial del SES. Tiene como objetivo mejorar el rendimiento de la ATM mediante la modernización y armonización de sistemas mediante soluciones tecnológicas y operativas innovadoras. El coste total estimado de la fase de desarrollo del programa SESAR (para el período 2008-2024) es de 3700 millones de euros, que se distribuirán equitativamente entre la UE, Eurocontrol y la industria [26].

SESAR JU está tomando más medidas para cumplir su compromiso con un futuro sostenible, abordando proyectos y actividades de investigación, categorizados en tres líneas: investigación exploratoria, proyectos de investigación industrial y validación y demostraciones a muy gran escala. Ejemplo de proyectos lanzados en 2021 [5]:

PJ33-W3 FALCO - ENDOSO ATCO FLEXIBLE Y COMPLEMENTO LDACS, un proyecto de investigación industrial de SESAR que está explorando soluciones para hacer que la gestión del tráfico aéreo sea

1 https://www.europarl.europa.eu/factsheets/en/sheet/133/air-transport-single-european-sky:
2 https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2020/659421/EPRS_BRI(2020)659421_EN.pdf
3 https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2020%3A579%3AFIN
4 https://www.europarl.europa.eu/thinktank/es/document.html?reference=EPRS_BRI%282020%29659421
5 https://www.sesarju.eu/activities-projects

más flexible, eficiente y sensible a las cambiantes demandas y condiciones del tráfico. El proyecto también probará LDACS, una tecnología que ofrece conectividad de enlace de datos y comunicaciones de voz digitales con uso eficiente del espectro.

ALBATROSS[6], un proyecto de demostración SESAR de 2 años a muy gran escala (2020-12-01> 2021-11-30) que hará un inventario de las fuentes de residuos de combustible / CO_2 de un conjunto más amplio de actividades relacionadas con las operaciones de vuelo normales de "*Gate to Gate*", incluyendo pre-salida, salida, ascenso-crucero-descenso, llegada, operaciones de maniobras en tierra y estacionamiento, y proponiendo mitigaciones adecuadas. Estas mitigaciones se seleccionarán de entre las soluciones operativas maduras con ahorros de combustible / CO_2 demostrados, del catálogo de soluciones SESAR.

Existe una implementación cada vez mayor del espacio aéreo de rutas (FRA), que es un volumen específico de espacio aéreo en el que los usuarios pueden planificar libremente una ruta entre los puntos de entrada y salida definidos. Sujeto a la disponibilidad del espacio aéreo, el enrutamiento es posible a través de puntos intermedios, sin referencia a la red de rutas del servicio de tránsito aéreo (ATS). Dentro de este espacio aéreo, los vuelos permanecen sujetos al control del tráfico aéreo. La FRA fomenta la implementación de rutas más cortas y un uso más eficiente del espacio aéreo europeo. Eurocontrol estima que una vez que el espacio aéreo de ruta libre esté completamente implementado a nivel europeo, los ahorros potenciales podrían alcanzar las 500,000 millas náuticas / día, 3000 toneladas de combustible / día y 10000 toneladas menos de CO_2 / día[7].

Gracias a estas acciones del SES y del espacio aéreo de ruta libre (FRA) se han ahorrado más de 2,6 millones de toneladas de CO_2 desde 2014 (aproximadamente el 0,5% de las emisiones totales de CO_2 de la aviación) [26] y las emisiones de CO_2 han permanecido estables en los últimos años a pesar del aumento del tráfico aéreo, y a pesar de la imposibilidad de tomar las rutas óptimas o sin obstáculos debido a clima adversos, o por evitar zonas peligrosas y otras limitaciones operativas. De modo que, según un análisis realizado en 2017, el objetivo de no volar más del 2,6% de distancia adicional, que conlleva consecuentemente una disminución de tiempo de vuelo, está en camino de alcanzarse debido a una mejor planificación y a una reducción de restricciones de rutas innecesarias como, por ejemplo, las áreas militares.

La proporción de tiempo de vuelo en el espacio aéreo de ruta libre durante 2017 fue del 20% en comparación al 8,5% en 2014. A finales de 2019, 55 centros de control de área (ACC) ya habían implementado, total o parcialmente, operaciones en el espacio aéreo de ruta libre. Se esperan operaciones completas en toda Europa para 2023/2024 como indica la Figura 17 inferior.

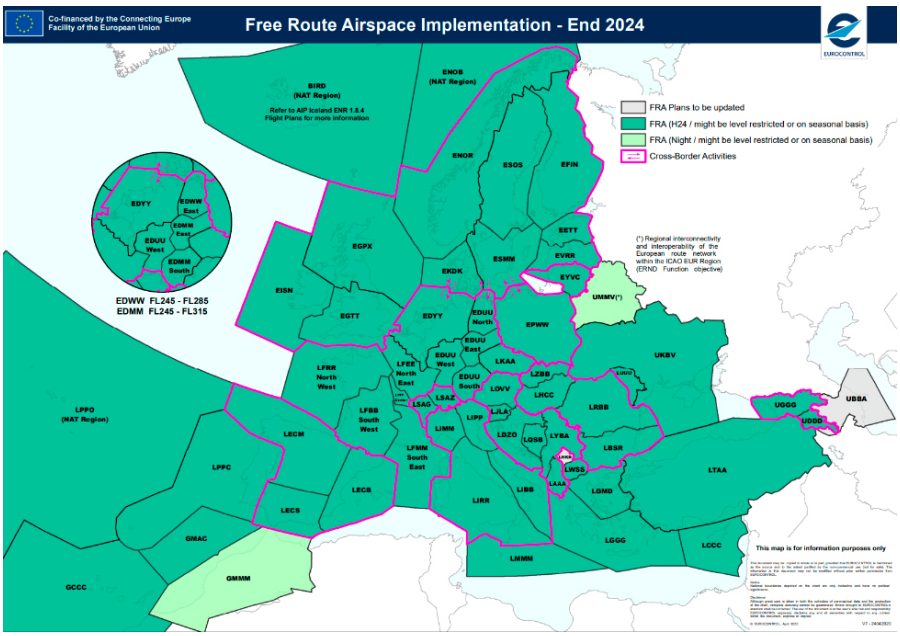

Figura 17. Implementación proyectada de operaciones FRA en Europa a finales del 2024

EASA y Eurocontrol, en su publicación del 31 de mayo de 2021 "Cinco pilares para un cielo único europeo verde"[8], señala que:

- Estos cinco pilares son: reorientación de objetivo ecológico, rendimiento ecológico, tarificación ecológica, digitalización y supervisión ecológicos.

6 https://www.dlr.de/ft/en/desktopdefault.aspx/tabid-17585/
7 https://www.eurocontrol.int/concept/free-route-airspace
8 https://www.eurocontrol.int/publication/five-pillars-green-single-european-sky

Archivo fotográfico

Figura 17. https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2021-05/eurocontrol-fra-implementation-end-2024-v8-04052021.pdf

- La adopción de un enfoque holístico como parte de la revisión del Paquete Cielo Único Europeo centrado en estos pilares, si se implementara conjuntamente, permitiría al sistema ATM contribuir al máximo a la ambición de neutralidad climática de la Unión Europea al permitir aeronaves y usuarios del espacio aéreo para reducir aún más su huella de carbono.
- El indicador de rendimiento clave ambiental ("Eficiencia de vuelo horizontal") mejoró solo marginalmente en un 0,44% y, que esta limitada mejora, se debía a tres obstáculos principalmente:
  - Adopción lenta de tecnología y no aprovechamiento de las ventajas procedentes de la digitalización y la automatización.
  - Gobernanza fragmentada y no uniforme para gestionar el camino hacia la aviación sostenible, siendo fundamental acordar la contribución necesaria de cada actor.
  - Falta de indicadores de desempeño adecuados. Se necesitarán nuevos indicadores para implementar el marco regulatorio revisado, para permitir el seguimiento de los objetivos de desempeño ambiental y climático.

Según EUROCONTROL[9], para el espacio aéreo de EUROCONTROL en su conjunto, la eficiencia de los vuelos en ruta horizontales se mantuvo, con variaciones estacionales, relativamente estable durante 2016-2019, y solo mejoró a medida que el tráfico disminuyó debido a la pandemia de la COVID-19. No obstante, hubo cambios notables a nivel de país. El ejemplo de Italia muestra en la siguiente Figura 19 una notable mejora en la eficiencia del vuelo horizontal tras la implementación del espacio aéreo de ruta libre a finales de 2016.

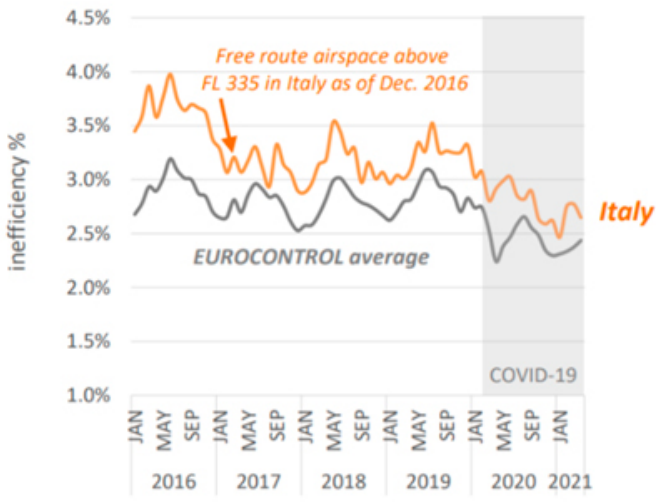

Figura 19. Evolución de la eficiencia de los vuelos en ruta horizontales.

9 https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2021-07/eurocontrol-data-14-horizontal-flight-efficiency.pdf

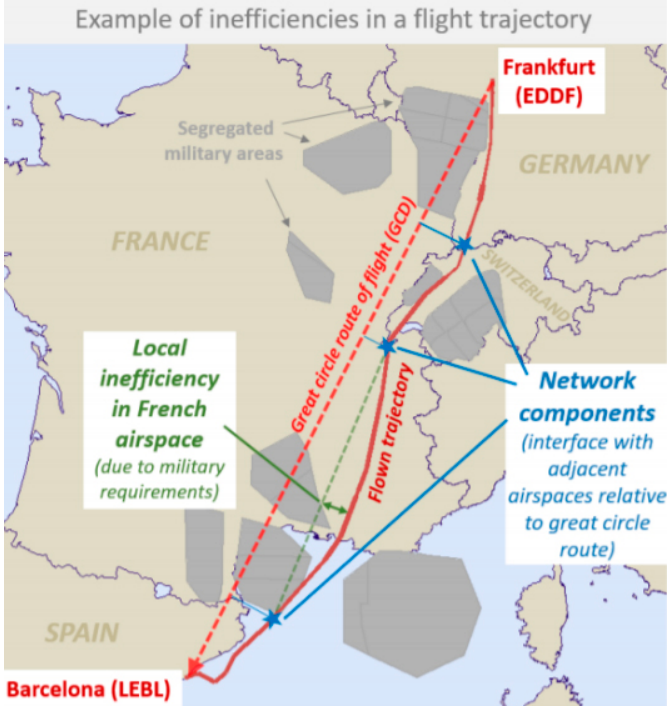

Figura 18. Ejemplo de ineficiencia en trayectorias de vuelo.

IMPACTO CLIMÁTICO DE EMISIONES DISTINTAS DE CO_2

Según el Informe de la Comisión al Parlamento Europeo y el Consejo [21], existen opciones operativas para limitar o reducir los impactos de la aviación distintas de emisiones de CO_2:

- El Cielo Único Europeo (SES) tiene varios indicadores de desempeño ambiental vinculados a la eficiencia de combustible / emisiones de CO_2 del sistema de gestión del tráfico aéreo. Esto podría desarrollarse para considerar potencialmente el impacto de emisiones distintas de CO_2 y añadirse al concepto de tarificación por ruta.
- Las mejoras en la gestión del tráfico aéreo que resulten en una reducción del consumo de combustible / emisiones de CO_2 generalmente reducirán las emisiones distintas de CO_2.
- El evitar las estelas de condensación cambiando las trayectorias de vuelo horizontal o verticalmente generalmente tiene penalizaciones por consumo de combustible, ya que esto implica volar distancias más largas o en altitudes subóptimas.

De la Conferencia de RAeS (*Royal Aeronautical Society*) "Mitigación del impacto climático de las sustancias no-CO_2" de marzo de 2021, organizada por "*RAeS Greener by Design Specialist Group*" en colaboración con DLR (el centro de investigación de la República Federal de Alemania para aeronáutica y espacio): el impacto climático de la aviación de las emisiones distintas del CO_2 puede mitigarse mediante diversas medidas, incluidas nuevas tecnologías de motores para reducir las emisiones, el uso de com-

bustible de aviación sostenible y la gestión del tráfico aéreo (ATM). El evitar las estelas de condensación mediante el desvío de vuelos y las medidas ATM podría representar una forma rápida (horas o días) de reducir el impacto de la aviación en el balance de radiación terrestre.

El Dr. Marc Stettler del Imperial *College* London ha demostrado que, con una desviación del 1,7% de los vuelos, el forzamiento radiativo (RF) de las estelas de condensación se puede reducir en un 59%. Si la desviación de vuelo se utiliza simultáneamente con motores más limpios, el RF de la estela se puede reducir en un 92% (lo que equivale al 57% del RF total) [10]. Por otro lado, como hemos comentado, el desvío de vuelos aumenta el consumo de combustible y las emisiones de CO_2. El profesor Ian Poll de la Universidad de Cranfield cuantificó esta penalización de combustible por evitar las ISSR (áreas sobresaturadas de hielo) y concluyó que el combustible adicional quemado en general era insignificante: si una aeronave se desvía 2000 pies por encima del ISSR, hay un aumento del 1,5% en el combustible y un 1,4% cuando se desvía 2000 pies por debajo. Y esta penalización de combustible no es en todo el vuelo, solo durante la duración del desvío. Además, una reducción en la altitud tiene como beneficio adicional una reducción de las emisiones de NOx

El impacto en el medio ambiente relacionado con ANS (*Air Navigation Service*) se puede analizar en el "*Aviation Intelligence Portal*"[11], ya que este impacto está estrechamente relacionado con el rendimiento operativo (eficiencia del combustible), que se debe en gran medida a las ineficiencias en la trayectoria de vuelo y el consumo de combustible (y las emisiones) asociado. El portal está elaborado por la Unidad de Revisión del Desempeño (PRU) que es parte de la Unidad de Inteligencia de Aviación (AIU) de EUROCONTROL. La descripción general muestra una vista consolidada de los componentes principales[12]. Se puede encontrar un análisis más detallado en la sección respectiva de esta última página mencionada.

MEJORAS OPERACIONALES EN AEROPUERTOS

La eficiencia operativa del aeropuerto influye en el tiempo adicional promedio de secuencia y medición de llegadas (zona ASMA) o en el tiempo de rodaje adicional promedio por salida.

Para mejorar esta eficiencia, se han implementado sistemas de gestión de llegadas (AMAN) y salidas que junto con el sistema de integración de Toma de Decisiones Colaborativas del Aeropuerto (A-CDM), tiene como objetivo mejorar la secuencia de llegadas y salidas. Además, en los últimos años, se ha extendido el sistema AMAN al espacio aéreo en ruta de 180-200 millas náuticas desde el aeropuerto de llegada, lo que ha ayudado a una mejor secuencia del tráfico.

Existen diversas medidas operativas que se pueden usar para disminuir las emisiones en el entorno de un aeropuerto. La Tabla 1 describe algunas de las que conciernen al diseño e instalaciones de los aeropuertos.

10 https://www.greenairnews.com/?p=927
11 https://ansperformance.eu/
12 https://ansperformance.eu/efficiency/

Medida	Descripción	Comentarios
Diseño del Aeropuerto.	• Proporcionar un diseño eficiente de pista, pista de rodaje y plataforma. • Selección del enclave del aeropuerto (para nuevos aeropuertos).	• Minimiza el rodaje y la congestión. Facilita movimientos terrestres más eficientes a través de una infraestructura mejorada (diseño de calles de rodaje, ubicación y diseño de calles de rodaje de salida rápida, bahías de paso / espera de aeronaves, etc.). • Permite la optimización del acceso de tránsito regional, el clima (áreas con poca niebla), etc.
Instalaciones Aeroportuarias.	• Proporciona una conexión a tierra eléctrica fija de 400 Hz potencia (FEGP) y, cuando sea necesario, aire acondicionado (PCA) en las puertas / áreas de mantenimiento y fomentar su uso. • Mejora las capacidades de despegue y aterrizaje con baja visibilidad, con el apoyo de sistemas de control y guía de movimiento en la superficie, cuando sea necesario. • Uso de iluminación LED para aeródromos, donde sea apropiado.	• Reduce o elimina el uso de APU, GPU y unidades de aire acondicionado. Por lo general, requiere una inversión de capital sustancial, pero a menudo genera ahorros de combustible / mantenimiento. • Reduce congestión y retrasos por mal tiempo y puede reducir la necesidad de desvíos a otros aeródromos. • Reduce directamente el uso de energía primaria.

Tabla 1. Características aeroportuarias que minimizan consumo de combustible y emisiones

El 14 de julio de 2021, la Comisión Europea adoptó un paquete de propuestas para hacer que las políticas de clima, energía, uso del suelo, transporte e impuestos de la UE sean adecuadas para reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero en al menos un 55% para 2030, en comparación con los niveles de 1990 [13].

Algunas de ellas afectan directamente a medidas mencionadas anteriormente relacionadas con las instalaciones del aeropuerto, como la propuesta de Reglamento sobre infraestructura de combustibles alternativos, que introduce la obligación a la instalación de suministro eléctrico a aeronaves durante su estacionamiento en todos los aeropuertos centrales y de la Red Transeuropea de Transporte, en lugar de combustible con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, la contaminación y el ruido de estas aeronaves. Esta obligación se aplicará a todas las puertas, a partir de 2025, y a todos los puestos, a partir de 2030. Además, a más tardar en 2030, los Estados miembros deberán garantizar que toda la electricidad suministrada a las aeronaves estacionadas provenga directamente de la red eléctrica o a partir de energía renovable generada en el aeropuerto[14].

Hay que tener en cuenta que en el entorno de un aeropuerto existen diversas medidas operacionales para disminuir las emisiones de las aeronaves, pero por otro, existen medidas operacionales de reducción del ruido aplicadas en algunos aeropuertos que pueden dar lugar a un aumento del combustible consumido y por tanto de las emisiones como:

- Procedimientos de reducción del ruido y regímenes de ruido compartido que aumentan las distancias recorridas.
- Pistas de vuelo preferenciales que requieren de más tiempo de vuelo o de movimiento en tierra (taxi) adicionales.
- Multas de ruido que provocan cambio en los procedimientos operacionales, reduciendo la eficiencia.
- Restricciones horarias que causen congestión en llegadas o salidas y que provoquen más tiempo de vuelo, retrasos y restricciones, etc.

Todo esfuerzo para reducir el consumo de combustible y las emisiones debe tener en cuenta estas interdependencias.

Para alcanzar los objetivos planteados para el 2035 antes señalados, se están llevando a cabo varias iniciativas operacionales, que serán detalladas a continuación.

MEJORAS OPERACIONALES EN LA GESTIÓN DEL TRÁNSITO AÉREO (ATM)

En 2015 fueron acordadas por un grupo de la ATM, definiciones, métricas y parámetros armonizados para medir las operaciones de ascenso continuo (CCO) y las operaciones de descenso (CDO), incluyendo definición de "ruido CCO / CDO" y de "combustible CCO / CDO". En el 2017 se realizó a escala europea un estudio de la implementación real de CCO / CDO, en el que se midieron y estimaron el consumo de combustible, el CO_2 y el impacto financiero. Los resultados obtenidos indican lo siguiente [26]:

- Mayor potencial para reducir ruido y fuel en el CDO comparado con el CCO y que las mejoras conseguidas en ruidos serán menores que en el fuel y por tanto en las emisiones.
- Esta capacidad para realizar operaciones CCO / CDO también parece estar vinculada a la complejidad del espacio aéreo más que a la capacidad del aeropuerto.
- Un vuelo típico con segmentos nivelados podría beneficiarse en promedio de ahorros de CO_2 de hasta 48 kg para un CCO y 145 kg para un CDO. Se estimó que los beneficios potenciales de CO_2 de la optimización de los CDO en toda Europa eran diez veces mayores que los de la optimización de los CCO.
- Potencial mucho menor para optimizar el ruido CCO / CDO en comparación con el combustible CCO / CDO. Reconociendo que la optimización de los beneficios ambientales depende de las condiciones locales.
- La implementación de CDO debe estar focalizada en la optimización del perfil de vuelo desde la parte superior del descenso.

Con estas operaciones el ahorro potencial total en Europa es de hasta 350.000 toneladas de combustible, lo que equivale a 1,1 millones de toneladas de CO_2 emisiones por año. Pero hay que tener en cuenta que la capacidad de volar 100% CCO o CDO puede no ser posible por distintos motivos como la seguridad (es decir, separación de tiempo o distancia), clima o capacidad [26].

13 European Green Deal: Commission proposes transformation of EU economy and society to meet climate ambitions https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_21_3541

14 Questions and Answers - Sustainable transport, infrastructure and fuels https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_21_3525

La Toma de Decisiones Colaborativas en el Aeropuerto, A-CDM, es otra medida operacional de ATM que tiene como objetivo mejorar la gestión tanto del tráfico aéreo como de la capacidad en los aeropuertos, basándose en compartir la información precisa y puntual y a la adopción de nuevos procedimientos, mecanismos y herramientas.

Los objetivos del A-CDM son:

- Aumentar la eficiencia de los recursos.
- Mejorar la puntualidad o reducir demoras.
- Mejorar la predictibilidad de eventos.
- Mejorar las actuaciones de la red ATM.

Los beneficios son:

- Aerolíneas: mejora del cumplimiento del programa, posibilidad de priorización.
- Agentes de handling: mejora de la predictibilidad de las operaciones, mejor uso y optimización en la utilización de recursos.
- Aeropuerto: mejora de la puntualidad, uso más eficiente de los recursos inmóviles.
- Control de Tráfico Aéreo: optimización del uso del lado aire, reducción de la congestión.
  - CFMU: mayor cumplimiento de slots, optimización del uso de la capacidad del espacio aéreo.

A-CDM es mundialmente reconocido y está completamente implementado en 30 aeropuertos de Europa [15]. En promedio, la implementación de A-CDM permite un tiempo de rodaje reducido de 0.25 a 3 minutos por salida. El informe de evaluación de impacto del A-CDM de 2016 identificó los ahorros generados a partir de 13 de los 17 aeropuertos A-CDM, demostrando unas mejoras tangibles en el rendimiento del tiempo de rodaje que se traduce en unas 102.700 toneladas de emisiones de CO_2, considerando 2.1 millones de salidas [16].

15 https://www.eurocontrol.int/concept/airport-collaborative-decision-making
16 https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-04/a-cdm-impact-assessment-2016.pdf

En la Tabla 2 inferior se describen procedimientos que disminuyen el impacto medioambiental en un aeropuerto.

Medida	Operación	Comentarios
Procedimiento de la aeronave.	• Operaciones de descenso continuo (CDO). • Operaciones de subida continua (CCO).	• Descender con motores a baja potencia reduce el consumo de combustible y el ruido bajo la trayectoria de vuelo, pero puede depender de la gestión del espacio aéreo y las limitaciones de capacidad. • La subida continua para evitar la necesidad de vuelos nivelados a bajas altitudes reduce el consumo de combustible y el ruido bajo la trayectoria de vuelo, pero puede depender de la gestión del espacio aéreo y de problemas de capacidad.
Acciones discrecionales del piloto.	• Minimización del uso de empuje inverso en el aterrizaje. • Rodadura sin motor.	• El piloto debe conservar plena autoridad sobre la operación segura de la aeronave. • El piloto debe conservar la autoridad total sobre la operación segura de la aeronave. Las reducciones de emisiones son específicas del lugar y de la aeronave.
Otros procedimientos.	• Reducir el tiempo del motor al ralentí. • Remolque de Aeronaves.	• Las emisiones de HC y CO son mayores durante el ralentí. Reducir esta fase también puede resultar una disminución de la operación del motor. • El remolque de aeronaves puede reducir significativamente el uso de motores de aeronaves. Pueden producirse problemas logísticos en los aeropuertos con zona de maniobras limitada.

Tabla 2. Oportunidades operacionales para minimizar el consumo de combustible y las emisiones de las aeronaves en aeropuertos [60].

Otras iniciativas operacionales de las que se esperan beneficios ambientales se muestran en la tabla siguiente [67]:

Soluciones SESAR	Beneficios ambientales
AMAN extendido (E-AMAN). E-AMAN permite la secuencia del tráfico de llegada mucho antes de lo que se hace actualmente al extender el horizonte AMAN y así permitir una gestión del tráfico más fluida.	Menor consumo de combustible debido a la reducción de la vectorización a niveles más bajos, la reducción de los tiempos de espera en vuelo (holding time) y el mantenimiento de niveles de vuelo más eficientes durante más tiempo.
Mejorar el Espacio Aéreo de la Terminal usando operaciones basadas en RNP. Esto permite que la aeronave siga trayectorias de vuelo de precisión para reducir la distancia recorrida y evitar áreas sensibles al ruido.	Menos consumo de combustible y ruidos.
Gestión de Salida sincronizada con la secuencia previa de salida. La gestión previa a la salida ofrece un flujo de tráfico óptimo a la pista al tener en cuenta los pronósticos precisos del tiempo de rodaje y la planificación de rutas derivada de datos.	Reduce tiempos de espera, ahorrando combustible y permite la eficiencia del servicio de navegación aérea.
Gestión de salidas integrando restricciones de gestión de superficies. La solución integra funciones de planificación de superficie y rutas para construir una secuencia de salida muy precisa, teniendo en cuenta los cambios tácticos.	Menor consumo de combustible y emisiones.
Separación basada en el tiempo para la aproximación final. Las separaciones de distancia actuales reemplazadas por intervalos de tiempo para adaptarse a las condiciones climáticas y mantener la capacidad de aproximación a la pista.	Menor consumo de combustible debido a reducción de tiempo de espera en el aire.
Asistencia Automática del Controlador para planificación de los movimientos en superficie y rutas. La funcionalidad de planificación de rutas permite a los controladores editar rutas gráficamente y calcular automáticamente los tiempos de rodaje estimados, lo que contribuye a operaciones de superficie más predecibles.	Tiempos de rodaje mejorados que resultan en un menor consumo de combustible.
Desarrollo de un nuevo receptor GPS y transmisor de Datos, conocido como ADS-B. Actualmente, los controladores de tráfico aéreo utilizan datos de radar para ayudar a los aviones a aterrizar o despegar, el GPS ayuda a crear patrones de vuelo más eficientes.	Ahorrar combustible y mejorar tiempo de llegada, reducir emisiones innecesarias cuando un avión está inactivo en la pista.

Tabla 3. Otras iniciativas operacionales [67].

OTRAS INICIATIVAS EN AEROPUERTOS:

En febrero de 2021, "*Paris Region*", "*Choose Paris Region*", Grupo ADP, Air France-KLM y Airbus lanzaron una convocatoria mundial sin precedentes "expresiones de interés para el hidrógeno en los aeropuertos". Esta iniciativa abierta de innovación es un paso clave para iniciar un avance tecnológico en toda la cadena de valor del hidrógeno dentro de la ciudad aeroportuaria. Se centra en tres temas principales [17]:

- Almacenamiento, transporte y distribución de hidrógeno (gaseoso y líquido) en un entorno aeroportuario (sistemas de almacenamiento, microlicuefacción, repostaje de aeronaves, etc.).
- Diversificación de casos de uso de hidrógeno en aeropuertos y aeronáutica (vehículos y equipos de asistencia en tierra, transporte ferroviario en aeropuertos, suministro de energía para edificios o aeronaves durante operaciones terrestres, etc.).
- Economía circular en torno al hidrógeno (recuperación de hidrógeno disipado durante el abastecimiento de hidrógeno líquido, recuperación de un subproducto de una reacción para producir hidrógeno sin carbono, etc.).

Resaltar la iniciativa NetZero2050 con el compromiso de ACI EUROPE (Consejo Internacional de Aeropuertos) y sus miembros para reducir las emisiones de carbono y alcanzar la neutralidad neta en 2050. En la actualidad 357 aeropuertos están ya en el programa ACA con 47 aeropuertos neutros en carbono (nivel 3+) [18].

En España, tanto ENAIRE como AENA poseen una estrategia hacia la sostenibilidad dentro de su compromiso social corporativo; el primero como principal proveedor de servicios de navegación aérea y de información aeronáutica, y el segundo, como el primer operador aeroportuario que gestiona los aeropuertos y helipuertos públicos españoles.

ENAIRE está siendo pionera en la integración e intercambio de datos en la red del "Network Manager", contribuyendo a la mejora de la eficiencia, la capacidad y la seguridad del espacio aéreo mediante el uso de nuevas tecnologías y la innovación continua a través del desarrollo de herramientas propias que intercambian información con EUROCONTROL y otros proveedores: "*Flow tools*", conjunto multidisciplinar de aplicaciones para la resolución de problemas globales a nivel local, que permite analizar datos en bruto procedentes de múltiples fuentes; "*Perseo-Emissions*", que permite el cálculo de las distintas emisiones (CO_2, NOx, SOx, etc.) producidas por el tráfico aéreo en España; o la aplicación para monitorizar los puntos de una aerovía donde los controladores aéreos ofrecen a los pilotos la posibilidad de realizar rutas más directas, detectando cuáles son los puntos donde se proporcionan esos vuelos directos, y calculando el ahorro de distancia conseguido frente a la ruta planificada en el plan de vuelo original. Durante 2018 esta herramienta ha permitido ahorrar, gracias a estos vuelos directos autorizados en el espacio aéreo español, 7 millones de millas náuticas a las compañías aéreas, evitando así la emisión de 243.000 toneladas de CO_2 a la atmósfera y el ahorro de combustible a las aerolíneas[19].

Además, ENAIRE ha facilitado la implantación en los aeropuertos españoles de operaciones en descenso continuo, ha diseñado procedimientos más precisos que minimicen el ruido y ha implementado un sistema de gestión integrado que contribuye a asegurar la protección y conservación de la biodiversidad, consiguiendo en el 2015 que toda la energía consumida por ENAIRE procediera de fuentes renovables[20].

AENA, por un lado, ha implementado en sus instalaciones medidas de eficiencia energética que permiten reducir el consumo eléctrico, a la vez que ha aumentado el autoabastecimiento energético a partir de fuentes renovables. Y, por otro, ha establecido actuaciones para la reducción de emisiones por combustible y el trabajo colaborativo con terceros, llevando a cabo la caracterización, control, vigilancia y corrección de las emisiones atmosféricas generadas y monitorizando el ruido. Además, 8 aeropuertos constan con certificaciones ACA lo que cubre el 70% de la red [21]. Los Aeropuertos Adolfo Suárez Madrid-Barajas y Josep Tarradellas Barcelona-El Prat, que generan la mitad de las emisiones de la red, ya han ascendido del nivel 2 al 3, lo que implica además de tener un programa de gestión y reducción de emisiones, involucrar a las terceras partes y evaluar sus emisiones. Así mismo, los aeropuertos César Manrique-Lanzarote, Málaga-Costa del Sol y el de Palma de Mallorca han renovado la certificación

17 https://www.chooseparisregion.org/calls-for-applications/h2-hub-airport

18 ELI programa Airport Carbon Accreditation, ACA, es una certificación que otorga el Consejo Internacional de Aeropuertos (ACI EUROPE). Es un sistema de acreditación basado en cuatro niveles (Nivel 1 "Inventario", Nivel 2 "Reducción", Nivel 3 "Optimización" y Nivel 3+ "Neutralización"), que responden a compromisos progresivos de reducción de las emisiones de CO_2, teniendo como objetivo final lograr cero emisiones netas de carbono. https://www.airportcarbonaccreditation.org/index.php

19 https://www.enaire.es/es_ES/2020_03_25/ndp_premio_sostenibilidad

20 https://www.enaire.es/sobre_enaire/sostenibilidad-medioambiente_servidumbresl/nuestro_compromiso

21 https://portal.aena.es/es/corporativa/aeropuertos-aena-adscritos-programa-airport-carbon---accreditation-avanzan-certificacion-alcanzar-neutralidad-en---carbono-en-2026.html?p=1237548067436

ACA; mientras que el de Alicante-Elche, Menorca y Santiago-Rosalía de Castro, han renovado el nivel 1.

Ejemplo de estas medidas son la implementación del A-CDM, la sustitución de los APU por suministro de energía eléctrica a 400 Hz en la pasarela de embarque y de los vehículos de apoyo en tierra (GSE) por otros de tecnología alternativa o eco-limpios, el fomento del uso de combustibles sostenibles y la instalación de sistemas mediante energía solar, plantas de cogeneración y de aerogeneradores en sus instalaciones, etc. Actualmente, el 100% de los puestos de estacionamiento en pasarela ya cuentan con estos sistemas y está prevista la implantación de nuevas tomas, así como la reposición y sustitución de equipos antiguos de manera que en 2030 los aeropuertos contarán con 470 puntos de suministro eléctrico a 400 Hz para aeronaves, y se tiene el objetivo de disponer de 152 puntos de recarga para vehículos eléctricos en las zonas públicas de los aeropuertos de la red de Aena [1].

Además, AENA realiza la evaluación ambiental de sus proyectos (EIA) de acuerdo con la ley de evaluación ambiental 21/2013, de 9 de diciembre, considerando la variable ambiental en la toma de decisiones para la ejecución de proyectos, y realizando Planes de Aislamiento Acústico (PAA).

Todas estas actuaciones se encuentran alineadas con el compromiso adquirido en 2019 de adhesión a la iniciativa NetZero2050 de ACI Europa (Consejo Internacional de Aeropuertos), consistente en alcanzar cero emisiones netas de carbono en los aeropuertos para 2050, y sin incluir mecanismos de compensación de emisiones. A este respecto, el Consejo de Administración de Aena aprobó en marzo su Plan de Acción Climática 2021-2030: 'Rumbo cero emisiones', que permitirá alcanzar en 2026 la neutralidad de carbono y obtener una reducción del 94% en 2030 de las emisiones por pasajero asociadas a las operaciones propias de Aena, en el camino hacia la consecución del Net Zero en 2040.

Para la consecución de estos objetivos estratégicos, en los que es necesaria la implicación de todas las áreas de Aena, se incluye la puesta en marcha de un conjunto de actuaciones y medidas efectivas, estableciendo unos indicadores que medirán su cumplimiento. El Plan de Acción Climática, que supone una inversión cercana a los 550 millones de euros en el periodo 2021 y 2030, se estructura en 3 programas estratégicos: neutralidad en carbono, aviación sostenible y comunidad y cadena de valor sostenible [22].

En la segunda cumbre de sostenibilidad de la aviación de ACI EUROPE, 20 de mayo de 2021, ACI EUROPE realizó una serie de anuncios reafirmando el compromiso de los aeropuertos europeos con la acción climática y alcanzando significativamente sus ambiciones de lograr cero emisiones neta de CO_2, compromiso que fue lanzado en junio del 2019.

- ACI EUROPE confirmó el compromiso de la industria aeroportuaria europea de lograr Net Zero de emisiones de CO_2 para 2050 a más tardar.
- 235 aeropuertos administrados por 63 operadores en 29 países han respaldado este compromiso de la industria, comprometiéndose así individualmente con el mismo objetivo.
- Además de los 211 aeropuertos que lo habían hecho antes de la crisis de la COVID-19 y que siguen cumpliendo su compromiso, otros 24 aeropuertos se han sumado al compromiso de la industria aeroportuaria europea con Net Zero. Estos 235 aeropuertos representaron el 68% del tráfico de pasajeros en 2019.
- 91 aeropuertos administrados por 16 operadores están listos para cumplir su compromiso Net Zero ya para 2030.

De acuerdo con el volumen de tráfico de los aeropuertos europeos en el 2019 y la huella de carbono estimada, este compromiso Net Zero eliminará un total de 3,14 millones de toneladas de emisiones anuales de CO_2 a partir de 2050 [23].

22 https://portal.aena.es/es/corporativa/aena-invertira-alrededor-550-millones-euros-en-plan-accion-climatica-en-periodo-2021-2030.html?p=1237548067436

23 https://www.aci-europe.org/press-release/317-airport-industry-reconfirms-and-accelerates-net-zero-co_2-targets.html

6.3. MEJORAS DE EFICIENCIA GRADUALES Y DE DISEÑO

6.3.1. Programas de desarrollo tecnológico.

Buscando ese progreso tecnológico hacia la sostenibilidad y una mayor competitividad la industria aeronáutica ha llevado a cabo elevadas inversiones en I+D +i (en España, del orden del 8% de la facturación de este sector [1]; en 2018, fueron un total 19.000 millones de €, con una inversión 4 veces mayor en EE. UU. que en Europa [2]), con iniciativas tanto privadas como públicas, siendo principalmente en EE. UU., NASA, y en Europa, las actividades aeronáuticas realizadas dentro de los Programas Marco de I+D de la Unión Europea.

PROGRAMAS DE I+D EN EUROPA RELATIVOS AL IMPACTO AMBIENTAL DE LA AERONÁUTICA

- Programas *CLEAN SKY*

En Europa se desarrolló una Iniciativa de Tecnología Conjunta (JTI) público-privada de la UE y la industria europea, el *Clean Sky*, que forma parte del séptimo Programa Marco de Investigación, Desarrollo Tecnológico y Demostración de la Unión Europea (2007-2013), con un presupuesto de 1.600 millones de euros, el 50% de los cuáles son aportados por la industria aeronáutica europea y el otro de la Comisión Europea. Como objetivo prioritario, que está basado en la Agenda Estratégica de Investigación de ACARE, se ha fijado la introducción de nuevas tecnologías para la consecución de aeronaves más respetuosas con el medio ambiente, llevándose a cabo todos los pasos necesarios para reducir significativamente el impacto del modo de transporte aéreo en el medio ambiente. *Clean Sky 1* comprende 7 áreas con 6 demostradores tecnológicos, de los cuáles se obtendrán diversos desarrollos que se supervisarán de forma integrada en el seno del Evaluador tecnológico, el cual analizará la viabilidad de todas y cada una de las tecnologías desarrolladas.

Los demostradores tecnológicos fueron: Aeronaves Regionales Verdes (GRA), Diseño ecológico (ECO), Motores sostenibles y ecológicos (SAGE), Aviones inteligentes de ala fija (SFWA), Sistemas para operaciones verdes (SGO) y Rotorcraft verde (GRC).

Ejemplos de demostradores[3]: sustituir piezas de aluminio del fuselaje por material compuesto, sustituir potencia hidráulica o neumática por eléctrica, ensayar distintos vehículos con configuraciones de motor de 1 eje, de rotor abierto o con engranajes, integrar flujos pasivos, activos o tecnologías de control de cargas en SFW conceptos, etc.

En la Figura 20 se incluyen los detalles de los objetivos medioambientales fijados en los diferentes Demostradores Tecnológicos Integrados.

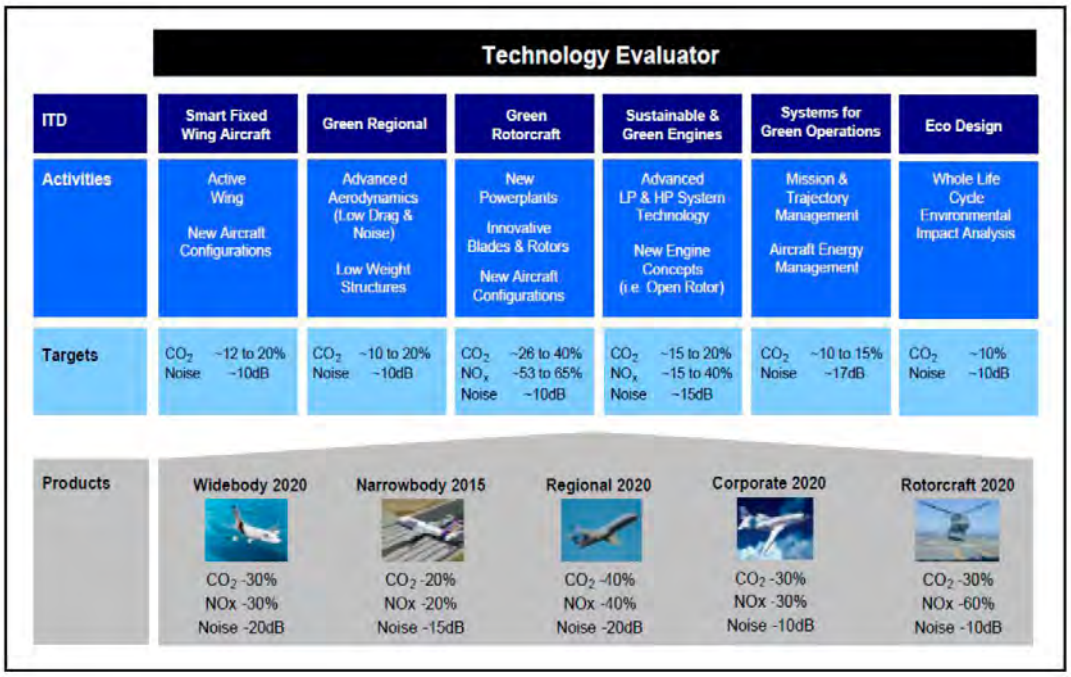

Figura 20. Actividades y Objetivos de los demostradores tecnológicos en Clean Sky [9].

1 https://www.tedae.org/es/noticias/tribuna-sobre-el-informe-el-impacto-economico-y-social-de-los-sectores-tedae

2 https://www.asd-europe.org/sites/default/files/atoms/files/ASD%202019%20Facts%20and%20Figures.pdf

3 https://www.cleansky.eu/node/45; https://www.cleansky.eu/discover

En mayo de 2014, el Consejo de la Unión Europea acordó extender la JTI *Clean Sky* (*Clean Sky 2*[4]) con un presupuesto de 4.000 millones de euros, que se basaría en los logros de *Clean Sky 1*, y su misión era desarrollar tecnologías rompedoras que redujeran de manera significativa el impacto medioambiental de los aviones y, en general, el transporte aéreo, dando como resultado aeronaves menos ruidosas y más eficientes en el consumo de combustible. Las innovaciones tecnológicas de este programa se agrupaban en grandes aviones de pasajeros, aeronaves regionales, *rotorcraft* rápido IADP, estructura de avión, motores, sistemas, transporte aéreo pequeño y diseño ecológico, como tecnología para integrar los diseños de rotor abierto, tecnologías de ingestión de capa límite, diseño avanzado de la parte trasera del avión, demostración de prueba de vuelo *UltraFan*, control de flujo activo para la integración del motor UHBR , control de flujo laminar natural e híbrido, etc.

En *Clean Sky* se está trabajando en varios proyectos para abordar los retos ambientales relacionados con motores y aerodinámicas, uno de los demostradores tecnológicos integrados era *Sustainable And Green Engines* (SAGE), cuyas actividades se dedicaban por un lado a la tecnología de sistemas avanzados, y por otro a nuevos conceptos de motores como SAGE2 *Counter-Rotating* Open Rotor (CROR), *Ultrafan*, y el demostrador aerodinámico BLADE, entre otros [5]. En la referencia [10] se pueden encontrar los avances del programa hasta la fecha (último informe del 2019.

Diferentes eventos y documentos relacionados con progresos, aportaciones o análisis del programa *Clean Sky* han tenido lugar a lo largo de este año 2021 [6], destacando el proyecto GLIMPSE2050 (*Global Impact Assessment of Regulations and Policies for Sustainable Aviation* para 2050), en el que se realizó la evaluación de impacto ambiental de las normativas y políticas seleccionadas y se llegó a la conclusión de que se conseguiría una reducción del 11% en CO_2 y del 14% en NOx[7].

El 27 de abril de 2021, el Parlamento Europeo aprobó por mayoría el programa «Horizonte Europa», sucesor del programa Horizonte 2020 (octavo programa marco). Finalmente, para el período 2021-2027, Horizonte Europa dispondrá de un presupuesto total de 95.517 billones euros a precios de 2021[8].

PROGRAMAS DE I+D EN EE. UU. RELATIVOS AL IMPACTO AMBIENTAL DE LA AERONÁUTICA

En el periodo entre los años 90 y la primera mitad de la década de 2000, la NASA desarrolló en colaboración con otras organizaciones los programas AST (Advanced Subsonic Technology) [9] y UEET (Ultra-Efficient Engine Technology Program) [64]. AST, con el objetivo de desarrollar tecnologías de gran impulso para asegurar la competitividad de las aeronaves de transporte civil de EE. UU. y la búsqueda de nuevas formas de mejorar la seguridad, la productividad y la aceptación ambiental del sistema nacional de transporte aéreo. UEET estaba dividido en 6 grandes proyectos dedicados al desarrollo y transmisión de tecnologías revolucionarias de propulsión que permitieran la generación futura de vehículos en una amplia gama de velocidades de vuelo.

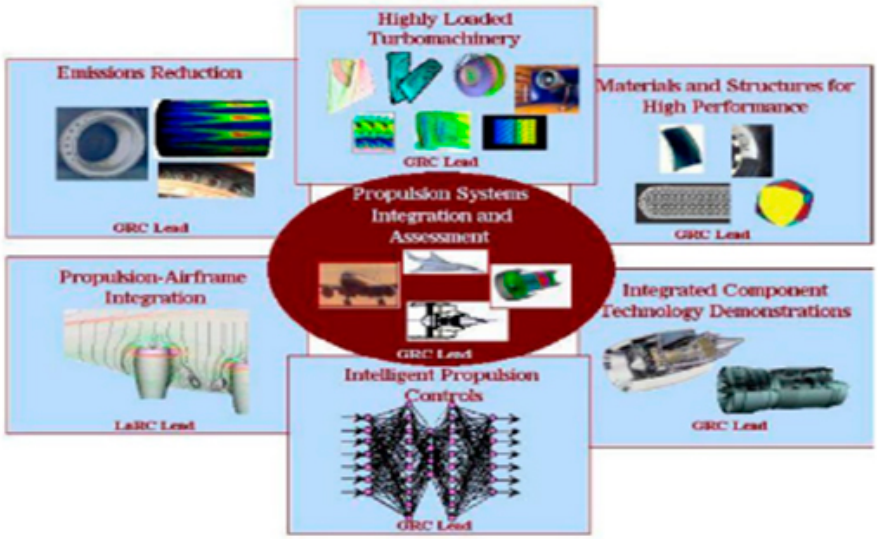

Figura 21. Esquema del programa UEET [17].

En AST se lograron avances tales como: una cámara de combustión que redujo el NOx en 50% en la prueba del motor PW4000 seguida de la certificación de P&W e implementación del producto. Otro concepto de cámara, el TAPS (*Twin Annular Premixing Swirler*), demostró una reducción del 62% de NOx en el motor CFM56 de GE-Snecma. También otros componentes de combustión de Rolls-Royce demostraron el potencial de lograr una reducción del 50% de NOx sin

4 https://www.cleansky.eu/technology-evaluator-te
5 https://www.cleansky.eu/sites/default/files/inline-files/Skyline%2021.pdf
6 https://www.cleansky.eu/
7 https://www.cleansky.eu/news/glimpse2050-how-regulation-can-reduce-aviations-environmental-footprint
8 https://www.europarl.europa.eu/ftu/pdf/es/FTU_2.4.5.pdf
9 https://er.jsc.nasa.gov/seh/pg36s95.html#:~:text=Therefore%2C%20NASA%2C%20other%20government%20agencies,ways%20to%20enhance%20the%20safety%2C

efectos adversos sobre CO y UHC. UEET, destinado específicamente a tecnologías de motor, estaba dividido en seis grandes proyectos, junto con las reducciones potenciales en emisiones de CO2 y de NOx, esta última para el ciclo LTO [77].

En 2006, la NASA en base a la tecnología que había desarrollado en AST y UEET, estableció el Programa de Aeronáutica Fundamental (FAP) para desarrollar tecnologías avanzadas de propulsión en un plazo de cinco a quince años, también conocido como Generación N+1 a N+2 y para la generación N+3, o más allá de 2025. Se crearon cuatro proyectos distintos: ala rotatoria subsónica (SRW), supersónicos, hipersónicos y (SFW) ala fija Subsónica [35]. Posteriormente, la NASA estableció el Programa de Investigación de Sistemas Integrados (ISRP) para llevar a gran escala demostraciones de sistemas de las tecnologías desarrolladas bajo SFW. También se creó en el 2009, el Proyecto de Aviación Ambientalmente Responsable (ERA) [53] para desarrollar esas demostraciones de sistemas integrados en el período 2020-2025, o generación N+2 de sistemas de aeronaves.

El proyecto ERA finalizó en 2015 y se centró en explorar y documentar la viabilidad, los beneficios y el riesgo técnico de 8 importantes tecnologías relacionadas con estructuras, aerodinámica y motores[10]:

- Boquillas pequeñas integradas que soplan aire sobre la superficie del estabilizador vertical de un avión mostraron que los aviones del futuro podrían diseñarse de manera segura con colas más pequeñas, reduciendo el peso y la resistencia.
- Nuevo proceso para unir grandes secciones de materiales compuestos para crear estructuras tolerantes al daño un 20% más ligeras.
- Nueva y radical tecnología de ala que permite la extensión de los flaps sin dejar espacios que aumenten el ruido y que induzcan resistencia.
- Con GE, rediseño de la etapa del compresor de un motor de turbina para mejorar su eficiencia aerodinámica que podría suponer un ahorro de un 2,5 por ciento en el consumo de combustible.
- Con Pratt & Whitney, diseño de un fan avanzado para mejorar la eficiencia de la propulsión y reducir el ruido, pudiendo reducir el consumo de combustible en un 15 por ciento y mejorar significativamente el ruido.
- Con Pratt & Whitney, en un diseño mejorado para la cámara de combustión de un motor a reacción para reducir NOx, y se consiguió reducir la emisión cerca de un 80%.
- Se desarrollaron nuevas herramientas de diseño para reducir el ruido de los alerones desplegados y el tren de aterrizaje durante los despegues y aterrizajes.

10 https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/green-light-for-green-flight-tagged.pdf

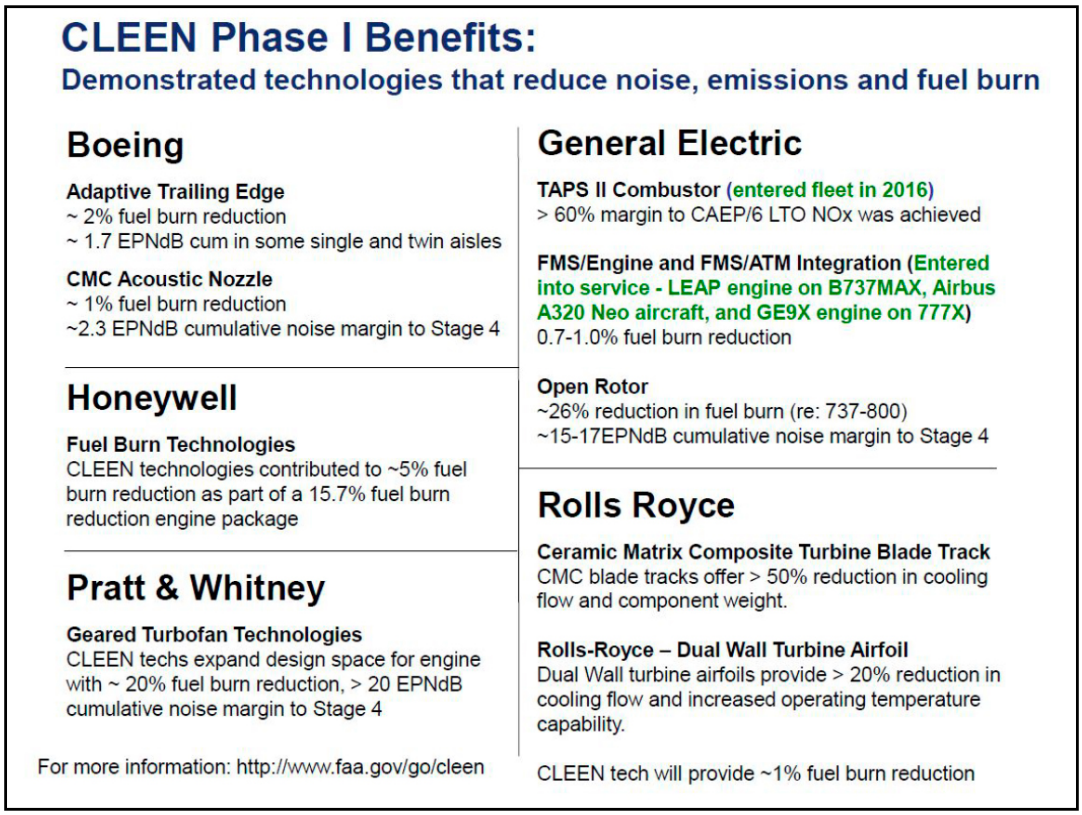

Figura 22. Tecnologías demostradas de reducción de combustible, emisiones y ruido [37].

- Estudios significativos sobre un concepto de cuerpo de ala híbrido en el que las alas se unen al fuselaje en una línea continua y sin costuras y los motores a reacción están montados en la parte superior del avión en la parte trasera, se minimiza el consumo de combustible y se reduce el ruido.

Por otra parte, la FAA desarrolló el programa CLEEN (*Continuous Lower Energy, Emissions and Noise*) con una inversión de $250 millones y $100 millones en CLEEN I y II respectivamente, que supuso el principal esfuerzo medioambiental de la FAA para acelerar el desarrollo de nuevas tecnologías aeronáuticas y de motores, avanzar en el uso de carburantes alternativos y conseguir la modernización del sistema de transporte aéreo de Estados Unidos para hacer que volar sea aún más seguro, más eficiente y más predecible y a la vez, conformar el Sistema de Transporte Aéreo de Próxima Generación o *Nextgen*. En este programa las tecnologías abordadas estuvieron relacionadas con diseños revolucionarios del motor, tecnologías de alas, mejoras del sistema de gestión de vuelo, cámaras de combustión y rediseño de fuselaje mejorados.

El diseño del avión *Nextgen* está basado en proyectos previos como ERA o los diseños N+3 mencionados, y en nuevos proyectos como: propulsión eléctrica e híbrida, turbina de gas de núcleo pequeño, ala *transónica Truss-Braced* (TTWB) y utilización mayor de materiales compuestos, que se verá con más detalle en el apartado 6.3.4. La propulsión eléctrica e híbrida será tratada en el capítulo 6.5.

Como se ha comentado a lo largo del informe, para hacer la aviación más sostenible se tiene que reducir su impacto ambiental y sobre todo su impacto en el cambio climático. Para ello se han de disminuir las emisiones de efecto invernadero (CO_2 es el que más contribuye), y para ello, la cantidad de fuel quemado o utilizar combustibles sostenibles. Para reducir esta cantidad de fuel quemado, se ha de conseguir que las aeronaves se muevan con más facilidad y con la menor energía posible, esto es, que las aeronaves sean más eficientes, más ligeras y aerodinámicas. Por tanto, para hacer las aeronaves más sostenibles se han de desarrollar tecnologías focalizadas en propulsión, aerodinámica y peso.

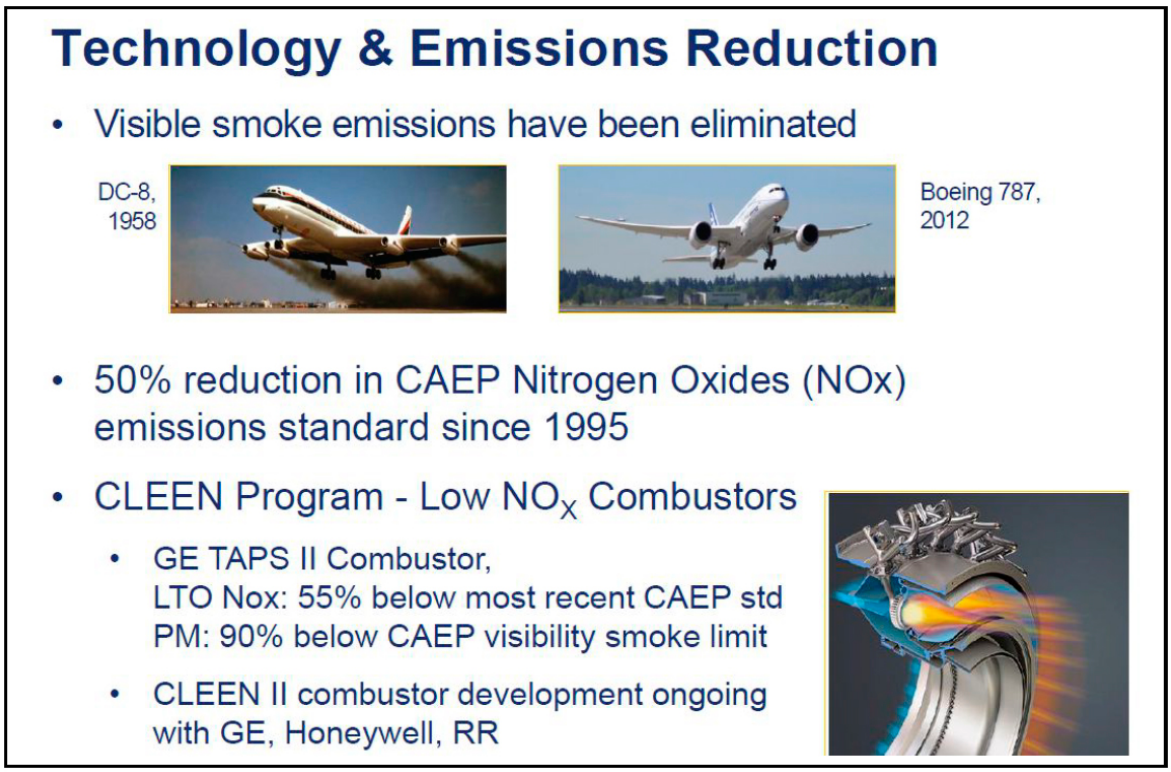

Figura 23. Evolución en tecnología de reducción de emisiones [37].

6.3.2. Propulsión.

Reducción del consumo específico del combustible (SFC)

Para reducir el SFC se ha de aumentar los valores de rendimiento térmico y/o propulsivo para una velocidad de vuelo y un tipo de combustible determinado. En el caso de un turbofán, el rendimiento térmico está determinado en gran medida por la relación de presión total (OPR), la temperatura de entrada en la turbina (TET) y los rendimientos de los componentes individuales (compresores, turbinas y cámaras de combustión). Los niveles de eficiencia de los componentes tienen un efecto directo en el consumo de combustible, y se han logrado avances notables en los últimos 30 años, con casi todos los componentes del turbofán alcanzando niveles de eficiencia politrópica de más del 90%, gracias al desarrollo de códigos CFD de diseño precisos. El control de los flujos secundarios a través de la turbo maquinaria proporcionará incrementos del rendimiento de los componentes, pero las mejoras en el rendimiento se producen al aumentar TET y OPR juntas.

Actualmente, con el objetivo de reducir el consumo especifico, se consideran tres configuraciones de motores: motores de accionamiento directo (Direct Drive Turbofán, DDTF), motores con caja de cambio reductora (*Geared Turbofan*, GTF) y motores de rotor abierto (Open Rotor):

MOTORES DE ACCIONAMIENTO DIRECTO, DDTF.

Constituyen la aproximación convencional, donde el compresor y los componentes del núcleo (compresor y turbina) giran en el mismo eje y funcionan a la misma velocidad de rotación; por lo tanto, el sistema está limitado por el componente con la velocidad más baja, que es el compresor, con lo que el núcleo debe funcionar a velocidades más lentas y menos eficientes. Se han desarrollado tecnologías de alto rendimiento y peso reducido que ofrecen una optimización entre los requerimientos de fan y turbina, llegándose a alcanzar elevadas prestaciones. En la figura inferior, se muestra la evolución de las prestaciones medioambientales de familia de motores Trent (modelos Trent XWB -*eXtra Wide Body*- que equipa el A350 y los nuevos desarrollos *Advance* y *Ultrafan*, este último dentro de *Clean Sky 2*) en relación con los objetivos 2050 de ACARE.

MOTORES CON CAJA DE CAMBIO REDUCTORA, GTF.

En estos motores GTF, el compresor y los componentes del núcleo están separados por un sistema de

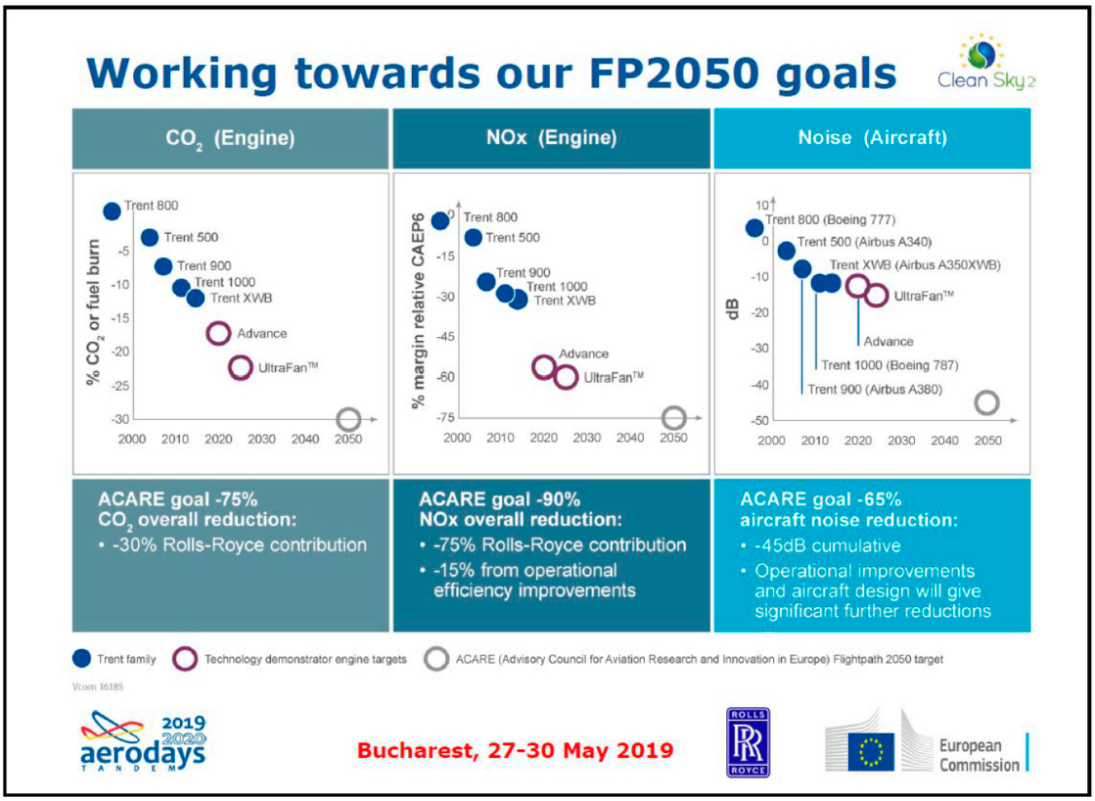

Figura 24. Evolución de una familia de motores vis a vis los objetivos de ACARE 2050.

Archivo fotográfico

Figura 24. http://www.tandemaerodays19-20.eu/presentations/

engranajes que permite que funcionen a velocidades diferentes y más eficientes. El núcleo puede funcionar más eficientemente y producir un nivel de empuje dado en el fan, con menos etapas de compresor y turbina, en comparación con un motor de accionamiento directo, reduciendo así el peso del motor y el combustible necesario para transportar ese peso en la aeronave. Las ventajas del ciclo del motor GTF, en términos de eficiencia del fan, en comparación con el ciclo convencional de turbofán y con el de rotor abierto o *propfan*, se muestran en la Figura inferior.

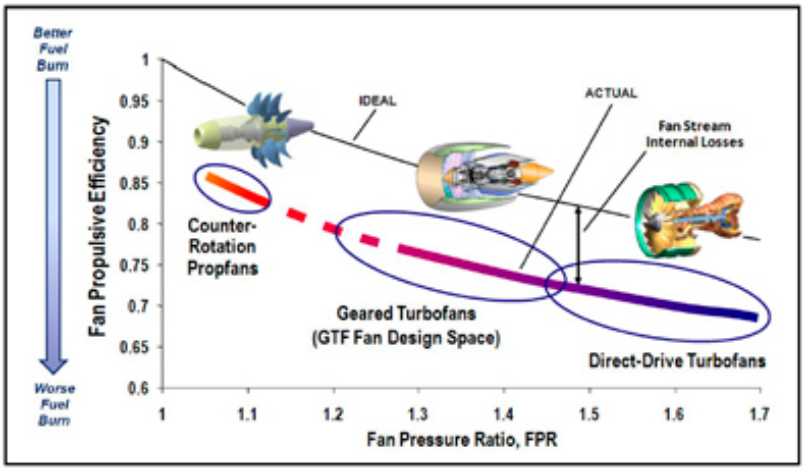

Figura 25. Tendencia en el rendimiento de la propulsión del fan vs. su relación de presión [40].

La primera generación de GTF en EE. UU., fue desarrollada por Pratt & Whitney (P&W) en colaboración con la NASA y se considera una tecnología N+1. Las áreas tecnológicas investigadas incluían fan de bajas velocidad y relación de presión, sistema de engranajes del fan, cámara combustión de bajas emisiones y eje de baja presión, de alta velocidad y compacto. Estas tecnologías permitieron motores con ratios de derivación ultra altos - Ultra High Bypass ratios (UHBR)- de 12 o más, permitiendo al mismo tiempo reducir la relación de presión en el fan (FPR) entre 1,3 y 1,4 para lograr una mayor eficiencia del fan.

Una vez se alcanzó el punto de beneficio máximo para este nivel de tecnología, a medida que la BPR de diseño siga aumentando y la FPR disminuya, se necesitó un segundo cambio de paradigma en la tecnología para ampliar la línea de tendencia beneficiosa del consumo de combustible. La NASA y P&W investigan una segunda generación de tecnologías de propulsor GTF para ayudar a alcanzar esos objetivos, posibilitando una relación de derivación (BPR) de hasta 18 y una FPR de entre 1,25 y 1,3. La Figura 26 inferior muestra la proyección del beneficio en consumo de combustible que proporcionará la primera y segunda generación de GTF, una reducción del 15% o del 25 al 30% en comparación con la actual, obtenida por la combinación del motor V2500 con el A320.

En Europa los fabricantes de motores establecieron un plan a lo largo del 5º, 6º y 7º Programa Marco con diversos proyectos, y posteriormente en el programa Clean Sky para el desarrollo de tecnologías que faciliten el diseño y fabricación de nuevos motores más eficientes y con menor impacto ambiental:

Proyecto VITAL (*enVIronmenTALly friendly aero engines*, 2009) ha investigado una serie de nuevas tecnologías para el sistema de baja presión del motor, para facilitar el desarrollo de arquitecturas de fan ligeras y de bajo ruido para motores UHBR, considerando las tres diferentes configuraciones para plantas de potencia de bajo ruido y alta eficiencia mencionados anteriormente, que son el DDTF liderado por Rolls-Royce, el GTF por MTU y el CRTF por Snecma. La arquitectura DDTF ofrece un compromiso optimizado entre los requisitos del fan y la turbina considerando las tecnologías de bajo peso introducidas por el programa. El GTF combina un compresor con un tren de engranajes reductores, para permitir diferentes velocidades de rotación para el fan, por un lado, y el *booster* y la turbina por el otro. El CRTF ofrece una configuración con dos fans girando en direcciones opuestas, lo que permite velocidades de rotación más bajas, ya que los dos fans dividen las cargas involucradas.

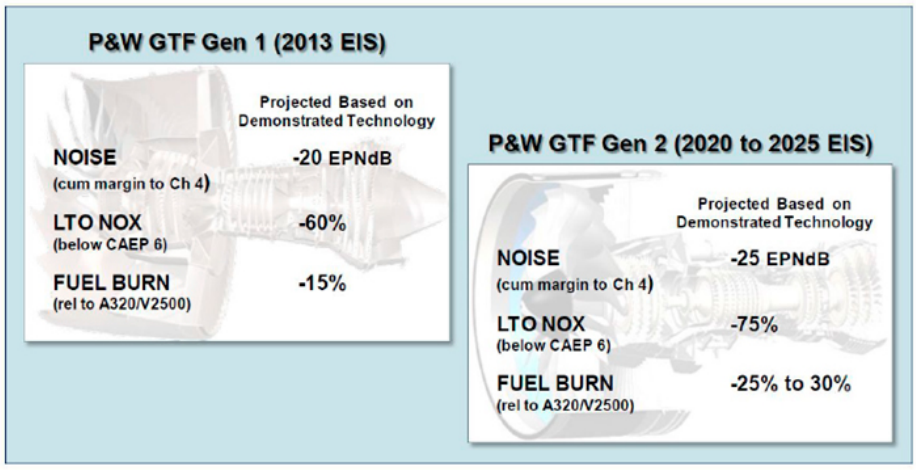

Figura 26. Proyecciones de las reducciones en consumo de combustible y otros impactos ambientales con el ciclo de motor GTF de P&W [40].

Las tecnologías que se están incorporando en estos motores incluyen entre otras, las siguientes:

- Nuevos conceptos de fan con énfasis en los contra-rotativos y los ligeros.
- Composites poliméricos y avances en materiales metálicos.
- Ahorro de peso de la turbina de baja presión a través del diseño de perfiles de ultra alta sustentación, ultra alta carga por escalón y materiales ligeros.
- Tecnologías para instalación ligera y de baja resistencia de motores HBR relativas a tobera, góndola e inversor de empuje (reversa).

Ultrafán

Está siendo desarrollado por Rolls-Royce y permite que el fan y la turbina se optimicen de forma independiente mediante la introducción de una caja de cambios de potencia capaz de funcionar hasta 100.000 HP para ofrecer una eficiencia de propulsión mucho mejor. Se conseguirá un 25% de mejora en eficiencia de combustible comparado con el primer motor Trent, y OPR de más de 70:1. Está siendo diseñado para cumplir con los estrictos niveles potenciales de ruido y emisiones para las aeronaves que entren en servicio antes de 2030.

MOTORES DE ROTOR ABIERTO

El diseño está destinado a ofrecer la velocidad y el rendimiento de un turbofán, con la economía de combustible de un turbohélice. Este concepto aumenta la relación de derivación al eliminar el conducto del fan y ofrece ganancias de eficiencia de dos dígitos debido a una relación de presión del fan más baja. A mediados de los años ochenta, la NASA, en asociación con varias industrias de motores de EE. UU., investigó esta nueva tecnología radical de propulsión y resurgió dentro del 7º Programa marco en el proyecto DREAM (*valiDation of Radical Engine Architecture systeMs*, 2011) y en el *Clean Sky*. En la Figura 28, el rendimiento previsto de los sistemas de propulsión de rotor abierto muestra importantes beneficios en el consumo de combustible incluso en comparación con los actuales motores turbofán de alta relación de derivación (HBPR).

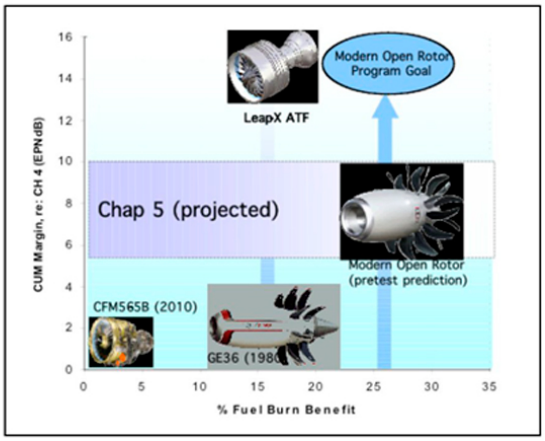

Figura 28. Beneficios de la performance de la tecnología de rotor abierto comparada con turbofanes actuales.

SAGE2 counter-rotating open rotor, CROR.

En 2017, el SAGE2 CROR demostró con éxito nuevas tecnologías que incluyen palas de hélice compuestas, sistema de control de paso, caja de cambios de reducción de rotación contraria y optimización aeroacústica en las instalaciones de prueba de SAFRAN, confirmando la viabilidad técnica de un CROR, la expectativa de mejora en el consumo de combustible (-30% en comparación con el año 2000) y la capacidad para satisfacer los requisitos actuales de ruido del Capítulo 14 de la OACI[1].

Innovación revolucionaria para motores sostenibles, RISE.

Este programa RISE [2] fue lanzado alrededor de junio del 2021 por los socios de CFM International, GE Aviation y Safran, en el camino hacia una nueva generación de motores de fan abierto de bajo consumo que entrarán en servicio a mediados de la década de

Figura 27.

1 https://www.easa.europa.eu/eaer/topics/technology-and-design/stakeholder-actions

2 https://aviationweek.com/aerospace/cfm-unveils-open-fan-demonstrator-plan-next-gen-engine

2030. Con el objetivo de una reducción del 20% en el consumo de combustible y en las emisiones de CO_2 en comparación con los motores actuales. A diferencia de SAGE2, que se centró principalmente en la integración del sistema y la eficiencia de propulsión, RISE incluirá un nuevo núcleo compacto para aumentar la eficiencia termodinámica, así como nuevas cámaras de combustión y motores-generadores de bajas emisiones para sistemas eléctricos híbridos. Esta configuración incorpora un núcleo compacto de alta presión, un compresor de refuerzo de alta velocidad y una caja de cambios delantera impulsada por eje de baja presión y alta velocidad.

Tecnologías del núcleo del motor.

En el área de turbo maquinaria del núcleo dentro de los proyectos de la NASA para reducir el consumo de combustible, el énfasis está en aumentar la densidad de potencia del núcleo del motor, resultando en unidades más pequeñas para un requisito de empuje dado. Aumentar la relación de presión total del sistema de compresión del núcleo (OPR), manteniendo o mejorando la eficiencia aerodinámica, es una de las áreas de enfoque. Otra área es, el aumento de la temperatura de entrada de la turbina (TET) para permitir un mayor rendimiento térmico.

OPR y TET más altas plantean difíciles retos que requieren una combinación de diseño avanzado de componentes aerodinámicos, materiales de mayor resistencia y temperatura más alta, y técnicas computacionales avanzadas.

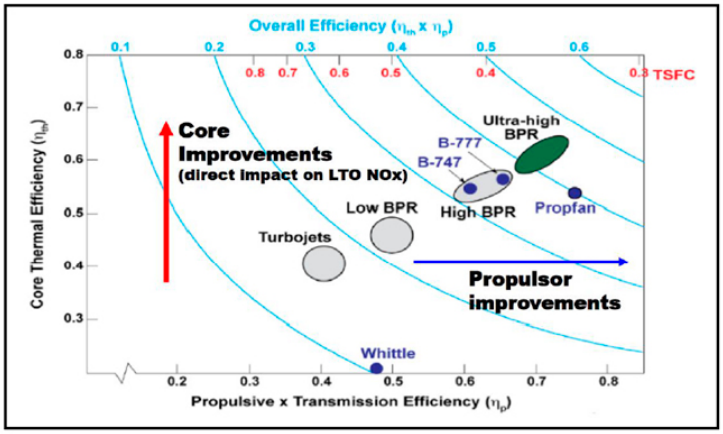

Figura 29. Tendencias en los rendimientos con las mejoras en propulsor y núcleo [36].

En la Figura 29, se muestra la relación entre la eficiencia térmica, de propulsión y general del núcleo, junto con la tendencia histórica de consumo de combustible con el ciclo del motor y el objetivo de las tecnologías de motor avanzadas, incluido el ciclo del motor con relación de derivación ultra alta (UHBPR).

Las tecnologías para llegar a desarrollar los núcleos de alta densidad de potencia requieren, por un lado, diseños aerodinámicos avanzados y por otro, el empleo de materiales avanzados, ligeros y más fuertes para los componentes principales. En la Figura 30 y Figura 31 se indican las tecnologías principales en desarrollo en estos dos campos de actuación.

La introducción de los materiales compuestos de matriz cerámica (CMC), ha dado lugar a oportunidades para cambios revolucionarios en el diseño y funcionamiento del sistema de propulsión, por su menor densidad y mayor capacidad de temperatura, en relación con las de los componentes metálicos, ofrecen múltiples ventajas, tales como ahorro de peso, mejor rendimiento y empuje, y menor consumo específico de combustible. La Figura 31 muestra áreas dentro de un núcleo típico de motor en donde se puede aplicar la tecnología CMC, así como las características de diseño y los beneficios potenciales para el motor.

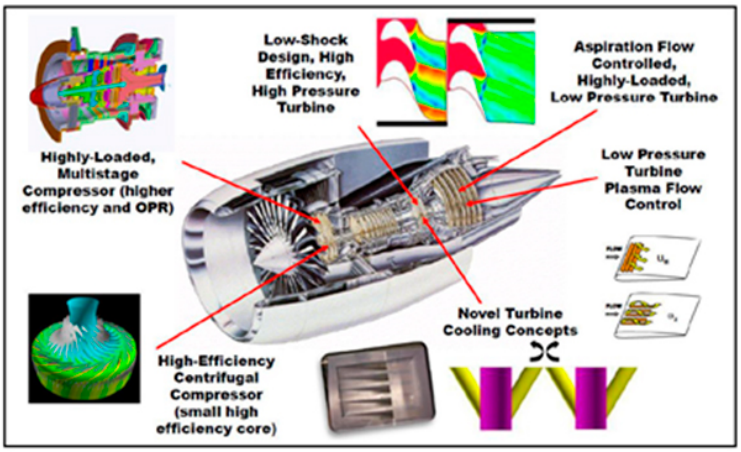

Figura 30. Tecnologías basadas en diseño aerodinámico del núcleo para motores avanzados [36].

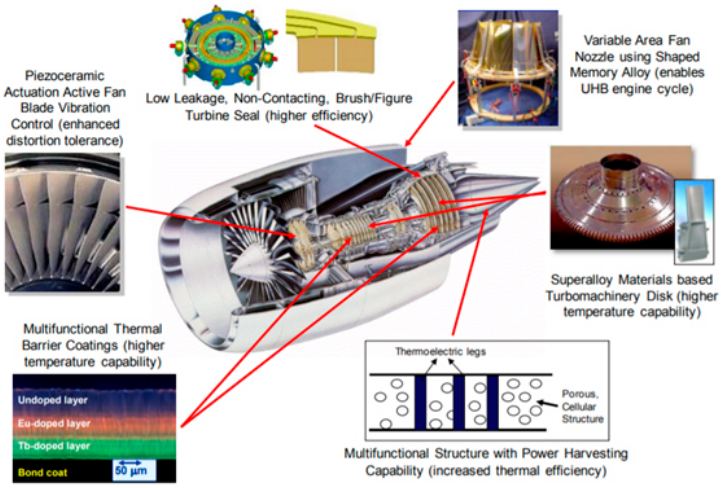

Figura 31. Tecnologías basadas en materiales del núcleo para motores avanzados [40].

Se han desarrollado nuevas configuraciones de núcleo mediante la gestión de calor (intercooler, enfriador de aire de refrigeración, recuperador), combustión mejorada, sistemas activos y otros, para reducir considerablemente las emisiones de CO2 y NOX: Proyecto NEWAC (New Aero engine Core concepts, 2006-2011) del 6º Programa Marco. NEWAC complementó otros proyectos en este campo, por ejemplo EEFAE (CLEAN y ANTLE) en el 5º PM y VITAL en el 6º PM. Las nuevas propuestas de configuración del núcleo tratadas en NEWAC (New Aero engine Core concepts) [3] son cuatro, cada una, para un tipo distinto de turbofán:

- Núcleo recuperativo interenfriado para el concepto de aerorreactor recuperativo interenfriado (Intercooled Recuperative Aeroengine, IRA) operado en baja OPR y utilizando un concepto de cámara de combustión pobre, premezclada y prevaporizada (LPP).
- Núcleo interenfriado para un concepto de motor de alta OPR basado en un DDTF de 3 ejes con una cámara de combustión de inyección directa pobre (LDI).
- Nucleo activo con sistemas activos aplicables a un GTF con OPR media utilizando una
- cámara de evaporación parcial y mezclado rápido (PERM).
- Núcleo de flujo controlado para el turbofán contrarrotatorio (CRTF) a OPR media usando una cámara PERM o LDI. Estas configuraciones se muestran esquemáticamente en la figura inferior.

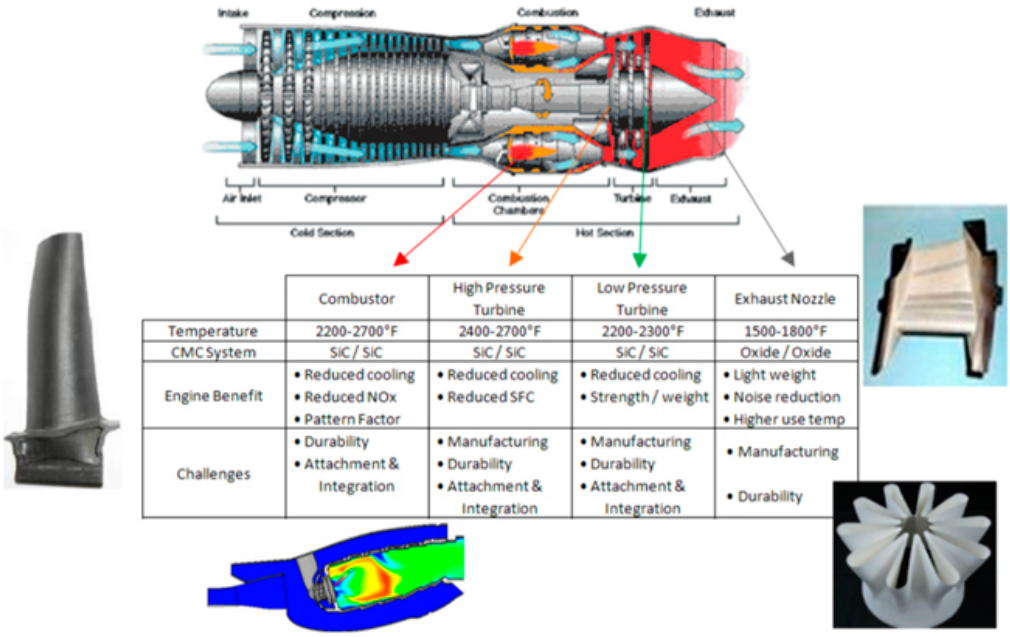

Figura 32. Aplicaciones para materiales CMC en componentes de motor y beneficios potenciales [20].

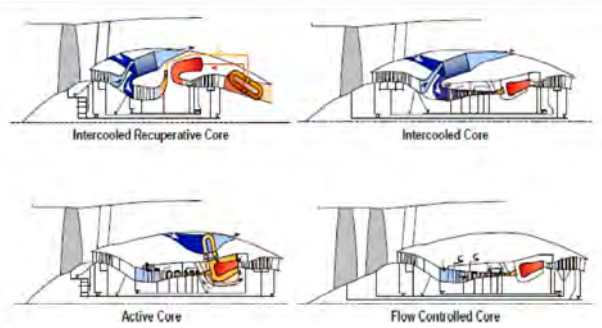

Figura 33. Cuatro Conceptos del núcleo en NEWAC.

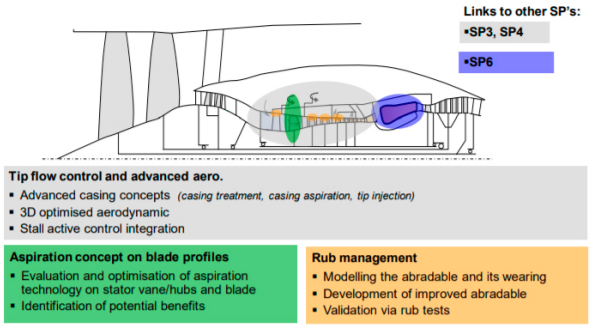

Figura 34. Núcleo de flujo Controlado- enfoque técnico.

Archivo fotográfico

Figura 33. Assessment of New Aero Engine Core Concepts and Technologies in the EU Framework 6 NEWAC Programme, January 2010. Conference: ICAS 2010 Congress Proceedings, Paper No. 408.Project: NEWAC (EC FP6

Figura 34. https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/20121029_130736_70767_Publishable_Final_Activity_Report.pdf

[3] https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/20121029_130736_70767_Publishable_Final_Activity_Report.pdf

Turbina de gas de núcleo pequeño.

Otra forma de obtener una mayor eficiencia de combustible de un motor, como se ha visto previamente, es cambiar su configuración de forma que el flujo de aire a través de él se modifique, junto con presiones y temperaturas. Durante años, los motores a reacción han aumentado la eficiencia del motor al cambiar la cantidad de aire que fluye a través del núcleo del chorro caliente del motor desviando el flujo, apareciendo el concepto de relación de derivación (bypass ratio, BPR).

Figura 35. Turbina de gas de núcleo pequeño.

En general, cuanto mayor sea la relación de derivación, más eficiente puede ser el motor para generar empuje, pero hay un límite en esta relación de derivación procedente del máximo tamaño de la góndola, y este inconveniente se salva haciendo el núcleo más pequeño en diámetro y aprovechando estudios anteriores sobre materiales y geometrías internas para controlar el aumento de temperaturas y presiones, que son un resultado natural de gestionar la combustión en espacios más reducidos. Este es uno de los objetivos del esfuerzo de investigación de pequeñas turbinas de gas.

La NASA está estudiando formas de reducir el diámetro del núcleo de motores a reacción turbofán de alta derivación para aumentar la eficiencia del combustible [4]. Como parte del Programa de Vehículos Aéreos Avanzados de la NASA (AAVP), se ha formulado un nuevo proyecto llamado "*Hybrid Thermally Efficient Core*" (HyTEC) [5] en el que la NASA tiene la intención de acelerar el desarrollo de tecnologías de motores turbofán de núcleos pequeños, culminando en una demostración de núcleo avanzado en el 2026. El objetivo de HyTEC es demostrar una mayor eficiencia térmica con tecnologías integradas de motor de núcleo de alta densidad de potencia que logran un beneficio de consumo de combustible del 5 al 10%, en comparación con el mejor de 2020 en su clase, para los aviones de pasillo único con entrada en servicio (EIS) a principios de la década de 2030.

TECNOLOGÍAS REVOLUCIONARIAS DE PROPULSIÓN.

Se espera que los nuevos conceptos de propulsión tengan un impacto considerable en la reducción de combustible para la futura flota. Actualmente, el rotor abierto, la ingestión de capa límite y los aviones eléctricos son las innovaciones más importantes en lo que respecta a las tecnologías de propulsión de aviones.

Propulsión eléctrica, híbrida o aeronaves alimentadas con pilas.

Motores convencionales y eléctricos son usados durante el vuelo de distintas formas, eléctrico o híbrido-eléctrico. Este último sistema de propulsión se encuentra entre las tecnologías más prometedoras (ver capítulo 6.5).

Ingestión de capa límite.

Con el objetivo de reducir el peso y la resistencia asociados a los altos rendimientos de propulsión generados por los sistemas convencionales integrados en la aeronave, se considera que distribuir el empuje propulsivo en las estructuras principales del fuselaje es un enfoque prometedor. Esta idea se conoce como el "Concepto de Fuselaje Propulsor" (PFC), que permite que todo el fuselaje actúe como empuje propulsivo. La forma más directa de implementar este concepto es mediante la ingestión completa de capa de límite anular (BLI). El concepto de llenado de estela a través de BLI ha sido investigado a fondo en varios proyectos, entre ellos Fusefan y STARC-ABL de la NASA, Claire Liner de Bauhaus Luftfahrt y el concepto D8 del MIT.

Con la tecnología BLI, los motores están situados cerca de la parte trasera de la aeronave de modo que el aire que fluye sobre el fuselaje se convierte en parte de la mezcla de aire que se ingiere en la entrada de aire del motor y se acelera hacia atrás. Según estudios analíticos de la NASA, la tecnología BLI es capaz de reducir el consumo de combustible de los aviones hasta en un 8,5% en comparación con los aviones actuales. Como parte del Programa Horizonte 2020, se está realizando un proyecto dedicado a demostrar la validación del concepto de PFC, denominado CENTRELINE (Concept validatioN sTudy foR fuselagE wakefilLIng propulsion integration).

[4] https://www.nasa.gov/aero/nextgen-aircraft-design-is-key-to-aviation-sustainability

[5] https://www1.grc.nasa.gov/aeronautics/hytec/

La configuración específica de PFC investigada en CENTRELINE, presenta un diseño de sistemas PFC turbo eléctricos de dos motores con un propulsor BLI en la popa del fuselaje alimentado a través de tomas de Geared TurboFan (GTF) colocadas debajo del ala. El beneficio de combustible de la misión de diseño de PFC, basado en la configuración aerodinámica de PFC optimizada en 2D, es del 4,7%[6].

La empresa MTU Aero Engines está centrada actualmente en lo que se conoce como motor WET (turbofán mejorado con agua). Con este concepto, el agua se evapora en un intercambiador de calor en el motor y se inyecta en la cámara de combustión. El calor de escape se utiliza para evaporar el agua, lo que puede mejorar significativamente la eficiencia del sistema de propulsión. Además, la combustión húmeda evita casi por completo las emisiones de NOx. Este concepto reduce el consumo de combustible en más de un 15% independientemente del tipo de combustible, reduce considerablemente todas las emisiones, especialmente los niveles de NOx, y, según las estimaciones iniciales, también reduce la formación de estelas de condensación. Si el concepto de turbofán mejorado por agua (motor WET) se utiliza junto con los SAF, ofrecería la posibilidad de reducir drásticamente las emisiones, incluso para aviones de largo recorrido[7].

6 January 2021, https://www.mdpi.com/2226-4310/8/1/16/htm
7 https://aeroreport.de/en/innovation/new-propulsion-systems-hydrogen-is-the-future

6.3.3. Aerodinámica.

Las tecnologías aerodinámicas han estado a lo largo de la historia de la aviación en continuo desarrollo para conseguir una reducción del consumo de combustible y, por tanto, de emisiones:

- Dinámica de fluidos computacional, CFD.
- Avances en tecnología de perfil/ala.
- Dispositivos hipersustentadores de borde de ataque y borde de salida.
- Ensayos en túnel aerodinámico a altos números de Reynolds.
- Conceptos estructurales mejorados.
- Configuraciones ala/motor/pilón más integradas.
- Optimización multidisciplinar.

Para las configuraciones de aeronaves actuales, las áreas para una mejora significativa en el consumo de combustible en los próximos años son: integración de propulsión, reducción de la resistencia aerodinámica y optimización multidisciplinar. Además, las configuraciones alternativas de aeronave, pueden permitir mejoras integradas adicionales a partir de tecnologías en sistemas, materiales y motores.

En la Figura 36 se muestra un desglose típico de resistencia: la viscosidad / fricción y la resistencia inducida por sustentación son dominantes para las aeronaves subsónicas en crucero, siendo la resistencia viscosa o de fricción el área que queda con potencial para una mayor reducción de la resistencia.

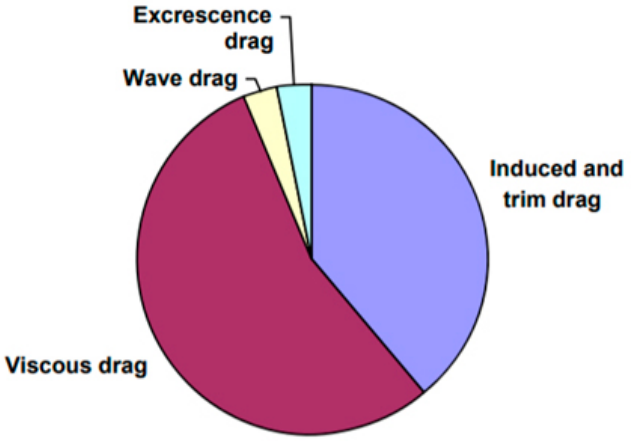

Figura 36. Desglose de resistencia [32].

Los avances en aerodinámica, así como en materiales y estructuras, han permitido una reducción significativa de la resistencia inducida por la sustentación:

- Maximizando la extensión efectiva de la envergadura por el empleo de composites.
- Incorporando dispositivos avanzados de punta de ala (winglets), que aumentan la eficiencia aerodinámica y reducen el uso de combustible.

Resumiendo, la tecnología aerodinámica podría clasificarse en tres áreas:

- Herramientas, procesos y capacidades aerodinámicos.
- Nuevas configuraciones de aeronaves.
- Tecnologías de productos aerodinámicos.

Los avances en herramientas, capacidades y procesos aerodinámicos como CFD, vuelo y pruebas en túnel de viento han permitido el desarrollo y evaluación de nuevas tecnologías y mejorar los diseños y análisis aerodinámicos.

Nuevas configuraciones de aeronaves, con configuraciones de ala/motor/pilón más integradas han aumentado la eficiencia aerodinámica.

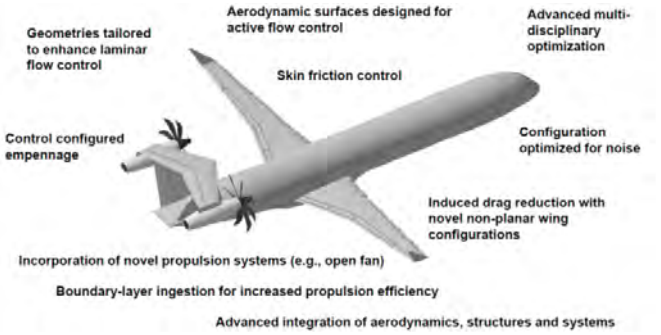

Figura 37. Nuevas configuraciones de aeronaves [32].

Los avances en las tecnologías de productos aerodinámicos están permitiendo una reducción significativa de la resistencia inducida por la sustentación, al aumentar la envergadura efectiva como dispositivos avanzados de punta de ala o maximizar su extensión gracias a los materiales compuestos. En la figura inferior se muestran ejemplos de estos avances.

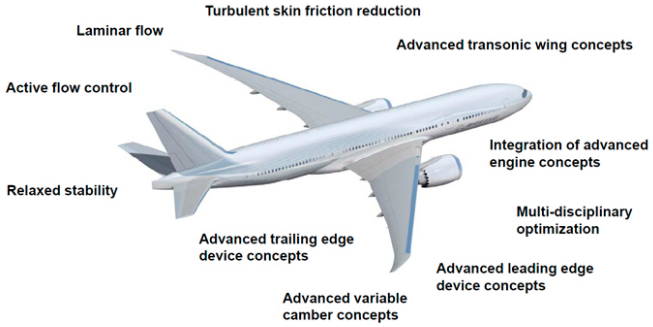

Figura 38. Tecnologías de productos aerodinámicos [32].

Dispositivos de punta de ala: *Winglet*.

Los dispositivos de punta de ala aumentan la sustentación generada en el extremo del ala y reducen la resistencia inducida por la sustentación causada por los vórtices de la punta de ésta, mejorando la relación sustentación/resistencia. Esto aumenta la eficiencia del combustible en los aviones propulsados o la velocidad en los planeadores, en ambos casos aumentando el alcance.

Un *winglet* es una extensión casi vertical de los extremos de las alas. Su forma, así como su tamaño son críticos para un correcto desempeño. El vórtice que gira desde debajo del ala golpea la superficie curva del *wingtip*, generando una fuerza que se inclina hacia adentro y ligeramente hacia adelante. Convierte parte de la energía desperdiciada en el vórtice del extremo del ala en una reducción de la resistencia aerodinámica. Otro beneficio potencial es que reducen la fuerza de esos vórtices que deja detrás el avión; y por tanto reducen el aire turbulento de su estela, que podría causar problemas de control de aeronaves que la cruzaran.

Flujo laminar y control activo de flujo.

Un campo de I+D de gran importancia es el flujo laminar, ya que su aplicación en diversas partes de la aeronave contribuye también a la reducción de resistencia disminuyendo por tanto el consumo de combustible. El control de flujo laminar natural (NFL) se logra sólo mediante el diseño de las superficies de las alas y otras partes de la aeronave con una forma adecuada, y en el control activo de flujo laminar (LFC) y el del flujo híbrido (HLFC), el flujo laminar se mantiene o se consigue aplicando succión a la capa límite.

La tecnología NLF o LFC se estudia, por ejemplo, en el proyecto de ala laminar, BLADE (*Breakthrough Laminar Aircraft Demonstrator in Europe*), que es parte del *Clean Sky*. Este demostrador tiene la tarea de evaluar la viabilidad de introducir la tecnología de ala de flujo laminar con el objetivo de reducir la resistencia del avión en un 10% y las emisiones de CO_2 hasta en un 5% [26]. Es el primero en el mundo en combinar un perfil de ala laminar transónico con una verdadera estructura primaria interna, en el que las secciones del ala exterior, de unos 10 metros de ancho, fueron sustituidas por perfiles laminares. De estos ensayos se estima que el potencial de ahorro de combustible del flujo laminar natural (NLF) para un vuelo de 800 millas náuticas sería de alrededor del 4,6%.

La tecnología HLFC es particularmente adecuada para las alas en flecha y el empenaje. La NASA, en el marco de su programa de investigación ERA (*Environmentally Responsible Aviation*), llevó a cabo una serie de ensayos en vuelo en un B757 equipado con un sistema HLFC para evaluar la dependencia de las condiciones laminares con factores como la fabricación de superficies, dispositivos de succión y recubrimientos de superficies para evitar la contaminación.

Se ha demostrado mediante ensayos que la escala y la flecha afectan a las aplicaciones del flujo laminar (NLF vs HLFC), observándose también que los beneficios en impacto ambiental dependen de la escala de aplicación. El beneficio potencial neto estimado de esta aplicación en consumo de combustible para los transportes subsónicos es 5 - 12 % aproximadamente.

En la actualidad las actividades de investigación sobre flujo laminar se están potenciando en Europa dentro del programa *Clean Sky 2*. Se están llevando a cabo actividades en NLF y HLFC como se indica en la Figura 39 y Figura 40 respectivamente, que están en un estado avanzado.

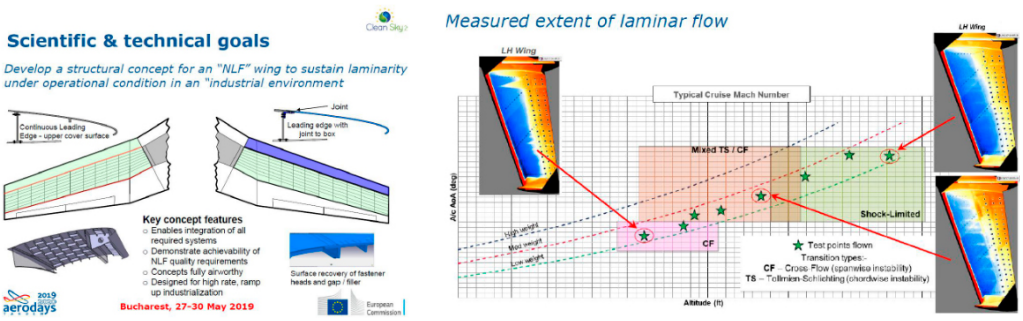

Figura 39. Actividades de flujo laminar natural en Clean Sky 2 [46].

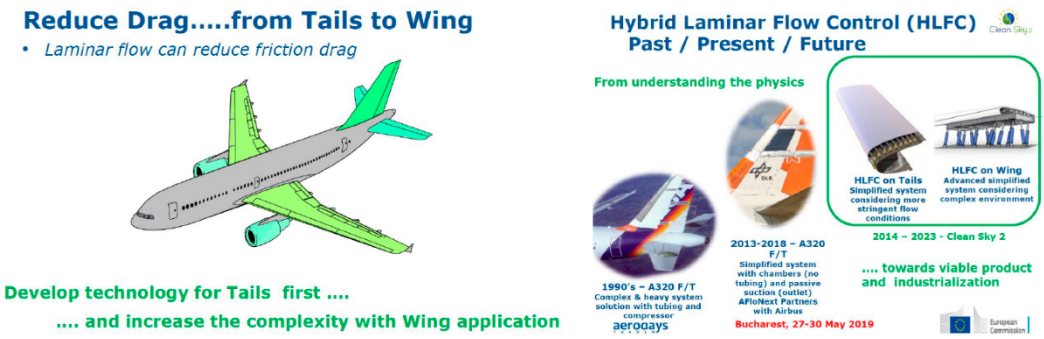

Figura 40. Actividades de flujo laminar híbrido en Clean Sky 2 [38].

Tecnología de reducción de fricción turbulento: estructuras acanaladas en la superficie del ala (*riblets*), demostrándose, mediante ensayos en túnel y en vuelo, que reducen pasivamente la fricción turbulenta local de pared del orden de un 6% [32], disminuyendo así la resistencia del flujo turbulento. Investigaciones llevadas a cabo por el DLR en Berlín consiguieron reducciones de resistencia turbulenta de hasta un 10% optimizando la forma de los *riblets*.

Tecnología de curvatura variable en el borde de salida. La NASA ha desarrollado y combinado el concepto de *flap* o *slat* de curvatura continua variable, con el concepto de control activo de forma del ala para reducir la resistencia y el consumo de combustible subsiguiente. El control activo de forma del ala está diseñado para cambiar aero-elásticamente la forma de ala en vuelo con el fin de lograr una forma óptima para reducir la resistencia.

Efectos aerodinámicos en la integración propulsión-célula.

El creciente diámetro exterior de la góndola debido al aumento de la relación de derivación (BPR), las limitaciones de la altura del tren de aterrizaje y la demanda de una distancia al suelo suficiente requieren una estrecha adaptación entre el ala y el motor para la instalación de motores de alta BPR. Por lo tanto, la integración del sistema de propulsión resulta de gran importancia, ya que, de lo contrario, el aumento de la eficiencia del motor puede verse disminuida por el aumento de la resistencia debida a la instalación.

Dentro de los programas marco de la UE se han realizado diversos proyectos dedicados, total o parcialmente, a la integración de la propulsión como el denominado ENIFAIR (*Engine Integration on Future Transport Aircraft*) con el objetivo principal de mitigar el impacto aerodinámico de las interferencias motor-pilón-ala. Por otro lado, también se ha investigado para nuevas configuraciones no convencionales de aeronaves el potencial o riesgo de las mismas referente a la instalación de los motores, como en el proyecto ROSAS (*Research on Silent Aircraft Concepts*) como se muestra en la Figura 41.

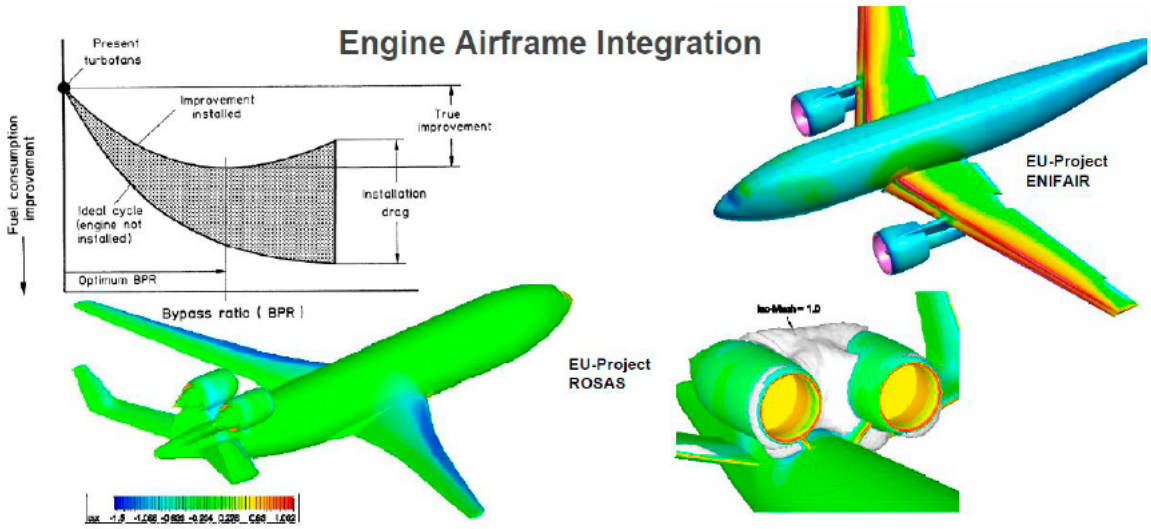

Figura 41. Integración propulsión-célula en configuraciones convencionales y no convencionales [65].

CONFIGURACIONES AERONÁUTICAS REVOLUCIONARIAS.

La NASA ha promovido en EE. UU., desde el año 2000 aproximadamente, una investigación sobre configuraciones de avión revolucionarias, mediante programas de colaboración público-privada, con actividades de I+D de la industria. Entre estas tecnologías destacan [1]:

El concepto de ala reforzada con puntal (SBW) permite, sin aumentar el peso, aumentar la envergadura y, por tanto, menos empuje es necesario. Un avión SBW fue diseñado por Boeing en el proyecto SUGAR (*Subsonic Ultra Green Aircraft Research*), en el que se consiguieron configuraciones aproximadamente un 29% más eficiente en combustible en una misión de 900 mn (rango de diseño de 3500 mn) que un Boeing 737-800 con motores CFM56. Una optimización del peso del ala adicional combinado con un motor de rotor abierto podría conducir a un ahorro de combustible de hasta un 53% en comparación con la flota de referencia.

Ala transónica *Truss-Braced* (TTBW). Estudios para aumentar la eficiencia aerodinámica mediante este concepto de avión transónico con ala *Truss-braced*. El TTBW es esencialmente un avión clásico de tubos y alas, pero con un ala extremadamente larga y delgada. Tan largo y delgado, de hecho, que necesita un poco de ayuda en ambos lados del fuselaje para sostenerlo. Este tipo de ala crea la misma cantidad de sustentación que las alas más gruesas y cortas que se ven en los aviones de pasajeros en la actualidad, pero lo hace con mucha menos resistencia. Al estrechar el grosor de las alas y extender su longitud, se reduce la resistencia y se quema un 5-10% menos de combustible que un avión comparable de fuselaje estrecho.

La tecnología TTBW es la que podría estar antes desarrollada, en unos 10 años, mientras que las anteriores necesitarían entre 5 y 10 años más.

El cuerpo de ala mezclado (BWB), también llamado cuerpo de ala híbrido (HWB), es principalmente una gran ala volante, que contiene un área de carga útil (cabina de pasajeros o área de almacenamiento de carga) dentro su sección central. La forma del cuerpo central y las alas exteriores se mezclan suavemente.

El consumo de combustible para varios BWB de gran tamaño tiene un pronóstico entre el 27% y el 50% menor que los aviones actuales de tamaño y alcance similares. Para el BWB de pequeño tamaño, las estimaciones de eficiencia de combustible son aproximadamente un 30% mejores que la aeronave actual de referencia[1].

Hay también iniciativas para combinar los beneficios de la propulsión eléctrica y el diseño del concepto mezcla de ala y cuerpo, BWB o HWB. La NASA ha estado estudiando los conceptos de BWB con sistemas de propulsión turbo eléctrica distribuida durante la última década, y el ahorro de combustible previsto está en el orden del 70%. Los recientes avances en el diseño de pequeños BWB podrían dar lugar a nuevas oportunidades en este ámbito. Los BWB pequeños suelen cubrir la categoría de 100 a 150 asientos, que está mucho mejor adaptada a varios conceptos de propulsión eléctrica híbrida y de batería que los aviones muy grandes. Un BWB eléctrico podría basarse en el progreso combinado en el diseño de la estructura del avión y la propulsión, que se espera que ocurran en paralelo en las próximas décadas.

Otro concepto prometedor tipo ala volante es el "Flying-V", una configuración de doble ala en forma de V, diseñado para un número de pasajeros similar y rango que el A350. Las dos alas acomodan la cabina de pasajeros, bodega y tanques de combustible. Similar a la configuración BWB, el Flying-V tiene menor resistencia aerodinámica y es un 20% más eficiente en combustible que un avión de tubo y ala comparable.

Fuselaje de doble burbuja, por ejemplo el diseño D8 de *Aurora Flight Sciences* para la NASA, cuya característica principal es un fuselaje de "doble burbuja" que consiste en dos tubos combinados uno al lado del otro. El cuerpo del fuselaje aplanado genera sustentación adicional y las alas pueden diseñarse más pequeñas y ligeras para llevar el peso de la aeronave, reduciéndose la cantidad de combustible quemado con respecto a una configuración convencional comparable. Además, los motores conectados en la parte trasera del fuselaje permiten que el aire fluya sobre la parte superior del avión y entre en los motores, lo que reduce la resistencia general. Este concepto se conoce como ingestión de la capa límite. La configuración D8 tiene el potencial de lograr hasta un 20% de mejora en eficiencia en comparación con el A320 neo.

Box-/Joined-Wing, esta configuración de ala de caja, que fue propuesta primero por Ludwig Prandtl en 1924, conecta las puntas de las dos alas. Para una elevación y envergadura determinadas, esta configuración asegura una resistencia inducida mínima y ahorro en el consumo de combustible en comparación con las aeronaves convencionales. El proyecto

[1] IATA Technology Roadmap for Environmental Improvement Fact Sheet, 2019-2 https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/technology20roadmap20to20205020no20foreword.pdf

Parsifal [2], es un proyecto de investigación con el objetivo de diseñar un avión con la misma envergadura que un Airbus A320 o Boeing B737, con la capacidad de un avión de una categoría mayor, como un Airbus A330 o un Boeing 767, y el consumo de combustible de aviones más pequeños.

Un nuevo concepto de avión de fuselaje ancho, el SE200 [3], de 264 asientos, (marzo, 2021) fue presentado por una empresa emergente de Alabama, *SE Aeronautics*, que ha reelaborado todo el concepto de avión de pasajeros, revelando un innovador avión de tres alas que tendrá menos de un 70% de consumo de combustible y una huella de carbono un 80% menor que los aviones tradicionales similares.

El avión Celera 500L es una revolución en la aviación privada con un uso extensivo de superficies de flujo laminar que da como resultado una reducción cercana al 59% en la resistencia en comparación con un convencional de tamaño similar.

Figura 42. Avión Celera 500L.

Reduce las emisiones de carbono en más del 80% en relación con los aviones de negocios comerciales comparables (8 veces menos consumo de combustible) y en más del 40% en relación con los aviones comerciales más eficientes por pasajero con una reducción de 5-7 veces en el coste operativo. La reducción de emisiones de carbono del Celera 500L supera los estándares de emisiones objetivo de la FAA y la OACI para las aeronaves que entran en servicio en o después de 2031 en más del 30%. El diseño del Celera 500L se adapta bien a futuras adaptaciones de la tecnología de propulsión híbrida o eléctrica.

Archivo fotográfico

Figura 42. https://www.ottoaviation.com/technology

2 https://cordis.europa.eu/project/id/723149/results
3 https://www.seaeronautics.com

6.3.4 Estructuras y materiales.

Respecto a mejoras en estructuras y materiales, hay que destacar los avances e innovaciones siguientes:

Fabricación 3D aditiva.

Esta nueva técnica para construir piezas aeroespaciales implica agregar material, capa tras capa, en formas geométricas precisas. Esto permite producir componentes complejos directamente a partir de información de diseño asistida por computadora. Permite una producción más rápida y flexible, y reduce el desperdicio de material en comparación con los enfoques tradicionales como el fresado. También da como resultado piezas mucho más ligeras que reducen el peso de la aeronave y, en consecuencia, el consumo de combustible. Las piezas impresas en 3D ya están volando en los aviones de prueba Airbus A320neo y A350 XWB (por ejemplo, soportes de cabina, tubos de purga, boquillas de combustible en el motor CFM LEAP).

Utilización mayor de materiales compuestos en estructuras de avión.

Aunque se dispone de mejores metales y procedimientos de fabricación, los materiales compuestos se llevan usando en aviación durante décadas y cada vez se realizan estructuras más complejas y estructuralmente mejores y más ligeras que las mismas de metal. El uso de materiales compuestos (composites) se prefiere cada vez más para componentes estructurales en todos los nuevos diseños. Según CICAIA (Consejo Internacional de Coordinación de Asociaciones de Industrias Aeroespaciales), el potencial de ahorro de peso total con metales se encuentra en el rango de 5±2%. Con composites avanzados, los posibles ahorros serían del 8±2% para aviones de un pasillo y del 4±2% para los de dos pasillos [56]. Hay otras tecnologías de reducción de peso en estudio que podrían producir ahorros en torno al 2,5% para los aviones pequeños y el 4% para los grandes [56]. En la actualidad, aviones como el Boeing 787 *Dreamliner* o el A350 tienen un 50% y 53% de partes fabricadas en composites frente al 1% en el 747 y el 11% en el 777 [63]. Pero quedan oportunidades para aumentar el uso de compuestos en la aviación, especialmente en la fabricación de grandes aviones. Existen tres desafíos a superar relacionados con el aumento de materiales compuestos: el primero, reducir el tiempo desde el concepto de pieza, diseño, fabricación y optimización del proceso, ensayos hasta su certificación, el segundo, aumentar el ratio de fabricación, sobre todo de grandes piezas y el tercero, el proceso de reciclado. La NASA ha completado el *"Advanced Composites Project"* sobre el primer desafío, utilizando nuevos métodos de diseño, mejores capacidades de modelado, métodos de inspección y procesos para automatización para reducir el tiempo de certificación.

Uso de materiales avanzados en Motores.

Además del uso de materiales avanzados en la estructura de las aeronaves, se han realizado importantes esfuerzos de desarrollo para mejorar los materiales o recubrimientos en los motores de las aeronaves mediante el uso de nuevos materiales y procesos, como las aleaciones metálicas de alta resistencia y temperatura y los compuestos de matriz cerámica (CMC), mencionados en el capítulo de propulsión, ofreciendo oportunidades para cambios revolucionarios en el diseño y funcionamiento del sistema de propulsión.

Los materiales o recubrimientos mejorados, como las superaleaciones, y los procesos para fabricar fan, compresores, cámaras de combustión y turbinas han tenido un gran impacto en la capacidad de los motores de turbinas de gas modernos.

Economía Circular.

La economía circular es un concepto emergente para la aviación, si bien su aplicación aún no está generalizada, la utilización de conceptos de economía circular podría brindar valiosas oportunidades de aprendizaje para el futuro. La aplicación de sus principios al sector de la aviación se centraría principalmente en dos elementos: aviones y aeropuertos.

En el caso de las aeronaves, el modelo de economía circular se aplica en las operaciones de las aeronaves y para la gestión del final de la vida útil de las aeronaves *"end of life"*. Ejemplos de aplicaciones de estas aplicaciones son: el grupo Air France-KLM, que adoptó la estrategia de economía circular en sus operaciones de vuelo desde 2015, Airbus con el proyecto PAMELA, Boeing con el proyecto *"Process for Advanced Management of End-of-Life Aircraft"* y Boeing y la Asociación de *Aircraft Fleet Recycling,* cuyo objetivo es establecer un nuevo estándar para una gestión ambientalmente responsable de aeronaves al final de su vida útil.

En los aeropuertos, su aplicación también ha demostrado un gran potencial de beneficios ambientales y económicos. Ejemplos de economía circular en el aeropuerto son el de Schiphol y Philips, que desarrollaron una asociación para proporcionar una solución de iluminación circular para el aeropuerto. Y el rediseño del sistema de gestión de residuos en el aeropuerto de Gatwick ya mencionado.

TECNOLOGÍAS REVOLUCIONARIAS EN ESTRUCTURAS Y MATERIALES

En el proyecto ***Spanwise Adaptive Wing (SAW)*** [1] de la NASA, se está investigando la forma de diferentes partes del ala, con el objetivo de reducir el peso y la resistencia, mejorando así la eficiencia del combustible. Es un concepto revolucionario en estructura y material que emplea una aleación de memoria de forma (SMA) de estado sólido de alta fuerza para desarrollar un método estructuralmente eficiente y confiable para deflactar una parte del ala en vuelo. El objetivo es reducir el peso de la estructura y la resistencia al adaptarse mejor a cada fase de vuelo.

Otra tecnología prometedora es el ***"morphing wing"*** [2], que está siendo estudiada por la NASA y el MIT. Esta nueva arquitectura de ala podría simplificar enormemente el proceso de fabricación y reducir el consumo de combustible en un 2-8% mejorando la aerodinámica del ala, así como mejorando su maniobrabilidad. Este mecanismo involucra a todo el ala, que estaría cubierto por una piel hecha de piezas superpuestas, dando como resultado un ala mucho más liviana y, por lo tanto, mucho más eficiente energéticamente que las de diseños convencionales, ya sean de metal o composite, al tiempo que se reduce el consumo de combustible. Puede cambiar de forma para controlar el vuelo del avión, mejorando la aerodinámica del ala y la eficiencia de vuelo, así como mejorando sus capacidades de maniobra.

1 https://technology.nasa.gov/patent/TB2016/LEW-TOPS-124#:~:text=The%20Spanwise%20Adaptive%20Wing%20(SAW,of%20the%20wing%20in%2Dflight

2 https://news.mit.edu/2019/engineers-demonstrate-lighter-flexible-airplane-wing-0401

6.4. COMBUSTIBLES SOSTENIBLES

Como ya hemos visto anteriormente, la estrategia para convertir la aviación comercial en una actividad plenamente sostenible se sustenta en diferentes elementos y acciones coordinados en el tiempo. Si la compensación de emisiones mitigaba el impacto de las emisiones en el corto plazo, los combustibles con bajas o nulas emisiones netas de CO_2 son una pieza fundamental en el medio plazo. Los combustibles de aviación sostenibles (SAF en sus siglas en inglés), en uso ya en la aviación comercial, incluyen propuestas de diferente tipo bajo un mismo propósito: disminuir o anular el impacto neto de las emisiones de los motores de aviación convencionales. Este es el factor clave que hace a los SAF tan interesantes para la sostenibilidad del sector aeronáutico, ya que no sería necesario retirar la flota actual de aviones comerciales para mejorar sus prestaciones medioambientales.

En 2013 se estableció un grupo de trabajo (AFTF[1]) dentro de OACI encargado de la evaluación del ciclo de vida completo para los combustibles alternativos de aviación. Esta iniciativa se ha consolidado y proporcionará los estándares necesarios para la certificación medioambiental y contabilización dentro de CORSIA del uso de combustibles sostenibles[2].

En Europa, la directiva RED II, define los criterios de sostenibilidad que deben cumplir los SAF, con especial atención en evitar impactos negativos indirectos, como por ejemplo la deforestación o la competencia con la alimentación, debido a la producción de biocombustibles [3]. Esta fundamental normativa corrige problemas identificados en la legislación anterior. A pesar de que entró en vigor en 2021, la Comisión Europea ya ha anunciado una propuesta de revisión para ampliar sus objetivos y mejorar sus salvaguardas [17].

Existen básicamente dos tipos de combustibles sostenibles para aviación: los biocombustibles, producidos a partir de compuestos biológicos, ya sean cultivados directamente para este propósito o residuales; y los producidos de forma sintética a partir de CO_2 e hidrógeno, que se conocen como electrocombustibles, *e-fuels* o también *Power-to-Liquid fuels (PtL)*. En ambos casos su uso comercial

Figura 43. Entrega de biocombustible en el aeropuerto de Los Ángeles.

parte del concepto drop-in, por el que los estándares de su fabricación permiten la mezcla directa con el combustible habitual en los turborreactores aeronáuticos en una proporción máxima del 50% (Figura 48), límite que se está trabajando en extender hasta el 100% [22].

De hecho, esta es la principal apuesta de sostenibilidad de la empresa Boeing, quien anunció en enero de 2021 su compromiso para certificar sus aeronaves de forma que puedan operar con SAF sin mezclar en 2030[4], reto también asumido por Embraer y otros constructores. Esta compatibilidad con combustibles sostenibles se está implantando también en aeronaves de nuevo diseño o actualizaciones como el D328eco [5] (Figura 44).

Airbus, por su parte, también combina sus propuestas de futuro basadas en el hidrógeno con la investigación en combustibles sostenibles. En marzo de 2021 realizó el primer vuelo 100% SAF con un A350, como inicio de un proyecto sobre el comportamiento medioambiental de estos combustibles (ECLIF3). De la mano de Rolls&Royce, DLR y Neste se están ensayando y midiendo de forma exhaustiva sus emisiones en condiciones reales. El objetivo es consolidar las pruebas existentes sobre las ventajas adicionales de estos combustibles, en particular en lo referente a la formación de estelas de condensación [6].

1 Alternative Fuels Task Force, dentro del Committee on Aviation Environmental Protection (CAEP).
2 https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/CAEP-FTG.aspx
3 https://ec.europa.eu/jrc/en/jec/renewable-energy-recast-2030-red-ii
4 https://boeing.mediaroom.com/2021-01-22-Boeing-Commits-to-Deliver-Commercial-Airplanes-Ready-to-Fly-on-100-Sustainable-Fuels
5 Flight International. Agosto de 2021.
6 https://www.airbus.com/newsroom/stories/A350-fuelled-by-100-percent-SAF-just-took-off.html

Archivo fotográfico

Figura 43. https://www.dailybreeze.com/2019/06/05/lax-welcomes-eco-friendly-united-airlines-flight-powered-by-biofuel/

Figura 44. D328eco, proyecto compatible 100%SAF y con posible versión de hidrógeno.

Una vez que no se prevén problemas técnicos de gran importancia, el principal escollo para el uso generalizado de combustibles sostenibles es su capacidad de producción existente, actualmente testimonial frente a la demanda de la aviación. Sin embargo, el número de proyectos industriales para incrementar esta capacidad se están sucediendo de forma vertiginosa, como atestigua la docena de anuncios de este tipo realizados solo en los tres primeros meses de 2021 [7].

por tanto de emisiones[9], por motivos económicos [24]. Noruega lidera la implantación de este tipo de medidas progresivas con la obligación de cumplir, ya para 2020, con una cuota del 0,5% SAF, mandato que llegará al 30% en 2030.

En EE. UU., donde el SAF parece jugar un papel dominante para reducir las emisiones de aviación, el enfoque se basa en incentivar su uso y producción, como recogen dos iniciativas legislativas actualmente en trámite[10]. En septiembre de 2021 el gobier-

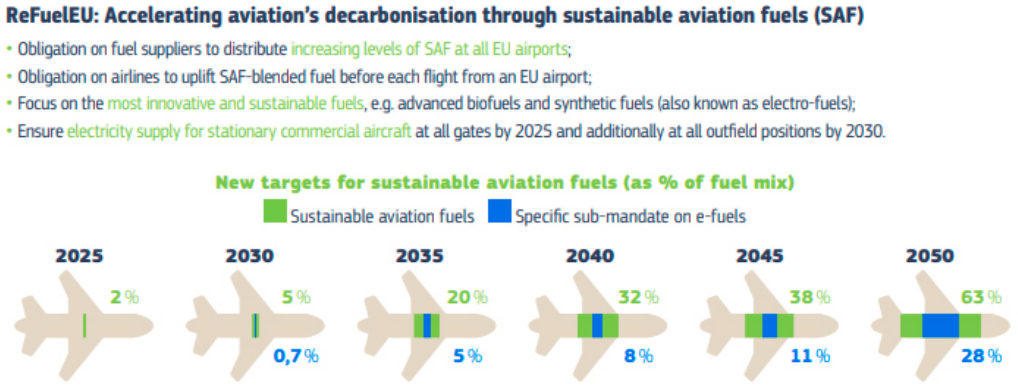

Figura 45. Cuotas obligatorias de combustible sostenible incluidas en la propuesta Refuel EU.

La acción regulatoria tiene también un papel decisivo que jugar para que los SAF consigan alcanzar un porcentaje significativo del consumo de combustible de aviación. En este aspecto, la reciente propuesta de la Comisión Europea conocida como *Refuel EU*, parte del paquete medioambiental presentado el 14 de julio de 2021, busca establecer unas cuotas obligatorias de repostaje con SAF para toda aeronave que despegue del espacio europeo. De forma progresiva (Figura 45), y con subcuotas específicas para los electrocombustibles, esta normativa supondría un espaldarazo definitivo para la implantación de los combustibles sostenibles de aviación. La obligación de repostar antes de todo despegue tendría el beneficio adicional de impedir la práctica del *tankering*[8], que implica un gasto innecesario de combustible, y

no estadounidense anunció el *Sustainable Aviation* Fuel Grand *Challenge*[11], con un objetivo cercano para producir más de 11.000 millones de litros de SAF en 2030, lo que cubriría aproximadamente el 10% de las necesidades del país.

Frente a la paliativa compensación de emisiones, y a la espera de un salto tecnológico decisivo en el área de la propulsión a largo plazo, los combustibles sostenibles se presentan como la opción más prometedora en un horizonte temporal cercano para reducir de forma efectiva el impacto medioambiental en vuelos de alta capacidad y larga distancia.

7 Flight International. Abril de 2021.

8 Cargar combustible extra en los aviones para evitar repostar en destinos con tarifas más altas. La diferencia de precios compensa económicamente el incremento de consumo debido al peso adicional.

9 Alrededor de un 0,5% adicional.

10 Sustainable Aviation Fuel Act y Sustainable Skies Act

11 https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-09/S1-Signed-SAF-MOU-9-08-21.pdf

Archivo fotográfico

Figura 44. Fuente: Deutsche Aircraft.
Figura 45. Fuente: Comisión Europea.

6.4.1. Biocombustibles.

El principio por el que los biocombustibles reducen las emisiones netas de CO_2 es sencillo: los vegetales o derivados en los que se basa su fabricación capturan primero el dióxido de carbono de la atmósfera durante su crecimiento. Una vez transformados en biocombustible, su combustión en los motores libera este mismo CO_2, por lo que teóricamente se alcanza un impacto neutro. Por supuesto resulta fundamental evaluar el ciclo completo de producción del biocombustible para asegurarse de que la huella de carbono asociada a dicho proceso mantiene un saldo aceptable de reducción de emisiones.

Los biocombustibles se han venido utilizando de manera intensiva durante años en países como Brasil, con el etanol para automoción a base de caña de azúcar desde los años 70; junto a otros cultivos como el maíz o la soja formaron la materia prima para los biocombustibles de primera generación. Los problemas de impacto en uso del suelo, y la competencia con la producción alimentaria, asociados a estos cultivos, llevaron a buscar alternativas, que se concretaron en la segunda generación de combustibles de origen biológico como los preparados a partir de residuos vegetales o de grasas animales, cultivos en tierras marginales (camelina, jatropha) o directamente de basura urbana (MSW[1]). Los biocombustibles avanzados también incluyen una tercera generación, e incluso cuarta, basadas en el cultivo de microalgas.

ASTM APPROVED PROCESS	DATE OF APPROVAL	FEEDSTOCK OPTIONS	BLENDING RATIO BY VOLUME
FT-SPK Fischer-Tropsch hydro-processed synthesised paraffinic kerosene	2009	**Lignocellulosic biomass** *Agricultural and forestry residues (e.g. sugarcane bagasse, sugar cane trash, treetops, corn stover and corn stalks) and municipal waste*	Up to 50%
HEFA-SPK Synthesised paraffinic kerosene produced from hydro-processed esters and fatty acids	2011	**Oils and fats** *Camelina, jatropha, castor oil, palm oil, animal fats, and used cooking oil*	Up to 50%
HFS-SIP Synthesised isoparaffins produced from hydro-processed fermented sugars	2014	**Microbial conversion of sugars to hydrocarbon** *Sugarcane, cassava, sorghum, and corn*	Up to 10%
FT-SPK/A Synthesised kerosene with aromatics derived by alkylation of light aromatics from non-petroleum sources	2015	**Lignocellulosic biomass** *Agricultural and forestry residues (e.g. sugar cane bagasse, sugarcane trash, treetops, corn stover and corn stalks) and municipal waste*	Up to 50%
ATJ-SPK (isobutanol) Alcohol-to-jet synthetic paraffinic kerosene	2016	**Biomass used for sugar production and lignocellulosic biomass** *Sugarcane, cassava, sorghum, corn, and ethanol*	Up to 50%
ATJ-SPK (ethanol) Alcohol-to-jet synthetic paraffinic kerosene	2018	**Biomass used for sugar production and lignocellulosic biomass** *Sugarcane, cassava, sorghum, corn, and ethanol*	Up to 50%
CHJ Catalytic hydrothermolysis synthetic jet fuel	2020	**Triglyceride-based feedstocks** *Waste oils, algae, soybean, jatropha, camelina, and carinata*	Up to 50%
HHC-SPK High hydrogen content synthetic paraffinic kerosene	2020	**Biologically derived hydrocarbons** *Algae*	Up to 10%

Figura 46. Procesos certificados para la producción de biocombustibles para aviación.

1 Municipal Solid Waste

Archivo fotográfico

Figura 46. https://rsb.org/wp-content/uploads/2020/06/RSB-Aviation-Report-WEB_Final.pdf

En la actualidad existen diversos procesos certificados para la producción de biocombustibles ya en uso industrial (principalmente HEFA-SPK), y otros en estado de desarrollo e implementación (Figura 46). Dependiendo de la materia prima y del proceso de producción utilizado se alcanzan diferentes reducciones de emisiones de CO_2 respecto al combustible procedente del petróleo. Es importante volver a señalar que este cálculo debe tener en cuenta el ciclo completo, incluyendo impactos derivados como el del cambio de uso de terreno (LUC), tanto directo como indirecto. A modo de ejemplo, sería necesario contabilizar las emisiones adicionales emitidas si se deforestase un área para cultivar estos vegetales apropiados para la fabricación de biocombustible.

Los resultados de la Figura 47, donde la línea discontinua señala las emisiones asociadas al combustible de aviación convencional, muestran el cálculo completo de gases de efecto invernadero asociado al uso de diferentes biocombustibles (LCA[2]). Se puede observar reducciones en algunos casos que alcanzan niveles de CO_2 neutro, pero también biocombustibles con huellas de carbono inaceptables. Es por esto que, antes de lanzar la producción industrial de cualquier combustible sostenible, resulta crítico realizar un análisis exhaustivo de viabilidad y eficiencia medioambiental, con criterios estandarizados, que incluya efectos indirectos como podría ser el desplazamiento de cultivos alimentarios.

En la gráfica destacan además algunos casos con saldos netos negativos en la emisión de gases de efecto invernadero. Esto es, combustibles cuyo ciclo completo de producción y uso extrae estos compuestos de la atmósfera. La explicación consiste en que se utilizan subproductos de su fabricación para, por ejemplo, generar energía adicional y substituir combustibles fósiles. Otras vías para la obtención de biocombustibles con ciclo completo de CO_2 negativo, todavía en fase de desarrollo, consisten en la optimización del proceso para incluir el secuestro de carbono (BECCS[3]), ya sea en la fase de crecimiento vegetal o en el procesado de la biomasa, por ejemplo obteniendo biocarbón *(biochar)* como subproducto. Este compuesto es estable durante milenios, eliminando efectivamente CO_2 de la atmósfera, y se podría utilizar en la agricultura sin que libere nuevas emisiones[4].

En el terreno de los proyectos ya en fase industrial, y a modo de ejemplo, en enero de 2019 un biocombustible para aviación, obtenido a partir de productos de desecho, obtuvo una certificación medioambiental de ciclo completo que aseguraba una reducción de más del 60% en sus emisiones[5] respecto al equivalente convencional. Aunque su aplicación comercial ha sido un éxito, su precio y escalabilidad de producción son aspectos que todavía representan un desafío [45]. La calidad medioambiental de los biocombustibles es un área en constante mejora, desde

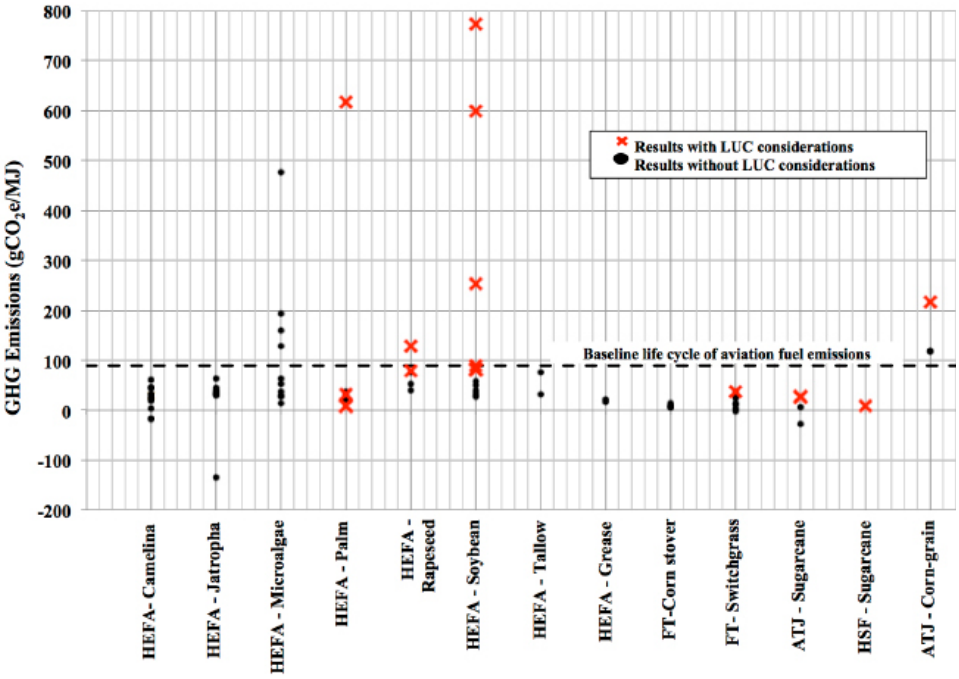

Figura 47. Emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al ciclo completo de vida de biocombustibles [61].

2 Life Cycle Assessment

3 BECCS: Bioenergy with Carbon Capture and Storage

4 https://www.stiesdal.com/fuels/the-skyclean-technology-explained/

5 https://rsb.org/2018/01/29/altair-rsb-certification-biofuel-refinery/

los objetivos habituales en la actualidad, que ronda el 80% de reducción de emisiones de CO_2, hasta la ansiada neutralidad de carbono[6].

Desde que se realizó el primer vuelo con biocombustibles en 2008[7] se ha avanzado mucho en su introducción para uso comercial, estimándose que el total de vuelos realizados con algún porcentaje de este tipo de combustibles supera los 300.000, y se suministra ya de manera limitada en aeropuertos de todo el mundo[8]. Para 2021 se estima una producción de 100 millones de litros de SAF, frente a los 15 millones de 2018. No obstante, conviene contextualizar estas cifras ya que la última cubrió menos del 0,1% del total de combustible de aviación usado en ese año. Aumentar la producción hasta el 2% del consumo permitirá lanzar definitivamente el mercado de biocombustibles, lo que parece alcanzable a la vista de los múltiples desarrollos industriales y comerciales en marcha, los incentivos a su uso mediante mecanismos como CORSIA y EU ETS (el uso de estos combustibles sostenibles se bonifica a la hora de calcular las compensaciones) y, sobre todo, las iniciativas legislativas ya mencionadas para su promoción tanto en Europa como en EE. UU.. Si en 2019 había un total de 6.000 millones de litros de SAF comprometidos para suministrar a medio plazo a aerolíneas de todo el mundo [47], en septiembre de 2021 un solo anuncio por una compañía alcanzaba prácticamente la misma cifra [9]. Las previsiones de la industria estiman que los combustibles sostenibles de aviación podrían cubrir hasta el 75% de su objetivo de reducción de emisiones de CO_2 [4].

Para alcanzar estas metas, los biocombustibles deben superar la actual limitación en la disponibilidad de materias primas *(feedstock)* para su producción, respetando siempre la calidad medioambiental en su ciclo de vida completo. En Europa, una revisión completa llegó a la conclusión de que las fuentes de materia disponibles podrían cubrir la producción del 5,5% de las necesidades de la aviación en 2030 [55]. Otros estudios señalan que solo con el volumen de aceite usado y grasas disponible se podría producir SAF para cubrir el 2% de la demanda en el continente europeo [26].

Resulta de particular interés los avances en la producción de biocombustibles a partir de residuos urbanos[10] y subproductos de la industria agrícola y maderera, ya que permiten acceder a un volumen de suministros de grandes dimensiones, a bajo coste y sin implicar competencia por uso de tierra. Más bien al contrario, el aprovechamiento de estas materias primas podría solucionar problemas existentes como el de los vertederos para basura urbana, con plantas de biocombustible ya construidas como la de Fulcrum Bioenergy en Nevada[11], o proyectos como el de Wastefuel para Manila, donde se pretende transformar anualmente un millón de toneladas de residuos urbanos en 113 millones de litros de combustibles sostenible para aviación a partir de 2025[12]. Otro ejemplo son los residuos forestales, objetivo del proyecto Rewofuel, financiado por la Unión Europea y con participación española, que busca desarrollar su potencial para la producción de biocombustibles para aviación[13]. En EE. UU., un estudio sobre el potencial energético de diferentes residuos,

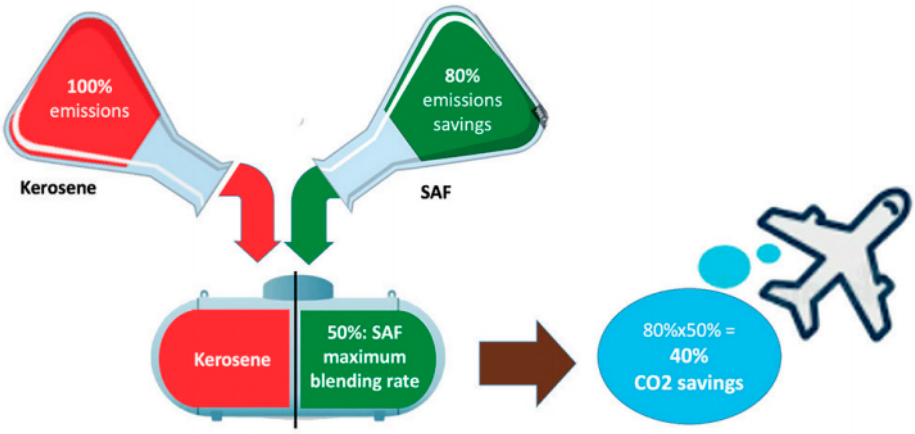

Figura 48. Reducción en emisiones de CO2 con una mezcla del 50% SAF [24].

6 https://www.greenairnews.com/?p=1201
7 http://news.bbc.co.uk/2/hi/7261214.stm
8 https://www.iata.org/en/programs/environment/sustainable-aviation-fuels/
9 https://www.ainonline.com/aviation-news/air-transport/2021-09-09/united-honeywell-partner-massive-saf-investment
10 https://www.greenairnews.com/?p=1046
11 https://fulcrum-bioenergy.com/wp-content/uploads/2021/07/2021-07-06-Sierra-Construction-Completion-Press-Release-FINAL.pdf
12 https://www.netjets.com/en-us/waste-fuel-sustainable-aviation-partnership
13 https://www.rewofuel.eu/

con la tecnología ya disponible, estimaba que solo con los purines de las granjas de ganado bovino y porcino se podría cubrir el 10% de las necesidades de combustible de aviación del país en 2016 [70].

El otro factor fundamental para permitir el despegue de los biocombustibles es la mejora de su competitividad económica frente al queroseno de aviación. Con precios del petróleo habituales (50-100 $/barril) el coste de producción del combustible convencional se encuentra en el rango de 0,3-0,6 $/L, frente a los 0,7-1,0 $/L del SAF con proceso HEFA-SPK [47]. Esta proporción es consistente con otros estudios sobre la producción de combustible sostenible a partir de aceite usado, con un coste entre un 50% y un 75% superior al de origen fósil [26].

La desventaja económica del biocombustible, que se ha ido reduciendo considerablemente en los últimos años [57], podría superarse totalmente en escenarios de encarecimiento del petróleo, mediante acciones políticas decididas que primasen su uso y que ya están en marcha (establecimiento de cuotas de mezcla obligatoria, bonificaciones por su utilización o tasas por uso de combustibles fósiles) pero también mediante el avance tecnológico y la entrada en juego de economías de escala. Una vía alternativa para extender su uso consistiría en que las aerolíneas trasladaran el coste extra de los biocombustibles al precio del billete, apelando a la sensibilidad medioambiental de los pasajeros. La previsión es que el sobrecoste de volar entre Londres y Nueva York con un 15% de SAF encarecería el billete individual 10$ [47].

Una ventaja medioambiental añadida de los biocombustibles ya reseñada es que, según un estudio internacional liderado por la NASA y el DLR, se puede asociar su uso con una mitigación de otros efectos negativos para el cambio climático como la formación de estelas de condensación y la nubosidad asociada [68]. Este beneficio se conseguiría gracias a que su combustión produce menos partículas de hollín y de diferente tipo que las del queroseno habitual, lo que llevaría a un menor número y mayor tamaño de los microcristales que conforman los *contrails*. Estudios más recientes confirman esta ventaja ensayando en vuelo diferentes mezclas, con un porcentaje óptimo de 30% SAF que consiguió reducir el impacto de este tipo de emisiones en un 70% [76]. Otros beneficios adicionales identificados consisten en una menor liberación de óxidos de azufre [52], e incluso el aumento de la eficiencia del combustible entre un 1 y un 3 % [22]. Se espera que los ensayos en vuelo actualmente en desarrollo dentro del proyecto *Emission and Climate Impact of Alternative Fuels (ECLIF3)*, mencionado anteriormente, podrán consolidar estos prometedores resultados.

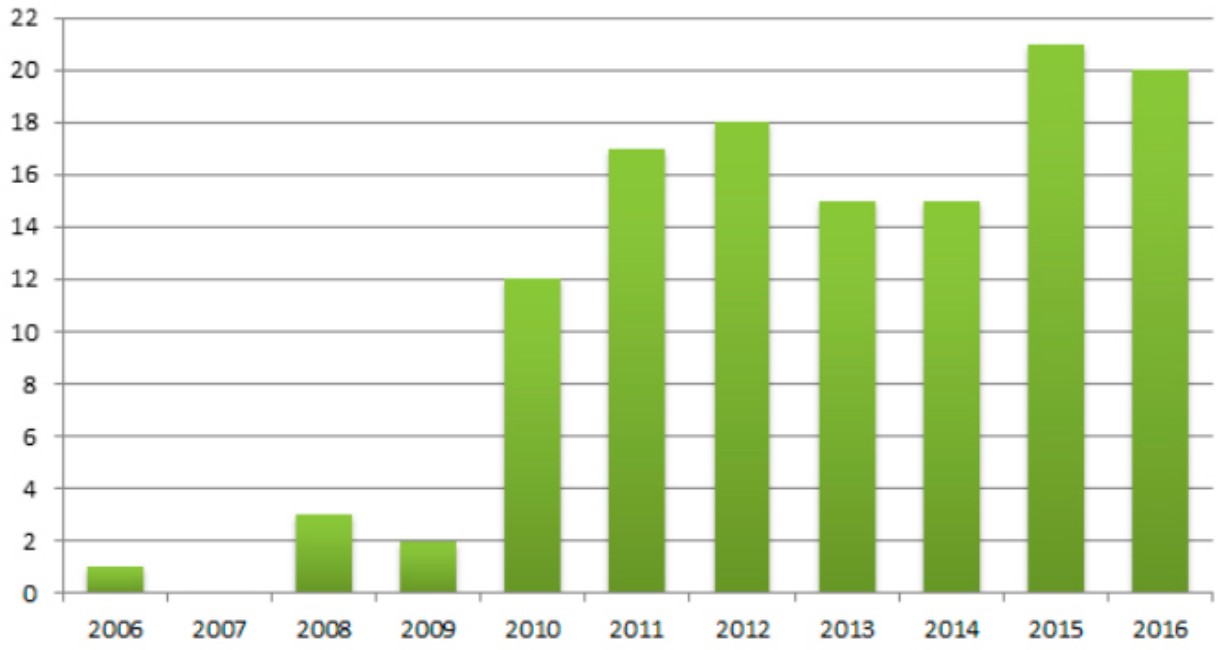

Figura 49. Número de iniciativas activas para la promoción del uso de biocombustibles (ICAO GFAAF, 2017) [61].

6.4.2. Electrocombustibles.

La producción sintética de combustibles alternativos a los de origen fósil, también conocidos como *synfuels*, supone un salto cualitativo en lo referente a la sostenibilidad de la aviación. Mimetizando en cierta forma el ciclo de los biocombustibles, el proceso implica la extracción del CO_2 directamente de la atmósfera (DAC) o su captura en procesos industriales *(point source)*, y su conversión en hidrocarburo al combinarlo con hidrógeno, que a su vez se obtiene, por ejemplo, a partir de agua por electrólisis (Figura 51). El origen de la energía para alimentar el proceso, sobre todo la generación del hidrógeno, es lo que determinará el saldo neto de emisiones de CO_2. Si se utilizan fuentes renovables, como la energía solar o eólica, el electrocombustible resultante podría ser prácticamente CO_2 neutro.

Una vez obtenido el gas de síntesis (H_2 y CO), existen diferentes procesos para la obtención de hidrocarburos, como el Fischer-Tropsch (FT) o a través de la síntesis de metanol. Estas tecnologías están plenamente validadas en demostradores a escala reducida, y se va avanzando en su implementación industrial, aunque de forma limitada por el alto coste de producción asociado. En 2020 el precio de los PtL se movió en el rango de 1,3 a 2,2 €/L, lo que significa de 2 a 3 veces el precio del combustible de origen fósil [75]. La Figura 50 confirma esta variabilidad de los precios de los SAF, tanto sintéticos como de origen orgánico, desglosándolos por tecnologías de producción. Por otra parte, al tratarse de desarrollos relativamente recientes, se espera que mejoras tecnológicas, como la electrólisis de alta temperatura, y las economías de escala asociadas a la producción industrial podrán reducir estos costes significativamente [30].

A pesar de estar un paso por detrás de los biocombustibles, tanto en aplicación industrial como en coste, los combustibles sintéticos cuentan con la ventaja de ocupar mucho menos terreno por unidad producida y, sobre todo, evitar toda la problemática de los efectos directos e indirectos de cambio de uso de suelo cultivable y posibles deforestaciones asociadas. Una ventaja adicional frente a los combustibles sostenibles de origen orgánico deriva del mínimo consumo de agua necesario, estimado en 1,3 L de agua por cada litro de PtL.

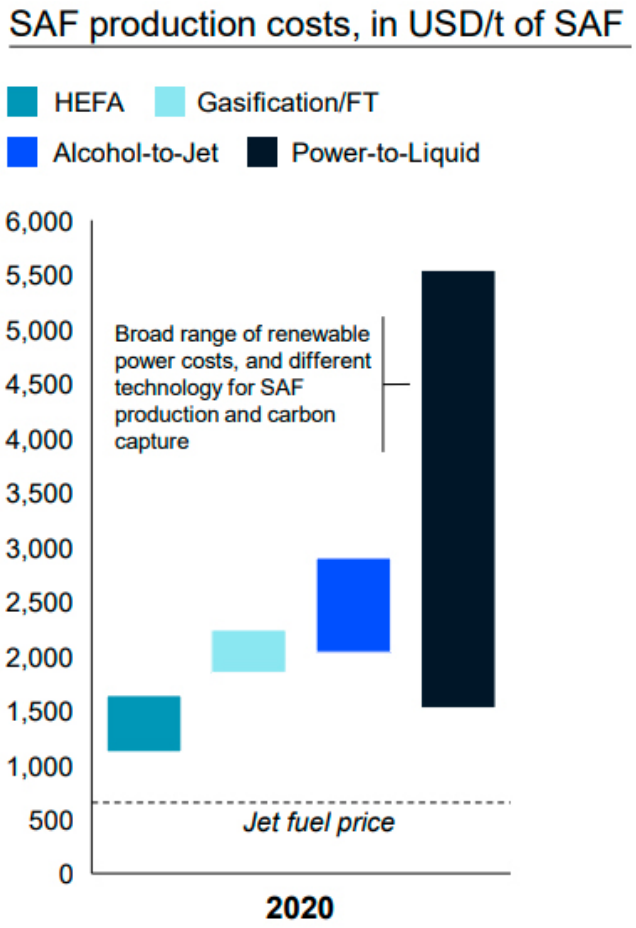

Figura 50. Comparativa de precios entre combustibles sostenibles y de origen fósil.

Entre las diferentes iniciativas industriales en curso, destaca el ambicioso proyecto anunciado en junio de 2020 por Norsk e-fuel para la producción de electrocombustible para aviación en Noruega a partir de energía renovable. La producción comenzará en 2023 con una capacidad anual de 10 millones de litros, y los agresivos planes de expansión contemplan multiplicarla por 10 en solo 3 años, además de servir como modelo para otras factorías[1]. Resulta obvio relacionar la viabilidad de esta iniciativa industrial con la normativa sobre la cuota obligatoria de combustible sostenible ya señalada en el país escandinavo, efecto que podría multiplicarse a nivel europeo con la cuota obligatoria de PtL propuesta en la iniciativa legislativa de la Comisión Europea *Refuel* EU (Figura

[1] https://www.norsk-e-fuel.com/en/

Archivo fotográfico

Figura 50. Fuente: WEF Clean Skies for Tomorrow expert interviews, McKinsey.

45). Alemania, por su parte, también anunció en mayo de 2021 su propia estrategia para la promoción de los electrocombustibles para aviación[2].

Un proceso tecnológico similar al señalado anteriormente es el que emplea el demostrador de producción de e-fuel lanzado en mayo de 2019 por un consorcio internacional alrededor del aeropuerto de Rotterdam-The Hague, o la iniciativa anunciada por el consorcio canadiense SAF+, con apoyo de Airbus, que iniciará su actividad en 2021[3]. Sin embargo, a diferencia de las anteriores, en esta última planta el CO_2 se capturará de las emisiones de una instalación industrial ya existente. Aunque las credenciales medioambientales de la captura directa de la atmósfera son más sólidas, como señala un estudio reciente que revisa las tecnologías DAC para la producción de combustibles sintéticos sostenibles, existen también ventajas por usar las emisiones industriales de CO_2, en la estrategia conocida como *point source*. Mientras la tecnología para la captura atmosférica se desarrolla y consolida, esta alternativa permitiría simplificar y abaratar la producción de PtL durante un período transitorio [20].

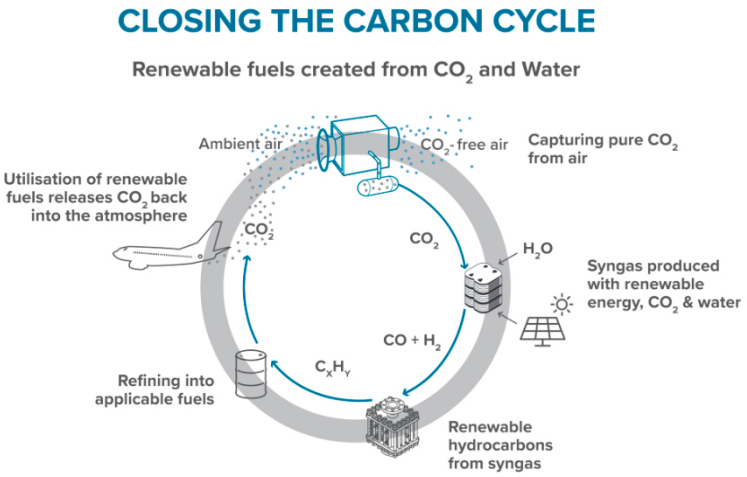

Figura 51. Ciclo de vida del e-fuel mediante electrólisis.

Otro tipo de enfoque para la producción de *synfuels*, basado en reacciones termoquímicas de alta temperatura, se ha probado en el proyecto *Sun-to-Liquid* [4] financiado por la Unión Europea y Suiza. Un reactor alimentado con luz solar concentrada consigue transformar CO_2 y agua en gas de síntesis, para proceder después con la sintetización del combustible de aviación por el proceso FT (Figura 52). La planta piloto se encuentra situada en Móstoles, y cuenta con una importante contribución tecnológica española. A finales de 2019 concluyó con éxito la validación del ciclo completo de producción escalable a nivel industrial.

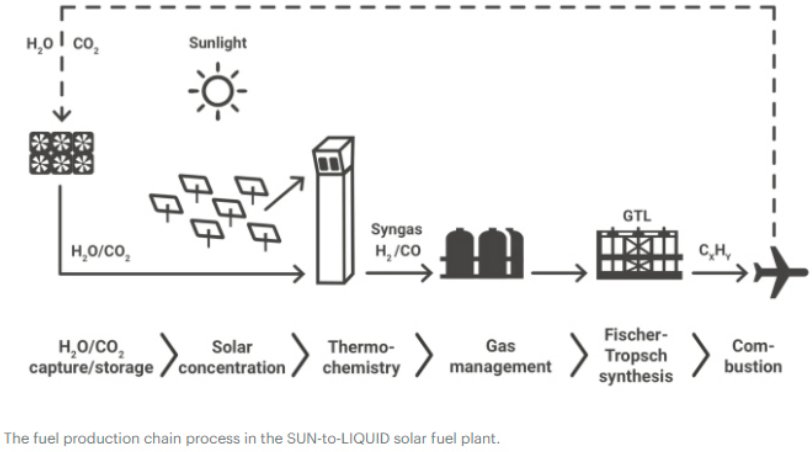

Figura 52. Sun-to-Liquid Proceso de producción.

Estos ejemplos ponen de manifiesto el enorme empuje actual en la investigación y desarrollo de los combustibles sintéticos sostenibles, cuyo uso comercial parece a la vuelta de la esquina. Sus ventajas frente a los biocombustibles parecen reservarle un espacio propio a medio plazo en el camino hacia una aviación plenamente sostenible. En enero de 2021 se alcanzó un importante hito con el primer vuelo comercial con una mezcla de combustible convencional y sintético entre Ámsterdam y Madrid.

Por último, es importante recordar que ninguno de estos combustibles sostenibles tiene el potencial para erradicar otros impactos medioambientales de la aviación, más allá de las emisiones de CO_2. Es el caso de la nubosidad inducida o las emisiones de hollín, aunque como ya se señaló anteriormente, posiblemente sí se reducirán con el uso de SAF. Para enfrentar estos desafíos será necesario cambiar radicalmente la forma en que se propulsan las aeronaves, lo que se explorará en el siguiente capítulo.

2 https://www.bmvi.de/SharedDocs/EN/PressRelease/2021/044-scheuer-roadmap.html
3 https://safplusconsortium.com/
4 https://www.sun-to-liquid.eu/

Archivo fotográfico

Figura 51. https://ineratec.de/rotterdam-the-hague-airport-renewable-fuel-from-air/
Figura 52. Fuente: Sun-to-Liquid.

6.5. AVIACIÓN ELÉCTRICA

Tras un largo período en el que se mantuvo como una aspiración, la revolución eléctrica es ya una realidad en el ámbito del transporte terrestre y, como se mostraba en la Figura 3, el interés y los proyectos eléctricos se han disparado también en el sector aeronáutico[1]. Los alicientes para desarrollar este tipo de propulsión son diversos, aunque el fundamental es medioambiental: a día de hoy es la única vía para poder realizar vuelos con un impacto medioambiental cero, asumiendo que se use un suministro eléctrico renovable y a falta de evaluar el ciclo de vida de la batería.

Los plazos para convertir en realidad esta promesa eléctrica son sin duda inciertos, dada su dependencia en el desarrollo de nuevas tecnologías, pero dentro del horizonte de esta misma década se espera el inicio de su despliegue comercial. Se estima que la entrada en servicio de aeronaves eléctricas para 20 pasajeros podría llegar alrededor de 2025, con desarrollos mayores de 50-80 pasajeros no antes del 2030 [22].

Por supuesto existen todavía considerables obstáculos a la hora de generalizar este tipo de aeronaves, algunas de ellas que solo se prevé resolver a largo plazo[2]. Sin embargo, dado el potencial medioambiental de la aviación eléctrica, y su capacidad de combinarse con otras tecnologías, la apuesta eléctrica parece una pieza fundamental en el futuro sostenible de la aviación.

Existen diferentes estrategias y enfoques bajo este denominador eléctrico, cada una con sus ventajas e inconvenientes, según el tipo de fuente energética utilizada para la propulsión [66]. Empezando por el creciente proceso de electrificación en aeronaves de propulsión convencional, se revisarán después las diferentes opciones híbridas que introducen una fuente eléctrica para alimentar propulsores, y terminaremos con las propuestas 100% eléctricas. Dadas las especiales características del hidrógeno como vector energético, que permiten su uso alimentando pilas de combustible en configuraciones eléctricas o directamente en turborreactores, trataremos las propuestas basadas en este combustible en el siguiente capítulo.

Como hemos venido señalando en este informe con otras iniciativas para mejorar la sostenibilidad de la industria aeronáutica, no se debe entender su desarrollo necesariamente como una competición entre opciones, sino como soluciones que pueden cubrir los diversos segmentos de aviación en distintos marcos de tiempo.

1 https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/electric-aircraft.aspx
2 https://leehamnews.com/2020/05/01/33297/

6.5.1. Aviones más eléctricos.

La progresiva introducción de sistemas y capacidades eléctricos en diseños convencionales es la estrategia conocida como *More Electric Aircraft* (MEA). Los pesados y complejos circuitos hidráulicos, neumáticos y mecánicos se eliminan gracias al uso de motores y sistemas eléctricos, con la consiguiente reducción de peso, lo que además permite la optimización del funcionamiento de los motores principales dedicados en exclusiva a la propulsión. Además, los sistemas eléctricos son significativamente más sencillos, lo que incrementa la seguridad y reduce los costes de mantenimiento.

Un ejemplo de este proceso serían los inversores de empuje del A380, donde se reemplazó el sistema hidráulico habitual por uno eléctrico. Airbus continúa por esta senda con los planes para reemplazar el sistema mecánico de los timones de dirección de los A320neo por actuadores eléctricos[1].

El Boeing 787 por su parte, a pesar de los problemas iniciales con las baterías, supuso un paso importante en esta estrategia al eliminar el sangrado habitual desde los motores hacia el sistema de aire acondicionado de la cabina, substituyéndolo por compresores eléctricos y mejorando la eficiencia energética del avión en su conjunto[69].

Otra propuesta relevante de este enfoque es el sistema e-taxi, desarrollado por Safran, y que permite el desplazamiento de las aeronaves en las operaciones en tierra mediante un motor eléctrico alimentado por el APU[2] y conectado al tren de aterrizaje. Se consigue así un ahorro de combustible y emisiones (hasta un 4% en corta y media distancia [26]) al evitar el funcionamiento de los motores principales en regímenes no eficientes, además de una considerable reducción de ruido. En la industria de los helicópteros encontramos también el ejemplo del prototipo EDAT de Bell, con el reemplazo del rotor de cola por un sistema de cuatro propulsores eléctricos[3].

El siguiente paso cualitativo en el uso de energía eléctrica para reducir las emisiones contaminantes es la arquitectura turboeléctrica, en el que una turbina de gas, alimentada por combustible convencional, mueve un generador eléctrico que a su vez transmite la potencia para que motores eléctricos generen el empuje (Figura 54). Aunque la fuente de energía primaria siga siendo en principio hidrocarburos, esta configuración permite optimizar el régimen de la turbina de gas, dedicada en exclusiva a la generación de energía eléctrica, lo que incrementa de manera significativa su eficiencia. Por otra parte, la propulsión mediante motores eléctricos permite acceder a otras ventajas que se revisarán en la propulsión puramente eléctrica.

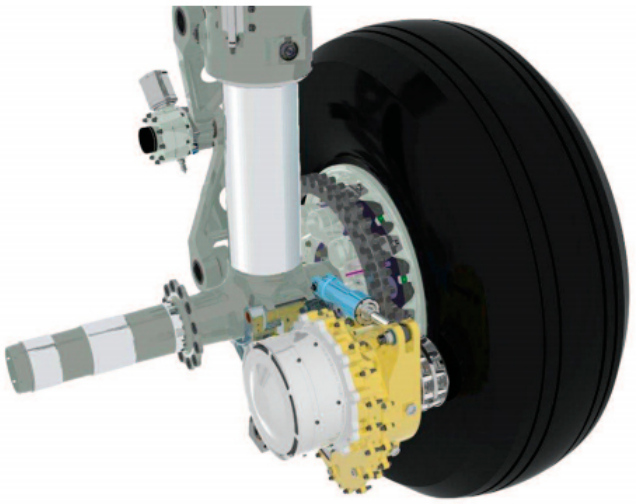

Figura 53. Sistema eTaxi para la propulsión eléctrica de las aeronaves en tierra.

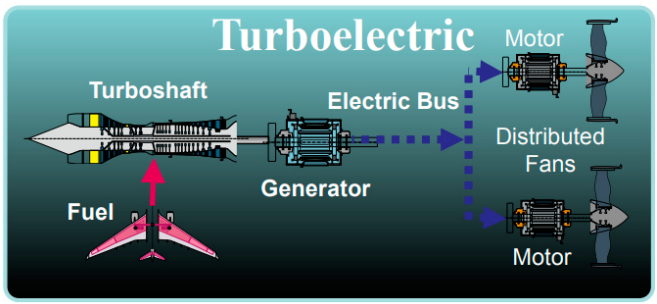

Figura 54. Esquema de la propulsión turboeléctrica [27].

1 https://www.flightglobal.com/air-transport/airbus-switching-a320neo-family-from-mechanical-to-electronic-rudder-control/143203.article

2 Auxiliary Power Unit.

3 https://news.bellflight.com/en-US/193412-the-next-steps-for-bell-s-electrically-distributed-anti-torque

Archivo fotográfico

Figura 53. Fuente SAFRAN.

Si frente a las aeronaves convencionales se mejora la eficiencia, y por tanto se reducen las emisiones, el concepto turboeléctrico evita el principal problema de la propulsión 100% eléctrica: la autonomía, al poder almacenar la misma cantidad de combustible que una aeronave convencional. Por otra parte, se puede mejorar aún más su comportamiento medioambiental recurriendo a combustibles sostenibles, o tratando las emisiones a bordo, como se propone desde el MIT[4], con una reducción potencial del 95% en NOx.

Se han realizado diferentes casos de estudio teóricos sobre la aplicación de arquitecturas turboeléctricas, entre los que destaca el ESAero ECO-150 (Figura 56), que prevé reducir a la mitad el consumo de un Boeing 737-700 en un trayecto equivalente [27]. El futurista N3-X de la NASA (Figura 55), un ala volante con las turbinas de gas en las puntas y sistema eléctrico superconductor, mejoraría la eficiencia energética en un 72% frente al equivalente Boeing 777 [27], aunque el horizonte tecnológico a alcanzar para hacerlo técnicamente viable está muy lejano.

Figura 56. ESAero ECO-150 [50].

Figura 55. NASA N3-X.

Más a corto plazo, se podría esperar la entrada en servicio de propuestas similares al STARC-ABL también de la NASA (Figura 57), un sistema híbrido en el que dos turbofanes convencionales alimentan además un motor eléctrico en la cola del fuselaje. La ingestión de la capa límite del fuselaje permite incrementar la eficacia del propulsor trasero y reducir el consumo en un 10% [27]. Esta estrategia es difícilmente aplicable a un turbofán convencional debido a su necesidad de un flujo de aire central limpio.

Diferentes proyectos buscan ya la aplicación real de sistemas turboeléctricos en proyectos de investigación como el EcoPulse (Figura 58), desarrollado por Daher, Safran y Airbus, que utilizará un motor turbohélice en una doble misión de propulsión convencional y turbogenerador para alimentar 6 motores eléctricos distribuidos en las alas[5]. Este mismo concepto es el que podría desarrollar Embraer, ya a nivel comercial, con su propuesta de transporte militar STOUT[6]. Otro proyecto comercial basado en una arquitectura turboeléctrica, y con un claro reclamo medioambiental añadiendo la plena compatibilidad con SAF, es el BEHA de Faradair[7].

Figura 57 STARC-ABL de NASA.

Figura 58. Proyecto turboeléctrico híbrido EcoPulse.

A pesar de la relevancia de los avances descritos, y de las interesantes posibilidades que abre el concepto turboeléctrico, el denominador común medioambiental de todos los modelos reseñados está en que el origen de la toda la energía utilizada para la propulsión sigue procediendo de la combustión de hidrocarburos.

Figura 59. Proyecto BEHA. Fuente: Faradair.

4 https://news.mit.edu/2021/hybrid-electric-plane-pollution-0114

5 https://www.daher.com/en/the-ecopulse-demonstrator-achieves-its-first-key-milestone/

6 https://www.aviacionline.com/2020/11/embraer-y-la-fuerza-aerea-brasilena-presenten-su-proyecto-de-avion-militar-de-propulsion-hibrida/

7 https://www.faradair.com/

Archivo fotográfico

Figura 55. https://www.nasa.gov/content/hybrid-wing-body-goes-hybrid
Figura 57. https://sacd.larc.nasa.gov/asab/asab-projects-2/starc-abl/
Figura 58. Fuente: Airbus.
Figura 59. Fuente: Faradair.

6.5.2. Híbridos.

El siguiente hito fundamental hacia la sostenibilidad en esta estrategia gradual del transporte aéreo se producirá probablemente con la incorporación de la propulsión eléctrica, durante algunas fases de vuelo al menos, sostenida con baterías o pilas de combustible. Esta arquitectura de propulsión híbrida, en sus diferentes variantes, permitiría por ejemplo aprovechar la mayor energía específica del queroseno para superar fases de alta demanda, como el despegue y ascenso. Reservando el empuje eléctrico para el crucero se eliminarían las dañinas emisiones en altura, con otros efectos negativos asociados a la propulsión a reacción como son las estelas de condensación y la nubosidad inducida.

Existen varios tipos de arquitectura híbrida, cada uno con sus ventajas e inconvenientes, según se combinen diferentes fuentes energéticas y el tipo de motores empleados para la propulsión. De hecho, la optimización y el desarrollo tecnológico necesario para la introducción de estos conceptos híbrido-eléctricos es el objetivo de proyectos de investigación como el europeo Imothep[1]. Las dos configuraciones que vamos a describir son las más habituales, pero se debe tener en cuenta que la gran flexibilidad de los sistemas propulsores y generadores eléctricos permiten combinaciones alternativas o la superposición de ambas.

El sistema híbrido en paralelo mantiene motores turborreactores para lograr el empuje, pero que funcionarían en dos regímenes diferentes según las necesidades: uno de forma convencional con combustible, y el otro movido por motores eléctricos acoplados al eje del primer compresor o hélice. El suministro de energía eléctrica procedería de baterías o pilas de combustible (Figura 60).

Este sistema paralelo tiene la ventaja de mantener intacta la capacidad propulsiva de los motores actuales, así como la autonomía derivada del consumo de hidrocarburos, mientras se reserva el uso de la potencia eléctrica para aquellas condiciones de vuelo más críticas en cuanto al impacto medioambiental. El apoyo eléctrico permitiría además optimizar el tamaño de los motores a reacción, dimensionados en la actualidad para alcanzar el pico de empuje necesario al despegue. Como ejemplo de esta arquitectura se puede señalar el SUGAR Volt (Figura 61), una propuesta de Boeing que estima un ahorro potencial en combustible alrededor del 60% respecto al equivalente convencional [27]. La viabilidad tecnológica de esta propuesta depende del desarrollo de motores y sistemas eléctricos de gran potencia.

Figura 61. Boeing Sugar Volt. Sistema de propulsión híbrida en paralelo [27].

La otra principal opción híbrida consiste en confiar la propulsión exclusivamente a motores eléctricos, que a su vez estarían alimentados alternativamente desde baterías o mediante un motor convencional conectado a un generador eléctrico. A estos sistemas se les denomina híbridos en serie (Figura 62), y comparten con la opción turboeléctrica la ventaja de poder optimizar el punto de diseño del motor con-

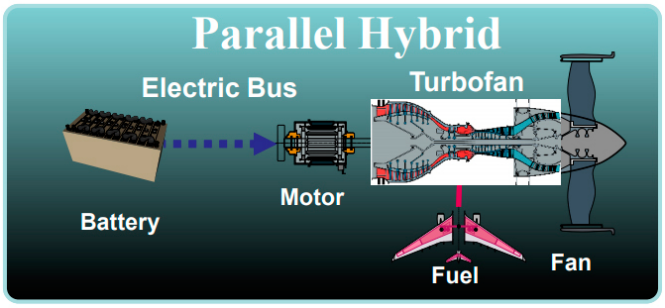

Figura 60. Esquema de la propulsión híbrida en paralelo [27].

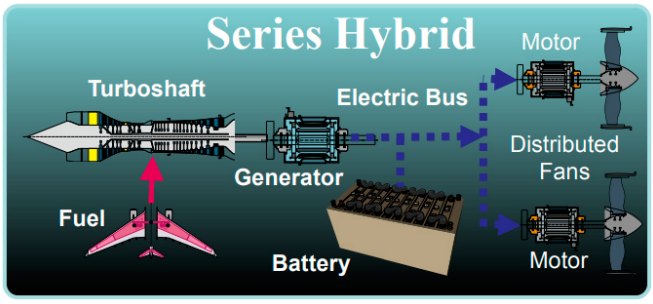

Figura 62. Esquema de la propulsión híbrido en serie [27].

[1] https://www.imothep-project.eu/

vencional, ya sea de combustión interna o turbina de gas, al estar dedicado en exclusiva a la producción de electricidad. Como en la opción anterior, los tramos alimentados por baterías conseguirían la eliminación total de emisiones durante algunas fases del vuelo, aunque el precio a pagar por contar con dos fuentes energéticas en la aeronave es el de añadir complejidad a todo el sistema, lo que dificulta el mantenimiento y aumenta el peso.

La primera prueba en vuelo de una aeronave con esta configuración, el E-star, se remonta a 2011[2] (Figura 63). En la actualidad existen diversas empresas, con proyectos comerciales en desarrollo, que ya han realizado ensayos en vuelo de sistemas propulsores híbridos (Electric EEL de Ampaire en 2019, ver Figura 68, y Voltaero en 2020, ver Figura 67), aunque en aeronaves de baja capacidad y potencia reducida.

Figura 63. E-star (2011).

Figura 64. Dash8-100 Demonstrador Híbrido-Eléctrico. Primer vuelo para 2024.[3]

Mantener el combustible convencional como parte del suministro de energía permite extender el alcance de vuelo de manera significativa, evitando así uno de los principales problemas que encara la propulsión 100% eléctrica. Sin embargo, como le ocurre también a esta, existe todavía mucho trabajo para asegurar la escalabilidad de los sistemas eléctricos a las dimensiones necesarias para vuelos de más de 20 pasajeros. En este último aspecto supuso un serio contratiempo la cancelación del proyecto E-fan X en 2020[4] (Figura 65), promovido por Airbus, Rolls-Royce y Siemens. Este banco de pruebas híbrido en serie abría el camino hacia motores eléctricos de gran potencia[5] (2 MW) y sistemas de gestión electrónica de alta capacidad. Sin embargo, recientemente R&R anunció los primeros ensayos del proyecto PSG1, que retoma su compromiso con el desarrollo de un propulsor híbrido-eléctrico de gran potencia . En el largo plazo esta tecnología podría aplicarse a diseños innovadores como el Airbus E-Thrust[6] (Figura 66).

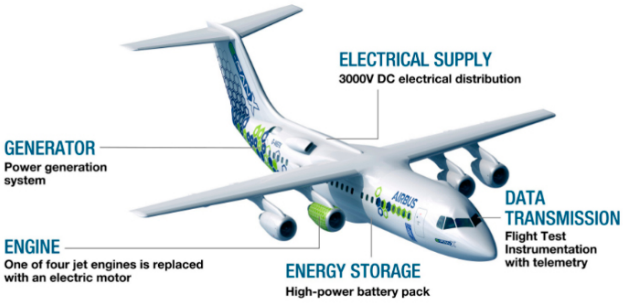

Figura 65. E-Fan X. Banco de pruebas híbrido en un BAe 146.

Figura 66. Airbus E-Thrust. Propuesta conceptual híbrida en serie.

Por último, cabe también destacar dos tipos de estrategias adoptadas en los diferentes proyectos con enfoque híbrido. Por una parte, se trabaja en la incor-

2 https://www.flyingmag.com/news/eadsdiamond-unveil-electric-hybrid/
3 Flight International. Agosto de 2021.
4 https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/electric-flight/e-fan-x.html#ove
5 https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2021/03-06-2021-rr-starts-testing-most-powerful-hybrid-electric-propulsion-system-in-aerospace.aspx
6 https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2019/05/airbus-and-sas-scandinavian-airlines-sign-hybrid-and-electric-aircraft-research-agreement.html

Archivo fotográfico

Figura 63. Fuente: Diamond Aircraft.
Figura 64. Fuente: DHC.
Figura 65. Fuente: Airbus
Figura 66. Fuente: Airbus

poración de la propulsión eléctrica a través de modificaciones en aeronaves regionales convencionales ya existentes, lo que acorta los plazos para su entrada en servicio. Este es el plan de Ampaire, cuyos objetivos son la remotorización del Grand Caravan EX (Figura 73) y su Eco Otter SX de 19 plazas y 370 km de autonomía[7]; o el demostrador de tecnología híbrida-eléctrica de De Havilland Canada y P&WC basado en el Dash8-100 (Figura 64). Por otra, proyectos más ambiciosos diseñan aeronaves a partir de cero para aprovechar al máximo las ventajas de la propulsión híbrida, como la propuesta de Zunum, con capacidad para 12 pasajeros y 1.300 km de alcance[8]. No obstante, y como ejemplifica este último caso, las ventajas evidentes de diseño al partir de cero suponen, por otra parte, un gran reto a la hora de asegurar la viabilidad empresarial de proyectos basados en tecnologías innovadoras.

Figura 67. Demostrador híbrido-eléctrico de Voltaero.

Figura 68. Ensayo en vuelo del Electric EEL con propulsión híbrida.

Mirando un poco más a largo plazo, el consorcio internacional FUTPRINT50[9], financiado por la Unión Europea, busca el desarrollo de las herramientas y tecnologías necesarias que permitan la entrada en servicio de un avión híbrido-eléctrico de 50 plazas antes de 2040. En cualquier de los escenarios sobre la mesa, el camino hacia un transporte aéreo sostenible parece muy probable que cuente, al menos como una parada intermedia, con la participación del concepto de propulsión híbrida.

7 https://www.ampaire.com/vehicles/Eco-Otter-SX-Aircraft
8 https://zunum.aero/aircraft/
9 FUTPRINT50: Future propulsion and integration: towards a hybrid-electric 50-seat regional aircraft. www.futprint50.eu

Archivo fotográfico

Figura 67. Fuente: Voltaero
Figura 68. Fuente: Ampaire.

6.5.3. Baterías.

La evolución en etapas de la electrificación de la aviación la iniciamos con el concepto de aviones más eléctricos (MEA), para pasar después a las configuraciones híbridas y, como no podía ser de otra manera, llegar ahora a la categoría de los aviones 100% eléctricos o *All Electric Aircraft* (AEA). En esta arquitectura la energía necesaria para el vuelo se almacena en baterías o se genera en pilas de combustible, desde donde se transmite directamente a motores eléctricos que generan el empuje (Figura 69).

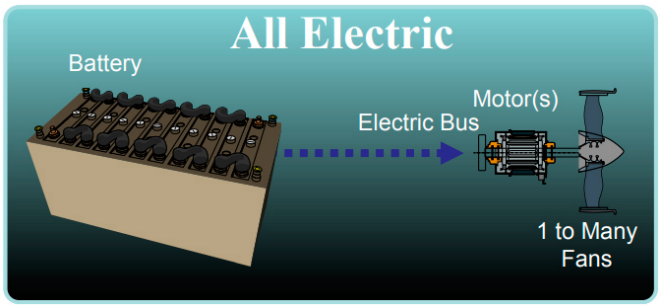

Figura 69. Esquema de la propulsión 100% eléctrica [27].

Al igual que la híbrida en serie, esta configuración permite la distribución de la propulsión de forma beneficiosa para el diseño de la aeronave. Al contrario que con las aeronaves con turborreactores, no penaliza repartir el empuje entre varios motores eléctricos relativamente pequeños. Más bien al contrario, ya que limita su tamaño a máquinas del orden de 1 MW, lo que simplifica su implementación, la transmisión de potencia eléctrica y los sistemas electrónicos necesarios.

Figura 70. NASA X-57. Demostrador eléctrico.

Otra ventaja potencial de los propulsores eléctricos es que sus dimensiones permiten situarlos en el extremo del ala, lo que abriría la posibilidad de reducir la resistencia inducida al contrarrestar los vórtices de punta. Estas ventajas se pondrán a prueba con el avión experimental de la NASA X-57, actualmente en montaje (Figura 70).

El avance en la electrificación de la aviación, así como los tiempos y segmentos que ocupan las diferentes tecnologías, vienen condicionados en gran medida por un parámetro crucial: la energía específica de cada sistema de almacenamiento de energía. Este coeficiente nos indica la cantidad de energía contenida por unidad de masa, y al comparar los valores de la Tabla 4 se constata el principal desafío de la aviación eléctrica con baterías: el combustible convencional de hidrocarburos contiene al menos 40 veces más energía por unidad de peso, con la consecuencia directa de que las aeronaves eléctricas a batería poseen en la actualidad una limitada autonomía y capacidad de transporte.

	Queroseno (Jet A-1, a 15 oC)	**Batería de Ion-Litio**	**Hidrógeno gaseoso** (700 bar, 0 oC)	**Hidrógeno líquido** (20 K)
Energía específica (W•h/kg)	12.386	100-265	33.333	33.333
Densidad energética (W•h/L)	9.909	250-670	1.400	2.367

Tabla 4. Comparativa de diferentes vectores energéticos para la aviación comercial (elaboración propia a partir de diversas fuentes [1]).

[1] IATA 2015. Guidance Material for Sustainable Aviation Fuel Management 2015 - https://www.cei.washington.edu/education/science-of-solar/battery-technology/ - https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/combustible-hidrogeno. - https://energies.airliquide.com/resources-planet-hydrogen/how-hydrogen-stored

Archivo fotográfico

Figura 70. https://www.nasa.gov/specials/X57/

En diferentes estudios se ha pretendido determinar a partir de qué umbrales de energía específica se pueden pensar en desarrollar soluciones eléctricas viables para las diferentes categorías de aviación comercial. Esta carrera de desarrollo, según algunas opiniones [74], se lanzaría a partir de baterías que alcanzasen los 400 W•h/kg.

Sin embargo, para el caso de la aviación general y regional, con avionetas y pequeñas aeronaves de transporte, el vuelo 100% eléctrico parece ya viable con las capacidades actuales de las baterías de Ion-Litio. Así lo demuestran ejemplos como el entrenador Alpha Electro de Pipistrel en 2020, que alcanzó la primera certificación de tipo por parte de EASA de una aeronave ligera de nuevo diseño 100% eléctrica[2] (Figura 71); o las remotorizaciones eléctricas de aeronaves ya existentes como la de un De Havilland Beaver para 6 pasajeros (Harbour Air y Magnix, primer ensayo en vuelo en 2019[3]. Figura 72) o la de un Cessna Grand Caravan con hasta 9 pasajeros (Aerotec y Magnix, primer vuelo completado en 2020. Figura 73). En la misma línea se ha presentado el proyecto P-Volt de Tecnam, con motores Rolls-Royce[4].

Figura 71. Alpha Electro de Pipistrel. Entrenador eléctrico certificado por EASA en 2020.

Las baterías actuales parecen también capaces de alimentar los eVTOL[5], pequeñas aeronaves destinadas al transporte aéreo urbano, cuyo desarrollo es en la actualidad una auténtica carrera con multitud de proyectos ya en fase de ensayos en vuelo. En ella participan desde los grandes constructores aeronáuticos (propuestas de Airbus[6] o Boeing[7]) hasta nuevos actores con experiencia en movilidad (Uber[8], Hyundai) y una multitud de start-ups (Archer Aviation, Joby Aviation, Volocopter, Lilium).

Figura 72. DHC-2 De Havilland Beaver de Harbour Air remotorizado eléctrico por Magnix (2019).

Para dar el salto y propulsar aeronaves del orden de los 100 pasajeros se estima que serán necesarias baterías de 1.000 W•h/kg y arquitecturas híbridas. Finalmente, este tipo de aeronaves con una propulsión 100% eléctrica precisaría de avances que elevasen la energía específica de las baterías hasta los 1.800 W•h/kg [52]. Este umbral tecnológico se presenta lejano, aunque se está avanzando con rapidez en alternativas como las tecnologías de litio-sulfuro (Oxis Energy anunció baterías de aplicación comercial con 471 W•h/kg, aunque parece enfrentar serios problemas financieros), baterías de estado sólido (Cuberg ha demostrado células de litio con 369 W•h/kg para aplicaciones aeronáuticas[9]) o incluso baterías con tecnología de grafeno [52].

Figura 73. eCaravan de AeroTec y Magnix.
Eléctrico con baterías, alcance de 180 km y hasta 9 pasajeros.

Otro aspecto crucial a desarrollar en la aviación eléctrica es la distribución y gestión de las altas potencias necesarias, de forma eficiente y segura,

2 https://actualidadaeroespacial.com/la-easa-certifica-el-primer-avion-totalmente-electronico/
3 https://www.bbc.com/news/business-50738983
4 Flight International. Abril de 2021.
5 Electric vertical takeoff and landing
6 https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/urban-air-mobility/cityairbus.html
7 http://www.boeing.com/NeXt/index.html
8 https://www.uber.com/us/en/elevate/uberair/
9 https://cuberg.net/product/

que se relaciona directamente con otro parámetro fundamental para los equipos eléctricos: la potencia específica (kW/kg). Una propuesta alternativa frente a la tecnología actual se basa en el carburo de silicio, que facilitaría el diseño de componentes de mayor potencia. La tecnología criogénica, a menudo incluida en las previsiones para futuras aeronaves eléctricas, permitiría mejorar substancialmente las capacidades de los motores y sistemas eléctricos. Su posible aplicación en el entorno aeronáutico parece aún lejana [52], aunque, como veremos más adelante, la introducción del hidrógeno líquido como combustible podría cambiar esta situación.

Las propuestas comerciales más ambiciosas presentadas para el transporte 100% eléctrico con baterías abarcan desde transportes regionales como el eFlyer 800 (Figura 77) o el Eviation Alice, con participación española, ventas ya firmadas y primer vuelo planeado para finales de 2021[10] (Figura 76); hasta aeronaves comerciales de 186 pasajeros (Wright Electric, motores distribuidos de 2 MW ensayados en banco en septiembre de 2021[11], y entrada en servicio estimada para 2030, Figura 74).

Una de las propuestas eléctricas con baterías más prometedoras es el ES-19 de Heart Aviation, con 19 asientos y 400 km de alcance. Recientemente ha recibido importantes inversiones y compromisos de compra de Finnair y United Airlines[12], y su entrada en servicio está prevista para 2026 (Figura 75).

Figura 74. Propuesta eléctrica con baterías de Wright Electric para 186 pax (EIS 2030).

Las capacidades de la aviación 100% eléctrica en el corto-medio plazo, incluso en el mejor de los escenarios, son sin duda modestas cuando se compara con el estado actual de la aviación comercial. Sin embargo, se debe tener en cuenta el enorme potencial de desarrollo propio de las nuevas tecnologías, y su capacidad para reducir el impacto medioambiental de la aviación comercial regional y de pasillo único, cu-

Figura 75. ES-19. Proyecto 100% eléctrico con baterías de Heart Aviation para 19 pasajeros y 400 km (EIS 2026).

10 https://www.weflywright.com/technology#motors

11 https://www.reuters.com/business/aerospace-defense/dhl-orders-12-eviation-planes-plans-first-electric-network-2021-08-03/

12 https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-07-13/united-air-mesa-ink-deal-for-up-to-200-small-electric-planes

yas emisiones de CO_2 en 2018 supusieron un 58% del total de la aviación comercial [33]. Para alcanzar este objetivo será necesario sin duda apoyos regulatorios y políticos como el de Suecia y Noruega, donde se ha creado una plataforma integrada para el desarrollo de la aviación eléctrica (NEA[13]). En este último país todos los vuelos de corto alcance deberán ser 100% eléctricos a partir de 2040.

un salto tecnológico revolucionario. Volviendo a la Tabla 4, se explica ahora el enorme interés suscitado por el hidrógeno como vector energético. Ya sea a través de pilas de combustible, alimentando una aeronave eléctrica, o directamente en turborreactores, el hidrógeno se presenta como una solución directa al problema del almacenamiento energético.

Figura 76. Eviation Alice, com motores Magnix.
Aeronave regional eléctrica para 9 pasajeros y 800 km de alcance (EIS 2024).

El paso hacia capacidades mayores, con aeronaves de doble pasillo y larga distancia, parece por ahora una posibilidad muy remota; y las mejoras necesarias en la energía específica de las baterías requerirían de

Como veremos a continuación, y a pesar de sus propias limitaciones, esta vía abre nuevas y prometedores posibilidades de mejorar la sostenibilidad de la aviación comercial.

Figura 77. Bye Aerospace eFlyer 800 con motores SAFRAN,
propuesta eléctrica para 8 pasajeros y 900 km.

13 Nordic Network for Electric Aviation

Archivo fotográfico

Figura 77. https://byeaerospace.com/bye-aerospace-unveils-8-seat-all-electric-eflyer-800/

6.6. EL HIDRÓGENO

6.6.1. Vector energético sostenible.

El hidrógeno se ha propuesto, desde hace décadas, como un posible combustible alternativo al uso de hidrocarburos en el transporte. Una de sus características principales, que explica en gran parte este interés, consiste en que su combustión produce únicamente agua como residuo, en teoría, con la enorme ventaja medioambiental que esto supone.

Es importante aclarar que, aun siendo el elemento más abundante del universo, el hidrógeno no se encuentra disponible directamente en la Tierra, por lo que no se le puede considerar una fuente de energía, sino un vector energético. Esto quiere decir que para conseguir este combustible es necesario invertir antes una cierta cantidad de energía, por ejemplo en la electrólisis del agua, por lo que el hidrógeno es sencillamente una forma de almacenar energía ya existente. Y esto es fundamental a la hora de entender que el hidrógeno como combustible, por sí mismo, no implica transporte sostenible. Esto dependerá del origen de las fuentes de energía utilizadas, y de las emisiones asociadas a su ciclo completo de elaboración, lo mismo que sucede con la propulsión con baterías eléctricas.

Si se utilizan fuentes renovables y un proceso sin impacto medioambiental se podrá obtener lo que se conoce como hidrógeno verde o limpio, que sí implica un gran paso hacia un transporte sostenible. Hay que tener en cuenta que la producción industrial de hidrógeno, hoy en día, se realiza principalmente a partir de carbón, hidrocarburos o gas natural, sin ofrecer en estos casos ventajas medioambientales (*grey hydrogen*). Un caso intermedio, promovido en cierta medida por las autoridades políticas en Europa, es el del *blue hydrogen*[1], en cuyo proceso de obtención se asume la emisión de CO_2, pero que inmediatamente es capturado y almacenado (CCS[2]). El recurso a esta vía de producción se contempla como una solución temporal para reducir el precio de producción del hidrógeno de bajas emisiones, todavía poco competitivo si se produce por electrólisis, y asegurar un volumen suficiente de suministro. Existen otras modalidades de producción de hidrógeno, cada uno con su propio impacto medioambiental y el correspondiente color identificativo[3].

El desafío de reducir los costes de producción del hidrógeno verde ha sido la primera de las iniciativas para la promoción de las energías limpias del gobierno de Estados Unidos dentro del programa *Energy Earthshots*, anunciado en junio de 2021. El llamado *Hydrogen Shot* tiene como objetivo producir hidrógeno verde un 80% más barato que en la actualidad, hasta alcanzar 1 $/kg, en el plazo de una década[4]. Como se puede apreciar, el hidrógeno se está imponiendo como una de las apuestas de descarbonización más relevantes a nivel global. En el ámbito del transporte aéreo, este apoyo institucional para la reducción de los costes de producción y operación para tecnologías basadas en hidrógeno verde es crítico, de modo que sean económicamente viables las inversiones, por ejemplo, en aeronaves con nuevos sistemas propulsivos.

La Tabla 4 explica otro de los motivos por los que el hidrógeno resulta tan interesante en aviación sostenible: frente a los problemas de almacenado de energía de las baterías, cada kg de H_2 tiene 2,7 veces más energía que su equivalente de combustible convencional Jet A1. Esto elimina, en principio, el problema de autonomía que aquejaba a la aviación eléctrica. No obstante, como también vemos en esa tabla, la densidad energética del H_2 —la cantidad de energía almacenada por litro— es al menos cuatro veces inferior a la del queroseno. Esto implica que, aun contando con mayor energía específica, las aeronaves que utilicen hidrógeno como combustible necesitarán mayor espacio de almacenaje. Además, las geometrías y equipamientos necesarios para alojar H_2 de forma concentrada en depósitos criogénicos (-253 oC) o de alta presión (350 o 700 bar) suponen un desafío para la configuración y dimensiones de las aeronaves comerciales actuales. Estos tanques, más complejos y pesados, determinarán en cada caso de aplicación si el uso de un combustible

1 https://www.greentechmedia.com/articles/read/eu-sets-green-hydrogen-targets-now-blue-hydrogen-has-to-keep-up
2 Carbon capture and sequestration
3 https://www.enapter.com/hydrogen-clearing-up-the-colours
4 https://www.energy.gov/articles/secretary-granholm-launches-hydrogen-energy-earthshot-accelerate-breakthroughs-toward-net

más ligero como el H_2 ahorra peso total en el avión. Se ha estimado que el peso al despegue de una aeronave propulsada por combustión de hidrógeno será, dependiendo de su misión y configuración, entre un 4,4% mayor y un 14,8% menor que su equivalente convencional [3].

Por otra parte, la implantación del hidrógeno como combustible de aviación exigirá una gran inversión en infraestructura aeroportuaria y de distribución para permitir el repostaje. Aunque ya hay aeropuertos con cierta disponibilidad (Hamburgo, Memphis) sería necesario un gran empuje político para hacer el hidrógeno accesible como combustible de uso rutinario. En este aspecto cabe destacar el ejemplo de países que fomentan la generalización del uso de este combustible, como Alemania, Francia o Japón, donde existen incipientes redes de repostaje para el transporte por carretera. Este último país lanzó ya en 2017 una estrategia nacional para alcanzar una economía del hidrógeno, con hitos en el abaratamiento de su producción, desarrollo tecnológico y construcción de infraestructruras que faciliten su distribución.

En esta misma dirección, el 8 de julio de 2020 la Comisión Europea lanzó la Alianza Europea del Hidrógeno Limpio [11], que pone en marcha una serie de iniciativas para promover el uso de este vector energético con origen sostenible. Entre otros objetivos se establece el de multiplicar por 12 la capacidad actual de producción de H_2 mediante electrólisis para 2024. Esta decisión se enmarca en el compromiso de alcanzar una sociedad europea con cero emisiones netas de CO_2 en 2050, para lo que el H_2 sostenible se presenta como una herramienta fundamental a la hora de descarbonizar la industria y el transporte. España también se ha incorporado a este impulso estratégico aprobando en octubre de 2020 su propia hoja de ruta para la implantación del hidrógeno renovable, que incluye la instalación de hidrogeneras en los principales aeropuertos[5]. Para hacerlo posible, el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia[6] servirá de marco para proyectos que desarrollen la cadena de valor del hidrógeno verde a nivel nacional. En 2021 Reino Unido también anunció su propia es-trategia nacional para la promoción del hidrógeno.

El uso del hidrógeno en aviación se puede aplicar con dos tipos de tecnologías: las pilas de combustible, alimentando un sistema de propulsión eléctrica, y la combustión directa en motores convencionales. Cada una de estas opciones tiene grandes ventajas, pero también algunos inconvenientes que se necesita resolver antes de su aplicación práctica. Además, ya vimos en el capítulo de combustibles sostenibles que el hidrógeno era una parte fundamental en el proceso de sintetización de los *synfuels*. Ante este abanico de posibles aplicaciones parece claro que, de una forma u otra, este vector energético va a ser una parte importante del futuro sostenible de la industria aeronáutica.

Figura 78. Planta de producción de hidrógeno sostenible en Fukushima (marzo 2020).

5 https://www.lamoncloa.gob.es/consejodeministros/Paginas/enlaces/061020-enlace-hidrogeno.aspx

6 https://planderecuperacion.gob.es/

Archivo fotográfico

Figura 78. https://www.japan.go.jp/tomodachi/2020/earlysummer2020/hydrogen.html

6.6.2. Pilas de combustible.

Las pilas de combustible convierten la energía química de un compuesto en electricidad, sin recurrir a la combustión. En el caso de las de hidrógeno se obtiene como producto de salida únicamente agua (Figura 79), que se puede almacenar para su reutilización en la aeronave, o descargarla cuando no suponga ningún riesgo medioambiental, evitando la formación de nubosidad inducida.

La potencia eléctrica generada por este sistema se puede aplicar de manera equivalente al uso de baterías en las diferentes versiones de electrificación e hibridación expuestas en el capítulo anterior. Esta tecnología se encuentra en un grado de madurez avanzado, con aplicaciones comerciales consolidadas en el sector del transporte terrestre, tanto en automóviles (el Toyota Mirai ha vendido más de 10.000 unidades desde 2014, y disfruta de una autonomía de 500 km y repostaje en 3 minutos[1]) como en autobuses y otros vehículos industriales.

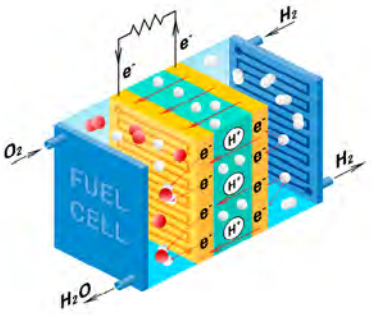

Figura 79. Funcionamiento de una pila de hidrógeno.

En cuanto a su aplicación aeronáutica, los desafíos de la propulsión eléctrica se mantienen con las pilas de hidrógeno, al igual que los beneficios para el medioambiente y los potencialmente derivados de una propulsión distribuida. Sin embargo, ahora se añade una considerable ventaja: el almacenaje de energía en forma de hidrógeno elimina en gran medida las limitaciones de autonomía de las baterías. Una posible sinergia de diseño con gran potencial, objeto de investigación en el proyecto ASCEND de Airbus[2], consiste en el aprovechamiento del sistema criogénico necesario para almacenar hidrógeno líquido de forma que, además, haga posibles sistemas y motores eléctricos superconductores (Figura 80).

El primer ensayo en vuelo de una aeronave propulsada por pilas de hidrógeno se realizó en España en 2008[3], de la mano de Boeing (R&T-Europe) y su adaptación híbrida de un Diamond Dimona, alimentado en paralelo también con baterías (Figura 81). El primer vuelo soportado exclusivamente por pilas de hidrógeno lo realizó el Antares DLR-H2 en 2009. Entre otros proyectos con propulsión de hidrógeno que se han llevado a cabo desde entonces se puede destacar el HY4, banco de pruebas para el desarrollo de un tren propulsor de hidrógeno con intención comercial (Figura 82). H2FLY, uno de los responsables de esta aeronave, forma parte del proyecto MAHEPA[4], para el estudio de soluciones híbridas eléctricas modulares. Recientemente anunció además su colaboración con Deutsche Aircraft para desarrollar una versión propulsada por hidrógeno del ya mencionado D328eco (Figura 44), y que podría aprovechar también la tecnología de tanques reemplazables (Figura 88) de Universal Hydrogen[5].

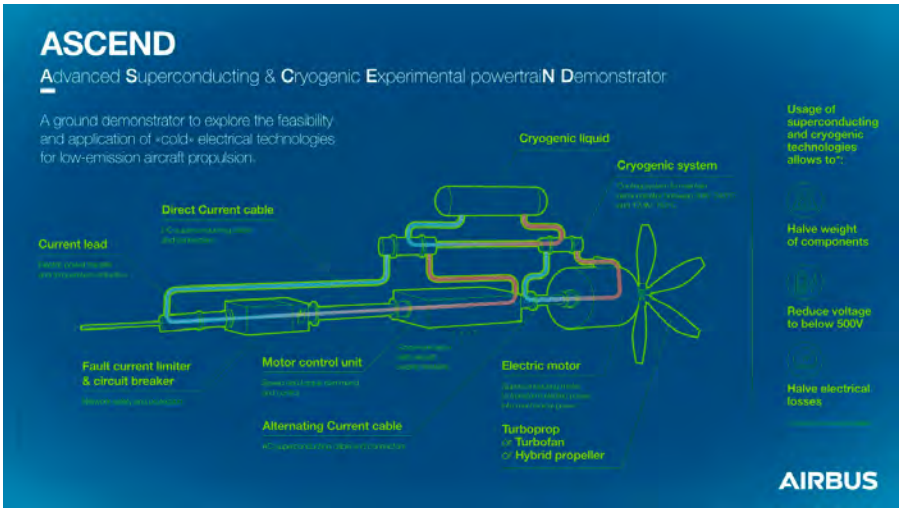

Figura 80. Proyecto de investigación ASCEND de AIRBUS, combinando criogenia y superconductividad.

1 https://www.toyota.es/world-of-toyota/articles-news-events/new-toyota-mirai
2 https://www.airbus.com/newsroom/stories/ascend-cryogenics-superconductivity-for-aircraft-explained.html?
3 https://www.abc.es/ciencia/abci-boeing-prueba-exito-espana-primer-avion-pila-hidrogeno-200804040300-1641769545030_noticia.html
4 Modular Approach to Hybrid Electric Propulsion Architecture
5 https://www.deutscheaircraft.com/news/deutsche-aircraft-and-universal-hydrogen-partner-on-zero-emissions-regional-aviation

Archivo fotográfico

Figura 80. Fuente: Airbus

Figura 81. Boeing. Demostrador híbrido de pilas de hidrógeno (2008).

Figura 82. HY4. Propulsión exclusiva con pilas de hidrógeno (2016).

La autonomía de vuelo extendida que ofrece la tecnología de pilas de hidrógeno es la ventaja competitiva que esgrimen los eVTOL de Skai[6] o Piasecki[7]; al igual que la propuesta para remotorizar aeronaves regionales de ZeroAvia (Figura 83), con una capacidad típica de hasta 19 pasajeros y 900 km de alcance[8]. Para ello desarrollará un tren propulsor de 600 kW que probará en la plataforma Dornier228, la misma seleccionada por la compañía MTU y el DLR para su propio motor eléctrico con pilas de hidrógeno[9].

ZeroAvia, que en 2021 ha ensayado en tierra este nuevo propulsor, ya probó en 2020 una primera versión de su propulsión eléctrica con pilas de hidrógeno mediante el ensayo en vuelo de un Piper M-class de 6 pasajeros[10]. Ese mismo año también realizó una prueba del mismo modelo alimentado con baterías.

Esta decisión de avanzar hacia la aviación sostenible por la vía del hidrógeno, frente a la opción eléctrica con baterias, parece ser parte de una tendencia más general. Así ha sido el caso también en otros proyectos de transporte regional como el Fresson[11], o la nueva apuesta de Pipistrel[12].

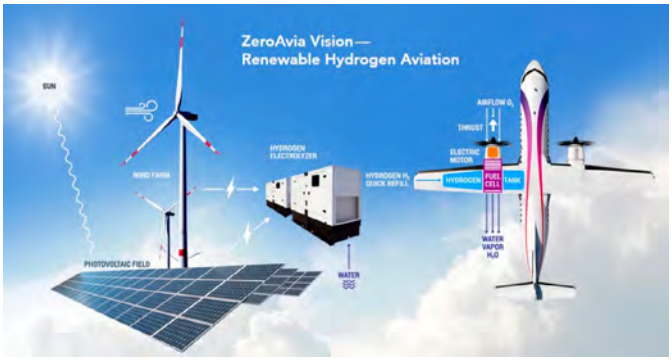

Figura 83. Ciclo del hidrógeno para una aviación sostenible con pilas de combustible.

Por otra parte, el futuro de los motores alimentados por pilas de hidrógeno no está limitado a este tipo de segmentos, sino que tiene la capacidad para propulsar aeronaves de gran capacidad como la propuesta ZEROe Pod de Airbus[13]. Esta configuración, con góndolas que albergarían tanto el hidrógeno como los motores eléctricos, podría beneficiarse de diferentes soluciones de diseño ya mencionadas, como los tanques reemplazables o la sinergia criogenia-superconducción (Figura 84).

Figura 84. Diseño conceptual ZEROe Pod, con propulsión distribuida con pilas de hidrógeno.

A modo de resumen, y como demuestra la actual ola de anuncios y proyectos, las pilas de hidrógeno son una opción disponible con cero emisiones y alta capacidad energética que, además, abre nuevas posibilidades para configuraciones híbridas. Esto es particularmente interesante para el caso de su combinación con motores de combustión de hidrógeno.

6 https://www.skai.co/
7 https://evtol.com/news/hypoint-piasecki-evtol-hydrogen-fuel-cell-systems/
8 https://www.zeroavia.com/19-seater-release
9 https://fuelcellsworks.com/news/dlr-and-mtu-aero-engines-research-aircraft-propulsion-using-fuel-cells/
10 https://www.zeroavia.com/press-release-25-09-2020
11 https://www.cranfieldaerospace.com/2021/project-fresson-hydrogen/
12 Flight International. Abril 2021.
13 https://www.airbus.com/newsroom/stories/hydrogen-pod-configuration.html

Archivo fotográfico

Figura 83. Fuente: ZeroAvia
Figura 84. Fuente: Airbus

6.6.3. Combustión directa.

La propulsión con motores a reacción de hidrógeno es una solución que se ha mantenido durante años como un potencial substituto a la convencional basada en hidrocarburos. De hecho, el primer motor a reacción construido en 1937 (von Ohain) utilizó inicialmente este combustible. A pesar de algún ensayo en EE. UU. en los años 50, y de numerosos estudios de viabilidad en los años 70[1], hubo que esperar hasta 1988 para que se produjese el primer ensayo en vuelo de una aeronave comercial parcialmente propulsada por motores turborreactores de hidrógeno, con el demostrador Tupolev Tu-155 (Figura 85).

Como ya hemos señalado, la reacción de hidrógeno con oxígeno produce agua como resultado, con la enorme ventaja medioambiental de conseguir una combustión sin emisiones de CO_2. Sin embargo, frente a las pilas de combustible, la utilización directa de hidrógeno en motores a reacción presenta algunos inconvenientes, al producirse óxidos de nitrógeneo (NOx), y liberarse además el H_2O directamente en la atmósfera con el consiguiente riesgo de formación de estelas de condensación.

Para mitigar las emisiones de NOx, fruto de las altas temperaturas alcanzadas en la cámara de combustión, se están desarrollando investigaciones que permitirían reducirlas de forma significativa. Nuevas tecnologías en la alimentación de la cámara (*micromix combustion technology*) permiten preveer reducciones del orden del 66% [62] comparado con motores convencionales avanzados. Otras estimaciones sitúan el potencial de estas reduciones en el 80%[2].

Por otra parte, la emisión en altura de vapor de agua -un gas de efecto invernadero- sería 2,6 veces mayor con motores de hidrógeno [3], y podría inducir además nubosidad asociada y el consiguiente impacto sobre el calentamiento global. Sin embargo, diversos estudios preveen que los microcristales que las conforman serían menos numerosos y de mayor tamaño que con la combustión de hidrocarburos fósiles, ventaja compartida con los SAF, y su efecto negativo total al menos un 11% menor [62]. Medidas adicionales, como cambios en el perfil de altitud de vuelo, podrían contribuir significativamente a mitigar este problema. En cualquier caso, como ya se ha señalado, estos efectos negativos más allá del CO_2 necesitan todavía más investigación para entender mejor sus dinámicas e impactos medioambientales.

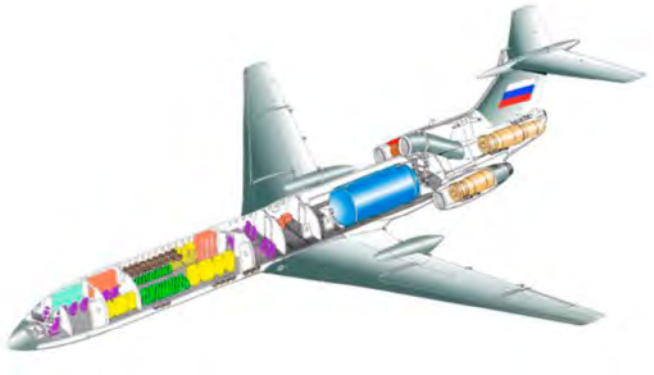

Figura 85. Modelo experimental Tupolev 155 propulsado por hidrógeno líquido (depósito en azul) (1988).

El interés más reciente en esta modalidad de propulsión se puede conectar con el estudio *Cryoplane* [3], publicado en 2003 y financiado por la Unión Europea con la participación de Airbus entre otras entidades públicas y privadas. En este proyecto se revisó de forma sistemática la viabilidad de una motorización por combustión directa de hidrógeno para la aviación comercial. La principal conclusión confirmaba que no existía ninguna barrera técnica identificable que impidiese desarrollar esta configuración. No se estimó que implicase penalización alguna por peso o alcance, pero sí la necesidad de un mayor volumen de almacenaje, para lo que se propusieron diferentes soluciones de diseño.

Desde el punto de vista económico se insistía en la necesidad de un fuerte apoyo, tanto económico como regulatorio, por parte de las autoridades políticas para lanzar un cambio de este calibre en la industria aeronáutica. Por último, y conectado con el punto anterior, se confirmaban las enormes ventajas del hidrógeno en el ámbito de la sostenibilidad, lo que justificaría su respaldo.

Otro aspecto despejado por el proyecto *Cryoplane* fue el de la seguridad en aeronaves con este tipo de combustible, constatándose que sería cuando menos tan seguras como las que utilizan queroseno.

1 G. D. Brewer

2 https://leehamnews.com/2020/09/18/bjorns-corner-the-challenges-of-hydrogen-part-9-hydrogen-gas-turbines/

Archivo fotográfico

Figura 85. https://www.globalsecurity.org/military/world/russia/tu-155.htm

Otros estudios posteriores apuntan incluso a una mayor seguridad en el caso de aeronaves alimentadas con hidrógeno líquido [22].

Figura 86. AIRBUS. Iniciativa ZEROe para propulsión por combustión de hidrógeno.

En septiembre de 2020 Airbus recuperó su apuesta por la propulsión con combustión de hidrógeno al lanzar el ambicioso programa ZEROe ya mencionado, compuesto inicialmente por tres propuestas conceptuales para aeronaves de corto y medio alcance (Figura 86). El hidrógeno líquido se utilizaría no solo para alimentar los turborreactores responsables de la propulsión, sino también para proporcionar toda la energía eléctrica necesaria a través de pilas de hidrógeno. Esta hibridación limitada, que aprovecha las ventajas de las pilas de combustible y permite optimizar los motores, responde plenamente al concepto ya descrito de avión más eléctrico. Aunque más que un programa comercial se trata en realidad de un marco de investigación, se prevén demostradores en vuelo para 2025, y una hipotética entrada en servicio de este tipo de aeronaves entorno al 2035.

La viabilidad de proyectos de esta envergadura dependerán, en gran medida y como ya se ha señalado, del impulso político y social para respaldar su desarrollo e implementación. En este aspecto, es incontestable que la generalización del hidrógeno en aviación sería una herramienta de gran valor en la lucha contra el cambio climático, lo que justificaría semejante apuesta disruptiva. De hecho, si se revisa la Figura 9, se puede comprobar que Airbus ha centrado sus propuestas en el sector más contaminante en términos de emisiones de CO_2.

Hoy en día todo apunta a que sí existe esa voluntad e impulso para hacer realidad una aviación más sostenible. Además de las iniciativas ya señaladas, en 2014 se lanzó la iniciativa público-privada *Fuel Cell and Hydrogen 2*, y desde 2018 el proyecto *EnableH2*[3] también con financiación pública europea, que buscan definir y avanzar las tecnologías para el uso comercial de sistemas de propulsión basados en el hidrógeno líquido. Su objetivo es el de demostrar, en las condiciones actuales, la viabilidad técnica y económica para alcanzar vuelos con cero emisiones de CO2 y un mínimo impacto por NOx. Francia, por su parte, financia el proyecto *Hyperion*, marco en el que Safran, Airbus y Ariane Group desarrollarán la tecnología necesaria para un futuro motor de combustión de hidrógeno criogénico[4].

En el año 2021 se ha confirmado la progresión hacia una aviación propulsada por hidrógeno. Los anuncios se suceden, e incluso nuevos desarrollos de turborreactores como el RISE de CFM ya mencionado (Figura 87) incluirán una versión de hidrógeno[5]. No cabe duda de que los problemas aun por resolver no son despreciables, tanto en el aspecto técnico como en la logística necesaria. Sin embargo, como ya señalaban *Fuel Cells and Hydrogen 2* y el programa *Clean Sky 2* en un estudio conjunto de 2020, los factores políticos, tecnológicos y económicos parecen alineados para hacer realidad el enorme potencial en el ámbito de la sostenibilidad de este vector energético [28].

Figura 87. Propuesta de motor con rotor abierto RISE, compatible con SAF e hidrógeno.

Figura 88. Infograma de repostaje con los tanques modulares de Universal Hydrogen.

3 https://www.enableh2.eu/

4 Flight International. Junio de 2021.

5 https://www.cfmaeroengines.com/wp-content/uploads/2021/07/CFM_RISE_Whitepaper_Media.pdf

Archivo fotográfico

Figura 86. https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe.html
Figura 87. Fuente: cfm aeroengines
Figura 88. https://www.hydrogen.aero/about

6.7. EL RUIDO

El origen del ruido en la aviación proviene de las operaciones realizadas en el aire, de las operaciones en tierra y de operaciones mixtas. Se puede encontrar oportunidades de mitigación del ruido considerando distintos aspectos: tecnología, mejoras operacionales, mejor planificación de uso del espacio, restricciones operacionales y un quinto relacionado con una mejor comunicación y compromiso de la comunidad [73], basado en el enfoque equilibrado de OACI[1].

En el 2019 se celebraron 50 años desde la adopción de los primeros estándares globales para certificación de ruido de aeronaves, estándares que han llevado a los aviones a ser un 75% más silenciosos que el primer jet y, este progreso continúa de modo que los aviones más nuevos del mercado tienen, en promedio, una huella de ruido que es del 30-50% a la de los aviones que están reemplazando gracias al nuevo motor y diseño y tecnología de fuselajes. Se han conseguido grandes progresos [72]: la siguiente imagen muestra la reducción considerable de la huella del avión Boeing 787-8 comparándola con la de su predecesor al que sustituye, 2,4 km^2 menor.

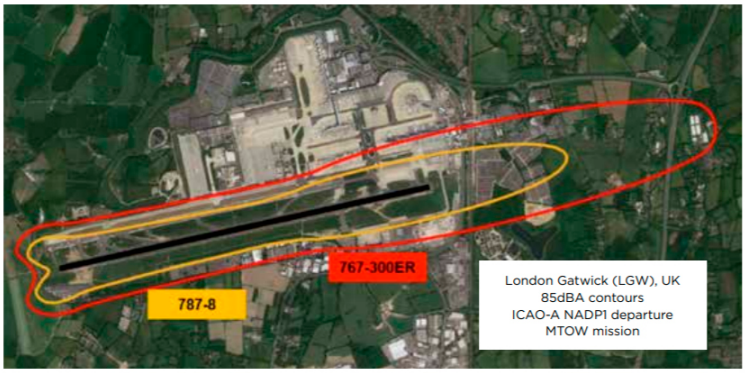

Figura 90. Huella del ruido [72].

Otros ejemplos: diseño de la huella de ruido de A320 neo es casi 1 km^2 menor que la del A320, la del Boeing 737 MAX es más de 1,7 km^2 menor que la del 737 Next Gen, el A350-900 es más de 2,5 km^2 menor que la del A340-300.

Por otro lado, la aviación es una industria altamente regulada, y el ruido generado por los aviones está sujeto a mucho control tanto a nivel internacional, como nacional y local, muestra de ello son la directiva de la UE sobre la gestión y evaluación del ruido

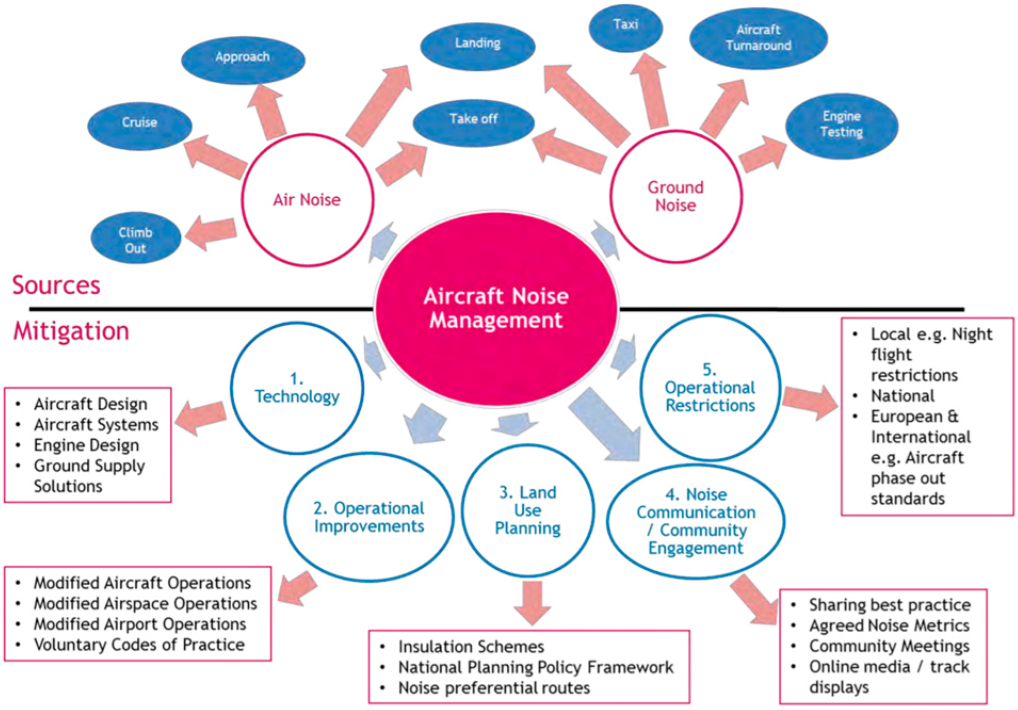

Figura 89. Gestión del ruido en aeropuertos [73].

1 https://www.icao.int/environmental-protection/pages/noise.aspx

ambiental, *Environmental Noise Directives* 2002/49/EC[2] y en España, la ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido[3]. Para OACI, Organización de Aviación Civil Internacional, limitar o reducir el número de personas afectadas por el ruido de las aeronaves es uno de sus objetivos ambientales clave y prioridad principal, ya que el ruido de las aeronaves es la causa más importante de reacciones adversas de la comunidad relacionadas con la operación y expansión de los aeropuertos. Esa es la razón por la que, en las últimas cinco décadas, el volumen I de ruido de las aeronaves - del Anexo 16 - del Convenio de Chicago sobre Aviación Civil Internacional, ha sufrido varios cambios y se hayan incorporado Reglamentos y Métodos Recomendados (SARPS) más restrictivos, con el fin de fomentar la Introducción de la última tecnología de ruido disponible en los nuevos diseños de aeronaves. En consecuencia, los requisitos son cada vez más estrictos, siguiendo el progreso de la tecnología resultante de los capítulos 2, 3, 4 y 14 [29]. El capítulo 14 fue adoptado por el Consejo de la OACI en 2014 y será el estándar principal de la OACI para el ruido subsónico de aviones propulsados por hélices y reactores durante los próximos años. Es aplicable a los nuevos tipos de aviones presentados para la certificación a partir del 31 de diciembre de 2017, y a partir del 31 de diciembre de 2020 para aeronaves de menos de 55 toneladas de peso.

Así a nivel internacional la OACI, para conceder a un avión civil la certificación tipo necesaria para entrar en servicio, requiere de un complejo programa de ensayos que demuestren que esa aeronave ha sido diseñada y ensayada siguiendo las normas y procedimientos aprobados y que, por lo tanto, se considera segura para el vuelo. Entre esos ensayos se encuentran algunos de certificación acústica, demostrando que los niveles de ruido no superan los máximos establecidos por Anexo 16, Volumen I, del Convenio de Chicago, fijados por el Comité de Protección de medio ambiente (CAEP) de OACI en función del peso máximo al despegue de la aeronave (MTOW).

Ese esquema de certificación mide el ruido en tres puntos, uno bajo la senda de despegue, otro bajo la trayectoria de aterrizaje y un tercero sobre una línea paralela al eje de la pista en unas condiciones de temperatura, humedad y viento predeterminadas. La unidad de medida elegida es el Decibelio Percibido Equivalente (EPNdB), que tiene en cuenta el nivel de molestia, los tonos puros del espectro de frecuencia y la duración del ruido.

Se han conseguido grandes progresos en ruido, pero estos beneficios no siempre son percibidos por la comunidad. Las reacciones ante el ruido y la percepción del ruido son un problema complejo por confluir muchas variables. La aviación solo puede actuar e influir sobre algunas de ellas, como el volumen, duración y frecuencia de eventos de ruidos, así como el momento del día o la densidad de población, no así en las condiciones atmosféricas, en el ruido de fondo existente o en la percepción individual del ruido [73]. Además, se concluye:

- El número de personas afectadas por cada variable no es constante, por ejemplo, una acción ruidosa de un avión en una mañana ventosa generalmente resulta en menos personas molestas que la misma acción en una mañana tranquila y brumosa.
- Se requiere investigación para comprender con más detalle la ponderación y las interrelaciones específicas cada una de las variables tiene sobre el resultado final.

Consideraciones adicionales a tener en cuenta son el carácter subjetivo del ruido, ya que la percepción del ruido depende de la sensibilidad al ruido de cada persona, así como la mayor sensibilidad actual de la población al ruido ambiental, considerando hoy como una molestia significativa niveles tolerables unas pocas décadas atrás. Además, la naturaleza del problema del ruido también puede cambiar con el tiempo debido a las interdependencias existentes, por ejemplo, la reducción del ruido del motor hace que el ruido aerodinámico sea más dominante. Todo lo anterior hace que la tarea de medir, gestionar y reducir el número de personas afectadas por el ruido de los aviones sea un desafío.

Comparando el ruido acumulado de las aeronaves recientemente certificadas con los actuales objetivos de ruido para 2020 y 2030 establecidos por el Comité sobre Protección Medioambiental de la Aviación (CAEP) de la OACI a principios de 2013 siguiendo las recomendaciones del IER2, segunda revisión de expertos en ruido independientes, se observa que [56], en todos los casos los niveles de ruidos para las cuatro categorías de aeronaves consideradas recientes (reactores de negocios-BJ, reactores regionales-RJ, aeronaves de un pasillo-SA y de dos pasillos-TA) están muy por debajo del nivel regulatorio de ruido del capítulo 14 de la OACI.

La política de mitigación adoptada por la OACI, bajo la denominación de "enfoque equilibrado" (Balanced Approach)[59], recomienda el estudio, caso por caso, de la situación en cada aeropuerto y aplicar la mezcla

2 https://ec.europa.eu/environment/noise/directive_en.htm
3 https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2003-20976

más eficiente de cuatro elementos (ver Figura 91)[4].

Reducción de ruido en la fuente -que es el primer pilar según la OACI para la gestión del ruido de las aeronaves-, optimización de procedimientos operativos, políticas de uso de suelo y restricción de operaciones de los aviones más ruidosos. La Unión Europea hizo suya esta política a partir del año 2003.

En los últimos años, la OACI también ha intensificado su trabajo en otro aspecto esencial de la gestión del ruido, el compromiso de la comunidad.

Reducción de ruido en la fuente.

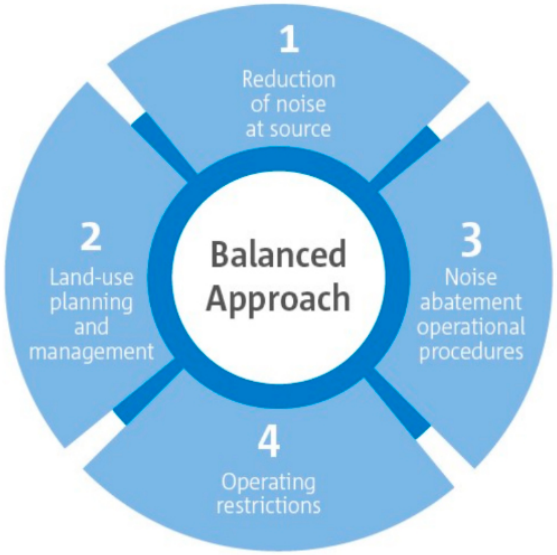

Figura 91. Enfoque equilibrado en la gestión del ruido de un aeropuerto.

El ruido en la fuente se regula a través de los certificados tipo de la aeronave como se indicó anteriormente y reducir éste es el que tiene mayor prioridad.

En los últimos 50 años los fabricantes de aviones y motores han aplicado tecnologías para reducir niveles de ruido drásticamente, de modo que comparado con el primer avión jet, el ruido de aviones modernos [73] se ha reducido en un 97% en la operación de salida (a 15dB de reducción), y un 94% en operaciones de llegada (a 12dB de reducción), estas reducciones de ruido se conseguían a la vez que se reducía la cantidad de combustible quemado y por tanto las emisiones de CO_2. Para poner estas reducciones en contexto, 15dB es equivalente a un 65% en reducción de molestia[5], y un 97% de reducción de la energía acústica significa que 33 aviones modernos saliendo simultáneamente de un aeropuerto producirían juntos el ruido de un avión a reacción del mismo tamaño que partió en la década de los sesenta.

La fuente primaria de ruido son los motores y la secundaria, es la que se origina en el flujo de aire que rodea el avión en su movimiento (fuente aerodinámica o fuente de la estructura del avión). El ruido del motor proviene del chorro, el fan y el compresor, y el ruido de la estructura del avión se debe a las discontinuidades de la estructura de la aeronave, como los dispositivos hipersustentadores, los bordes de salida donde hay un cizallamiento de velocidad, y la capa límite turbulenta en el fuselaje y el tren de aterrizaje.

Históricamente, las reducciones de ruido se han producido como resultado de una tecnología dirigida principalmente a reducir el consumo de combustible mediante la reducción de la velocidad del chorro. En la actualidad, el ruido de los reactores ya no es la fuente principal para las aeronaves más grandes debido a la reducción de la velocidad del chorro, por el aumento de la eficiencia de propulsión al reducir la relación de presión del fan.

En un avión moderno de dos pasillos: el ruido del motor, aunque depende del tipo de éste, es generalmente dominante en las operaciones de despegue, siendo el fan el componente principal y el ruido del chorro unos 5 dB menos. Para la aproximación y el aterrizaje de aviones modernos, los niveles de ruido, propulsores y aerodinámicos son comparables, aunque el ruido del fuselaje domina debido a la contribución del tren de aterrizaje.

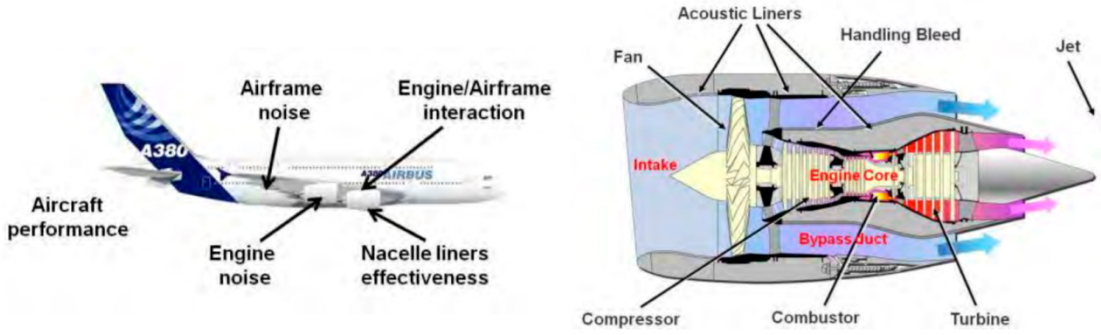

Figura 92. Elementos relevantes que influyen en el ruido del motor y de la aeronave [45].

4 https://www.easa.europa.eu/eaer/topics/airports/noise-management-strategies

5 ICAO Annexe 16 Appendix 2-14 section 4.2. PNL=40+10xLog(N)/Log(2), where N is perceived annoyance. If PNL is reduced by ~15dB, N is reduced by 65%

En los últimos años se han aplicado distintas tecnologías de reducción del ruido, estas tecnologías se han centrado principalmente en:

Ruido del motor. Tecnologías para Reducción del Ruido de Motor.

Hay dos fuentes principales de ruido en los motores turbofán comerciales de hoy: el ruido de la turbomaquinaria, Ffan/turbina/compresor, y el escape, también conocido como chorro.

Los turbofanes modernos con una relación de derivación muy alta tienen velocidades de chorro significativamente reducidas para el mismo empuje y, en consecuencia, hacen mucho menos ruido, de modo que el ruido del fan se está convirtiendo en la fuente dominante de ruido de los aviones.

Los avances en materiales y tecnología de fabricación han permitido que estos motores con una relación de derivación muy alta eviten incurrir en penalizaciones de peso y resistencia en la aeronave, de hecho, reducen el ruido de la aeronave y, al mismo tiempo, reducen el consumo de combustible.

El Turbofán GTF, mencionado en la sesión de tecnología de propulsión, es una solución necesaria para grandes relaciones de derivación junto con velocidades de chorro muy reducidas para reducir el ruido del chorro a un nivel aceptable.

Se han desarrollado varios métodos para reducir el ruido de chorro en motores turbofán, como el uso de toberas excéntricas y de accionamiento en lugar de boquillas axiales convencionales, la instalación de un mezclador *chevron* modificando la forma de la tobera de escape, aplicando deflectores de flujo del ventilador (FFD) a la salida de las toberas e instalando una serie de *microjets* alrededor del borde del escape.

Otras tecnologías para reducir el ruido del motor son, la optimización de la forma controlando la geometría de los conductos del motor, utilizar material absorbente de ruido, llamados revestimientos acústicos, en toberas, conductos de fans, entrada, etc. y aumentar el área de tratamiento acústico en la punta de las góndolas, llamados tratamientos de los *lips*, que son extensiones de las superficies tratadas con material absorbente.

Cuanto mayor es el fan, más fuerte es la fuente de ruido de éste, esto hace que se consideren varias tecnologías para reducir su ruido. Básicamente, se están experimentando dos estrategias generales para reducir este ruido: optimizar el sistema de fan o actuar directamente sobre el flujo de aire para reducir su velocidad.

Optimizar las características de diseño del sistema de fan para un ruido mínimo, consiste en optimizar la forma de las palas, elegir su número y la distancia entre palas / paletas, etc.

Otras tecnologías son: utilizar tobera de área variable, que permite un funcionamiento óptimo del fan al cambiar su relación de presión independientemente de su velocidad, y utilizar el llamado "control activo de ruido" o cancelación activa de ruido, que reduce el ruido agregando onda de sonido inversa; en concreto, los estatores activos no reducen el espacio disponible en la góndola para revestimientos pasivos; por lo tanto, son un concepto prometedor.

Ruido aerodinámico. Tecnologías para la Reducción del Ruido aerodinámico.

La estructura del avión es la otra fuente importante de ruido. Como el ruido del motor, esta categoría se puede dividir en varias subcategorías, los que más contribuyen son el tren de aterrizaje y los dispositivos hipersustentadores (HLD). Como era de esperar, cuanto más grande es el avión, más significativo es el efecto del tren de aterrizaje en comparación con el de los dispositivos de alta elevación.

Algunas tecnologías para reducir el ruido del tren de aterrizaje se han utilizado en los aviones más recientes, como el Airbus A380 o A350 donde se usan tapas en las cavidades, llantas en las ruedas y se utilizan técnicas inteligentes para evitar exponer cables y accesorios a altos caudales. Se llama concepto de *"slow down flow"*.

En comparación con el tren de aterrizaje, el progreso realizado en la reducción del ruido de *flaps* y *slats* parece estar bastante menos maduro. Esto se debe principalmente al hecho de que las tecnologías conocidas para reducir este ruido reducen considerablemente el rendimiento en la sustentación. Actualmente, se utilizan pocas tecnologías para limitar el ruido en estos dispositivos. En los A380 y A350 recientes, los *slats* están dispuestos para evitar cualquier espacio entre ellos y las alas, de modo que el flujo de aire no pueda pasar entre ellas. Es bastante eficaz, tanto desde el punto de vista acústico como de rendimiento, aunque esta solución solo se puede aplicar en algunas partes del ala.

Además del tren de aterrizaje y los HLD, las cavidades también son motivo de preocupación por el ruido. En realidad, numerosos dispositivos están embebidos en las superficies de las aeronaves, que tienen irregularidades en la superficie (escotillas, ganchos, hendiduras, agujeros) que se denominan globalmente "cavidades". Estas cavidades suelen desencadenar desprendimientos de la capa límite turbulenta, que actúa a su vez como fuente de ruido, la forma teórica

de evitar esta fuente de ruido espurio es básicamente rellenando las cavidades.

Soluciones más avanzadas se están investigando: bordes HLD hechos de materiales porosos, *chevrons* o spoilers fractales (programas de investigación TIMPAN y OPENAIRA), bordes de ataque adaptables de aleaciones con memoria de forma o mediante un actuador que suprimiría los huecos en los "*slats*" y *Unique Flap Device*, desarrollado por el Centro de Investigación de la NASA, denominado FLEXSEL (flexible *side edge link*). Este diseño de unión estructural flexible utiliza materiales *hiperelásticos* para proporcionar una transición geométrica suave de extensión mínima entre el borde lateral del *flap* y el ala principal.

Futuras Tecnologías de Reducción de Ruido.[6]

Los motores UHBR tienen graves problemas de integración debido al gran diámetro del fan que es incluso mayor que los actualmente existentes. Con esta opción, las tecnologías de reducción de ruido serán las mismas presentadas anteriormente. Aunque hay que tener presente que nuevas fuentes de ruido podrían surgir de estos motores más "abiertos", especialmente si las fuentes tradicionales de ruido del fan y de chorro disminuyen. En este caso, sería necesario considerar el ruido de la maquinaria, como el del compresor o el de la turbina.

Además de UHBR, otra estrategia también podría ser continuar aumentando BPR utilizando la arquitectura Open Rotor (OR). El ruido sería entonces el problema más crítico, junto con la seguridad. Las actividades de investigación en curso se enfrentan a este inconveniente y se están investigando varios mecanismos para reducir este ruido excesivo. Actualmente, existe una confianza razonable en que el open rotor podrá cumplir con la regulación más estricta del Capítulo 14 en unos pocos años.

Un avance en el ruido podría provenir de nuevos diseños de los fuselajes mostrados en el capítulo 6.3.3 de aerodinámica, que ofrecen el potencial de reducir significativamente el ruido, no solo reduciendo el del fuselaje y reduciendo y protegiendo el del motor, sino también reduciendo el empuje del motor requerido en el despegue. Sin embargo, hay muchos problemas técnicos muy importantes que deben abordarse antes de que una aeronave de este tipo entre en servicio.

Otro problema son las interdependencias entre la reducción del ruido y la reducción del consumo de combustible o las emisiones de CO2 y sigue habiendo incertidumbre sobre cuál será el futuro equilibrio de prioridades.

Mitigación de Ruido: Mejoras Operacionales.

Los beneficios en el ruido debido a los cambios operativos serán experimentados en diferentes puntos a lo largo de la trayectoria de vuelo, dependiendo de la medida empleada, del tipo de aeronave y la distribución de la población local. Este punto es importante ya que, para cualquier técnica de reducción de ruido dada, habrá algunas áreas cercanas a la trayectoria de vuelo que se beneficiarán más que otras. El beneficio exacto del ruido variará para diferentes ubicaciones dependiendo de la exposición al ruido actual y el alcance local para adoptar nuevas medidas de mitigación del ruido.

También es importante señalar que una serie de técnicas operativas tendrán implicaciones en otros factores ambientales debido a las interdependencias entre las emisiones de CO_2, NOx y ruido. Por ejemplo, cualquier técnica que afecte al empuje requerido (por ejemplo, diferentes configuraciones de *flaps* para el despegue) tendrá consecuencias sobre las emisiones de NOx y la calidad del aire local.

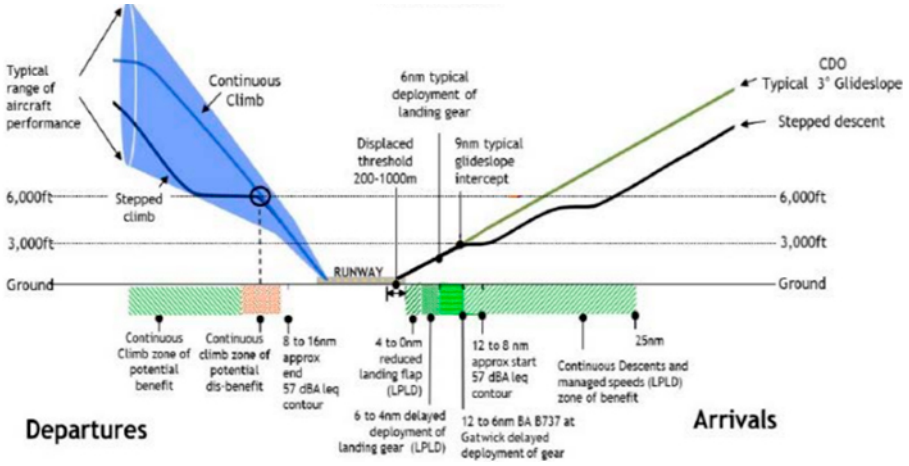

Figura 93. Oportunidades para mitigar el ruido [73].

6 https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01184664/document

Las mejoras operativas brindan la oportunidad de influir en el ruido tanto cerca del aeropuerto como más lejos. La Figura 93 y tabla inferior [56] muestran distintas oportunidades para mitigar el ruido de los aviones controlando los procedimientos y operaciones. Ver el capítulo 6.2 para más información.

Es importante señalar que la elección de uno u otro procedimiento operativo dependerá de muchos factores, no solo de los beneficios en términos de ruido, ya que existen muchas interdependencias a tener en cuenta como emisiones de CO_2, seguridad, capacidad, etc. De modo que cada aeropuerto elige los procedimientos óptimos.

Existe un margen significativo para mitigar el ruido de las aeronaves mediante la adopción de procedimientos operativos adecuados. En la mayoría de los casos, estas mejoras se pueden realizar de forma más rápida y rentable que las reducciones de ruido equivalentes derivadas de las mejoras en la tecnología del motor y la estructura del avión. En la tabla superior se ofrece un resumen de las mejoras operativas para mitigar el ruido de las aeronaves de aterrizaje, aproximaciones y salidas. La mayor adopción de técnicas establecidas desde hace mucho tiempo (como CDA, umbrales de inserción, baja potencia y baja resistencia, etc.) junto con adopción de innovadores procedimientos (como aproximaciones más pronunciadas y descanso de ruido predecible) pueden ofrecer una reducción de ruido de entre 1 y 5 dB en varios puntos a lo largo de la trayectoria del vuelo de llegadas.

	Mitigación de ruido vertical. (Reducción de ruido efectiva al crear una mayor distancia entre la fuente de ruido y el receptor).	**Mitigación de ruido horizontal.** (Oportunidad de compartir ruido cuando existe una distribución geográfica favorable de la población).	**Práctica operativa de aeronaves.** (Reducción de ruido en la fuente).
Llegadas	• Descensos continuos. • Umbral desplazado. • Aproximaciones con mayor pendiente y escalonadas de mayor pendiente.	• Aproximaciones curvas. • Ajustado punto de unión. • Alternancia de pista. • Rutas de llegadas estándar definidas (STARS). • Preferencia direccional de pista.	• Baja potencia y resistencia. Ej. Flap de aterrizaje reducido, despliegue retardado del tren de aterrizaje. • Controlar velocidades de aproximación. • Evitar el empuje inverso al aterrizar.
Salidas	• Ascenso continuo. • Control del empuje de ascenso.	• Alternancia de pista. • Definir salidas estándares con instrumentos (SID). • Salidas de SID compensadas. • Rutas preferenciales de ruido (NPR).	• Gestión y control del ruido.
Estructura del espacio aéreo	• ATM para cielo único europeo. • Programa de investigación (SESAR). • Mejoras en el espacio aéreo del área de control de la terminal. • Programa de gestión del espacio aéreo.	• SESAR. • Uso flexible del espacio aéreo entre la aviación civil, militar y la aviación general y los usuarios del espacio aéreo. • Mejoras en la disponibilidad de rutas, rutas condicionales a través de zonas aéreas militares y mejoras de procedimiento.	
Ruido en tierra	• N/A.	• Ubicación de las instalaciones de prueba de motores de aeronaves en los aeropuertos.	• Taxi motor reducido. • Uso de energía eléctrica de tierra fija y aire acondicionado

Tabla 5. Resumen de oportunidades operativas de mitigación del ruido [49].

Las opciones para la mitigación del ruido operativo en las salidas son menos, pero más operaciones de subida continua (CCO) y descanso de ruido predecible, por ejemplo, ofrecen la capacidad de redistribuir el ruido y pueden reducir la intolerancia al ruido.

La siguiente tabla muestra posibles técnicas de mitigación de ruido operacional como reglas generales con los beneficios del ruido y las regiones afectadas por el beneficio:

Medida operativa de mitigación del ruido	**Beneficio potencial de ruido cuando se conozca *** (* No acumulativo ni comparativo ya que se aplican diferentes métricas)	**Región aproximada de beneficio de ruido por debajo de la trayectoria de vuelo**
	Llegadas	
Aproximaciones de Continuo Descenso (CDA).	1-5 dBA[7] SEL[8].	25 mn a 9 mn desde el punto de aterrizaje.
Gestión/control de velocidades de aproximación (LPLD).	1-3 dBA SEL.	20-12 mn desde el punto de aterrizaje.
Umbral desplazado: por ejemplo, 1000m desplazado.	2-4% de reducción en el área de contornos Leq de 57 y 72 dBA respectivamente.	Desplazamiento de 200m-1000m del efecto de ruido
Slightly steeper approaches – up to 3.2 degrees.	0.5-1 dBA SEL.	Aprox. 25 mn al punto de aterrizaje.
Steeper approaches – 3.25 to 4 degrees	1-2 dBA SEL. Aprox. reducción de 0,5 dB por aumento de un cuarto de grado en el ángulo de aproximación final.	Aprox. 25mn al punto de aterrizaje.
Delayed deployment of landing gear.	hasta 2 dBA SEL.	6-4 mn desde el punto de aterrizaje.
Reduced landing flap.	Hasta 1dBA SEL.	4mn al punto de aterrizaje.
	Salidas	
Ascensos continuos donde el espacio aéreo y las condiciones del tráfico lo permiten.	Zona de no beneficio teórico de 2-8 dB (LAmax) seguida de zona de beneficio de 2-8 dBA (LAmax).	Aprox. 10-20mn desde el despegue.
NADP1 o NADP 2[9].	Hasta 5dAB de diferencia en ruido entre las dos técnicas.	Beneficio cercano 0-11 mn desde el despegue. Beneficio lejano 5-15mn desde el despegue.

Tabla 6. Beneficios potenciales del ruido de las mejoras operativas [49].

7 dBA, unidades de nivel de sonido en la escala ponderada A, que incorpora una ponderación de frecuencia que se aproxima a las características del oído humano. Units of sound level on the A-weighted scale, which incorporates a frequency weighting approximating the characteristics of human hearing.

8 SEL, el nivel de exposición al sonido generado por una sola aeronave en el punto de medición, medido en dBA. Esta métrica de ruido tiene en cuenta la duración del sonido y su intensidad.

9 NADP1 y NADP 2, ICAO Noise Abatement Departure Procedures 1 and 2, procedimientos de salida de atenuación de ruido de OACI 1 y 2.

Mitigación de ruido: Planificación y gestión del uso de suelo.

Una planificación eficaz del uso del suelo busca proteger las áreas alrededor de los aeropuertos que se ven afectadas por niveles más altos de ruido de aeronaves, y evitar desarrollos inapropiados sensibles al ruido, particularmente desarrollos residenciales.

Fuera del recinto aeroportuario, las competencias sobre restricciones en el uso del suelo son normalmente competencia de los municipios vecinos, cuyas ordenanzas pueden limitar el tipo de uso de terrenos sometidos a unos ciertos niveles acumulativos de ruido. Generalmente estas restricciones se aplican empleando huellas acústicas y los aeropuertos pueden tener que sufragar los gastos de aislamiento acústico de viviendas e incluso el traslado de sus moradores a otros lugares. La prohibición de edificar viviendas en las zonas afectadas ocasiona una importante pérdida de valor de los terrenos, por lo que los propios ayuntamientos suelen ser los más interesados en reducir todo lo posible el impacto acústico de los aeropuertos. Aunque todas las cifras disponibles indican que, desde los años 70, se ha producido una importante y continua disminución del número de personas seriamente afectadas por el ruido aeroportuario.

Oportunidades relacionadas con la planificación del uso del suelo para mitigar el ruido de las aeronaves o reducir el número de personas afectadas por los aeropuertos.

- La definición de métricas de ruido para la planificación en el aeropuerto con el fin de mantener un método común para establecer criterios de desempeño proporcionaría mejores comparaciones de tendencias en aeropuertos individuales y entre aeropuertos, y brindaría una mayor transparencia a las autoridades y comunidades locales.
- Participación activa de los aeropuertos en la contribución y la configuración de la política de planificación local para garantizar que, cuando sea posible, se evite el desarrollo en áreas sensibles al ruido y la invasión de la población en áreas anteriormente ruidosas.
- Cualquier control o acuerdo de planificación debe estar relacionado con el área del contorno de ruido del aeropuerto más que con la población dentro de él.
- Esquemas de concesión de aislamiento acústico. La principal medida de mitigación es la provisión de aislamiento acústico, generalmente acristalamiento doble o secundario.
- Adquisiciones por parte de aeropuertos de terrenos y propiedades en áreas de alto nivel de ruido o asistencia a residentes para que se trasladen de áreas ruidosas a áreas más tranquilas.
- Los aeropuertos proporcionarán una amplia gama de material a las comunidades locales y a los posibles compradores de propiedades para garantizar que se disponga de la mayor cantidad de información posible sobre el entorno acústico local.
- Construir medidas de mitigación de ruido: barreras de ruido o bloques de ruido que mitigan el efecto de las pruebas de motores de aeronaves.

Mitigaciones de ruido en la comunicación y la participación comunitaria.

En los últimos años, la industria ha realizado un esfuerzo significativo para mejorar las técnicas de reducción del ruido, en particular mediante el desarrollo tecnológico de aeronaves y mejoras operativas. Sin embargo, como se comentó anteriormente, las percepciones del ruido por parte de las comunidades locales no siempre han mejorado en línea con estos desarrollos, dada la naturaleza muy subjetiva de la percepción individual del ruido.

El impacto del ruido de las aeronaves difiere entre los aeropuertos y las comunidades, por lo que la participación debe adaptarse a la comunidad, de modo que un enfoque único para todos no es apropiado y una buena comunicación entre las partes implicadas es necesaria.

Las medidas de mejora que están relacionadas con la participación y las comunicaciones son:

- Promover la participación abierta y transparente con las comunidades afectadas por el ruido.
- Asegurarse de que cualquier cambio en el impacto del ruido o esfuerzo en mitigar el ruido se comuniquen de forma clara y adecuadamente.
- Presentar a las partes interesadas locales en la hoja de ruta las mejores prácticas de participación, trabajando con las comunidades locales para establecer una variedad de técnicas de participación.
- Elaborar informes anuales, sesiones informativas específicas, boletines de noticias y actualizaciones, y proporcionando acceso directo a la información.

Mitigación de Ruido: Restricción de operaciones.

Los estados más desarrollados acostumbran a utilizar la normativa del Anexo 16 como un sistema para ir retirando los modelos más ruidosos, a medida que aparecen nuevos límites regulatorios, en una secuencia que primero prohíbe la fabricación, seguidamen-

te la importación y finalmente la operación de tales aeronaves. Así, en los primeros años 90, la mayoría de los países de la OCDE prohibieron la operación de aviones sin certificado de ruido. Mientras que, entre 2000 y 2002, hicieron lo propio con aquellos que solo cumplían con los límites del Capítulo 2. La aprobación por la Asamblea de la OACI del Capítulo 4, aplicable a nuevos modelos certificados después el 01/01/2006, llevaba adjunta la condición de que no se emplease esa norma para propiciar la retirada forzosa de modelos que sólo cumpliesen el Capítulo 3. Pese a ello, numerosos aeropuertos (no países) están procediendo a restringir durante ciertos períodos el acceso de aviones "Capítulo 3 menos 5 EPNdB" u otros mecanismos semejantes.

Además, los aeropuertos también establecen políticas de reducción de ruido, introduciendo restricciones de diferentes formas empleando esos valores de ruidos en operaciones de llegada (certificados o valores reales de ruido medidos por un sistema monitor, para controlar el ruido de movimientos individuales o el impacto colectivo mediante el uso de micrófonos en puntos estratégicos del aeropuerto). Muchos aeropuertos han instalado un sistema de vigilancia acústica que, junto con el seguimiento radar de las trayectorias, permite determinar si cada operación se ajusta con precisión a las trayectorias de impacto acústico mínimo diseñadas para cada modelo de aeronave. Es importante tener en cuenta las consecuencias no deseadas que pudieran surgir debido a la aplicación de restricciones operativas, ya que restringir el tiempo y el modo de operación de una pista puede alterar el tamaño y la forma de las huellas de ruido, o retrasos compuestos que resultan en operaciones que ocurren en momentos más sensibles.

Ejemplo de actuales restricciones operacionales impuestas:

- Limitaciones de acceso a ciertos modelos. No pueden operar en el aeropuerto modelos de aviones que no cumplen con ciertos límites. Los modelos que no cumplen con el Capítulo 3 desde abril de 2020 no son aceptados en la Unión Europea, o mediante la introducción de un sistema de tasas relacionadas con el ruido certificado como en los aeropuertos franceses.
- Establecimiento de categorías de nivel de ruido absoluto (no basado en MTOW): Heathrow y Barajas prohíben vuelos nocturnos de aeronaves que no estén por debajo de los límites establecidos por dos parámetros: ruido de aterrizaje certificado y ruido de despegue y lateral certificado promedio.
- Establecimiento de cuotas de ruido por temporadas de programación para cada aerolínea, otorgando autorizaciones a las empresas hasta que alcancen una cifra acumulativa de ruido certificado, como lo hace Charles De Gaulle durante el día y Barajas en el período nocturno (23:00 a 07:00).

En otros casos, se establece un nivel de ruido máximo aceptable con los valores de ruido reales:

- Se recibe una multa si se superan los niveles y, si es un hecho reiterado, se puede alcanzar hasta la prohibición de operar cierto tipo de aeronaves como en el Aeropuerto J.F. Kennedy de Nueva York.
- Los aviones más ruidosos y ruidosos de acuerdo con las normas del Anexo 16 de la OACI, Capítulo 3, no están autorizados a operar en el aeropuerto. Las aeronaves de una determinada categoría (por ejemplo, de 100 a 150 plazas) reciben una penalización económica de acuerdo con la estadística de ruido real medida en determinados puntos del recinto del aeropuerto, como se hace en Frankfurt y otros aeropuertos alemanes.

Otras acciones para reducir ruido en aeropuertos:

- Establecer pistas preferentes para aterrizajes nocturnos, y aproximaciones con descenso continuo (CDA), en las que el avión inicia el descenso en configuración de régimen mínimo de motor desde mucho antes que las aproximaciones regulares, reduciendo por tanto el impacto acústico.
- Prohibición del uso de inversores de empuje para ayudar a frenar el avión en períodos nocturnos.
- Restricción en el uso de las unidades de potencia auxiliar (APU) y los rodajes de prueba de motores en ciertas zonas o a ciertas horas.

En conclusión, existe un compromiso fuerte del gobierno y la industria en numerosos países para abordar los aspectos tecnológicos de ese enfoque equilibrado de la OACI. Siendo la tendencia general de las grandes iniciativas de investigación abordar una agenda ambiental global, considerando compensaciones y aspectos de interdependencia en los programas de trabajo científico y técnico. En la figura siguiente se muestran los proyectos de investigación en tecnología del ruido a nivel global, cubriendo un periodo de 15 años (2006-2020) involucrando a grandes fabricantes de aeronaves (Airbus, Rolls-Royce, Safran, MTU, GKN, Leonardo) y a centros líderes de investigación (DLR, Onera, NLR, CIRA) que reflejan el compromiso mundial de apoyar continuamente a la tecnología en la reducción del ruido.

Todos estos proyectos han dado lugar a distintos avances en la tecnología de reducción del ruido, actuando sobre los motores (Huff [39], Gliebe [31]) con modificaciones en las góndolas y el fan, o sobre el ruido del chorro mediante chevrons o diseño de toberas de área variable y otros; actuando sobre la estructura, introduciendo modificaciones en flaps o bordes de salidas, diseñando carenas para trenes de aterrizaje, (Dobrzynski [19], Manoha [51]).

En el largo plazo, hacia 2050, se requerirán configuraciones de aviones radicalmente nuevas para reducir significativamente el ruido, consumo de combustible y por consiguiente la emisión de CO_2 (ver capítulo 6.3). Así IATA, NASA y distintas empresas europeas y americanas como Boeing, Airbus, etc. están llevando a cabo actividades de I+D mediante programas de colaboración público-privada, con objetivo de conseguir tecnologías innovadoras y prometedoras (Bradley [5]), como diversas configuraciones de fuselaje y de propulsión revolucionarias, especialmente, la propulsión eléctrica tanto híbrida como totalmente eléctrica (ver capítulo 6.5). El impacto en el ruido de los aviones eléctricos dependerá de la configuración de diseño, pero asumiendo un avión con configuración convencional, sin utilizar las ventajas añadidas de diseño de la propulsión eléctrica, se estima una reducción de la huella de ruido del 36% en despegue y aterrizaje comparado con el avión mejor de su clase más competitivo en ruido; más reducción durante el despegue (50% menor) y menor reducción durante el aterrizaje (15% mayor) [66].

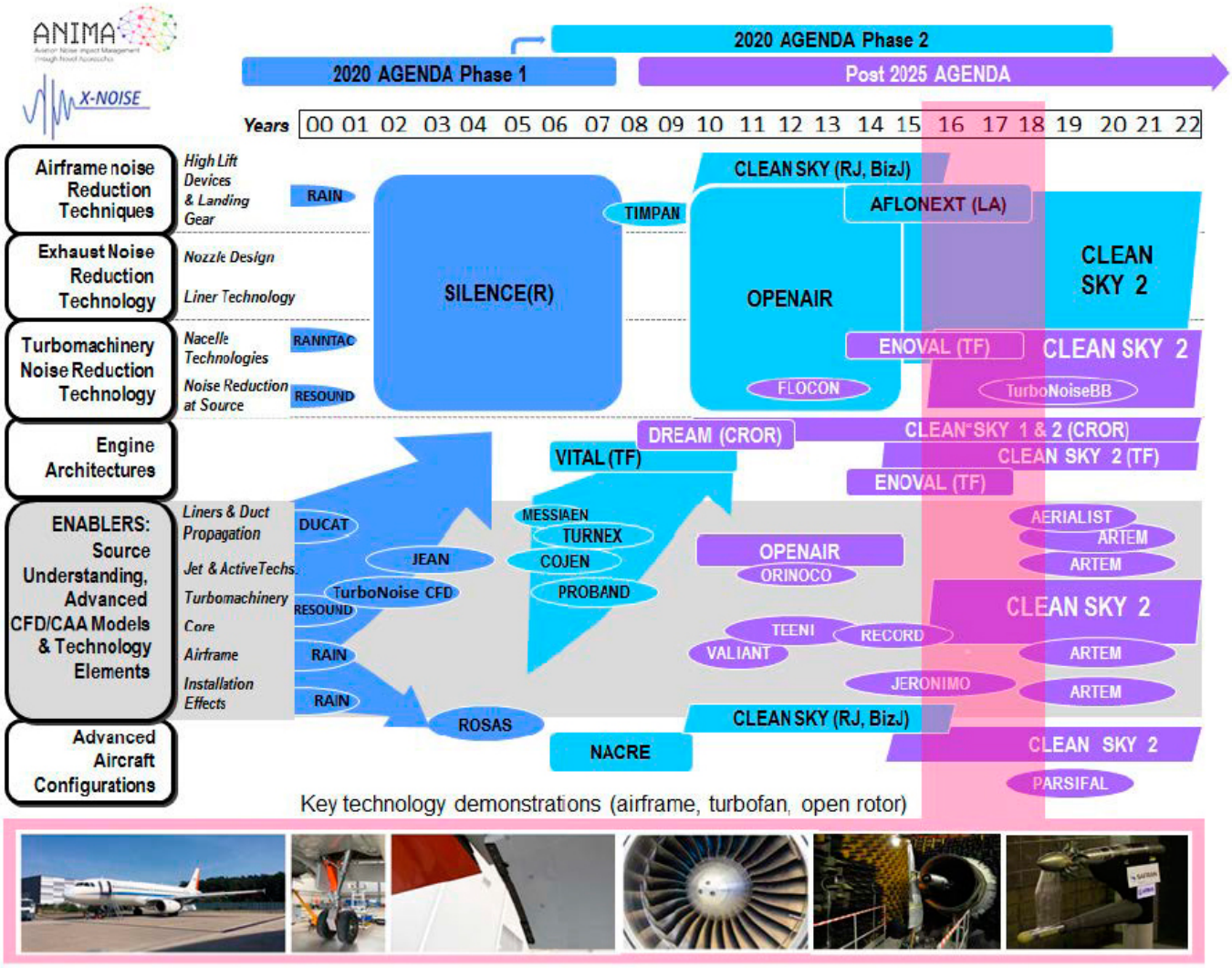

Figura 94. Proyectos europeos de ruido y demostradores tecnológicos clave [56].

La combinación de tecnología aeronáutica, nuevos sistemas a bordo y de gestión de operaciones han contribuido hacia procedimientos más eficaces de reducción del ruido y seguirán contribuyendo a medida que se vayan incorporando los avances en las distintas tecnologías.

7 CONCLUSIONES

La industria aeronáutica surgió y se desarrolló gracias a una larga historia de innovación y resolución de problemas técnicos. El reto de la sostenibilidad y de la eliminación de su impacto sobre el medio ambiente se está afrontando con el mismo espíritu, y los resultados no se han hecho esperar. Además de las emisiones de CO_2 y la mitigación del ruido, consideradas objetivos prioritarios en diferentes ámbitos, hoy en día la atención se extiende también a otro tipo de emisiones como los óxidos de nitrógeno (NOx) y la formación de nubosidad inducida debido a las estelas de condensación. A pesar de no ser, por mucho, el sector del transporte con mayor impacto en el calentamiento global, la aviación fue la primera en tener un plan coordinado y con hitos claramente establecidos para hacer frente al cambio climático. El "Compromiso para una Acción sobre Cambio Climático", firmado en 2008, establecía objetivos a corto, medio y largo plazo.

En un primer paso, la industria se comprometía a una mejora anual hasta el 2020 del 1,5% en la eficiencia de las aeronaves, directamente relacionada con el nivel de emisiones. Este objetivo se ha cumplido con creces gracias al desarrollo tecnológico gradual, proceso que va a seguir contribuyendo de manera decisiva a la reducción del consumo de combustible. A la aplicación generalizada de soluciones ya conocidas (winglets, materiales avanzados y más ligeros, sistemas de control de vuelo), se añadirán innovaciones aerodinámicas (flujo laminar) y nuevos desarrollos de motor (aumento de las relaciones de derivación y de presión). Las mejoras en los procedimiento de operaciones y control aéreo aportarán también una reducción de emisiones significativa, además de mitigar los problemas de ruido.

Para el corto y medio plazo se situó el 2021 como el inicio de un crecimiento del tráfico aéreo que no implicase aumentos en las emisiones netas de CO2. Para cumplir este compromiso el organismo internacional de aviación civil OACI puso en marcha el marco regulador de compensación de emisiones CORSIA que, a pesar de sus defectos, supuso un hito al contar con el apoyo de los países miembros y la industria aeronáutica en su conjunto. Esta iniciativa, junto a otros sistemas de compensación y comercio de emisiones como el EU ETS, suponen una herramienta de aplicación en el corto plazo que ayudará a contener y potencialmente reducir las emisiones de una aviación comercial siempre en crecimiento.

El fuerte crecimiento de los combustibles sostenibles de aviación, con amplios apoyos por parte de la industria y de gobiernos en todo el mundo, los perfilan como una solución clave a medio plazo, y hoy en día como la única herramienta identificada para descarbonizar los vuelos de larga distancia. En este horizonte, hasta el 2030-2035, se pueden esperar contribuciones tecnológicas significativas con diseños disruptivos (alas atirantadas, ingestión de capa límite) y nuevas modalidades de propulsión (rotores abiertos, motores híbridos y eléctricos, propulsión por hidrógeno).

Más allá de 2035 se espera la entrada en servicio de nuevas tecnologías y configuraciones revolucionarias, así como un crecimiento exponencial de los prometedores combustibles sintéticos sostenibles. Si se cumplen las previsiones podría suponer la irrupción de aeronaves de gran capacidad propulsadas por hidrógeno, así como la de baterías de alta capacidad que amplíen las posibilidades de la aviación eléctrica.

A largo plazo, en 2050, el compromiso inicial de la industria para reducir sus emisiones ha evolucionado, respondiendo a la urgencia medioambiental actual, situándose en términos generales en la descarbonización total para ese año. Con este tiempo por delante es difícil prever el camino que tomará para conseguirlo, sin descartar la irrupción de nuevas soluciones no consideradas en este informe, como por ejemplo podría ser la utilización del amoníaco como combustible de aviación[1]. En cualquier caso, parece muy probable que cada una de las tecnologías e innovaciones señaladas encuentren su papel para, de forma conjunta, se logre ese ambicioso objetivo.

[1] https://www.ammoniaenergy.org/articles/zero-emission-aircraft-ammonia-for-aviation/

La Tabla 7 y Tabla 8 proporcionan una indicación del plazo de desarrollo y la reducción potencial del consumo de combustible -ligado directamente a las emisiones de CO_2- para diferentes soluciones tecnológicas en la configuración de las aeronaves comerciales.

emisiones además del CO_2. Las soluciones más prometedoras para este enfoque integral se muestran en la Tabla 9, donde se detallan sus pros y contras, además de su perfil de aplicación más probable.

Considerando todos los factores, se estima que el potencial de reducción del impacto climático para

	Timelines and examples of propulsive technologies	Impact on Jet Fuel Burn compared to baseline
Current - Operational	**2010–2019:** Higher bypass and pressure ratios, lighter materials	**10- 15%***
Evolutionary development	**~2020-25:** High pressure core + ultra-high by-pass ratio geared turbofan	**20-25%***
Revolutionary development	**~2030:** Open rotor	**30%***
	~2030-40: Hybrid electric propulsion (depending on battery use)	**40 to 80%***
	~2035-40: Fully electric propulsion (primary energy from renewable source)	**up to 100%***

All values compared to **baseline tube-and-wing aircraft of technology level widely in service in 2015*

Tabla 7. Potencial de ahorro en combustible de las tecnologías de propulsión según IATA [42].

	Timelines and examples of aircraft design technologies	Impact on jet fuel burn compared to baseline
Evolutionary Technologies	**Currently: Airframe Retrofits** (winglets, riblets, lightweight cabin furnishing)	**6 to 12%**
	Currently: Materials and Structure (composite structure, adjustable landing gear, fly-by-wire)	**4 to 10%**
	2020+: Electric Taxiing	**1 to 4%**
	2020-25: Advanced Aerodynamics (hybrid/natural laminar flow, variable camber, spiroid wingtip)	**5 to 15%**
Revolutionary Technologies	**~2030-35:** Strut-braced*	**30%**
	~2035: Double bubble fuselage*	**35%**
	~2035-40: Box/joined wing*	**30-35%**
	~2040: Blended wing body**	**27 to 50%**
	~2035-45: Full electric aircraft (short range)	**Up to 100%**

*With advanced turbofan engines ** With hybrid propulsion

Tabla 8. Potencial de ahorro en combustible de las tecnologías de diseño de aeronaves según IATA [42].

A modo de ejemplo de los resultados que este enfoque con múltiples estrategias de reducción de emisiones podría lograr, y contando únicamente con la tecnología actual, EUROCONTROL estima que los vuelos intraeuropeos podrían reducir un 25% sus emisiones para 2030. Este objetivo se alcanzaría con una combinación de medidas que incluyen un mayor uso de combustible de aviación sostenible, un uso más eficiente del espacio aéreo con diversas soluciones tecnológicas en la red ATM europea, y la modernización de la flota por parte de las aerolíneas [114].

Por otra parte, para alcanzar una aviación sostenible, como se ha comentado anteriormente, es necesario valorar el impacto medioambiental del ciclo de vida completo, incluyendo la evaluación del ruido y otras

aeronaves con pilas de hidrógeno se encuentra entre un 75% y un 90% frente a los modelos convencionales. La propulsión por combustión de hidrógeno se sitúa en mitigaciones entre el 50% y el 70%. Por último, los combustibles sintéticos sostenibles se situarían en el rango del 30-60% [28].

Si hasta hace bien poco se antojaba imposible lograr una aviación comercial sostenible a nivel medioambiental, ahora vemos que existe un amplio arsenal de herramientas para conseguirlo. Sin duda no sabemos todavía cual será la solución óptima, aunque muy probablemente implique la combinación de todas estas estrategias en diferentes proporciones y marcos de tiempo. Para hacerlo posible, más allá de los avances tecnológicos, resultará también imprescindible un marco regulatorio y de financiación que favorezca

Comparison of new technology and sustainable aviation fuels and new technologies

Comparison vs. kerosene	Biofuels	Synfuels	Battery-electric	Hydrogen
Commuter <19 PAX	No limitation of range	No limitation of range	Maximum ranges up to 500-1,000 km due to lower battery density	No limitation of range
Regional 20-80 PAX				
Short-range 81-165 PAX				
Medium-range 166-250 PAX			Not applicable	Revolutionary aircraft designs as efficient option for ranges above 10,000 km
Long-range >250 PAX				
Main advantage ✓	Drop-in fuel – no change to aircraft or infrastructure	Drop-in fuel – no change to aircraft or infrastructure	No climate impact in flight	High reduction potential of climate impact
Main disadvantage ✕	Limited reduction of non-CO_2 effects	Limited reduction of non-CO_2 effects	Change to infrastructure due to fast charging or battery exchange systems	Change to infrastructure

Tabla 9. Comparativa de nuevas tecnologías y combustibles sostenibles [28].

el desarrollo e implementación de estas soluciones sostenibles, de forma que sean competitivas frente a los combustibles fósiles.

A modo de ejemplo, se podría imaginar una aviación civil en un horizonte de 10 a 20 años en el que predominase la propulsión eléctrica e híbrida para el transporte regional y de corto alcance, motores de combustión de hidrógeno para rutas intermedias y de alta capacidad, y vuelos de larga distancia con combustibles sostenibles. Todo ello, por supuesto, contando con innovaciones en todos los aspectos tanto de diseño como en la operación de las aeronaves.

Este futuro sostenible para la aviación es necesario, es posible y está en nuestras manos el hacerlo realidad, pero para alcanzarlo será necesario la implicación y el esfuerzo de toda la industria aeronáutica (fabricantes, aerolíneas, aeropuertos y servicios de navegación aérea), la de los gobiernos y organismos internacionales, así como el compromiso de los propios pasajeros.

8 BIBLIOGRAFÍA

[1] *AENA. Informe de gestión consolidado 2019. Apartado 14. http://www.Aena.es/csee/ccurl/437/603/Estado_de_la_Informacion_No_Financiera.pdf*

[2] *AESA. Libro blanco del I+D+i para la sostenibilidad de la aviación en España. Junio de 2020.*

[3] *AIRBUS. CRYOPLANE: Liquid Hydrogen Fuelled Aircraft – System Analysis. 24 de septiembre de 2003.*

[4] *ATAG. Waypoint 2050: Balancing growth in connectivity with a comprehensive global air transport response to the climate emergency. Septiembre de 2020.*

[5] *Bradley, M. K.; Droney, C. K. Subsonic Ultra Green Aircraft Research: Phase I Final Report. NASA/CR–2011-216847, 2011.*

[6] *Broekhoff, D.; Gillenwater, M.; Colbert-Sangree, T. y Cage, P. Securing Climate Benefit: A Guide to Using Carbon Offsets. Stockholm Environment Institute & Greenhouse Gas Management Institute, 2019.*

[7] *Castro Álvarez, O. Estudio de la efectividad medioambiental de medidas restrictivas a los vuelos domésticos en España. COIAE, 2021.*

[8] *Castro Álvarez, O. y Martín Santana, E. Sostenibilidad en el sector aeronáutico: un sector altamente comprometido. COIAE, 2020.*

[9] *CDTI. Dossier Informativo sobre Clean Sky. Julio de 2008.*

[10] *Clean Sky 2 Joint Undertaking. 2019 Consolidated Annual Activity Report. https://www.cleansky.eu/sites/default/files/inline-files/AAR-2019.pdf*

[11] *Comisión Europea. A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. Bruselas, 8 de julio de 2020.*

[12] *Comisión Europea. Communication from the Commission to the European parliament, the Council, the European economic and social committee and the Committee of the regions. 'Fit for 55': Delivering the EU's 2030 climate target on the way to climate neutrality. 14 de julio de 2021.*

[13] *Comisión Europea. Flightpath 2050. Europe's Vision for Aviation. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2011.*

[14] *Comisión Europea. Proposal for a Council Directive restructuring the Union framework for the taxation of energy products and electricity. 14 de julio de 2021.*

[15] *Comisión Europea. Proposal for a decision of the European Parliament and of the Council amending Directive 2003/87/EC as regards the notification of offsetting in respect of a global market-based measure for aircraft operators based in the Union. 14 de julio de 2021.*

[16] *Comisión Europea. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2003/87/EC establishing a system for greenhouse gas emission allowance trading within the Union, Decision (EU) 2015/1814 concerning the establishment and operation of a market stability reserve for the Union greenhouse gas emission trading scheme and Regulation (EU) 2015/757. 14 de julio de 2021.*

[17] *Comisión Europea. Proposal for a Directive of the European parliament and of the Council amending Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council, Regulation (EU) 2018/1999 of the European Parliament and of the Council and Directive 98/70/EC of the European Parliament and of the Council as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652. 14 de julio de 2021.*

[18] *Consejo Europeo. Resolución del Consejo Europeo del 21 de julio de 2020. https://www.consilium.europa.eu/media/45109/210720-euco-final-conclusions-en.pdf*

[19] *Dobrzynsky. Almost 40 Years of Airframe Noise Research– What did we achieve? 14th Aeroacoustics Conference, Vancouver, 5-7 de mayo de 2008.*

[20] *E4tech. Role of DAC in e-fuels for aviation. Report for Transport & Environment, junio de 2021.*

[21] *EASA. Updated analysis of the non-CO2 climate impacts of aviation and potential policy measures pursuant to the EU Emissions Trading System Directive Article 30(4). Septiembre de 2020.*

[22] *ERA Green and Sustainable Connectivity v1. European Regions Airline Association, 2020.*

[23] *Eurocontrol. Does taxing aviation really reduce emissions? Aviation Sustainability Unit. Think Paper #7, octubre de 2020.*
[24] *Eurocontrol. Flying the 'perfect green flight': How can we make every journey as environmentally friendly as possible? Aviation Sustainability Unit. Think Paper #10, 20 de abril de 2021.*
[25] *European ATM stakeholders. European CCO and CDO Task Force Report. 2018.*
[26] *European Environment Agency. EASA. Eurocontrol. European Aviation Environmental Report 2019.*
[27] *Felder, J. L. NASA Electric Propulsion System Studies. NASA Glenn Research Center. 30 de noviembre de 2015.*
[28] *Fuel Cells and Hydrogen 2 & Clean Sky 2. Hydrogen-powered aviation: A fact-based study of hydrogen technology. 2020.*
[29] *Gely, D. y Leylekian, L. Civil aircraft noise reduction: Summary of recent research and overview of forthcoming efforts to promote new research within European context. Proceedings of the 22nd International Congress on Acoustics, Buenos Aires, septiembre de 2016.*
[30] *Germany. Power-to-liquids (ptl): sustainable alternative fuels produced from renewable electricity. Conferencia sobre la aviación y los combustibles alternativos, Ciudad de México, OACI, 2017.*
[31] *Gliebe, P. The GE90: Quiet by design. Quieter aircraft engines through leveraging new technologies. 2003 Berkeley Airport Noise Symposium, 11 de marzo de 2003.*
[32] *Goldhammer, M. The Next Decade in Commercial Aircraft Aerodynamics–A Boeing Perspective. Aerodays 2011, Madrid, 31 de marzo de 2011. http://www.cdti.es/recursos/doc/eventosCDTI/Aerodays2011/5G1.pdf*
[33] *Graver, B.; Zhang, K. y Rutherford, D. CO2 emissions from commercial aviation, 2018. ICCT, 2019.*
[34] *Grewe, V. et al. The contribution of aviation NOX emissions to climate change: are we ignoring methodological flaws? Environmental Research Letters, volumen 14, número 12, diciembre de 2019.*
[35] *Haller, W. Overview of Subsonic Fixed Wing Project: Technical Challenges for Energy Efficient, Environmentally Compatible Subsonic Transport Aircraft. 3rd NASA Glenn Propulsion Control & Diagnostics Workshop, 28 de febrero de 2012.*
[36] *Heidmann, J. Improving Engine Efficiency Through Core Developments. AIAA Aero Sciences Meeting, 6 de enero de 2011.*
[37] *Hileman, J. Addressing Aviation Environmental Challenges through Technology and Fuels. U. C. Davis Aircraft Noise & Emissions Symposium, 2019.*
[38] *Hue, X. Hybrid laminar flow control on tails. Aeronautics Days, Bucharest, 27-30 de mayo de 2019.*
[39] *Huff, D. Technologies for turbofan noise reduction. 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Manchester, 11 de mayo de 2004.*
[40] *Hughes, C. E.; Van Zante, D. E. y Heidmann, J. D. Aircraft engine technology for green Aviation to reduce fuel burn. NASA TM- 2013-217690, 2013.*
[41] *IATA. Guidance Material for Sustainable Aviation Fuel Management. 2nd Edition. 2015.*
[42] *IATA. Technology Roadmap for Environmental Improvement Fact Sheet. 2021*
[43] *IPCC. Aviation and the Global Atmosphere. [J. E. Penner, D. H. Lister, D. J. Griggs, D. J. Dokken, M. McFarland (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, 1999.*
[44] *IPCC. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, 2014.*
[45] *Kharina, A. y Pavlenko, N. Alternative jet fuels: Case study of commercial-scale deployment, ICCT, 2017.*
[46] *König, J. CleanSky SFWA/BLADE. Breakthrough laminar aircraft demonstrator in Europe., Aeronautics Days, Bucharest, 27-30 de mayo de 2019.*
[47] *Le Feuvre, P. Are aviation biofuels ready for take off?, IEA, 18 de marzo de 2019. https://www.iea.org/commentaries/are-aviation-biofuels-ready-for-take-off*
[48] *Lee, D. S. et al. Aviation and global climate change in the 21st century. Atmospheric Environment, volumen 43, 2009.*
[49] *Lee, D. S. et al. The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. Atmospheric Environment, volumen 244, 2021.*
[50] *Madavan, N. A NASA Perspective on Electric Propulsion Technologies for Large Commercial Aircraft. ESARS-ITEC 2016, Toulouse, France, 4 de noviembre de 2016.*
[51] *Manoha, E.; Sanders, L.; y De La Puente, F. Landing gear noise prediction: what is the best method?. CEAS/X-Noise Workshop on Broadband noise of rotors and airframes. La Rochelle, 23-25 de septiembre de 2015.*
[52] *National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Commercial Aircraft Propulsion and Energy Systems Research: Reducing*

Global Carbon Emissions. Washington DC, The National Academies Press, 2016.

[53] *Nickol, C. Environmentally Responsible Aviation (ERA) Project. Assessing Progress Toward Simultaneous Reductions in Noise, Fuel Burn and NOx. 2011.*

[54] *NLR. Destination 2050. A route to net zero European aviation. Febrero de 2021.*

[55] *O'Malley, J.; Pavlenko, N.; Searle, S. Estimating sustainable aviation fuel feedstock availability to meet growing European Union demand. ICCT Working Paper 2021-13, marzo de 2021.*

[56] *OACI. 2019 Environmental Report. Aviation and Environment. Destination Green: The Next Chapter. ICAO Environmental Publications, 2019.*

[57] *OACI. Conferencia sobre la aviación y los combustibles alternativos. Ciudad de México, 2017.*

[58] *OACI. CORSIA Emissions Unit Eligibility Criteria. Marzo de 2019.*

[59] *OACI. Guidance on the Balanced Approach to Aircraft Noise Management. Doc 9829.*

[60] *OACI. Operational Opportunities to Reduce Fuel Burn and Emissions. ICAO, Doc. 10013, 1st edition, 2014.*

[61] *OACI. Sustainable Aviation Fuels Guide. Version 2, diciembre de 2018.*

[62] *Ponater, M. et al. Potential of the cryoplane technology to reduce aircraft climate impact: a state-of-the-art assessment. Atmos. Environ. 40, 6928–6944, 2006.*

[63] *Roeseler, W. G.; Sarh, B. y Kismarton, M. U. Composite Structures: The First 100 Years. 16th International Conference on Composite Materials.*

[64] *Rohde, J. Overview of the NASA AST and UEET emissions reduction projects. 2002*

[65] *Rossow, C. ACARE goals and DLR-Contributions for Reduction of Aviation Climate Impact. First CEAS European Air and Space Conference, Berlin, 10-13 de septiembre de 2007.*

[66] *Schäfer, A. et al. Technological, economic and environmental prospects of all-electric aircraft. Nature Energy Vol 4, 2019.*

[67] *SESAR Joint Undertaking. Sesar Solutions Catalogue 2019. 3rd Edition. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019.*

[68] *Silberg, B. NASA test: Jet biofuel may reduce climate-warming clouds. NASA's Jet Propulsion Laboratory. 21 de junio de 2017. https://climate.nasa.gov/news/2601/nasa-test-jet-biofuel-may-reduce-climate-warming-clouds/*

[69] *Sinnett, M. 787 No-Bleed Systems: Saving Fuel and Enhancing Operational Efficiencies. Boeing Commercial Aeromagazine, Q4 2007.*

[70] *Skaggs, R. L. et al. Waste-to-Energy biofuel production potential for selected feedstocks in the conterminous United States. Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 82, Part 3, Pages 2640-2651, febrero de 2018.*

[71] *Skowron, A.; Lee, D.S.; De León, R.R. et al. Greater fuel efficiency is potentially preferable to reducing NOx emissions for aviation's climate impacts. Nature Communications 12, artículo 564, 2021.*

[72] *Sustainable Aviation. Progress report 2015-2017. https://www.sustainableaviation.co.uk/wp-content/uploads/2018/06/SA-Progress-report-2015-17-1.pdf*

[73] *Sustainable Aviation. The SA Noise Road-map. A blueprint for managing noise from aviation sources to 2050. https://www.sustainableaviation.co.uk/wp-content/uploads/2018/06/SA-Noise-Road-Map-Report.pdf*

[74] *Thisdell, D. The magic number that makes electric flight viable. FlightGlobal, 11 de septiembre de 2020.*

[75] *Transport & Environment. FAQ: the what and how of e-kerosene. Why the aviation sector needs e-kerosene, and how to deploy it sustainably. Febrero de 2021.*

[76] *Voigt, C.; Kleine, J.; Sauer, D. et al. Cleaner burning aviation fuels can reduce contrail cloudiness. Commun Earth Environ 2, 114, 2021.*

[77] *Wey, C. NASA AST and UEET Programs. CAEP SG Emissions Workshop, 9 de septiembre de 2002.*