

SOSTENIBILIDAD EN EL SECTOR AERONÁUTICO: UN SECTOR ALTAMENTE COMPROMETIDO



Informe del Colegio Oficial de Ingenieros Aeronáuticos de España.
OCTUBRE de 2020

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

Introducción

El Colegio Oficial de Ingenieros Aeronáuticos de España tiene un alto compromiso con el sector aeronáutico español.

Y este compromiso lo hemos transformado en acciones concretas.

Estas acciones incluyen la creación de un comité de sostenibilidad desde el año 2019, el cual ha realizado varias jornadas sobre sostenibilidad en el sector, haciendo promoción de todas las medidas que el sector está realizando para ser más "verde". Este compromiso por la sostenibilidad no es solo un compromiso de este Colegio, sino de todo el sector aeronáutico. Este objetivo nos une a todos.

Este informe es una más de estas acciones para dar a conocer los esfuerzos del sector por ser más sostenible, y conseguir que los pasajeros del todo el mundo sigan confiando en la aviación como un medio muy sostenible y el más seguro que en este planeta se conoce.

La industria aeronáutica une a las personas, las une de manera sostenible, y de manera solidaria con el planeta.

Recibid un cordial saludo,
Estefanía Matesanz
Decana del Colegio Oficial de Ingenieros Aeronáuticos de España

Resumen ejecutivo.

- El objetivo principal de este informe es 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 (CO₂) es el principal objetivo en este esfuerzo, aunque es necesario considerar también otros elementos, entre ellos los óxidos de nitrógeno (NO_x) o la formación de estelas de condensación y nubosidad inducida.
- A pesar de sus menores emisiones globales en comparación con otros sectores del transporte, la aviación comercial abrió camino al lanzar en 2008 un plan coordinado y con hitos claramente establecidos para hacer frente al cambio climático: mejoras en eficiencia energética del 1,5% anual hasta 2020, crecimiento neutro en CO₂ a partir de ese mismo año, y reducción de las emisiones netas totales al 50% para el año 2050¹.
- 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 CO₂ 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 2021 entrará 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 esfuerzo decidido y de aplicación inmediata para mitigar las emisiones de CO₂ provenientes de la aviación comercial.
- 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 el nuevo sistema integrado de gestión aérea SESAR.
- 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.

¹ Tomando las emisiones globales de CO₂ debido a la aviación en 2005 como referencia.

- 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 CO₂. 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 aviación comercial con propulsión eléctrica, que se espera empiece a entrar en servicio esta misma década para aeronaves pequeñas, 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 CO₂. Resulta particularmente interesante su aplicación para el sector del transporte de pasajeros 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 (H₂ líquido). Si bien su combustión solo produce teóricamente agua, es necesaria más investigación sobre sus efectos medioambientales ya que libera el H₂O en altura (estelas de condensación y nubosidad inducida), así como continuar el desarrollo tecnológico para minimizar las emisiones de NO_x asociadas.
- 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.
- La aviación comercial sostenible 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 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 es factible alcanzar, por 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.

Índice

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETO	6
2. IMPACTO AMBIENTAL DE LA AVIACIÓN EN CONTEXTO	9
3. HACIA UNA AVIACIÓN SOSTENIBLE	12
4. ACCIONES, INNOVACIÓN Y TECNOLOGÍA	14
4.1. COMPENSACIÓN DE EMISIONES	14
4.2. NAVEGACIÓN Y OPERACIÓN EN TIERRA	17
4.3. MEJORAS DE EFICIENCIA GRADUALES Y DE DISEÑO	23
4.3.1. Programas de desarrollo tecnológico	23
4.3.2. Propulsión.	27
4.3.3. Aerodinámica.	33
4.3.4. Estructuras y materiales	37
4.4. COMBUSTIBLES SOSTENIBLES	38
4.4.1. Biocombustibles	39
4.4.2. Electrocombustibles	42
4.5. AVIACIÓN ELÉCTRICA	44
4.5.1. Aviones más eléctricos	45
4.5.2. Híbridos	47
4.5.3. Baterías	49
4.6. HIDRÓGENO	52
4.6.1. Vector energético sostenible	52
4.6.2. Pilas de combustible	54
4.6.3. Combustión directa	56
4.7. RUIDO	58
5. CONCLUSIONES	64
6. BIBLIOGRAFÍA	67

1

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 afirma la Agencia Europea del Medio Ambiente¹.

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.

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.

La IATA, la asociación internacional de las compañías aéreas, lo resume al afirmar que "hoy en día la industria de la aviación reúne los seres queridos, conecta culturas, expande la mente, abre mercados, y fomenta el desarrollo"

La IATA, la asociación internacional de las compañías aéreas, lo resume al afirmar que "hoy en día la industria de la aviación reúne los seres queridos, conecta culturas, expande la mente, abre mercados, y fomenta el desarrollo"².

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 carga³. En España, en 2019, se transportaron por vía aérea 275,2 millones de pasajeros, y un total de 1.069 millones de toneladas de carga⁴.

A partir de la firma del Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNFCCC) en 1992, se ha producido 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 ma-

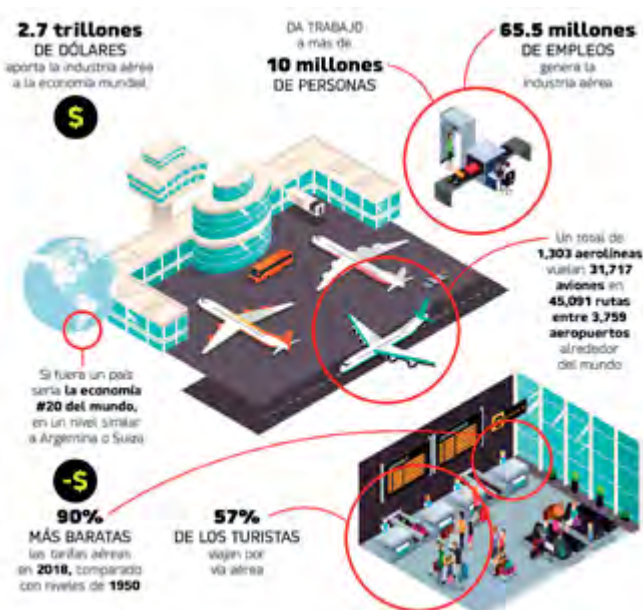


Figura 1. La industria aérea en números.

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.

¹ https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/agencia-europea-medio-ambiente-informacion-ambiental/soer2020esfinal_tcm30-504999.pdf

² https://www.iata.org/en/pressroom/pr/2013-12-30-01?utm_source=&utm_medium=&utm_campaign=

³ IATA y ATAG <https://a21.com.mx/aerolineas/2018/10/08/beneficios-de-la-aviacion-infografia>

⁴ Estadísticas de Aena. http://estadisticas.Aena.es/csee/ccurl/787/753/Anual2019_prov.pdf

teriales que limiten su impacto medioambiental. 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 [1].

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.

Desde sus inicios el avión ha sufrido grandes transformaciones, aunque 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 ha producido 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.

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 estudio del 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: proyectos Sentry⁵ y PAMELA⁶ (desarrollados dentro de los programas de la Unión Europea Clean Sky y LIFE respectivamente), o el trabajo de empresas dedicadas a estas tareas fundamentales para la sostenibilidad de la aviación civil⁷.

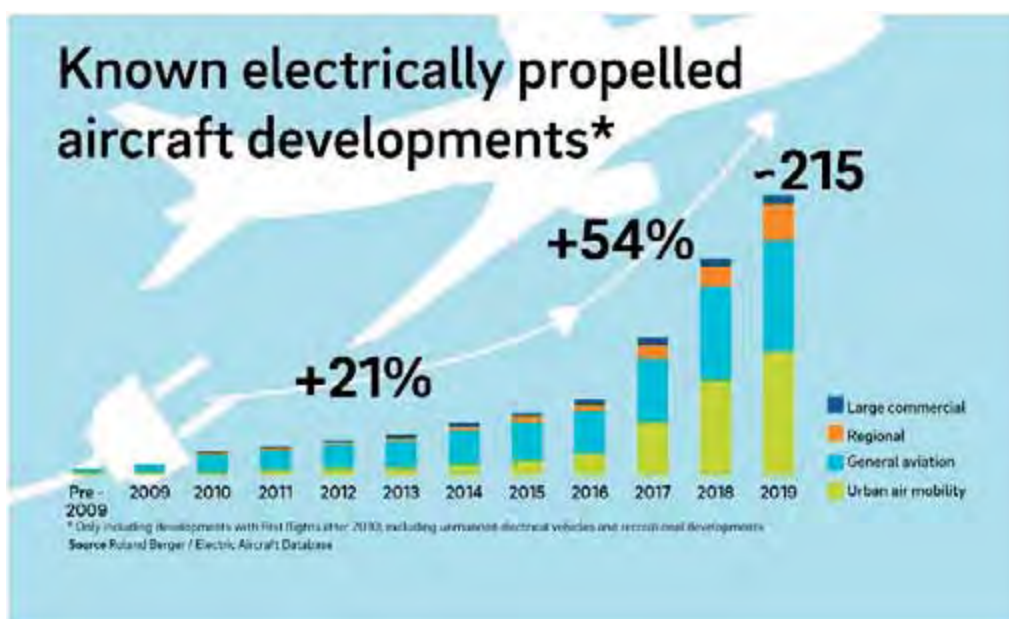


Figura 2. Evolución del número de proyectos de aviación con propulsión eléctrica por año.

⁵ <https://cordis.europa.eu/project/id/632487/reporting/es>

⁶ LIFE05 ENV/F/000059

⁷ AELS, TARMAC Aerosave, etc.

En el presente contexto resulta inevitable mencionar la crisis actual de la COVID19, que ha golpeado con dureza a 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-FanX⁸

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 a la recuperación económica con proyectos compatibles con el "European Green Deal" [2], y su objetivo de alcanzar un continente descarbonizado en 2050. Otros 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 2035⁹.

La industria aeronáutica, siempre en continuo proceso de mejora y superación tecnológica, se en-

cuentra en disposición de afrontar este desafío con éxito. Sirva como ejemplo la evolución del número de proyectos de aviación eléctrica en activo (Figura 2) hasta superar los 200 a finales de 2019¹⁰.

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.

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.

⁸ <https://www.airbus.com/newsroom/stories/our-decarbonisation-journey-continues.html>

⁹ <https://www.euractiv.com/section/aerospace/news/france-unveils-e15bn-in-aerospace-aid-sets-green-goals/>

¹⁰ Roland Berger: <https://www.rolandberger.com/en/Point-of-View/Electric-propulsion-is-finally-on-the-map.html>

2

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 [3], 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, casi con toda certeza, como la principal causa de este fenómeno [4]. A fin de comparar la intensidad e impacto de los diferentes tipos de emisiones y efectos se suele utilizar el concepto de forzamiento radiactivo (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 CO₂ 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 por lo tanto enfriando el planeta, produce un RF negativo.

El impacto global de una actividad sobre el cambio climático puede así evaluarse como la resultante de todos los forzamientos radiactivos que genera, tanto positivos como negativos. Para la aviación, los estudios disponibles coinciden en su carácter de contribuidora neta, con cifras alrededor del 3,5% de la contribución humana al cambio climático [5]. Esta evaluación solo considera factores confirmados, aunque se estima que podría ser mayor por efectos todavía en estudio como la nubosidad inducida.

Los principales factores de este impacto de la aviación son:

- Emisiones de gases inductores de efecto invernadero, principalmente CO₂, pero también NO_x, hollín, vapor de agua y otros.
- La formación de estelas de condensación (contrails) y la inducción de cirros (AIC). Este último efecto, todavía difícil de evaluar, se estima que podría suponer entre un 34% y un 70% del impacto total [5].

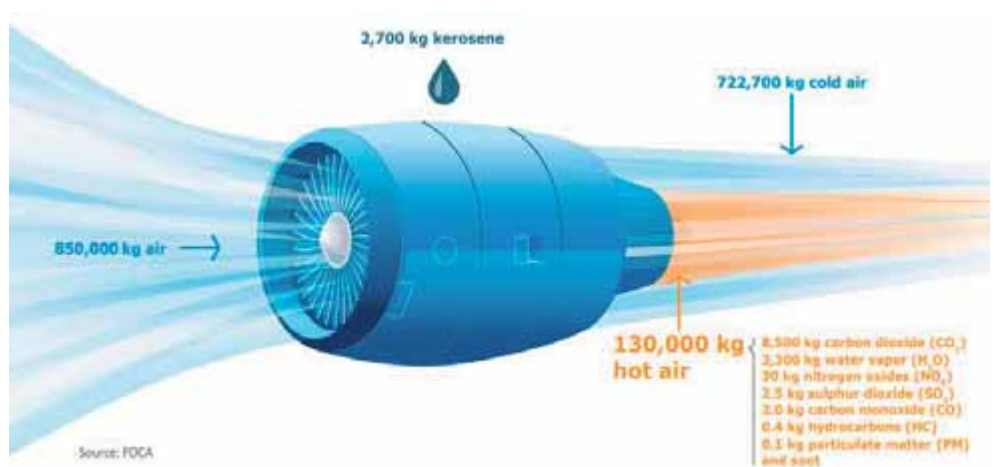


Figura 3. Consumo y emisiones tipo de una aeronave con 2 turbofanés en un vuelo de 1 hora y 150 pax.

Las interacciones de estas emisiones en las capas altas de la atmósfera son muy complejas, y son objeto de continuas investigaciones. Por ejemplo, los óxidos de nitrógeno (NOX) tiene una doble acción respecto al efecto invernadero: por una parte claramente negativa al actuar de precursor del ozono (O3), pero por otra elimina metano (CH4) de la atmósfera, otro gas de efecto invernadero. En todo caso, el efecto en conjunto de las emisiones de NOX es claramente favorecedor del cambio climático. Las emisiones de dióxido de sulfuro, por su parte, contribuyen a enfriar la atmósfera [5].

El avance en la comprensión de los diferentes mecanismos por los que la aviación comercial influye en el cambio climático pone de manifiesto el largo camino por recorrer hasta asegurar una aviación plenamente sostenible. Por otra parte, es este mismo conocimiento de los diferentes fenómenos implicados el que permite orientar los esfuerzos de la industria para mitigar su impacto.

Impact of Aviation on The Environment

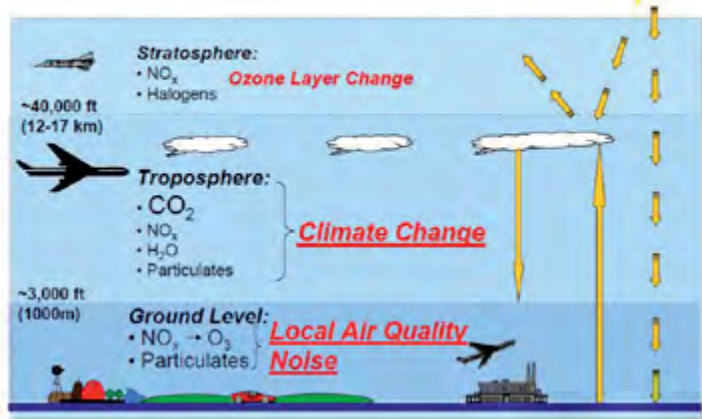


Figura 4. Esquema del impacto medioambiental de la aviación.

Centrándonos en las emisiones, su componente principal y mejor conocido es el dióxido de carbono (CO2), hasta tal punto que se utiliza para comparar impactos medioambientales de todo tipo entre diferentes industrias y sectores. En una de las evaluaciones más completas se concluyó que la aviación comercial en su conjunto fue responsable del 2,5% de las emisiones a nivel mundial en 2005 [5], cifra similar a otras estimaciones más recientes (2,4% en 2018 [7]). Este impacto de la aviación es ligeramente superior en estudios limitados al espacio europeo (3,6% en 2016 [8]). Contabilizando las emisiones de CO2 por países, de acuerdo con el origen de los vuelos, destacan Estado Unidos (24%) y China (13%) como los dos mayores contribuyentes con diferencia [7].

Para contextualizar estas cifras resulta útil compararla con el impacto medioambiental del transporte por carretera, responsable del 17% de las emisiones globales de CO2, como señala la Figura 5, 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 CO2 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 [4].

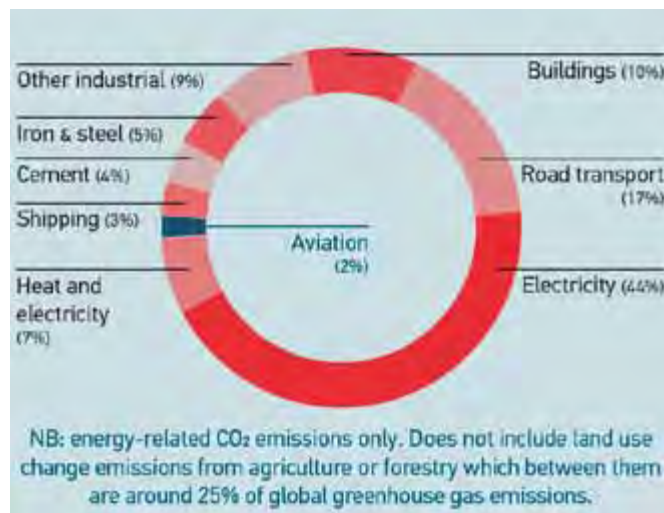


Figura 5. Contribución de CO2 debido a la aviación respecto al resto de emisores globales en 2014.

La Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA), en sus estudios sobre las emisiones de CO2 a nivel europeo, corrobora esta distribución del impacto en el sector del transporte (Figura 6).

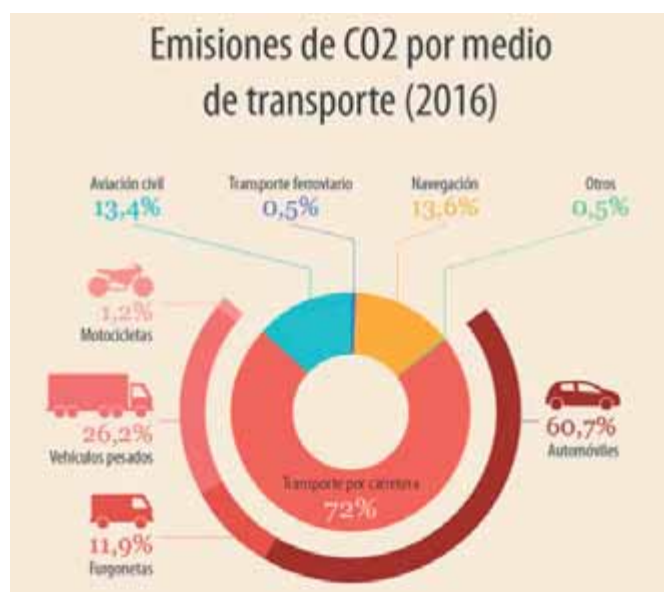


Figura 6. Contribución proporcional a las emisiones de CO2 por transporte en la UE.

Por otra parte, la Figura 7 detalla la importancia de los diferentes segmentos de la aviación según sus emisiones de CO2. 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.

2018 [7], la media del transporte aéreo de pasajeros es de 88 gCO2/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 122 gCO2/km². 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 82 gCO2/pax•km.

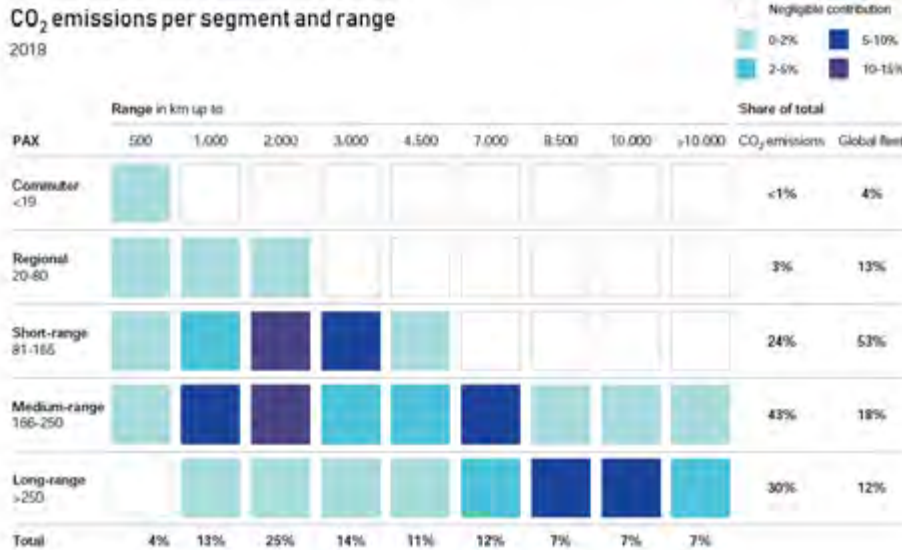


Figura 7. Contribuciones a las emisiones de CO2 en aviación según distancia y capacidad de los vuelos. (EU H2 2020).

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% [5]. 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 [7], se ha producido a pesar de la considerable mitigación por los avances tecnológicos en la industria aérea, como se aprecia en la Figura 8. 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 1.

Las mejoras en eficiencia de las aeronaves comerciales, en un escenario sin cambios radicales de tecnología o configuración, se estima que rondaría el 1-2% anual [4]. La incertidumbre actual hace difícil estimar el crecimiento futuro del tráfico aéreo, que ha sufrido un marcado parón en 2020 debido a la pandemia del COVID19, pero casi con toda probabilidad en el medio plazo superará 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 es la respuesta del sector de la aviación civil a este reto formidable.

Aviation emissions

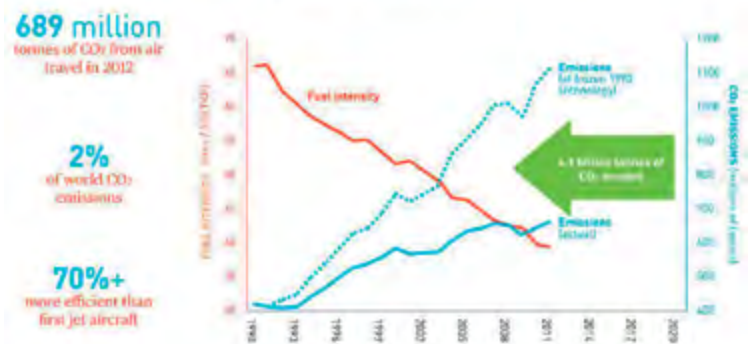


Figura 8. Emisiones de CO2 debido a la aviación evitadas debido a la mejora en eficiencia entre 1990 y 2012.

2 <https://www.eea.europa.eu/highlights/average-co2-emissions-from-new-cars-vans-2019>

Archivo fotográfico

- Figura 3. Fuente FOCA
- Figura 5. <https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/aviations-impact-on-the-environment/>
- Figura 6. 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>

1 ATAG. <https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/climate-action/efficient-technology>

3

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 3 ambiciosos objetivos:

1 Una mejora media en la eficiencia del transporte aéreo del 1,5% anual, medida en CO₂ emitido por tonelada-km transportada (RTK), entre 2009 y 2020.

2 Establecer como límite máximo de emisiones netas de CO₂ el nivel alcanzado en 2020, comprometándose a un crecimiento CO₂-neutro.

3 La reducción de las emisiones netas de CO₂ por parte de la aviación en un 50% en 2050 respecto a los niveles de 2005.

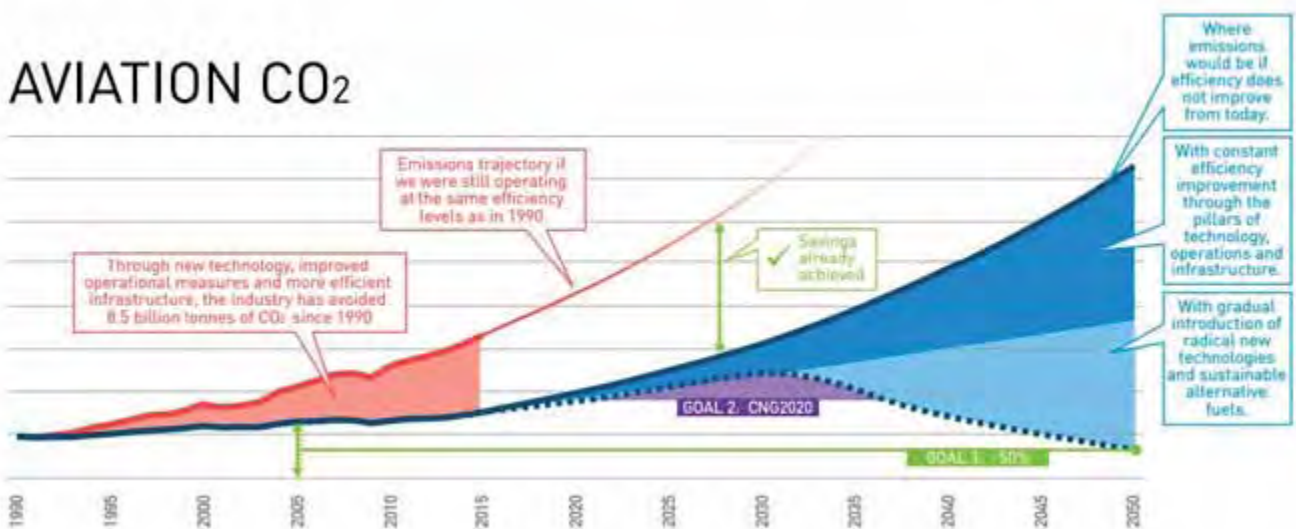


Figura 9. Evolución de las emisiones de CO₂ debido al transporte aéreo y su mitigación proyectada.

Las acciones necesarias para alcanzar estos objetivos son diversas. Según el consenso alcanzado en todo el sector, se pueden agrupar en 4 pilares [8]:

- Compensación de emisiones mediante sistemas de mercado.
- Modernización de infraestructuras, incluyendo las de control de tráfico aéreo.
- Mejoras en la eficiencia de las operaciones aeronáuticas.
- Desarrollo de nuevas tecnologías en las aeronaves, incluyendo los combustibles sostenibles para aviación (SAF).

¹ Air Transport Action Group

² ATAG. 3rd Aviation & Environment Summit. 22 de abril de 2008.

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.

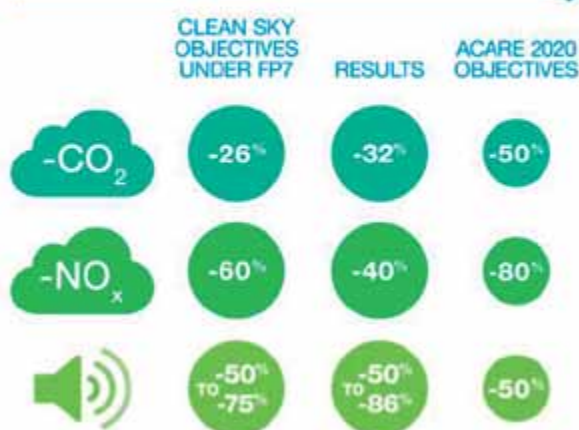
La OACI, organismo especializado de la ONU para la ordenación de la aviación civil internacional, juega un papel fundamental en la implementación de esta estrategia. Por una parte ha completado una serie de normativas de obligado cumplimiento para la certificación de aviones y motores en relación al ruido, la calidad del aire local (NOX, restos de hidrocarburos, CO, partículas) y cambio climático (CO2), lo que implica una certificación ambiental obligatoria a nivel mundial para la aviación civil.

Por otra, en 2016 OACI lanzó el mercado de compensación de emisiones de CO2 para aerolíneas (CORSIA), fundamental para la estrategia de mitigación de emi-

CLEEN I y II, gestionados por la autoridad federal aeronáutica (FAA), se han desarrollado de manera similar.

La economía circular es la extensión lógica de las iniciativas en sostenibilidad dentro de la industria aeronáutica. A la aplicación de medidas alineadas con las 3R 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 [10]. Dentro de otras iniciativas de las aerolíneas, destaca la estrategia de economía circular de Air France-KLM Group, con un rediseño y gestión sostenible de todo el catering y equipamiento de abordó. Los biocombustibles producidos a partir de residuos, tanto ur-

CLEAN SKY OBJECTIVES 2008-2017



CLEAN SKY 2 OBJECTIVES

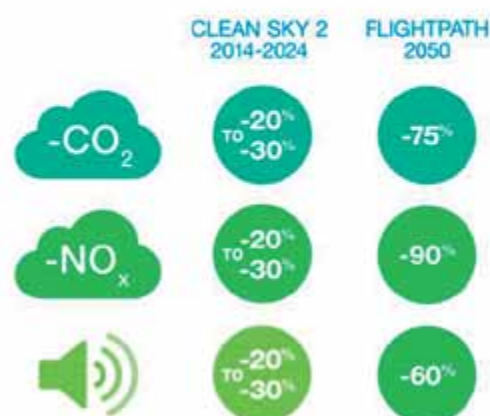


Figura 10. Programas de la UE CLEAN SKY 1 y 2, ACARE y FlightPath 2050. Evolución de objetivos medioambientales.

siones en el corto plazo, y que ha sido aceptada por la asociación del sector IATA. La entrada en vigor de su primera fase es el 1 de enero de 2021. Más adelante trataremos en detalle esta iniciativa.

La Unión Europea es también un actor fundamental en el impulso hacia un transporte aéreo sostenible. En 2011 estableció su visión para la aviación comercial del futuro: FlightPath 2050 [9], 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 CleanSky 2, continuación de una fructífera colaboración público-privada para financiar proyectos innovadores en el ámbito de la sostenibilidad. En Estados Unidos, los programas

banos como industriales o agrícolas (ver el apartado 4.4.1), son otra buena muestra de estas estrategias. Por último, 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 [10].

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.

4

ACCIONES INNOVACIÓN TECNOLOGÍA

4.1.

COMPENSACIÓN DE EMISIONES

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 CO₂ como referencia, se compensasen invirtiendo dinero en proyectos que redujesen una cantidad de emisiones equivalente se lleva probando desde hace ya tiempo. De hecho, a día a hoy hay compañías aéreas que afirman compensar el 100% de sus emisiones de dióxido de carbono, como Easyjet¹. El principal desafío en estas propuestas es la verificación de dichos proyectos de compensación, asegurando su adicionalidad y permanencia [11], además de la necesidad de aunar

esfuerzos coordinados si se pretende que el beneficio sea global.

El sistema de comercio de derechos de emisiones de la Unión Europea (EU ETS²) 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.

Entre 2013 y 2020 este sistema ha certificado la reducción de 193 millones de toneladas de emisiones de CO₂ relacionadas con el tráfico aéreo [8]. Con la llegada de 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.

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

² https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_es

En 2016 la OACI aprobó el lanzamiento de CORSIA³, un sistema de compensación de emisiones de CO₂ producidas por la aviación comercial. 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



Figura 11. Iniciativa CORSIA de la OACI.

su compromiso de compensar las emisiones de dióxido de carbono que superen el nivel de 2020. El sistema contabilizará el CO₂ emitido por cada aerolínea, y permitirá que estas participen en un mercado de derechos de emisión para aprovechar la capacidad de 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.

ducido 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) [12] y constituyó un comité técnico para su evaluación (TAB). CORSIA entrará en funcionamiento el 1 de enero de 2021, y se prevé que permita mitigar alrededor de 2.500 millones de toneladas de CO₂ hasta 2035 [1].

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 12. 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 2027⁴, con algunas excepciones marginales para países pequeños o poco desarrollados. Cada estado será el responsable de monitorizar las emisiones de las aerolíneas con vuelos en su territorio y con destino internacional. El cálculo de la cantidad de CO₂ que cada aerolínea debe compensar se rea-

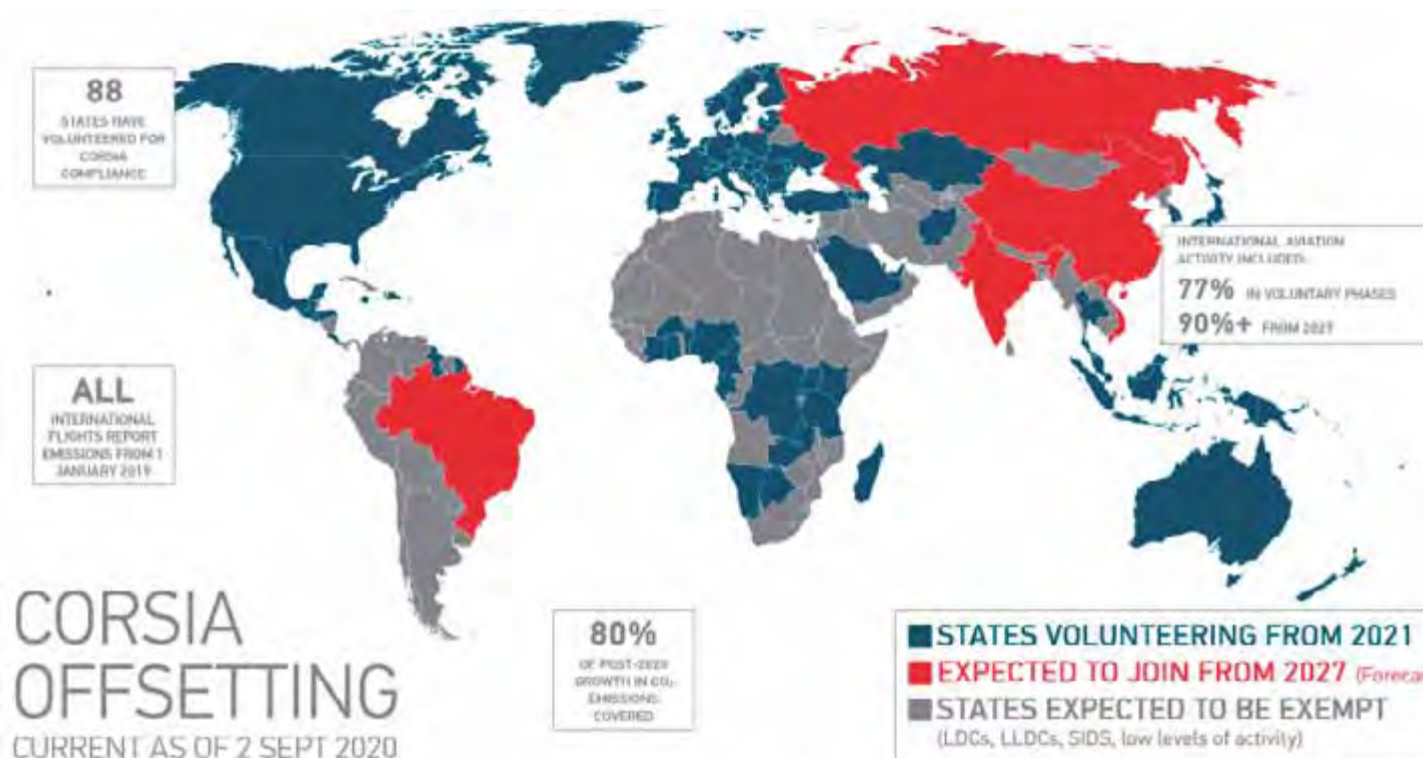


Figura 12. Países incorporados a CORSIA por etapas.

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 pro-

lizará 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.

³ <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx>

⁴ CORSIA tiene rango normativo como parte del Anexo 16 del Convenio sobre Aviación Civil Internacional (Convenio de Chicago).

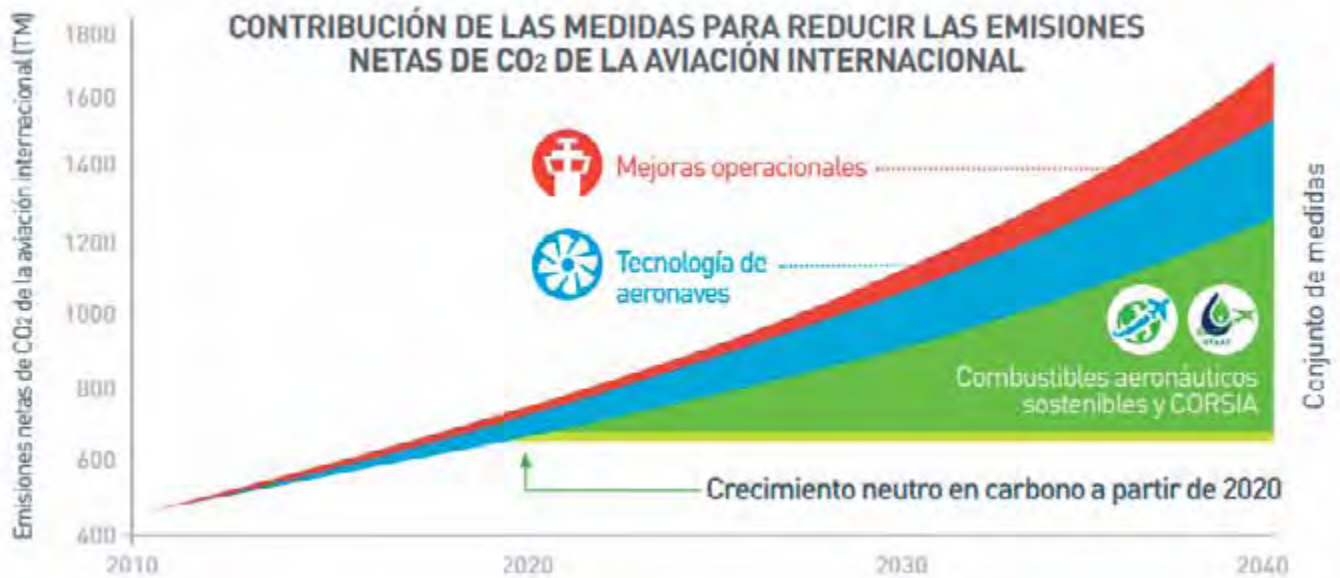


Figura 13. Previsión para un crecimiento de la aviación neutro en emisiones de CO₂ a partir de 2020.

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 CO₂.

En 2020, y tras un proceso no exento de debate⁵, OACI decidió cambiar el baremo máximo de emisiones, pasado de usar la media de los años 2019-2020 a considerar solo los datos de 2019. Esta medida se justificó en el impacto de la pandemia de COVID19 en el tráfico aéreo en 2020, que distorsionaría el cálculo de emisiones ante la anómala disminución de vuelos⁶.

Las principales críticas a este sistema de compensación señalan que probablemente no consiga frenar el aumento bruto de emisiones de CO₂ procedentes de la aviación, o que no incluya otros gases y efectos negativos medioambientales. Como alternativa se

plantea, por ejemplo, la introducción de tasas directas por emisión de carbono para reducir efectivamente el impacto medioambiental del tráfico aéreo, e incentivar la eficiencia energética de las aeronaves. La experiencia del sistema de compensación europeo EU ETS, en diferentes sectores, sirve para confirmar que sí se pueden conseguir reducciones directas en las emisiones con estas herramientas, aunque necesitan un diseño preciso y una revisión constante para asegurar su eficacia.

Por último, cabe resaltar que este sistema materializa el compromiso de la industria de las aerolíneas para frenar su nivel neto de emisiones de CO₂ de forma inmediata. CORSIA es el resultado de la colaboración público-privada transversal, dentro del sector de la aviación comercial a nivel global. Un esquema sin duda mejorable, pero que supone un primer paso necesario, de aplicación inmediata y cuyo éxito va a ser clave para el futuro de la aviación civil y la sostenibilidad medioambiental del planeta.

Archivo fotográfico

Figura 12. <https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/climate-action/offsetting-emissions-corsia/corsia/who-volunteers-for-corsia/>

Figura 13. https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Brochure/CorsiaBrochure_SPA-Mar2019_Web.pdf

⁵ <https://www.icsa-aviation.org/wp-content/uploads/2020/07/ICSA-Statement-on-Revision-of-CORSIA-Baseline.pdf>

⁶ <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/ES/ICAO-Council-agrees-to-the-safeguard-adjustment-for-CORSIA-in-light-of-COVID19-pandemic.aspx>

4.2. NAVEGACIÓN Y OPERACIÓN EN TIERRA

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 la operación de las aeronaves, las operaciones aeroportuarias y los procedimientos de navegación aérea.

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 CO₂ de infraestructura fija en más del 50% desde 1990 [8]. 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. El objetivo 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 2004¹.



En 2014, se estableció una empresa común (SJU) para desarrollar el sistema europeo de gestión del tráfico aéreo de nueva generación, SESAR, con ampliación hasta el 2024, en el que la UE aportará 1.500 millones de euros [8].

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 CO₂ desde 2014 (aproximadamente el 0,5% de las emisiones totales de CO₂ de la aviación) [8] y las emisiones de CO₂ 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.

Existe una implementación cada vez mayor del espacio aéreo de rutas libres FRA, donde los usuarios puedan libremente planificar una ruta dependiendo de la disponibilidad del espacio aéreo, fomentando la utilización de rutas más cortas y el uso más eficiente del espacio aéreo. 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; y se esperan operaciones completas en toda Europa para 2023/2024 como indica la figura siguiente.

¹ <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/en/sheet/133/air-transport-single-european-sky>

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.

En este sentido hay diversas medidas operativas que se pueden usar para disminuir las emisiones en el entorno de un aeropuerto.

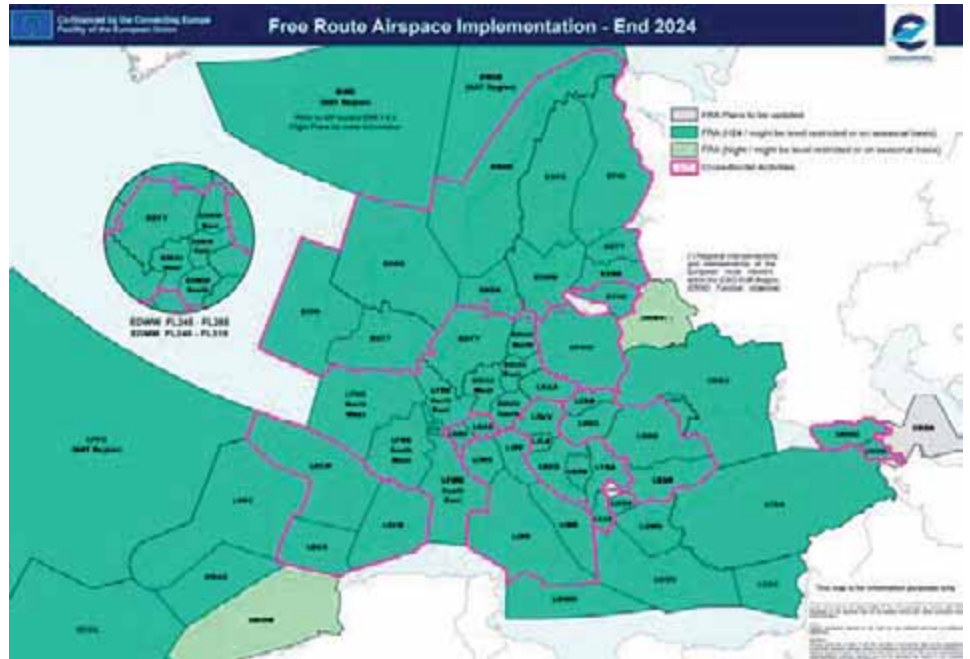


Figura 14. Implementación de operaciones FRA en Europa.

La Tabla 1 describe algunas de las que conciernen al diseño e instalaciones de los aeropuertos.

Medida	Descripción	Resultado
Diseño del aeropuerto	<ul style="list-style-type: none"> Proporcionar un diseño eficiente de pista, pista de rodaje y plataforma. 	<ul style="list-style-type: none"> Minimiza la sobrecarga y la congestión. Facilita movimientos de tierra más eficientes a través de una infraestructura mejorada. (diseño de la pista de rodaje, localización y diseño de la pista de rodaje de salida rápida, etc.).
Instalaciones aeroportuarias	<ul style="list-style-type: none"> Proporcionar energía fija de tierra de 400 Hz y, en caso necesario, aire pre-acondicionado en las puertas /áreas de mantenimiento. Mejorar las capacidades de despegue y aterrizaje de baja visibilidad, apoyadas por sistemas de guiado y control del movimiento en superficie, cuando sea necesario. 	<ul style="list-style-type: none"> Reduce o elimina el uso de APU, GPU y equipo de aire acondicionado. Reduce la congestión y el retraso en el mal tiempo y puede reducir la necesidad de desvíos a otros aeródromos.

Tabla 1. Características aeroportuarias que minimizan consumo de combustible y emisiones.[13]

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

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 CO₂ y el impacto financiero. Los resultados obtenidos indican lo siguiente [8]:

- 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 CO₂ de hasta 48 kg para un CCO y 145 kg para un CDO. Se estimó que los beneficios potenciales de CO₂ 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 CO₂ 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 seguridad (es decir, separación de tiempo o distancia), clima o capacidad [12].

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.

En promedio, la implementación de A-CDM permite un tiempo de rodaje reducido de 1 a 3 minutos por salida. Otros 17 aeropuertos han implementado A-CDM desde 2016, representando más del 40,9% de las salidas europeas operando desde un aeropuerto A-CDM. El informe de evaluación de impacto del A-MDL 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 108.072 toneladas de emisiones de CO₂.

En la Tabla inferior se describen procedimientos que disminuyen el impacto medioambiental, así como los resultados obtenidos según la operación.

Medida	Operación	Resultados
Procedimiento de la aeronave.	<ul style="list-style-type: none"> Operaciones de descenso continuo (CDO). Operaciones de subida continua (CCO). 	<ul style="list-style-type: none"> 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.	<ul style="list-style-type: none"> Minimización del uso de empuje inverso en el aterrizaje. Rodadura sin motor. 	<ul style="list-style-type: none"> El piloto debe conservar plena autoridad sobre la operación segura de la aeronave.
Otros procedimientos.	<ul style="list-style-type: none"> Reducir el tiempo del motor al ralentí. Remolque de aeronaves. 	<ul style="list-style-type: none"> 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 (3)

Otras iniciativas operacionales de las que se esperan beneficios ambientales se muestran en la tabla siguiente [15]:

SESAR soluciones	Beneficios ambientales
<p>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</p>	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
<p>Mejorar 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.</p>	Menos consumo de combustible y ruidos
<p>Gestión de Salida sincronizada con la secuenciaprevia 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</p>	Reduce tiempos de espera, ahorrando combustible y permite la eficiencia del servicio de navegación aérea
<p>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.</p>	Menor consumo de combustible y emisiones
<p>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</p>	Menor consumo de combustible debido a reducción de tiempo de espera en el aire.
<p>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.</p>	Tiempos de rodaje mejorados que resultan en un menor consumo de combustible
<p>Desarrollo de 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.</p>	Ahorrar combustible y mejorar tiempo de llegada, reducir emisiones innecesarias cuando un avión está inactivo en la pista.

Tabla 2. Oportunidades operacionales para minimizar el consumo de combustible y las emisiones de las aeronaves en aeropuertos (3)

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 (CO₂, NO_x, SO_x, 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 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 los 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 CO₂ a la atmósfera y el ahorro de combustible a las aerolíneas².

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 renovables³.

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 como causa de su actividad incluyendo a determinados de sus aeropuertos en el programa ACA⁴. 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 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 [16].

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.

⁴ El programa Airport Carbon Accreditation, ACA, es una certificación que otorga el Consejo Internacional de Aeropuertos (ACI EUROPE), establece 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 CO₂, teniendo como objetivo final lograr la neutralidad en carbono.

Archivo fotográfico

Figura 14. <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2020-04/eurocontrol-fra-implementation-end-2024-v7-30042020.pdf>



² https://www.enaire.es/es_ES/2020_03_25/ndp_premio_sostenibilidad

³ https://www.enaire.es/sobre_enaire/sostenibilidad-medioambiente_servidumbresl/nuestro_compromiso

4.3. MEJORAS DE EFICIENCIA GRADUALES Y DE DISEÑO

4.3.1. Programas de desarrollo tecnológico

Buscando ese progreso tecnológico hacia la sostenibilidad, la industria aeronáutica ha llevado a cabo inversiones elevadas en I+D (del orden del 15% de la facturación in 1999¹, 19.000 millones de € en Europa y 4 veces más en USA²), con iniciativas privadas y apoyo público, principalmente NASA-industria aeronáutica en EEUU y en Europa, con las actividades aeronáuticas realizadas dentro de los Programas Marco de I+DT de la Unión Europea.

PROGRAMAS DE I+D EN EUROPA RELATIVOS AL IMPACTO AMBIENTAL DE LA AERONAUTICA 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 VII Programa Marco de Investigación, Desarrollo

Tecnológico y Demostración de la Unión Europea (2007-2013), y fue financiado con 1.600 millones de euros, el 50% de los cuáles son aportados por la industria 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. A través de este programa se llevaron a cabo los 6 demostradores tecnológicos de los cuáles se obtendrán diversos desarrollos que se supervisarán de forma integrada en el seno del Evaluador tecnológico, el cuál analizará la viabilidad de todas y cada una de las tecnologías desarrolladas.






Technology Evaluator						
ITD	Smart Fixed Wing Aircraft	Green Regional	Green Rotorcraft	Sustainable & Green Engines	Systems for Green Operations	Eco Design
Activities	Active Wing New Aircraft Configurations	Advanced Aerodynamics (Low Drag & Noise) Low Weight Structures	New Powerplants Innovative Blades & Rotors New Aircraft Configurations	Advanced LP & HP System Technology New Engine Concepts (i.e. Open Rotor)	Mission & Trajectory Management Aircraft Energy Management	Whole Life Cycle Environmental Impact Analysis
Targets	CO ₂ -12 to 20% Noise -10dB	CO ₂ -10 to 20% Noise -10dB	CO ₂ -26 to 40% NO _x -53 to 65% Noise -10dB	CO ₂ -15 to 20% NO _x -15 to 40% Noise -15dB	CO ₂ -10 to 15% Noise -17dB	CO ₂ -10% Noise -10dB
Products	Widebody 2020  CO ₂ -30% NO _x -30% Noise -20dB	Narrowbody 2015  CO ₂ -20% NO _x -20% Noise -15dB	Regional 2020  CO ₂ -10% NO _x -10% Noise -20dB	Corporate 2020  CO ₂ -30% NO _x -30% Noise -10dB	Rotorcraft 2020  CO ₂ -30% NO _x -60% Noise -10dB	

Figura 15. Actividades y Objetivos de los demostradores tecnológicos en Clean Sky.[17]

¹ <https://www.aero.upm.es/departamentos/economia/investiga/informe/consolidacion%20europea.pdf>

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

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).

Ejemplo de demostradores³: sustituir el aluminio de parte de 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 15 se incluyen los detalles de los objetivos medioambientales fijados en los diferentes Demostradores Tecnológicos Integrados.

En mayo de 2014, el Consejo de la Unión Europea acordó extender la JTI Clean Sky (Clean Sky 2⁴), 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. Su financiación fue de 4.000 millones de euros. 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 de alta presión y de baja presión, y por otro a nuevos conceptos de motores como Sage2 Counter-Rotating Open Rotor (CROR), Ultrafan, y el demostrador aerodinámico BLADE, entre otros.

En la referencia [18] se pueden encontrar los avances del programa hasta la fecha (último informe del 2019), y en la Figura 10 se recogen los objetivos del Clean Sky junto con los objetivos de ACARE 2020 y de Flightpath 2050.

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

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)⁵ y UEET (Ultra-Efficient Engine Technology Program) [19]. AST, con el objetivo de desarrollar tecnologías de gran impulso para asegurar la competitividad de las aeronaves de transporte civil de EEUU 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

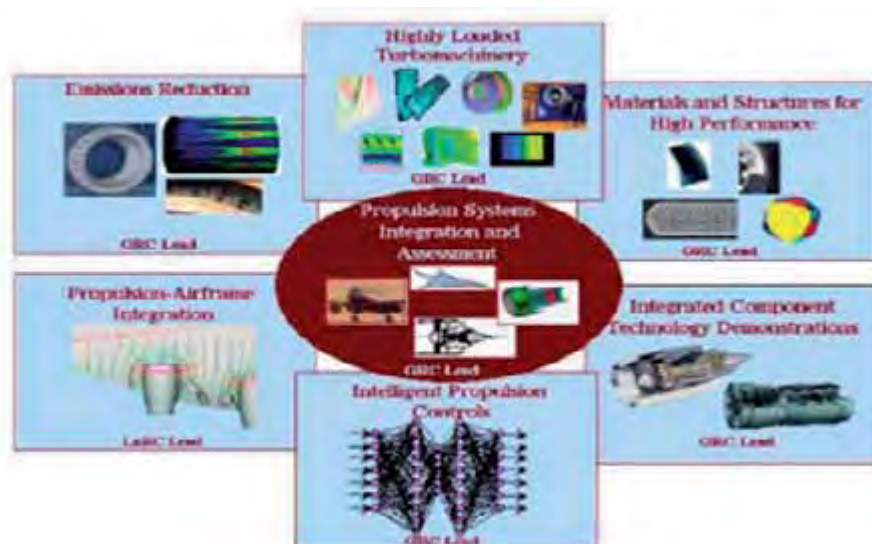


Figura 16. Esquema del programa UEET. [17]

tecnologías revolucionarias de propulsión que permitieran la generación futura de vehículos en una amplia gama de velocidades de vuelo.

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 efectos adversos so-

³ <https://www.cleansky.eu/node/45>

⁴ <https://www.cleansky.eu/>

⁵ <https://er.jsc.nasa.gov/seh/pg36s95.html#:~:text=Therefore%2C%20NASA%2C%20other%20government%20agencies,ways%20to%20enhance%20the%20safety%20>

bre 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 NO_x, esta última para el ciclo LTO [20].

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 [21]. Posteriormente, 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) [22] 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:

- 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 para crear estructuras de avión 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 NO_x, y se consiguió reducir la emisión cerca de un 80%.
- Se desarrollaron nuevas herramientas de diseño para ayudar a los ingenieros a reducir el ruido de los alerones desplegados y el tren de aterrizaje durante los despegues y aterrizajes.
- 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 a continuación, aunque la propulsión eléctrica e híbrida será tratada en el capítulo 4.5.

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 (CO₂ 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 más aerodinámicas. Por tanto, para hacer las aeronaves más sostenibles se han de desarrollar tecnologías focalizadas en propulsión, aerodinámica y peso.

CLEEN Phase I Benefits:

Demonstrated technologies that reduce noise, emissions and fuel burn

<h3>Boeing</h3> <p>Adaptive Trailing Edge ~ 2% fuel burn reduction ~ 1.7 EPNdB cum in some single and twin aisles</p> <p>CMC Acoustic Nozzle ~ 1% fuel burn reduction ~2.3 EPNdB cumulative noise margin to Stage 4</p>	<h3>General Electric</h3> <p>TAPS II Combustor (entered fleet in 2016) > 60% margin to CAEP/6 LTO NOx was achieved</p> <p>FMS/Engine and FMS/ATM Integration (Entered into service - LEAP engine on B737MAX, Airbus A320 Neo aircraft, and GE9X engine on 777X) 0.7-1.0% fuel burn reduction</p> <p>Open Rotor ~26% reduction in fuel burn (re: 737-800) ~15-17EPNdB cumulative noise margin to Stage 4</p>
<h3>Honeywell</h3> <p>Fuel Burn Technologies CLEEN technologies contributed to ~5% fuel burn reduction as part of a 15.7% fuel burn reduction engine package</p>	<h3>Rolls Royce</h3> <p>Ceramic Matrix Composite Turbine Blade Track CMC blade tracks offer > 50% reduction in cooling flow and component weight.</p> <p>Rolls-Royce – Dual Wall Turbine Airfoil Dual Wall turbine airfoils provide > 20% reduction in cooling flow and increased operating temperature capability.</p>
<h3>Pratt & Whitney</h3> <p>Geared Turbofan Technologies CLEEN techs expand design space for engine with ~ 20% fuel burn reduction, > 20 EPNdB cumulative noise margin to Stage 4</p>	<p>CLEEN tech will provide ~1% fuel burn reduction</p>

For more information: <http://www.faa.gov/go/cleen>

Figura 17. Tecnologías demostradas de reducción de combustible, emisiones y ruido.[23]

Technology & Emissions Reduction

- Visible smoke emissions have been eliminated

DC-8,
1958



Boeing 787,
2012



- 50% reduction in CAEP Nitrogen Oxides (NOx) emissions standard since 1995
- CLEEN Program - Low NO_x Combustors
 - GE TAPS II Combustor,
LTO Nox: 55% below most recent CAEP std
PM: 90% below CAEP visibility smoke limit
 - CLEEN II combustor development ongoing with GE, Honeywell, RR



Figura 18. Evolución en tecnología de reducción de emisiones.[23]

4.3.2. Propulsión

Reducción del consumo específico del combustible (SFC)

Para reducir el SFC hay que aumentar los valores de rendimiento térmico y/o propulsivo para una velocidad de vuelo y un tipo de combustible determinado.

politrópica de más del 90%, gracias al desarrollo de códigos CFD de diseño precisos. El control de los flujos secundarios a través de la turbomaquinaria

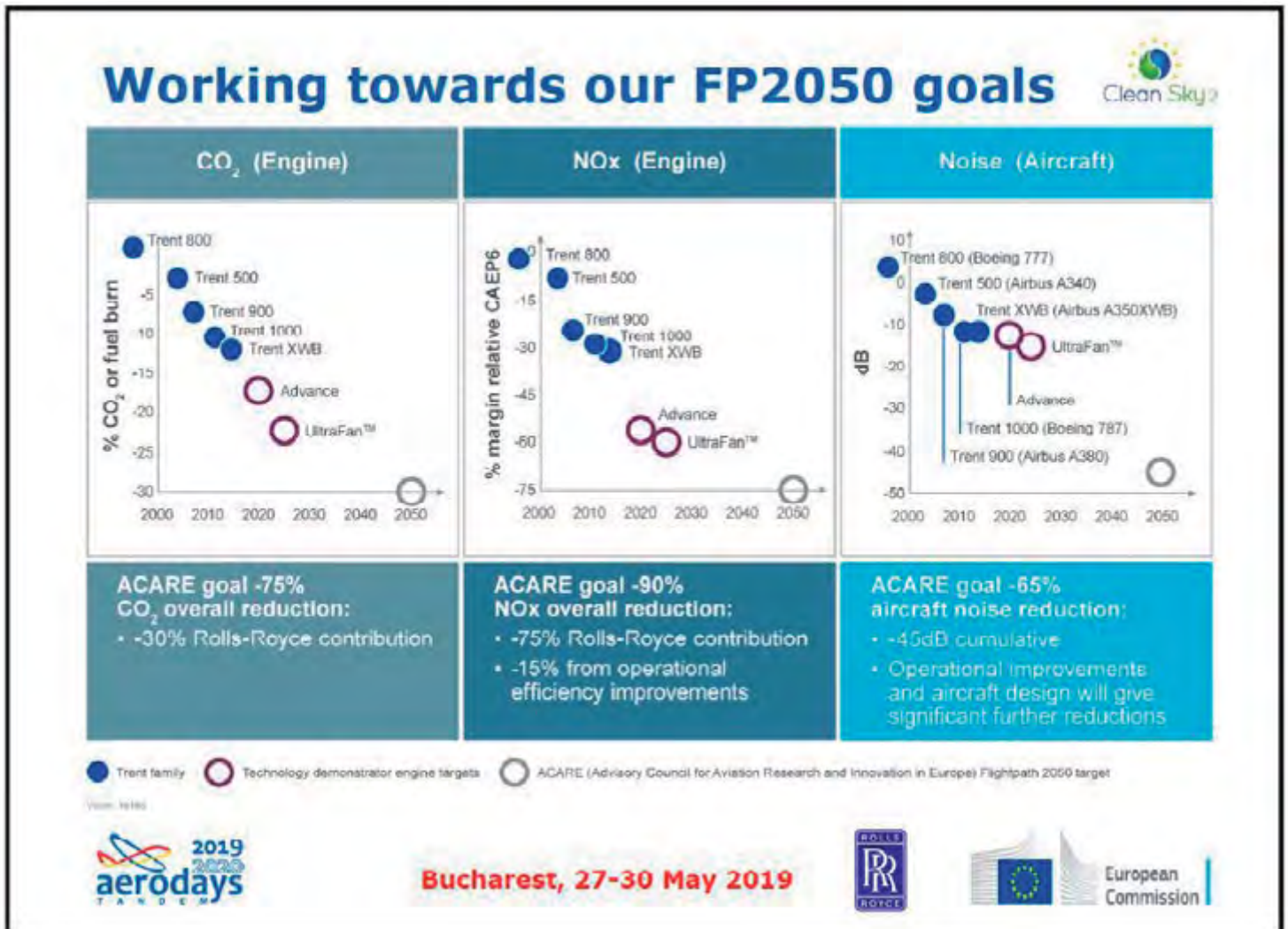


Figura 19. Evolución de una familia de motores vis a vis los objetivos de ACARE 2050.

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

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 específico, se consideran tres configuraciones de motores: motores de accionamiento directo (Direct Drive Turboprop, DDTF), motores con caja de cambio reductora (Geared Turbofan, GTF) y motores de rotor abierto (Open Rotor):

Motores de accionamiento directo (Direct Drive Turbofan, DDTF).

Constituyen la aproximación convencional, donde el compresor y los componentes del núcleo 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 con los nuevos desarrollos Advance y Ultrafan, este último dentro de Clean Sky 2) en relación con los objetivos 2050 de ACARE.

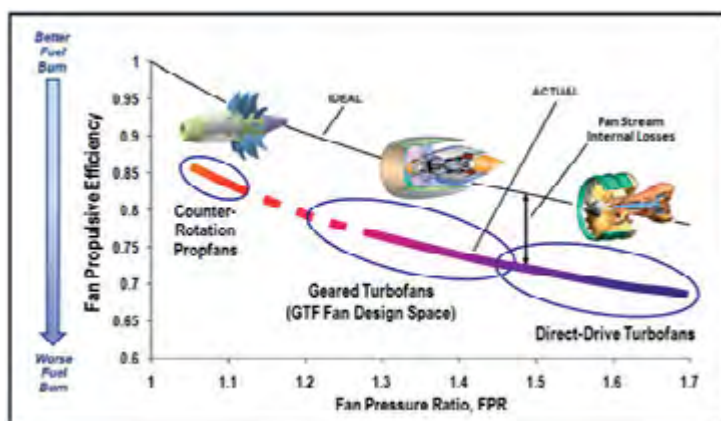


Figura 20. Tendencia en el rendimiento de la propulsión del fan vs. su relación de presión.[24]

La primera generación de GTF en EEUU, fue desarrollada por Pratt & Whitney (P&W) en colaboración con NASA y se considera una tecnología N+1. Las áreas tecnológicas investigadas incluían fan de baja velocidad y baja 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 que la BPR (bypass ratio) del motor alcanzara el rango de relación Ultra High Bypass (UHB) de 12 o más, permitiendo al mismo tiempo reducir la FPR⁶ entre 1,3 y 1,4 para lograr una mayor eficiencia del fan.

Una vez se alcance un punto de beneficio máximo para este nivel de tecnología, a medida que la BPR de diseño siga aumentando y la FPR disminuya, se necesitará un segundo cambio de paradigma en la tecnología para ampliar la línea de tendencia beneficiosa del consumo de combustible. NASA y P&W investigan una segunda generación de tecnologías de propulsores GTF para ayudar a alcanzar esos objetivos, y alcanzar una BPR de hasta 18 y una FPR de entre 1,25 y 1,3. La figura inferior muestra la proyección del beneficio en consumo de combustible que proporcionará la segunda generación de GTF, una reducción del 25 al 30% en comparación con la actual, obtenida por la combinación del DDTF 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 (Ultra High Bypass Ratio), 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.

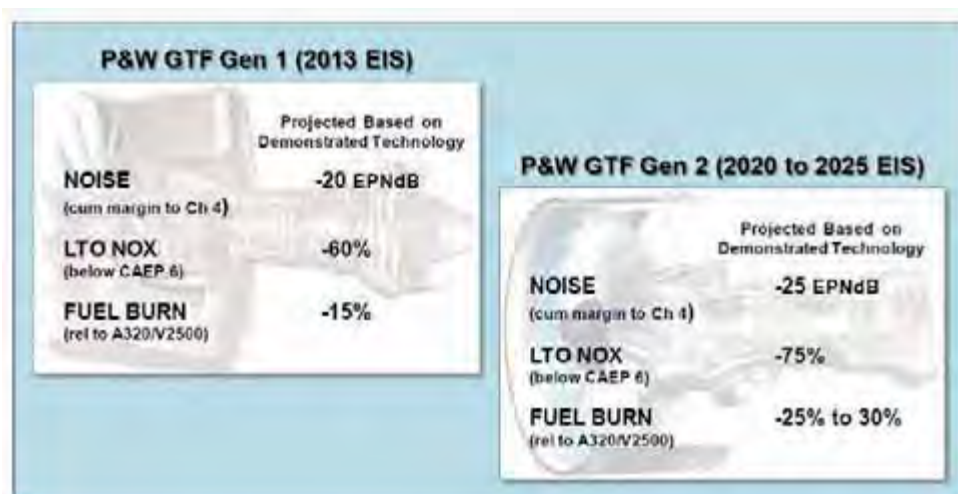


Figura 21. Proyecciones de las reducciones en consumo de combustible y otros impactos ambientales con el ciclo de motor GTF de P&W.[24]

⁶ Relación de presión del fan.

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.

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

- Nuevos conceptos de fan con énfasis en los contrarrotativos 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).

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. A mediados de los años ochenta, la NASA, en asociación con varias industrias de motores de EEUU, investigó esta nueva tecnología radical de propulsión y resurgió dentro de 7º Programa marco en el proyecto DREAM (valiDation of Radical Engine Architecture systeMs, 2011) y en el Clean Sky.

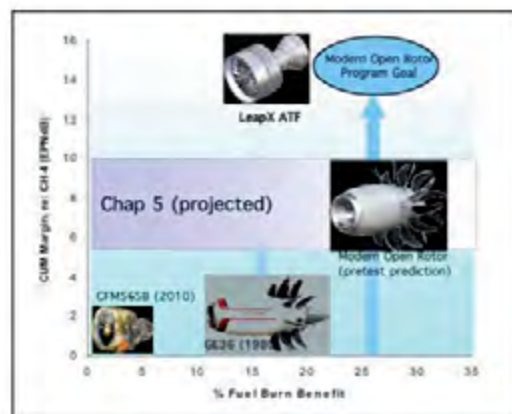


Figura 22. Beneficios de la performance de la Tecnología de rotor abierto comparada con turbofanos actuales.

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, con una 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 OACI⁷.

Ultrafan

Está siendo desarrollado por Rolls-Royce y permite que el compresor 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 está siendo diseñado para cumplir con los estrictos niveles potenciales de ruido y emisiones para las aeronaves que entren en servicio antes de 2030.

Tecnologías del núcleo del motor

En el área de turbo maquinaria del núcleo el énfasis, dentro de los proyectos de la NASA para reducir el consumo de combustible, 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.



Figura 23.

⁷ <https://www.easa.europa.eu/eaer/topics/technology-and-design/stakeholder-actions>

Una OPR y una 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.

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 las Figuras 24 y 25 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, mejores rendimiento y empuje, y menor consumo específico de combustible. La Figura 26 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.

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 NO_x: Proyecto NEWAC (New Aero engine Core concepts, 2006-2011) del 6º Programa Marco. NEWAC complementó otros proyectos en este campo, por ejemplo EEFAE en el 5º PM y VITAL en el 6º PM.

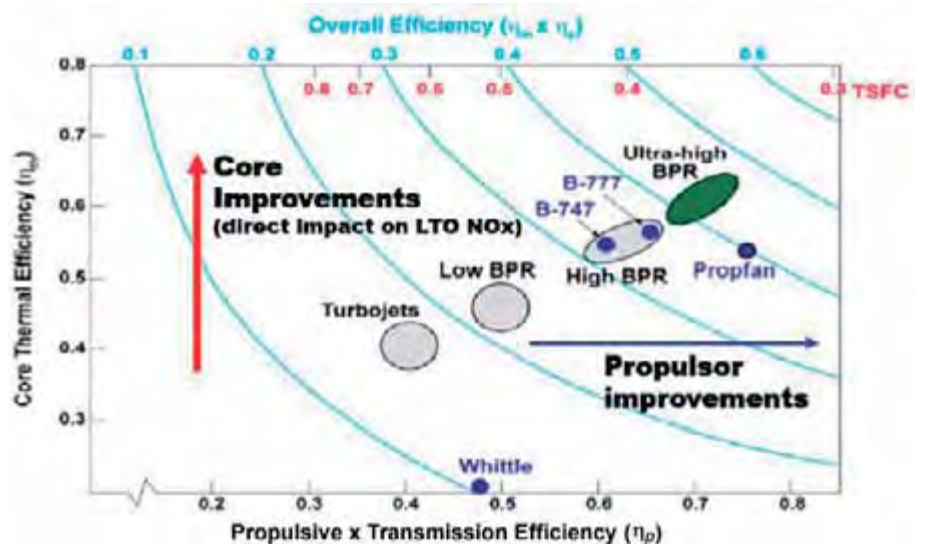


Figura 24. Tendencias en los rendimientos con las mejoras en propulsor y núcleo.[25]

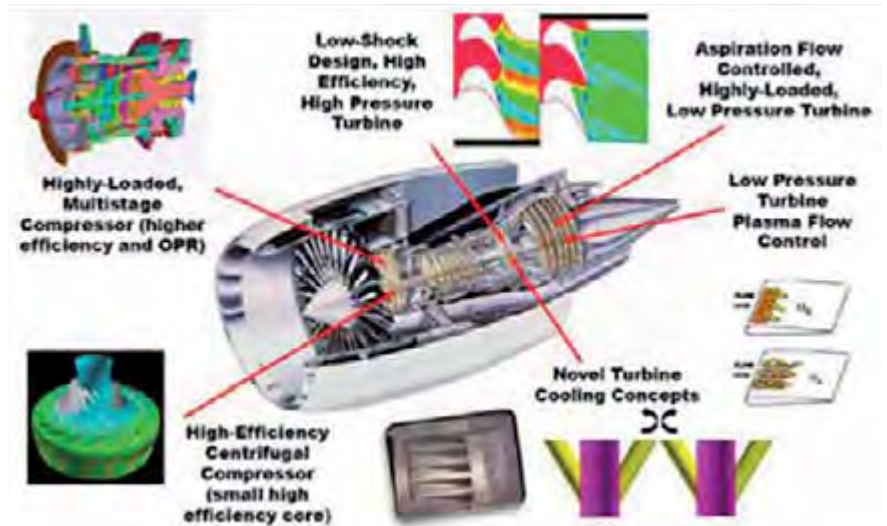


Figura 25. Tecnologías basadas en diseño aerodinámico del núcleo para motores avanzados[25].

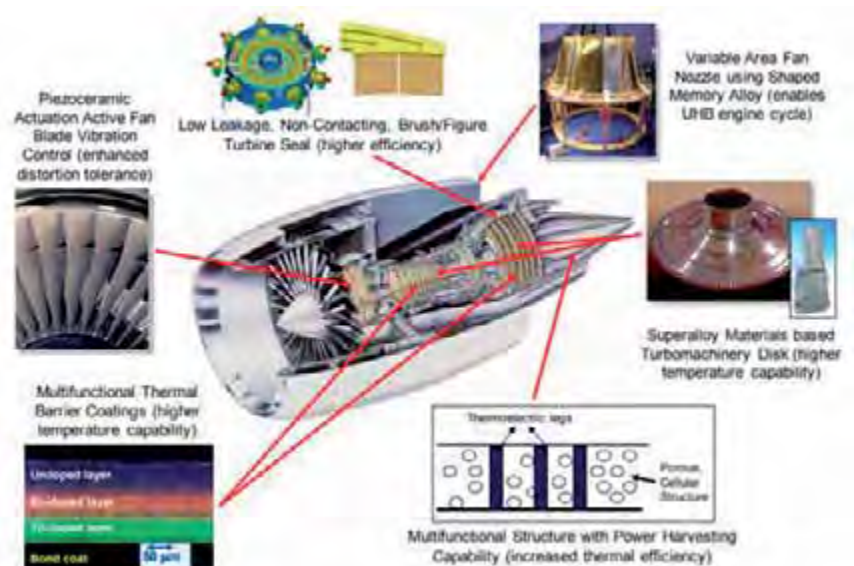


Figura 26. Tecnologías basadas en materiales del núcleo para motores avanzados[24].

Las nuevas propuestas de configuración del núcleo tratadas en NEWAC son cuatro, cada una, para un tipo distinto de turbofán:

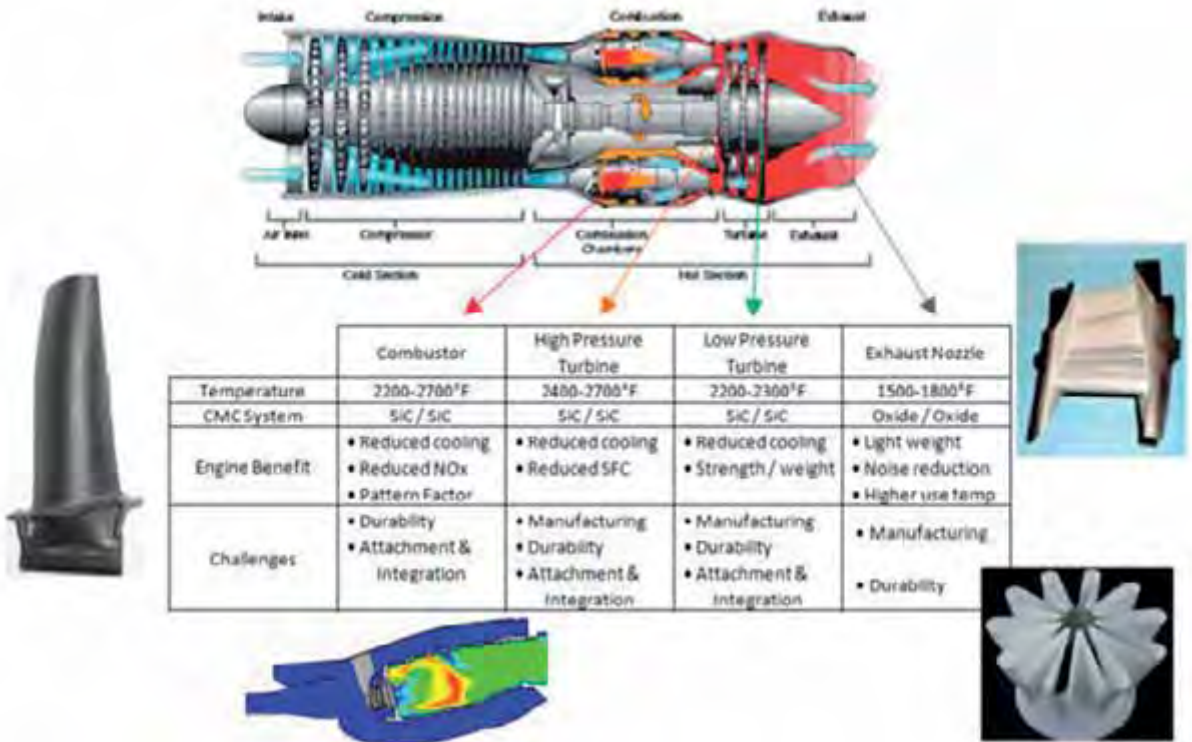


Figura 27. Aplicaciones para materiales CMC en componentes de motor y beneficios potenciales.[20]

- 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

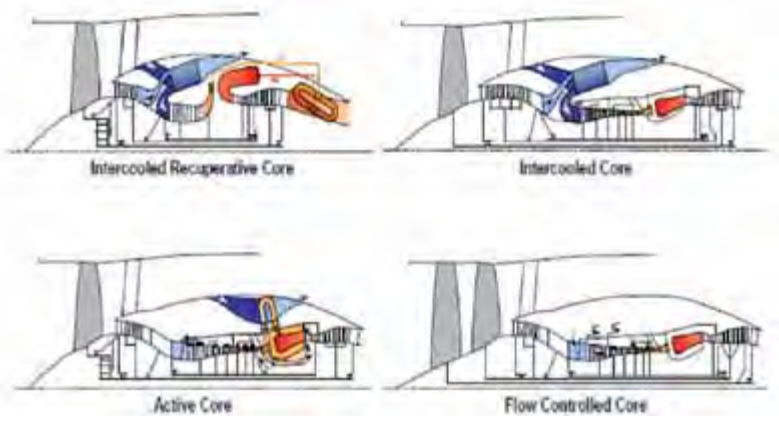


Figura 28. Conceptos del núcleo en NEWAC.

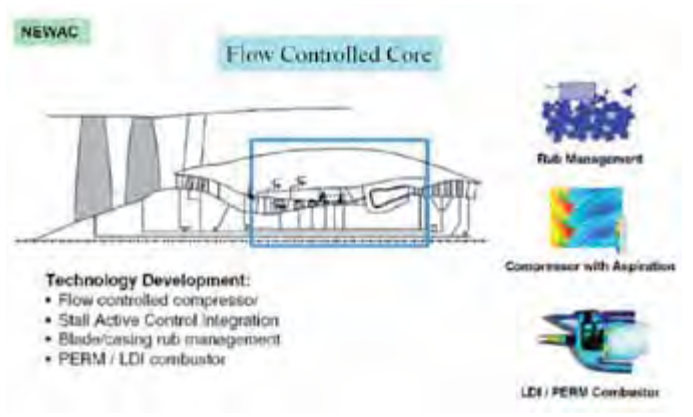


Figura 29. Esquema del concepto de núcleo de flujo controlado y sus desarrollos tecnológicos.

Turbina de gas de núcleo pequeño

Otra forma de obtener una mayor eficiencia de combustible de un motor es cambiar su configuración de forma que el flujo de aire a través de él cambie y 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).

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.



Figura 30. Turbina de gas de núcleo pequeño.

La NASA están estudiando formas de reducir el diámetro del núcleo de motores a reacción turbofán de alta derivación para aumentar la eficiencia del combustible⁸.

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.

⁸ <https://www.nasa.gov/aero/nextgen-aircraft-design-is-key-to-aviation-sustainability>

Propulsión eléctrica, híbrida o aeronaves alimentadas con pilas

Motores convencionales y eléctricos son usados durante el vuelo de distintas formas, eléctrico o Híbrido-Eléctrico. Estos tipos de sistemas de propulsión se encuentran entre las tecnologías más prometedoras (ver capítulo 4.5).

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 en 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 CENTRELINER (Concept validation sTudy foR fuselagE wakefilLing propulsion integration). Este proyecto explora un diseño de sistemas PFC turboeléctricos de dos motores con un propulsor BLI de fuselaje de popa.

Archivo fotográfico

Figura 19. <http://www.tandemaerodays19-20.eu/presentations/>
 Figura 28. Nagpurwala, Q. H., State of art and future trends, <http://164.100.133.129:81/eCONTENT/Uploads/16-PT12-Future%20Tech%2044%20%5BCompatibility%20Mode%5D.pdf>
 Figura 29. Nagpurwala, Q. H., State of art and future trends, <http://164.100.133.129:81/eCONTENT/Uploads/16-PT12-Future%20Tech%2044%20%5BCompatibility%20Mode%5D.pdf>

4.3.3. Aerodinámica

Las tecnologías aerodinámicas han estado a lo largo de la historia de la aviación en continuo desarrollo. Hoy en día los esfuerzos de investigación con incidencia en el consumo de combustible se centran en áreas tales como las siguientes.

- Dinámica de fluidos computacional, CFD
- 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

En base a estos avances se han desarrollado tecnologías aerodinámicas que han favorecido la disminución del consumo de combustible y, por tanto, la de las emisiones, incidiendo en la reducción de la resistencia aerodinámica y en la integración de la propulsión, así como optimización multidisciplinar.

Los avances en aerodinámica, así como en materiales y estructuras, permiten 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.

Tecnología de curvatura variable en el borde de salida.

Otro método de disminuir la resistencia. 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 aeroelásticamente una forma de ala en vuelo con el fin de lograr una forma deseada para la reducción de resistencia óptima.

Tecnología de estructuras acanaladas (riblets) en la superficie del ala, demostrándose, mediante ensayos en túnel y en vuelo, que reducen pasivamente

la fricción turbulenta local de pared del orden de un 6% [26], 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.

Flujo laminar

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 el consumo de combustible. El control de flujo laminar natural se logró sólo mediante el diseño de las superficies de las alas y otras partes de la aeronave con una forma adecuada.

Esta tecnología se estudia, por ejemplo, en el proyecto de ala laminar, BLADE (Breakthrough Laminar Aircraft Demonstrator in Europe). 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 CO₂ hasta en un 5% [8]. 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. El tamaño de las secciones laminares es representativo de las dimensiones de las alas de las aeronaves de un pasillo, que pueden aplicar la tecnología de flujo laminar. 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%.

El control de flujo laminar híbrido (HLFC) utiliza la succión de capa límite para mantener el flujo laminar sobre la superficie de la aeronave. Esta tecnología es particularmente adecuada para las alas en flecha y el empenaje. NASA, en el marco de su programa de investigación Environmentally Responsible Aviation (ERA), llevó a cabo una serie de ensayos en vuelo en un B757 equipado con un sistema HLFC.

Se ha visto que la escala y la flecha afectan a la aplicación 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 de Clean Sky. En Clean Sky 2 se están llevando a cabo actividades en NLF y HLFC como se indica en la Figura 31 y Figura 32 respectivamente, que están en un estado avanzado de desarrollo.

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 compensarse con el aumento de la resistencia debida a la instalación. Dentro de los programas marco de la UE se han

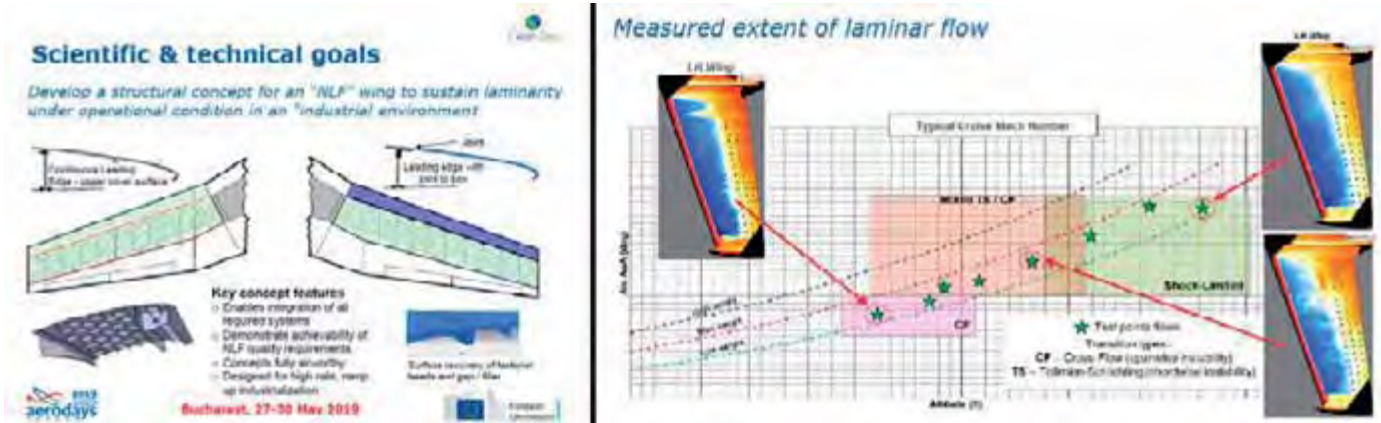


Figura 31. Actividades de flujo laminar natural en Clean Sky 2.[27]

Efectos aerodinámicos en la integración propulsión-célula

Para el desarrollo de aeronaves de transporte nuevas o modificadas, el uso de los nuevos motores UHBR implica, dado su gran diámetro, la necesidad de un acoplamiento estrecho con el ala.

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 inves-



Figura 32. Actividades de flujo laminar híbrido en Clean Sky2.[28]

El creciente diámetro exterior de la góndola debido al aumento de la relación de bypass (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

igado 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 33.

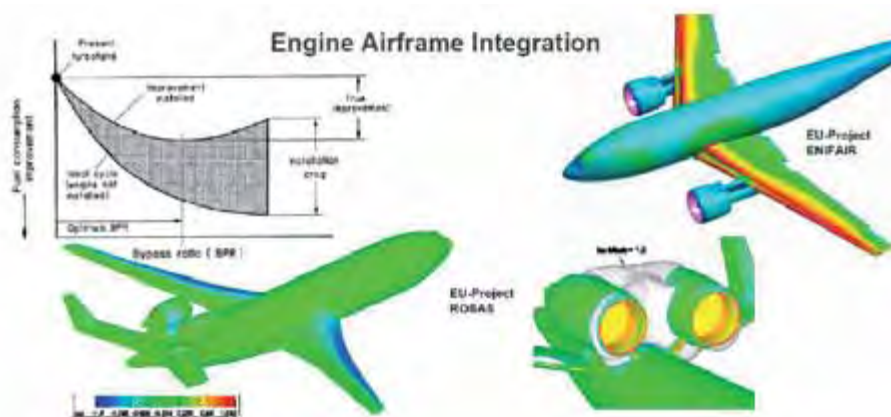


Figura 33. Integración propulsión-célula en configuraciones convencionales y no convencionales.[29]

CONFIGURACIONES AERONÁUTICAS REVOLUCIONARIAS

La NASA ha promovido en EEUU, desde el año 2000 aproximadamente, una investigación sobre configuraciones revolucionarias, mediante programas de colaboración público-privada, con actividades de I+D de la industria. Entre estas tecnologías destacan⁹:

El concepto de ala reforzada con puntal (SBW) permite sin aumentar el peso aumentar la envergadura y por tanto, menos empuje es necesario. Proyecto "Subsonic Ultra Green Aircraft Research" (SUGAR) de Boeing. Esta configuración es 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. La optimización del peso del ala combinado con un motor de rotor abierto podría conducir a un ahorro de combustible en bloque de hasta un 53% en comparación con la flota de referencia.

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 de referencia actual.

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 es-

tado estudiando los conceptos de BWB con sistemas de propulsión turboeléctrica 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. Además, el potencial de mercado en esta categoría de asientos es grande, y cabe esperar que los costes de desarrollo se compartan si un gran número de unidades se van a producir.

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 A320neo.

⁹ IATA Technology Roadmap for Environmental Improvement Fact Sheet, 2019-2 <https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/technology20roadmap20to20205020no20fo-reword.pdf>

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. Se consigue 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.

Ala transónica Truss-Braced.

Estudios para aumentar la eficiencia aerodinámica mediante concepto de avión Transónico con ala

Truss_braced (TTBW). 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.

Aunque se han estudiado otros diseños de aviones revolucionarios, como el cuerpo de doble burbuja y el ala combinada, 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.

4.3.4. Estructuras y materiales

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 ICCAIA, el potencial de ahorro de peso total con metales se encuentra en el rango de $5\pm 2\%$. Con composites avanzados, los posibles ahorros serían del $8\pm 2\%$ para aviones de un pasillo y del $4\pm 2\%$ para los de dos pasillos [10]. 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 [10]. 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 [30].

Existen tres desafíos al trabajar con materiales compuestos: el tiempo desde el concepto de pieza hasta su certificación, pasando por la optimización de proceso; la duración del proceso de fabricación y el del reciclaje. 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 empleo de materiales avanzados en la estructura avión, también es de suma importancia el uso en los motores de estos materiales como composites de matriz cerámica (CMC), ya mencionados anteriormente, aleaciones de titanio u otras aleaciones de base níquel, etc., así como recubrimientos que mantengan la resistencia a la rotura a fluencia a alta temperatura y la resistencia a la oxidación/corrosión debido a las grandes sollicitaciones en forma de elevados esfuerzos y muy altas temperaturas que se tienen que soportar. Se han realizado importantes esfuerzos de desarrollo para mejorar materiales o recubrimientos en el fan, compresor, cámara de combustión y en las turbinas, mediante la adopción de nuevos materiales y procesos.

TECNOLOGÍAS REVOLUCIONARIAS EN ESTRUCTURAS Y MATERIALES

En el proyecto Spanwise AdaptiveWing (SAW) de la NASA, se está investigando alas que pueden adaptarse a cada fase de vuelo modificando la forma de diferentes partes de la misma, con el objetivo de reduciendo el peso y la resistencia, mejorando así la eficiencia del combustible. Material revolucionario como una aleación de níquel-titanio SMA, aleación con memoria de forma, que se puede "entrenar" para volver a su forma después de una deformación cuando se calienta.

Otra tecnología prometedora es el "morphing wing", en estudio por la NASA y el MIT. Esta nueva arquitectura de alas podría simplificar enormemente el proceso de fabricación y reducir el consumo de combustible en un 2-8% mejorando la aerodinámica del ala, además de mejorar su maniobrabilidad. Este mecanismo de transformación involucraría a toda el ala, que estaría cubierta por una piel hecha de piezas superpuestas, de formas que sería capaz de deformarse para hacer una elevación y balanceo puro, aumentando la eficiencia del vuelo reduciendo el consumo del combustible.

4.4. 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 CO₂ son una pieza fundamental en el corto-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 la combustión en 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 (AFTF¹) 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 sostenibles².

Existen básicamente dos tipos de combustibles sostenibles para aviación: los producidos a partir de compuestos biológicos, ya sean cultivados directa-



Figura 34. Entrega de biocombustible en el aeropuerto de Los Ángeles.

mente para este propósito o residuales, y los producidos de forma sintética a partir de CO₂ e hidrógeno, que se conocen como electrocombustibles, "e-fuels" o también "synfuels". Su uso comercial parte del concepto "drop-in", por el que los estándares de su fabricación permiten la mezcla directa con el combustible habitual en los motores a reacción aeronáuticos, en una proporción que teóricamente podría llegar hasta el 100% [4].

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 una opción viable en un horizonte temporal cercano para reducir de forma efectiva el impacto medioambiental en vuelos de alta capacidad y larga distancia.

Archivo fotográfico

Figura 34. <https://www.dailybreeze.com/2019/06/05/lax-welcomes-eco-friendly-united-airlines-flight-powered-by-biofuel/>

¹ Alternative Fuels Task Force, dentro del Committee on Aviation Environmental Protection (CAEP)

² <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/CAEP-FTG.aspx>

4.4.1. Biocombustibles

El principio por el que los biocombustibles reducen las emisiones netas de CO₂ 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 CO₂, por lo que teóricamente se alcanza un impacto neutro. Por supuesto resulta fundamental evaluar el ciclo completo de la 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 forman 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 amelina, jatropha, microalgas o residuos diversos.

En la actualidad existen multitud de procesos de generación de biocombustibles ya en uso industrial (principalmente HEFA-SPK³), y otros en estado de desarrollo e implementación. El uso en aviación comercial está autorizado con mezclas de, por ahora, hasta un 50% de biocombustible [1]. Dependiendo de la materia prima y del proceso de producción utilizado se alcanzan diferentes reducciones de emisiones de CO₂ 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, es necesario contabilizar las emisiones adicionales emitidas

por deforestar un área para cultivar estos vegetales apropiados para la fabricación de biocombustible.

Los resultados de la Figura 35, 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 (LCA⁴). Se puede observar reducciones en algunos casos que alcanzan niveles de CO₂ 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 uniformes, 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.

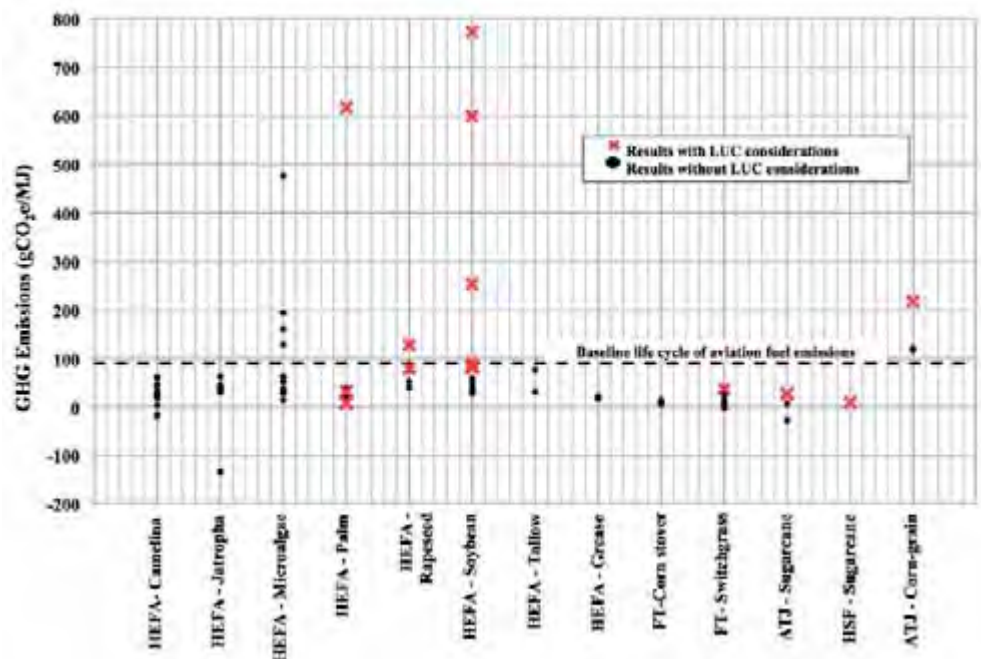


Figura 35. Emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al ciclo completo de vida de biocombustibles.[31]

³ HEFA-SPK: Hydroprocessed Esters and Fatty Acids - Synthetic Paraffinic Kerosene

⁴ Life Cycle Assessment

Otra vía para la obtención de biocombustibles con ciclo completo de CO₂ negativo, todavía en fase de desarrollo, consiste en la optimización del proceso para incluir el secuestro de carbono (BECCS⁵). Durante la producción de combustible sostenible, a partir de biomasa, se obtiene biocarbón ("biochar") como subproducto. Este compuesto es estable durante milenios, eliminando efectivamente CO₂ de la atmósfera, y se podría utilizar en agricultura sin que libere nuevas emisiones⁶.

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 emisiones⁷ 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 [32].

Desde que se realizó el primer vuelo con biocombustibles en 2008⁸ 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 200.000, y se suministra de manera habitual en 5 aeropuertos⁹. A pesar de ello, los 15 millones de litros producidos en 2018 supusieron 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 6.000 millones de litros ya comprometidos en acuerdos con aerolíneas a medio plazo [33], y 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). Las previsiones de la industria estiman que los biocombustibles podrían suponer desde un 19% hasta el 50% de su objetivo de reducción de emisiones de CO₂ [4], e IATA sitúa la expansión de estos SAF hasta el 30% del consumo total

en aviación para 2030 [34]. En Europa, la capacidad de producción de biocombustibles para aviación en 2019 podría haber cubierto potencialmente el 4% de las necesidades totales de combustible de aviación en el continente [8].

Un 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



Figura 36. Datos del European Aviation Environmental Report 2016. EASA, EEA, Eurocontro.

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 HEFA-SPK [33]. Esta proporción es consistente con otros estudios para SAF a partir de aceite usado, con un coste entre un 50% y un 75% superior al de origen fósil [8].

La desventaja económica del biocombustible, que se ha ido reduciendo considerablemente en los últimos años [35], podría superarse totalmente en escenarios de encarecimiento del petróleo, mediante acciones políticas decididas que primasen su uso (establecimiento de cupos, cuotas de mezcla obligatoria, bonificaciones por su utilización o impuestos a la emisión de carbono) pero también mediante el avance tecnológico y la entrada en juego de economías de escala. Cabe recordar que el queroseno de aviación disfruta históricamente de una excepcional exención de impuestos que dificulta su sustitución, al contrario que cualquier combustible para el transporte terrestre. La Comisión Europea está revisando esta situación, lo que podría suponer una oportunidad para mejorar la competitividad de los combustibles sostenibles, al mismo tiempo que prepara la iniciativa legislativa "ReFuelEU Aviation"¹⁰ que busca promover su uso en aviación. Noruega, por su parte, ha abierto camino con su normativa que obligará a las aerolíneas a un mínimo de 30% SAF en sus operaciones domésticas e internacionales para 2030 [1].

⁵ BECCS: Bioenergy with Carbon Capture and Storage

⁶ <https://www.stiesdal.com/material/2019/02/Stiesdal-Sky-Clean-01.01.19.pdf>

⁷ <https://rsb.org/2018/01/29/altair-rsb-certification-biofuel-refinery/>

⁸ <http://news.bbc.co.uk/2/hi/7261214.stm>

⁹ ATAG (2019), <https://www.atag.org/component/news/?view=pressrelease&id=117>

¹⁰ <https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12303-ReFuelEU-Aviation-Sustainable-Aviation-Fuels>

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\$ [33].

Resulta de particular interés los avances en la producción de biocombustibles a partir de residuos urbanos 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. Un estudio sobre el potencial energético de diferentes residuos en EEUU, 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 [36]. A este lado del Atlántico, se estima que

con el volumen de aceite usado de cocina disponible se podría producir SAF para cubrir el 2% de la demanda de la aviación en el continente europeo [8].

Una ventaja medioambiental añadida de los biocombustibles es que, según un estudio internacional liderado por la NASA, 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 [37]. Este beneficio se conseguiría gracias a que su combustión produce menos partículas de hollín y más pequeñas que la del queroseno habitual. En los experimentos en vuelo realizados para validar la investigación se usaron mezclas del 50-70% de biocombustible. Otros estudios coinciden en señalar esta ventaja, además de otras adicionales como la reducción de emisiones de óxidos de azufre [38] o incluso el aumento de la eficiencia del combustible entre un 1 y un 3 % [1].

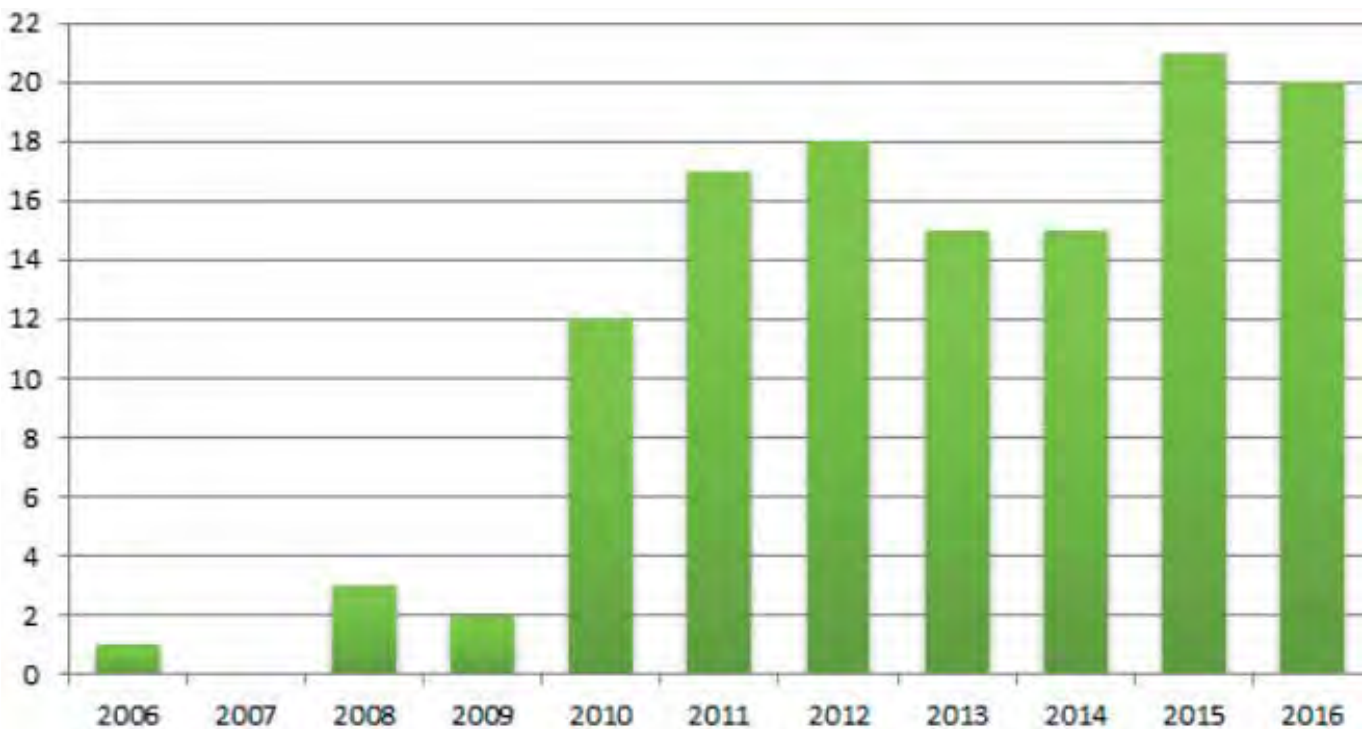


Figura 37. Número de iniciativas activas para la promoción del uso de biocombustibles (ICAO GFAAF, 2017).[31]

Archivo fotográfico

Figura 36. https://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2017-configuracion-del-futuro/infografia-1/biocombustibles-en-europa/image/image_view_fullscreen



4.4.2. Electrocombustibles

La producción sintética de combustibles alternativos a los de origen fósil, también conocidos como “e-fuels” o “power-based fuels”, 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 CO₂ directamente de la atmósfera o capturado en procesos industriales, y su conversión en hidrocarburos al combinarlo con hidrógeno, que a su vez se obtiene, por ejemplo, a partir de agua por electrólisis. El origen de la energía para alimentar el proceso, sobre todo la generación de hidrógeno, es lo que determinará el saldo neto de emisiones de CO₂. Si se utilizan fuentes renovables, como por ejemplo la energía solar o eólica, el e-fuel resultante podría ser prácticamente CO₂ neutro.

Existen diferentes procesos para la síntesis de los hidrocarburos a partir de hidrógeno y CO, como el Fischer-Tropsch (FT) o la síntesis de metanol. Estas tecnologías se han probado en demostradores a escala reducida, pero su viabilidad comercial se ha visto frenada debido al alto coste asociado, que se estima al menos como el doble del combustible de aviación de origen fósil [1], aunque otras evaluaciones lo sitúan en un rango entre 3 y 6 veces más caro [8]. 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 [39].

A pesar de estar un paso por detrás de los biocombustibles, tanto en aplicación industrial como en coste, los electrocarburantes cuentan con la ventaja de ocupar mucho menos terreno por unidad de combustible producido y, sobre todo, evitar toda la

problemática de los efectos directos e indirectos de cambio de uso de suelo cultivable, además de demandar un mínimo consumo de agua.

En junio de 2020 se anunció un ambicioso proyecto industrial para la fabricación de e-fuel 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 fac-

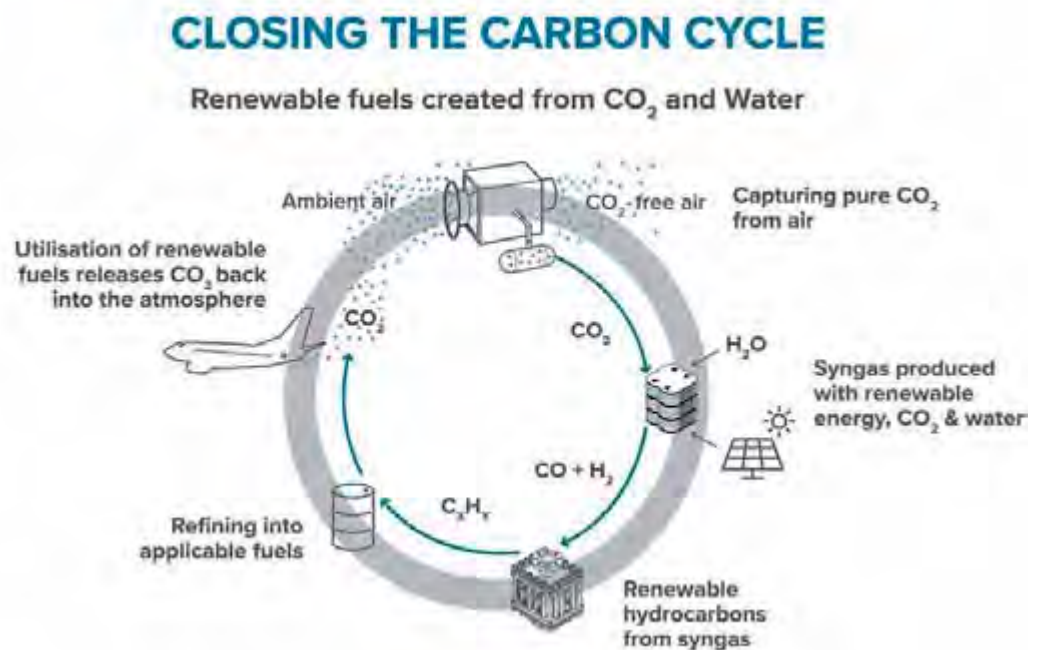


Figura 38. Ciclo de vida del e-fuel mediante electrólisis.

torías 11. 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. La misma tecnología de electrólisis se aplica en el demostrador lanzado en mayo de 2019 por un consorcio internacional alrededor del aeropuerto de Rotterdam-The Hague.

11 <https://www.norsk-e-fuel.com/en/>

Archivo fotográfico

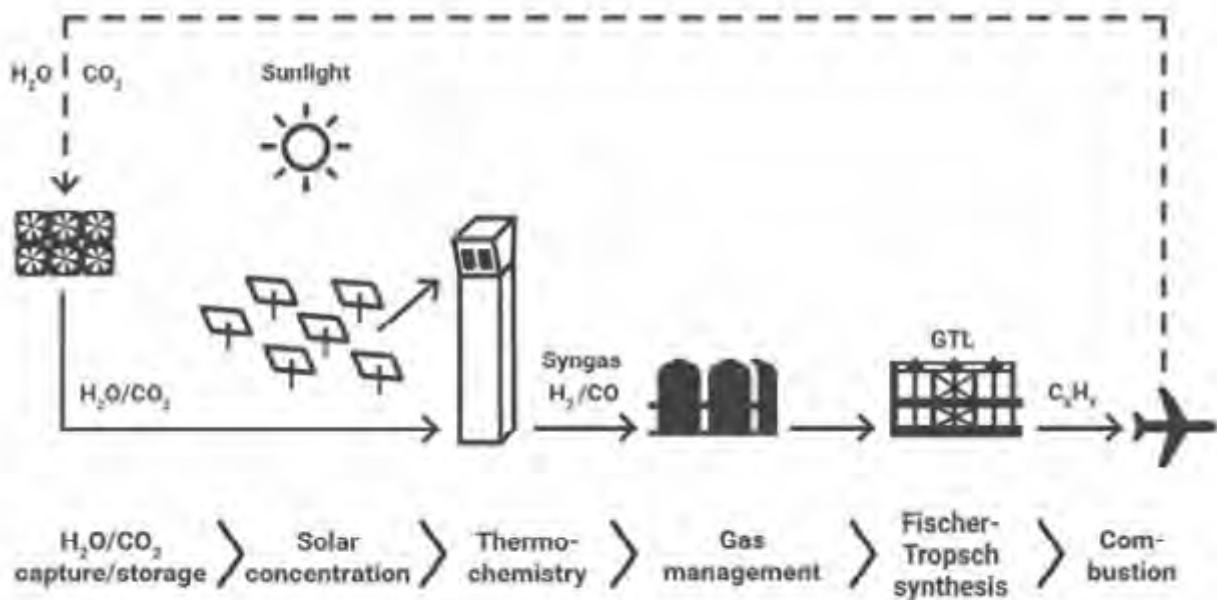
Figura 38. <https://ineratec.de/rotterdam-the-hague-airport-renewable-fuel-from-air/>



Otro tipo de enfoque, basado en reacciones termoquímicas de alta temperatura, se ha probado en el proyecto Sun-to-Liquid¹², financiado por la Unión Europea y Suiza. Un reactor alimentado con luz solar concentrada consigue transformar CO₂ y agua en gas de síntesis, compuesto de hidrógeno y monóxido de carbono, antes de su transformación en combustible de aviación por el proceso FT. 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.

Estos ejemplos ponen de manifiesto el enorme empuje de investigación y desarrollo en los electro-

combustibles o “e-fuels”, cuyo uso comercial parece a la vuelta de la esquina. Sus ventajas frente a los biocombustibles parecen reservarles un espacio propio a medio plazo en el camino hacia una aviación plenamente sostenible. Sin embargo, ninguno de los combustibles sostenibles conseguiría erradicar otros impactos medioambientales de la aviación más allá de las emisiones de CO₂, por ejemplo el de la formación de nubosidad o emisiones de hollín, aunque posiblemente sí reducirlos como ya se señaló anteriormente. Para enfrentar este desafío será necesario cambiar radicalmente la forma en que se propulsan las aeronaves, lo que se explorará en el siguiente capítulo



The fuel production chain process in the SUN-to-LIQUID solar fuel plant.

Figura 39. Sun-to-Liquid fuel production process.

¹² <https://www.sun-to-liquid.eu/>

4.5. 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 2, el interés y los proyectos eléctricos se han disparado también en el sector aeronáutico¹. 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 [1].

Por supuesto existen todavía considerables obstáculos a la hora de generalizar este tipo de aeronaves, algunas de ellas que solo se prevén resolver a largo plazo².

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 [58]. Empezando por el creciente proceso de electrificación en aeronaves de propulsión convencional, revisaremos 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 turbofanos, 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 elementos que pueden cubrir necesidades diversas en distintos marcos de tiempo.

¹ <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/electric-air-craft.aspx>

² <https://leehamnews.com/2020/05/01/33297/>

4.5.1. 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 optimizando el uso 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. 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 [40].

Otro logro significativo de este enfoque es el sistema “e-taxi”, desarrollado por Airbus y Safran, y que comenzará a operar en 2022. La innovación consiste en la propulsión eléctrica durante las operaciones en tierra mediante un motor eléctrico conectado al tren de aterrizaje y alimentado por el APU³. Se consigue así un ahorro de combustible y emisiones (hasta un 4% en corta y media distancia [8]) al evitar el funcionamiento de los motores principales en regímenes no eficientes, además de una considerable reducción de ruido.

El siguiente paso cualitativo en el uso de energía eléctrica para reducir las emisiones contaminantes es el sistema turboeléctrico, 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 40). Aunque la fuente de energía primaria siga siendo en principio hidrocarburos, esta arquitectura 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 revisaremos en la propulsión puramente eléctrica.

El siguiente paso cualitativo en el uso de energía eléctrica para reducir las emisiones contaminantes es el sistema turboeléctrico, 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 40). Aunque la fuente de energía primaria siga siendo en principio hidrocarburos, esta arquitectura 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 revisaremos en la propulsión puramente eléctrica.

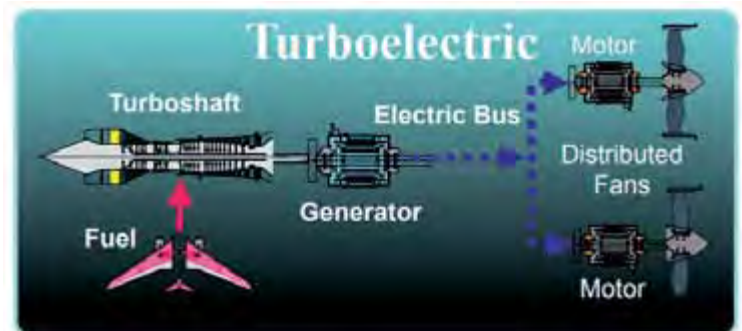


Figura 40. Esquema de la propulsión turboeléctrica. [41]

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. Por otra parte, se puede mejorar aún más su comportamiento medioambiental recurriendo a combustibles sostenibles. Se han realizado diferentes casos de estudio para su aplicación comercial, entre los que destaca el ESAero ECO-150 (Figura 42), que prevé reducir a la mitad el consumo de un Boeing 737-700 en un trayecto equivalente [41].

El futurista N3-X de NASA (Figura 41), 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 [41], aunque el horizonte tecnológico a alcanzar para hacerlo técnicamente viable está muy lejano.

³ Auxiliary Power Unit.

Más a corto plazo, se podría esperar la entrada en servicio de propuestas similares al STARC-ABL también de NASA (Figura 43), un sistema híbrido en el que dos turbofanes convencionales alimentan además un motor eléctrico en la cola del fuselaje.



Figura 41. NASA N3-X.



Figura 42. ESAero ECO-150.[42]

La ingestión de la capa límite del fuselaje permite incrementar la eficacia del propulsor trasero y reducir el consumo en un 10% [41]. Esta estrategia es difícilmente aplicable a un turbofan convencional debido a su necesidad de un flujo de aire central limpio.



Figura 43 STARC-ABL de NASA.

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.

Archivo fotográfico

Figura 41. <https://www.nasa.gov/content/hybrid-wing-body-goes-hybrid>
 Figura 43. <https://sacd.larc.nasa.gov/asab/asab-projects-2/starc-abl/>



4.5.2. 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 y, lo que sería un gran avance, también otros efectos negativos asociados a la propulsión a reacción como son las estelas de condensación y la nubosidad asociada.

Existen varios tipos de arquitectura híbrida según se combinen diferentes fuentes energéticas y el tipo de motores empleados para la propulsión. 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 turbofán para lograr el empuje, pero que funcionarían en dos regímenes diferentes según las necesidades: uno de forma convencional con combustible, y el otro movidos por motores eléctricos acoplados al eje del primer compresor, que actuaría como hélice. El suministro de energía eléctrica procedería de baterías o pilas de combustible (Figura 44).

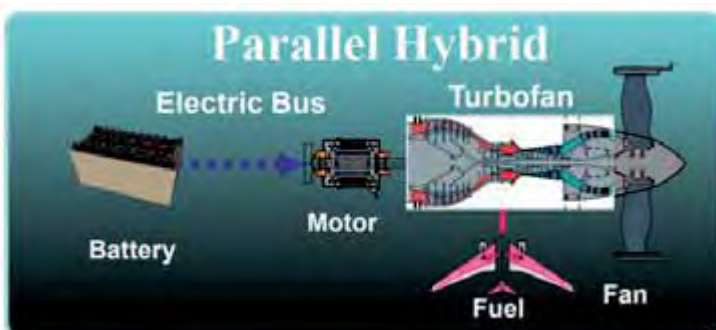


Figura 44. Esquema de la propulsión híbrida en paralelo.[41]

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 vuela-

lo 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 45), una propuesta de Boeing que estima un ahorro potencial en combustible alrededor del 60% respecto al equivalente convencional [41]. La viabilidad tecnológica de esta propuesta depende del desarrollo de motores y sistemas eléctricos de gran potencia.



Figura 45. Boeing Sugar Volt. Sistema de propulsión híbrida en paralelo.[41]

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 46), y comparten con la opción turboeléctrica la ventaja de poder optimizar el punto de diseño del motor convencional, 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.

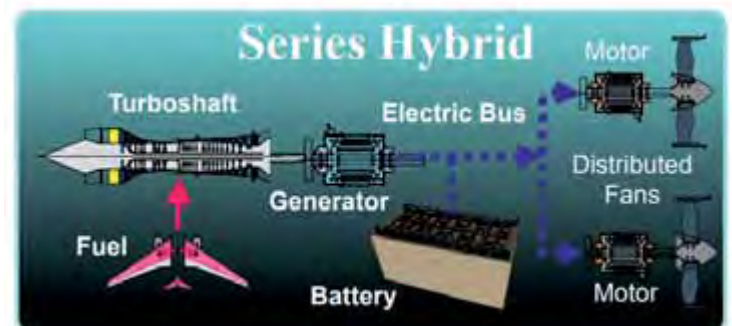


Figura 46. Esquema de la propulsión híbrido en serie.[41]

La primera prueba en vuelo de una aeronave con esta configuración, el E-star, se remonta a 20114 (Figura 47). En la actualidad existen diversas empresas, con proyectos comerciales en desarrollo, que ya han realizado ensayos en vuelo de sistemas propulsores híbridos en serie (Ampaire en 2019, Voltaero en 2020), aunque en aeronaves de baja capacidad y potencia reducida.



Figura 47. E-star (2011).

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 20205 (Figura 49), promovido por Airbus, Rolls-Royce y Siemens.



Figura 49. E-Fan X. Banco de pruebas híbrido en un BAe 146 (desde Airbus).

Este banco de pruebas híbrido en serie abría el camino hacia motores eléctricos de gran potencia (2 MW) y sistemas de gestión electrónica de alta capacidad. En el largo plazo esta tecnología podría aplicarse a diseños innovadores como el Airbus E-Thrust 6 (Figura 50).

4 <https://www.flyingmag.com/news/eadsdiamond-unveil-electric-hybrid/>

5 <https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/electric-flight/e-fan-x.html#ove>

6 <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2019/05/airbus-and-sas-scandinavian-airlines-sign-hybrid-and-electric-aircraft-research-agreement.html>



Figura 50. 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 incorporación 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 y su Eco Otter de 19 plazas y 370 km de autonomía7. 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 (Figura 48) con capacidad para 12 pasajeros y 1.300 km de alcance.

Mirando un poco más a largo plazo, el consorcio internacional FUTPRINT508, 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 el transporte sostenible parece ligado, al menos como una parada, al concepto híbrido.



Figura 48. Zunum. Propuesta híbrida en serie.

7 <https://www.ampaire.com/vehicles/Eco-Otter-SX-Aircraft>

8 FUTPRINT50: Future propulsion and integration: towards a hybrid-electric 50-seat regional aircraft. www.futprint50.eu

Archivo fotográfico

Figura 48. <https://zunum.aero/>



4.5.3. 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 en pilas de combustible, desde donde se transmite directamente a motores eléctricos que generan el empuje (Figura 51).

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 a reacción, no penaliza repartir el empuje entre varios motores eléctricos relativamente pequeños. Más bien al contrario, ya que limitar su tamaño a máquinas por debajo de 1 MW simplifica su implementación, la transmisión de potencia eléctrica y los sistemas electrónicos necesarios.

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 del ala 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 52).



Figura 52. NASA X-57. Demostrador eléctrico.

El avance a lo largo de la electrificación de la aviación, así como los tiempos y nichos 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 com-



Figura 51. Esquema de la propulsión 100% eléctrica.[41]

bustible convencional de hidrocarburos contiene al menos 40 veces más energía por unidad de peso, con la consecuencia directa de que las aeronaves eléctricas poseen en la actualidad una limitada autonomía y capacidad de transporte.

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 [44], 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 ligerade nuevo diseño 100% eléctrica⁹ (Figura 53); 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 2019¹⁰. Figura 54) o la de un Cessna Grand Caravan con hasta 9 pasajeros (Aerotec y Magnix, primer vuelo completado en 2020. Figura 55).

⁹ <https://actualidad aeroespacial.com/la-easa-certifica-el-primer-avion-totalmente-electronico/>

¹⁰ <https://www.bbc.com/news/business-50738983>

Archivo fotográfico

Figura 52. www.nasa.gov



	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)



Figura 53. Alpha Electro de Pipistrel. Entrenador eléctrico certificado por EASA en 2020.

Las baterías actuales parecen también capaces de alimentar los eVTOL¹¹, pequeñas aeronaves destinadas al transporte aéreo urbano, cuyo desarrollo es en la actualidad una auténtica competición con multitud de proyectos ya en fase de ensayos en vuelo. En ella participan desde los grandes constructores aeronáuticos (propuestas de Airbus¹² o Boeing¹³) hasta nuevos actores con experiencia en movilidad (Uber¹⁴, Hyundai) y una multitud de start-ups (Joby Aviation, Volocopter, Lilium).



Figura 54. 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.

¹¹ Electric vertical takeoff and landing

¹² <https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/urban-air-mobility/cityairbus.html>

¹³ <http://www.boeing.com/NeXt/index.html>

¹⁴ <https://www.uber.com/us/en/elevate/uberair/>

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 [38]. Este umbral tecnológico se presenta lejano, aunque se está avanzando con rapidez en alternativas como las tecnologías de litio-sulfuro (la empresa Oxis Energy ha anunciado una batería de aplicación comercial con 471 W·h/kg), baterías de estado sólido, metal-aire o con aplicaciones de grafeno [38].



Figura 55. eCaravande AeroTecyMagnix. Eléctrico con baterías, alcanzó de 180 km/h 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, que se relaciona directamente con otro parámetro fundamental para los equipos eléctricos: la potencia específica (kW/kg). Una alternativa propuesta 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, pero sigue estando aun lejos de ser viable técnicamente en el entorno aeronáutico [38].

Archivo fotográfico

Tabla 4. 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>

Las propuestas comerciales más ambiciosas presentadas para el transporte 100% eléctrico con baterías abarcan desde transportes regionales con 9 plazas y 1.000 km de alcance (por ejemplo Eviation, con participación española y entrada en servicio



Figura 56. Propuesta eléctrica con baterías de Wright Electric para 186 pax (EIS 2030).

propuesta para 2022), aviones con 19 asientos y 400 km de alcance (Heart Aviation, entrada propuesta en 2026, Figura 57), hasta aeronaves comerciales de 186 pasajeros (Wright Electric, motores distribuidos de 1,5 MW, entrada en servicio estimada para 2030, Figura 56).



Figura 57. Propuesta eléctrica con baterías de Heart Aviation para 19 pasajeros y 400 km (EIS 2026).

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, cuyas emisiones de CO₂ en 2018 supusieron un 58% del total de la aviación comercial [7]. Para alcanzar este objetivo será necesario sin duda respaldos regulatorios y políticos como el Suecia y Noruega, donde se ha creado una plataforma integrada para el desarrollo de la aviación eléctrica (NEA¹⁵). En este último país todos los vuelos de corto alcance deberán ser 100% eléctricos a partir de 2040.

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 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 turbofanés, el hidrógeno se presenta como una solución directa al problema del almacenamiento energético. Como veremos a continuación, y a pesar de sus propias limitaciones, esta vía abre nuevas y prometedoras posibilidades de mejorar la sostenibilidad de la aviación comercial.

¹⁵ Nordic Network for Electric Aviation

4.6. HIDRÓGENO

4.6.1. 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 parte este interés, consiste en que su combustión produce en teoría únicamente agua como residuo, 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 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 sí se produce CO₂, pero para ser capturado y almacenado (CCS²). 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.

La Tabla 4 explica otro de los motivos por los que el hidrógeno resulta tan interesante en aviación sostenible: frente a los problemas de almacenamiento de energía de las baterías, cada kg de H₂ 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 H₂—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, la geometría cilíndrica de los depósitos criogénicos (-253 °C) o de alta presión (700 bar) necesarios para alojarlo supone un desafío para la configuración y dimensiones de las aeronaves comerciales actuales. Estos depósitos, más complejos y pesados, determinarán en cada caso de aplicación si el uso de un combustible más ligero como el H₂ 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 [45].

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 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 infraestructuras que faciliten su distribución.

¹ <https://www.greentechmedia.com/articles/read/eu-sets-green-hydrogen-targets-now-blue-hydrogen-has-to-keep-up>

² Carbon capture and sequestration

En esta misma dirección, el 8 de julio de 2020 la Comisión Europea lanzó la Alianza Europea del Hidrógeno Limpio [46], 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 H₂ mediante electrólisis para 2024. Esta decisión se enmarca en el compromiso de alcanzar una sociedad europea con cero emisiones netas de CO₂ en 2050, para lo que el H₂ 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 aeropuertos³.

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

Archivo fotográfico

Tabla 4. 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>

³ <https://www.lamoncloa.gob.es/consejodeministros/Paginas/enlaces/061020-enlace-hidrogeno.aspx>

4.6.2. 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 59), que se puede almacenar para su reutilización en la aeronave, o descargarla cuando no suponga ningún riesgo medioambiental, evitando la formación de estelas de condensación o nubosidad inducida.

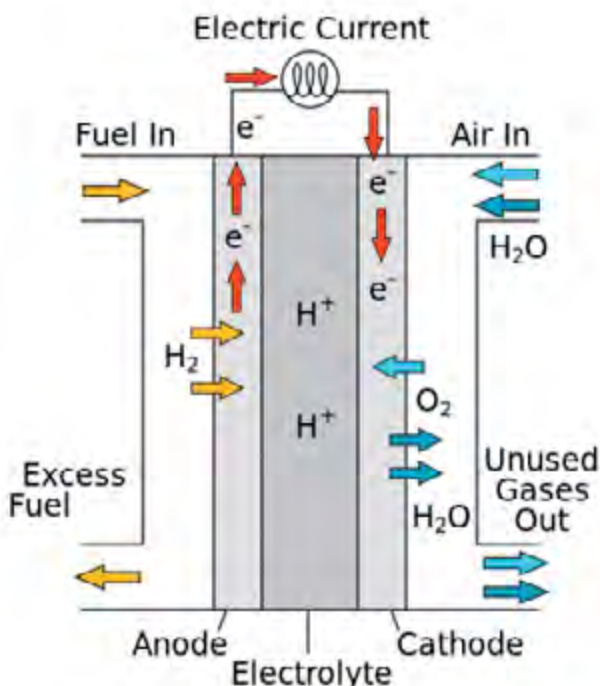


Figura 59. Funcionamiento de una pila de combustible (MAHEPA Wikipedia).

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.

Los desafíos que presentaban estas configuraciones, en cuanto a motorización y gestión de la energía eléctrica, se mantienen por tanto 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.

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 minutos⁴) como en autobuses y otros vehículos industriales.

El primer ensayo en vuelo de una aeronave propulsada por pilas de hidrógeno se realizó en España en 2008⁵, de la mano de Boeing (R&T-Europe) y su adaptación híbrida de un Diamond Dimona, alimentado en paralelo también con baterías (Figura 60). El primer vuelo soportado exclusivamente por pilas de hidrógeno lo realizó el Antares DLR-H2 en 2009.



Figura 60. Boeing. Demostrador híbrido de pilas de hidrógeno. 2008.

Entre otros proyectos con propulsión de hidrógeno que se han desarrollado desde entonces se puede destacar el HY4, un modelo desarrollado con intención comercial para servicios de aerotaxi en Alemania (Figura 61). H2fly, responsable de esta aeronave, se ha incorporado además al proyecto MAHEPA⁶, para el estudio de soluciones híbridas eléctricas modulares.



Figura 61. HY4. Propulsión exclusiva con pilas de hidrógeno. 2016.

⁴ <https://www.toyota.es/world-of-toyota/articles-news-events/new-toyota-mirai>

⁵ https://www.abc.es/ciencia/abci-boeing-prueba-exito-espana-primero-avion-pila-hidrogeno-200804040300-1641769545030_noticia.html

⁶ Modular Approach to Hybrid Electric Propulsion Architecture

La autonomía de vuelo extendida que ofrece la tecnología de pilas de hidrógeno es la ventaja competitiva que sostiene el proyecto de eVTOL Skai⁷; al igual que la propuesta para remotorizar una aeronave regional de ZeroAvia (Figura 62), con una capacidad de hasta 20 pasajeros y 800 km de alcance para 2023 [1]. Esta compañía demostró en 2020 las capacidades comerciales de la propulsión eléctrica con pilas de hidrógeno mediante el ensayo en vuelo de un Piper

M-class de 6 pasajeros⁸. Este mismo año ya había realizado una prueba del mismo modelo alimentado con baterías⁹.

Las pilas de hidrógeno son una opción disponible y de 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.



Figura 62. Ciclo del hidrógeno para una aviación sostenible con pilas de combustible (ZeroAvia).

⁷ <https://www.skai.co/>

⁸ <https://www.zeroavia.com/press-release-25-09-2020>

⁹ <https://www.zeroavia.com/press-release-23-06-2020>

4.6.3. Combustión directa

La propulsión con motores a reacción de hidrógeno es una solución que se ha mantenido durante años como un potencial sustituto a la convencional basada en hidrocarburos. De hecho, uno de los primeros motores a reacción construido en 1937 (von Ohain) utilizó inicialmente este combustible. A pesar de detallados estudios en los años 70¹⁰, hubo que esperar hasta 1990 para que se produjese el primer ensayo en vuelo de una aeronave parcialmente propulsada por motores turbofán de hidrógeno, con el demostrador Tupolev Tu-155 (Figura 63).

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 CO₂. Sin embargo, frente a las pilas de combustible, la utilización directa de hidrógeno en motores a reacción presenta algunos inconvenientes al producirse óxidos de nitrógeno (NOX), y liberarse además directamente el H₂O en la atmósfera.

Para mitigar las emisiones de NOX, fruto de las altas temperaturas alcanzadas en la cámara de combustión, se están desarrollando investigaciones que permitirían reducir significativamente su volumen. Nuevas tecnologías en la alimentación de la cámara de combustión ("micromix combustion technology") permiten prever reducciones del orden del 66% [47] comparado con motores convencionales avanzados. Otras estimaciones sitúan el potencial de estas reducciones en el 80%¹¹.

Por otra parte, la emisión en altura de vapor de agua-gas de efecto invernadero- sería 2,6 veces mayor con motores de hidrógeno [45], y conduce además a la creación de estelas de condensación, nubosidad asociada y el consiguiente impacto sobre el calentamiento global. Sin embargo, diversos estudios preveen que los microcristales que las conforman serán menos numerosos y mayores que con la combustión de hidrocarburos, y su efecto negativo total al menos un 11% menor [47]. Medidas adicionales, como cambios en el perfil de altitud de vuelo, podrían contri-

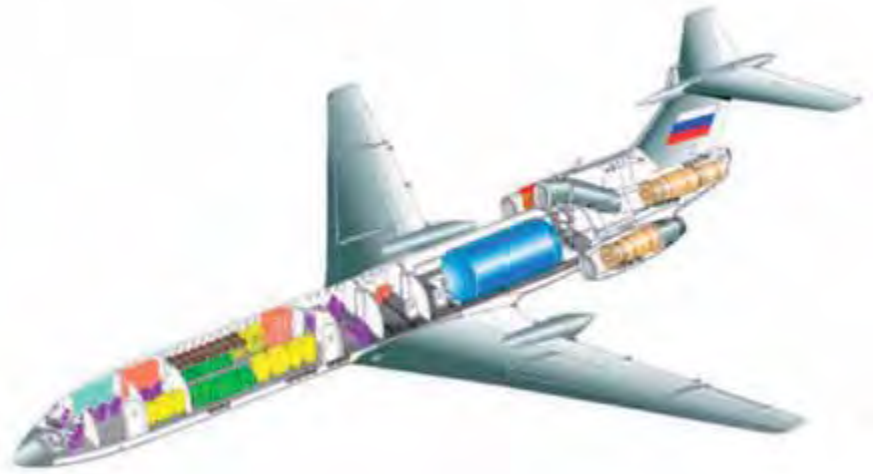


Figura 63. Modelo experimental Tupolev 155 propulsado por hidrógeno líquido (depósito en azul). 1990

buir significativamente a mitigar este problema. En cualquier caso, los efectos de las estelas y de la nubosidad inducida asociada están pendiente de más investigación para entender mejor sus dinámicas e impactos medioambientales.

El interés más reciente en esta modalidad de propulsión se puede conectar con el estudio Cryoplane [45], 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 en aviación. 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 diseños.

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.

Archivo fotográfico

Figura 63. <https://www.globalsecurity.org/military/world/russia/tu-155.htm>

¹⁰ G. D. Brewer

¹¹ <https://leehamnews.com/2020/09/18/bjorns-corner-the-challenges-of-hydrogen-part-9-hydrogen-gas-turbines/>

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 seguro como el de las aeronaves con tanques de queroseno. Otros estudios posteriores apuntan incluso a una mayor seguridad en el caso de aeronaves alimentadas con hidrógeno líquido [1].

En septiembre de 2020 Airbus recuperó su interés por la propulsión con combustión de hidrógeno al lanzar el programa ZEROe (Figura 64), compuesto por tres propuestas conceptuales para aeronaves de corto y medio alcance. El hidrógeno líquido se

comprobar que Airbus ha centrado sus propuestas en el sector más contaminante en términos de emisiones de CO₂.

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, también con financiación pública europea, que buscan definir y avanzar las tecnologías para el uso comercial de sistemas de propulsión basados en el hidrógeno. Su objetivo es el de demostrar, en las con-



Figura 64. AIRBUS. Iniciativa ZEROe para propulsión por combustión de hidrógeno.

utilizaría no solo para alimentar los turbofanés 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 de avión más eléctrico pero en base a hidrógeno. 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, la lucha contra el cambio climático es una motivación fundamental. De hecho, si se revisa la Figura 7, se puede

ver que, en las condiciones actuales, la viabilidad técnica y económica para alcanzar vuelos con cero emisiones de CO₂ y un mínimo impacto por NO_x.

El año 2020 ha marcado un hito de cambio y aceleración hacia una aviación propulsada por hidrógeno. Como defendía un estudio conjunto de Fuel Cells and Hydrogen 2 y el programa Clean Sky 2 en mayo de este mismo año [48], los factores políticos, tecnológicos y económicos parecen alinearse por fin para hacer realidad el enorme potencial en el ámbito de la sostenibilidad de este vector energético.

Archivo fotográfico

Figura 64. <https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe.html>



4.7. 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, planificación y gestión de uso del espacio, restricciones operacionales y un quinto relacionado con una mejor comunicación y compromiso de la comunidad [49].



Figura 65. Gestión del ruido en aeropuertos.[49]

En lo que se refiere a tecnología, las principales fuentes de ruido en la operación de las aeronaves son los motores y el ruido aerodinámico, este último dependiente de la posición de los dispositivos hipersustentadores, de la capa límite turbulenta sobre el fuselaje y del tren de aterrizaje.

El ruido de los motores, aunque depende del tipo de motor, en general es dominante en las operaciones de despegue donde el gradiente de subida es un elemento esencial en el ruido ocasionado tanto bajo el avión como en dirección lateral. En aproximación y aterrizaje de los aviones modernos, ambos niveles de ruido, propulsivo y aerodinámico son comparables, dependiendo de la configuración del avión, aunque es el ruido de la estructura del avión el que domina con el tren de aterrizaje haciendo la mayor contribución.

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 [50]: 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 km² menor.

En lo que se refiere a tecnología, las principales fuentes de ruido en la operación de las aeronaves son los motores y el ruido aerodinámico, este último dependiente de la posición de los dispositivos hipersustentadores, de la capa límite turbulenta sobre el fuselaje y del tren de aterrizaje.

El ruido de los motores, aunque depende del tipo de motor, en general es dominante en las operaciones de

despegue donde el gradiente de subida es un elemento esencial en el ruido ocasionado tanto bajo el avión como en dirección lateral. En aproximación y aterrizaje de los aviones modernos, ambos niveles de ruido, propulsivo y aerodinámico son comparables,



Figura 66. Huella del ruido.[50]

dependiendo de la configuración del avión, aunque es el ruido de la estructura del avión el que domina con el tren de aterrizaje haciendo la mayor contribución.

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 [50]: 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 km² menor.

Otros ejemplos: diseño de la huella de ruido de A320neo es casi 1 km² cuadrado menor que la del A320, la del Boeing 737 MAX es más de 1,7 km² menor que la del 737 Next Gen, el A350-900 es más de 2,5 km² 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.

Así a nivel internacional la OACI (Organización de Aviación Civil Internacional) 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, Parte I, al Convenio de Chicago.

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.

Esos límites admisibles que figuran en el Anexo 16 los fija el Comité de Protección de medio ambiente (CAEP) de OACI y son función del peso máximo al despegue de la aeronave (MTOW).

La regulación de OACI para el ruido emitido por los grandes aviones subsónicos ha evolucionado desde sus comienzos, siendo la primera edición del Anexo

16 que afectaba a los modelos certificados a partir de 1971, según el texto incluido en el Capítulo 2 del Anexo. Posteriormente aparecieron el Capítulo 3, más estricto, aplicable a partir de 1977, y el Capítulo 4, desde el 1 de enero de 2006, que es el que está actualmente en vigor. En estos momentos el CAEP está discutiendo un futuro Capítulo 5 que estaba previsto entrara en vigor este año 2020. El objetivo de estas normas es fomentar la introducción de la mejor tecnología acústica disponible en los nuevos diseños de aeronaves civiles. En consecuencia, los requisitos van haciéndose más estrictos, siguiendo los progresos de la tecnología [51].

Se han conseguido grandes progresos, 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 [49]. 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.

Una consideración adicional a tener en cuenta es la actual mayor sensibilidad de la población al ruido ambiente, considerando hoy como una molestia importante niveles de ruido tolerable hace unas décadas. Además, también la naturaleza del problema de ruido puede cambiar con el tiempo por las interdependencias existentes, como por ejemplo cuando al reducir el ruido de los motores se haga dominante el ruido aerodinámico.

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 [10], 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 OACI, bajo la denominación de "enfoque equilibrado" (Balanced Approach) [52], recomienda el estudio, caso por caso, de la situación en cada aeropuerto y aplicar la mezcla más eficiente de cuatro elementos (ver Figura 67)¹:



Figura 67. Enfoque equilibrado en la gestión del ruido de un aeropuerto.

Reducción de ruido en la fuente -que es el primer pilar según 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

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 [49] 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 CO₂. Para poner estas reducciones en contexto, 15dB es equivalente a un 65% en reducción de molestia², 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.

En los últimos años se han aplicado distintas tecnologías de reducción del ruido, como el fan en flecha, toberas de área variable. etc. (ver capítulo 4.3). La tecnología de diseño destinada a la reducción de ruido se ha centrado principalmente en:

Reducción del ruido del chorro disminuyendo las velocidades de pico del mismo.

- Afecta las emisiones de CO₂ y NO_x al aumentar el peso y las pérdidas aerodinámicas si se emplea un mezclador de conducto largo.
- Afecta las emisiones de CO₂ y NO_x en una cantidad menor si se emplean dispositivos de mejora de la mezcla como los chevrons.

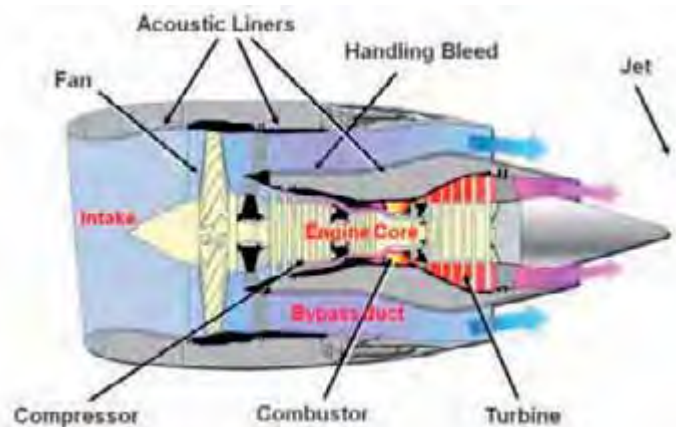


Figura 68. Elementos relevantes que influyen en el ruido del motor y de la aeronave.[45]

¹ <https://www.easa.europa.eu/eaer/topics/airports/noise-management-strategies>

² ICAO Annex 16 Appendix 2-14 section 4.2. $PNL=40+10 \times \log(N)/\log(2)$, where N is perceived annoyance. If PNL is reduced by ~15dB, N is reduced by 65%

Materiales absorbentes de ruido, aislantes o de protección.

Reducen el ruido al absorber o reflejar la energía del sonido. Pueden afectar las emisiones de CO₂ y las del ciclo LTO al aumentar el peso y las pérdidas aerodinámicas, pero estructuras ligeras pueden mitigar este efecto.

Diseños con una relación de derivación (BPR) más alta y una relación de presión (OPR) del fan más baja que inicialmente proporcionan un beneficio de ruido significativo y CO₂ mejorado.

Los materiales y diseños de peso reducido que disminuyen NO_x/ ruido / CO₂

Los componentes con aerodinámica mejorada que disminuyen NO_x/ ruido / CO₂ si el peso no se ve afectado. Así por ejemplo, las mayores presión del

motor (OPR) y relación de derivación (BPR), la aerodinámica mejorada y la reducción en el peso han reducido el consumo de combustible del motor en un 70% aproximadamente, los turbofán de alto BPR con tratamientos de ruido han reducido el ruido fuente alrededor de 20 dB, o la tecnología de combustión de bajas emisiones ha eliminado el humo visible y reducido los hidrocarburos no quemados en un 90%, disminuido el CO₂ en 60% y NO_x en aproximadamente 25-30% a una relación de presión fija del motor.

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).

Ejemplo de restricciones impuestas actualmente:

- Acceso Prohibido a modelos que no cumplan ciertos límites: en la Unión Europea no se aceptan modelos que no cumplan al menos con el Capítulo 3 desde abril de 2020, o introduciendo un sistema de tasas relacionadas con el ruido certificado como en los aeropuertos franceses.
- Establecimiento de categorías de niveles de ruido absolutos (no en función del MTOW): Heathrow y Barajas prohíben los vuelos nocturnos de aviones que no estén por debajo de límites establecidos por dos parámetros: el ruido certificado en aterrizaje y la media del ruido certificado en despegue y lateral.
- Establecimiento de cuotas de ruido por temporadas de programación para cada línea aérea, concediendo autorizaciones a las compañías hasta alcanzar una cifra de ruido certificado acumulado, como hace Charles De Gaulle en todo el día y Barajas en período nocturno (23:00 a 07:00).

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

- Se recibe una multa si se superan los niveles y, si es un hecho reiterado, puede llegarse hasta la prohibición de operar un cierto tipo de avión como en el aeropuerto J. F. Kennedy de Nueva York.
- Los aviones más ruidosos dentro de una determinada categoría (por ejemplo, birreactores de 100 a 150 plazas), reciben una penalización económica según la estadística del ruido real medido en determinados puntos del recinto aeroportuario, como se hace en Frankfurt y en otros aeropuertos alemanes.

Procedimientos operativos

Las diferentes distribuciones de los espacios habitados alrededor de los aeropuertos pueden permitir el diseño de trayectorias y procedimientos operativos que reduzcan el número de personas afectadas por el ruido de los aviones. La Figura 69 [10] muestra distintas oportunidades para mitigar el ruido de los aviones controlando los procedimientos u operaciones. Ver el capítulo 4.2 para más información.

Es importante señalar que no todas las oportunidades señaladas en la figura anterior pueden ser apli-

cables en cualquier aeropuerto. La elección de uno u otro procedimiento operativo dependerá de muchos factores, no solo de beneficios en cuanto a ruido, pues existen muchas interdependencias a tener en cuenta como emisiones, seguridad, capacidad, etc. de forma que cada aeropuerto optará por los procedimientos óptimos. Así en despegue, algunos aeropuertos ordenan el uso de pistas preferentes y procedimientos especiales para los tipos de aviones más ruidosos, con reducciones de régimen de motor, si la seguridad lo permite, al sobrevolar núcleos de población.

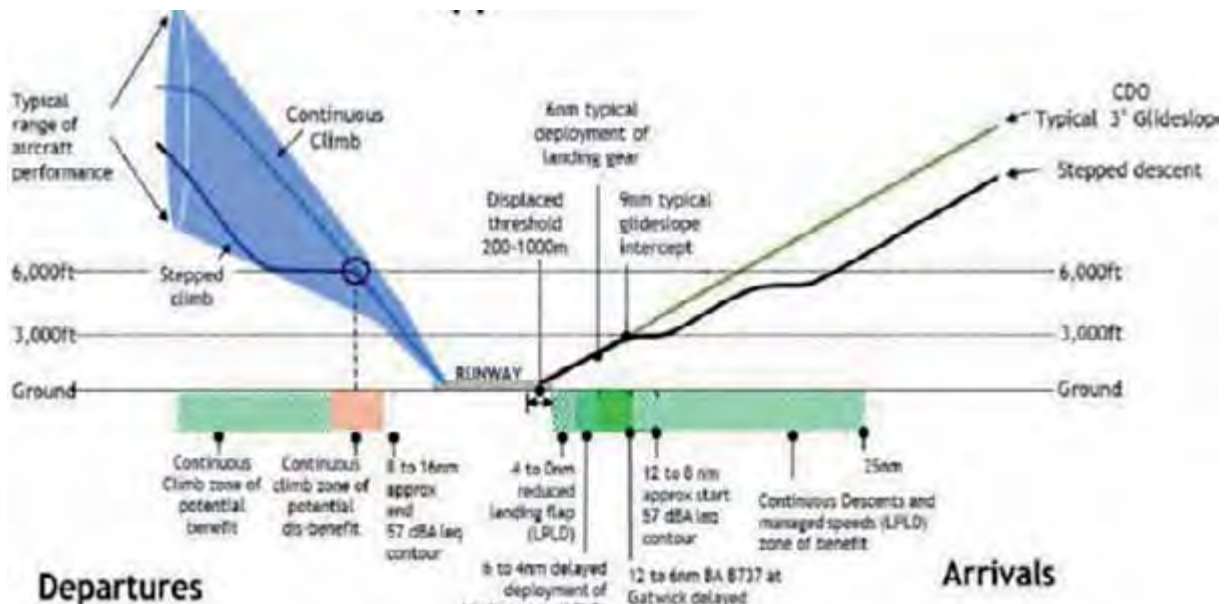


Figura 69. Oportunidades para mitigar el ruido.[49]

De igual modo, como se mencionó en el capítulo 4.2, las operaciones de descenso con motores a baja potencia y operaciones de subida continua reducen el consumo de combustible y el ruido bajo la trayectoria de vuelo, al evitar la necesidad de vuelos nivelados a bajas altitudes, pero el poder usar estas operaciones va a depender de la gestión del espacio aéreo y las limitaciones de capacidad. Así también el desarrollo de nuevos sistemas a bordo pueden conducir hacia procedimientos más eficaces de reducción del ruido. Distintas acciones para reducir ruido:

- Establecen 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.

Muchos aeropuertos han instalado un sistema de vigilancia acústica que, unido al seguimiento radar de las trayectorias, permite determinar si cada operación se ajusta con precisión a las sendas de impacto acústico mínimo diseñadas para cada modelo de avión. En general, los infractores suelen ser multados.

Planificación y gestión del uso de suelo.

Fuera del recinto aeroportuario, las competencias sobre restricciones en el uso del suelo son nor-

malmente 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.

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, seguidamente 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 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 for-

zosa 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.

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.

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 CO₂ (ver capítulo 4.3). 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 [57]), como diversas configuraciones de fuselaje y de propulsión revolucionarias, especialmente, la propulsión eléctrica tanto híbrida como totalmente eléctrica (ver capítulo 4.5). 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) [58].

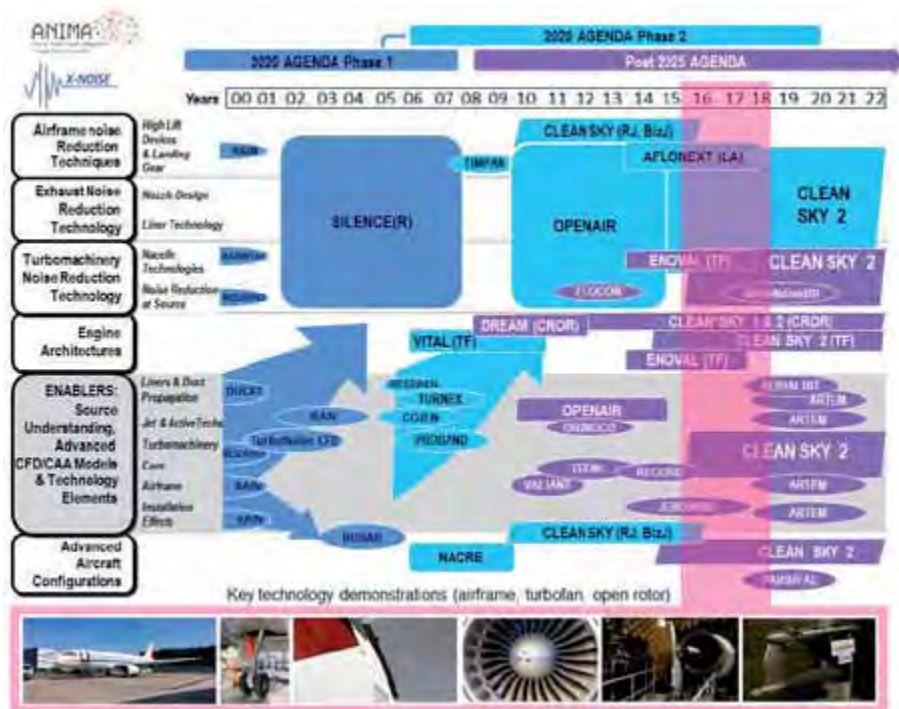


Figura 70. Proyectos europeos de ruido y demostradores tecnológicos clave.[10]

Todos estos proyectos han dado lugar a distintos avances en la tecnología de reducción del ruido, actuando sobre los motores (Huff [53], Gliebe [54]) 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 [55], Manoha [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.

5

CONCLUSIONES

La industria aeronáutica nació y se desarrolló a través de una larga historia de innovación y resolución de problemas técnicos. El reto de la sostenibilidad y de la eliminación de su impacto medioambiental se está afrontando con el mismo espíritu, y los resultados no se han hecho esperar. A pesar de no ser por mucho el sector del transporte con mayor impacto en el calentamiento global (Cap. 2), 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 (Cap. 3).

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 que, como vimos en el capítulo 4.3, 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 procedimientos de operaciones y control aéreo (Cap. 4.2) aportarán una reducción de emisiones significativa, además de mitigar los problemas de ruido (Cap. 4.7).

Para el corto y medio plazo se situó el 2020 como referencia y límite máximo de emisiones netas para el conjunto de la aviación civil. Para cumplir este compromiso el organismo internacional de aviación civil OACI puso en marcha el marco regulador de compen-

sación de emisiones CORSIA (Cap. 4.1), contando con el apoyo de los países miembros y de la asociación de aerolíneas IATA. Esta iniciativa supone un esfuerzo decidido y de aplicación inmediata que, con las mejoras necesarias durante su aplicación, está diseñado para contener y potencialmente reducir las emisiones de una aviación comercial siempre en crecimiento. Dentro de este sistema se bonifica además la implantación extensiva de los combustibles sostenibles (Cap. 4.4), con su gran potencial para mejorar la sostenibilidad de los vuelos comerciales. 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 propulsión por hidrógeno).

A largo plazo, en el 2050, se sitúa el ambicioso objetivo de reducir las emisiones de CO₂ de la aviación a la mitad del nivel de 2005. Resulta difícil prever una evolución tan lejana en un mundo y una industria aeronáutica en constante cambio, pero todos los elementos señalados anteriormente con toda probabilidad tendrán que cumplir su parte para alcanzar ese objetivo. Además, dentro de este horizonte se pueden alcanzar y aplicar soluciones técnicas y de diseño revolucionarias, que cubren nuevas configuraciones (ala volante) o la gran promesa sostenible de la propulsión eléctrica (Cap. 4.5).

La Tabla 5 y Tabla 6 proporcionan una indicación del plazo de desarrollo y la reducción potencial del consumo de combustible -ligado directamente a las emisiones de CO₂- para diferentes soluciones tecnológicas en la configuración de las aeronaves comerciales.

	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 5. Potencial de ahorro en combustible de las tecnologías de propulsión.[59]

	Timelines and examples of <u>aircraft design</u> 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 6. Potencial de ahorro en combustible de las tecnologías de diseño de aeronaves.[59]

Por otra parte, para alcanzar una aviación sostenible vimos anteriormente que es necesario valorar el impacto medioambiental del ciclo de vida completo, incluyendo la evaluación del ruido y otras emisiones además del CO2. Las soluciones más prometedoras para este enfoque integral se muestran en la Tabla 7, donde se detallan sus pros y contras, además de su perfil de aplicación más probable.

Teniendo en cuenta todos los factores, se estima que el potencial de reducción del impacto climático para 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% [48].

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			Not applicable	Revolutionary aircraft designs as efficient option for ranges above 10,000 km
Medium-range 166-250 PAX				
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 7. Comparativa de nuevas tecnologías y combustibles sostenibles.[48]

Para alcanzar el objetivo de la aviación comercial sostenible 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 de los propios pasajeros. Si hasta hace bien poco se antojaba imposible, ahora vemos que existe un amplio arsenal de herramientas para conseguirlo. Sin duda no sabemos cual será la solución óptima, aunque muy probablemente implique la combinación de todas estas estrategias en diferentes proporciones y marcos de tiempo.

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.

6

BIBLIOGRAFÍA

- [1] *ERA Green and Sustainable Connectivity v1. European Regions Airline Association, 2020.*
- [2] *Resolución del Consejo Europeo del 21 de julio de 2020:*
<https://www.consilium.europa.eu/media/45109/210720-euco-final-conclusions-en.pdf>
- [3] *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.*
- [4] *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.*
- [5] *D. S. Lee et al. Aviation and global climate change in the 21st century. Atmospheric Environment, 2008.*
- [6] *E. Campos. Sostenibilidad Del Sector Aeronáutico. COIAE 2020.*
- [7] *B. Graver, K. Zhang, D. Rutherford. CO2 emissions from commercial aviation, 2018. ICCT, 2019.*
- [8] *European Environment Agency. EASA. Eurocontrol. European Aviation Environmental Report 2019.*
- [9] *Comisión Europea. Flightpath 2050. Europe's Vision for Aviation. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2011.*
- [10] *OACI. 2019 Environmental Report. Aviation and Environment. Destination Green: The Next Chapter. ICAO Environmental Publications, 2019*
- [11] *D. Broekhoff, M. Gillenwater, T. Colbert-Sangree and P. Cage. Securing Climate Benefit: A Guide to Using Carbon Offsets. Stockholm Environment Institute & Greenhouse Gas Management Institute. 2019.*
- [12] *OACI. CORSIA Emissions Unit Eligibility Criteria, marzo de 2019.*
- [13] *OACI. Operational Opportunities to Reduce Fuel Burn and Emissions. ICAO, Doc. 10013, 1st edition. 2014.*
- [14] *European ATM stakeholders. European CCO and CDO Task Force Report. 2018.*
- [15] *SESAR Joint Undertaking. Sesar Solutions Catalogue 2019. 3rd Edition. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019.*
- [16] *Aena. Informe de gestión consolidado 2019. Apartado 14.*
http://www.Aena.es/csee/ccurl/437/603/Estado_de_la_Informacion_No_Financiera.pdf
- [17] *CDTI. Dossier Informativo sobre Clean Sky. Julio de 2008.*
- [18] *Clean Sky 2 Joint Undertaking. 2019 Consolidated Annual Activity Report.*
<https://www.cleansky.eu/sites/default/files/inline-files/AAR-2019.pdf>
- [19] *J. Rohde. Overview of the NASA AST and UEET emissions reduction projects. 2002*
- [20] *Chou Wey. NASA AST and UEET Programs. CAEP SG Emissions Workshop, 9 de septiembre de 2002.*
- [21] *W. Haller. 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.*
- [22] *C. Nickol. Environmentally Responsible Aviation (ERA) Project. Assessing Progress Toward Simultaneous Reductions in Noise, Fuel Burn and NOx. 2011*
- [23] *J. Hileman. Addressing Aviation Environmental Challenges through Technology and Fuels. U. C. Davis Aircraft Noise & Emissions Symposium, 2019*
- [24] *C. E. Hughes, D. E. Van Zante, J. D. Heidmann. Aircraft engine technology for green Aviation to reduce fuel burn. NASA TM- 2013-217690, 2013.*
- [25] *J. Heidmann. Improving Engine Efficiency Through Core Developments. AIAA Aero Sciences Meeting, 6 de enero de 2011.*
- [26] *M. Goldhammer, The Next Decade in Commercial Aircraft Aerodynamics-A Boeing Perspective. Aerodays 2011, Madrid, 31 de marzo de 2011.*
- [27] *J. König. CleanSky SFWA/BLADE. Breakthrough laminar aircraft demonstrator in Europe., AeronauticsDays, Bucharest, 27-30 de mayo de 2019.*

- [28] X.Hue, Hybrid laminar flow control on tails. *Aeronautics Days, Bucharest, 27-30 de mayo de 2019.*
- [29] C.Rossow. 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*
- [30] W. G. Roeseler, B. Sarh, M. U. Kismarton. *Composite Structures: The First 100 Years. 16th International Conference On Composite Materials.*
- [31] OACI. *Sustainable Aviation Fuels Guide. Version 2. Diciembre de 2018.*
- [32] A. Kharina, N. Pavlenko. *Alternative jet fuels: Case study of commercial-scale deployment, ICCT 2017.*
- [33] P. Le Feuvre. *Are aviation biofuels ready for takeoff?, IEA, 18 de marzo de 2019.*
<https://www.iea.org/commentaries/are-aviation-biofuels-ready-for-take-off>
- [34] T. K. Hari et al. *Aviation biofuel from renewable resources: Routes, opportunities and challenges, Renewable and Sustainable Energy Reviews 42, Pages 1234-1244. 2015.*
- [35] OACI. *Conferencia sobre la aviación y los combustibles alternativos. Ciudad de México, 2017.*
- [36] R. L. Skaggs 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.*
- [37] B. Silberg. *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/>
- [38] *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.*
- [39] *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.*
- [40] M. Sinnett. *787 No-Bleed Systems: Saving Fuel and Enhancing Operational Efficiencies. Boeing Commercial Aeromagazine. Q4 2007.*
- [41] J. L. Felder. *NASA Electric Propulsion System Studies. NASA Glenn Research Center.*
- [42] N. Madavan. *A NASA Perspective on Electric Propulsion Technologies for Large Commercial Aircraft. ESARS-ITEC 2016, Toulouse, France, 4 de noviembre de 2016.*
- [43] IATA. *Guidance Material for Sustainable Aviation Fuel Management. 2nd Edition. 2015.*
- [44] D. Thisdell. *The magic number that makes electric flight viable. FlightGlobal, 11 de septiembre de 2020.*
- [45] AIRBUS. *CRYOPLANE: Liquid Hydrogen Fuelled Aircraft – System Analysis. 24 de septiembre de 2003.*
- [46] *Comisión Europea. A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. Bruselas, 8 de julio de 2020.*
- [47] M. Ponateret al. *Potential of the cryoplane technology to reduce aircraft climate impact: a state-of-the-art assessment. Atmos. Environ. 40, 6928-6944, 2006.*
- [48] *Fuel Cells and Hydrogen 2 & Clean Sky 2. Hydrogen-powered aviation: A fact-based study of hydrogen technology. 2020.*
- [49] *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*
- [50] *Sustainable Aviation. Progress report 2015-2017. https://www.sustainableaviation.co.uk/wp-content/uploads/2018/06/SA-Progress-report-2015-17-1.pdf*
- [51] D. Gely, L. Leylekian. *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.*
- [52] OACI. *Guidance on the Balanced Approach to Aircraft Noise Management. Doc 9829.*
- [53] D. Huff. *Technologies for turbofan noise reduction. 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Manchester. 11 de mayo de 2004.*
- [54] P. Gliebe. *The GE90: Quiet by design. Quieter aircraft engines through leveraging new technologies. 2003 Berkeley Airport Noise Symposium. 11 de marzo de 2003.*
- [55] Dobrzynsky, *Almost 40 Years of Airframe Noise Research- What did we achieve?. 14th Aeroacoustics Conference, Vancouver. 5-7 de mayo de 2008.*
- [56] E. Manoha, L. Sanders, F. De La Puente. *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.*
- [57] M. K. Bradley, C. K. Droney. *Subsonic Ultra Green Aircraft Research: Phase I Final Report. NASA/CR-2011-216847, 2011.*
- [58] A. Schäferet al. *Technological, economic and environmental prospects of all-electric aircraft. Nature Energy Vol 4, 2019.*
- [59] IATA. *Technology Roadmap for Environmental Improvement Fact Sheet. 2019.*