

Trabajo Fin de Grado

HELICÓPTEROS HÍBRIDOS Y ELÉCTRICOS, ¿PRESENTE O FUTURO?

Diego González Lorenzo

Director académico: Dr. D. Fernando López Pérez

Director militar: Cte. D. Luis Antonio Comas Roqueta

Centro Universitario de la Defensa-Academia General Militar

2022

"La voluntad obstinada de perseguir una ambición propia es verdaderamente una fuerza que puede hacer superar obstáculos". Enzo Ferrari.



Agradecimientos

Antes de comenzar con la redacción de este trabajo querría dedicar unas palabras de agradecimiento a todas las personas que de un modo u otro me han ayudado y han estado conmigo a lo largo de esta aventura que comenzó hace ya 4 años.

En primer lugar, agradecerle a mi familia por haberme apoyado desde el primer momento, especialmente cuando atravesaba mis peores momentos durante primer curso en la Academia General Militar.

Del mismo modo, quiero dar las gracias a mis compañeros de habitación de primer curso, por ayudarme en todo momento y ser unos verdaderos amigos desde el primer día. En este sentido quiero agradecer especialmente a mis amigos Domingo y Rubén, con quienes guardo una estrecha relación de amistad a día de hoy.

Por otro lado, quiero recordar también de una forma especial a mis amigos de Zamora, un grupo con el que tengo recuerdos desde los 3 años, a quienes admiro por todo lo que han conseguido y con quienes estoy en deuda por su apoyo incondicional desde que me fui a Zaragoza.

Quisiera agradecer también a todos los excelentes profesores con los que he tenido la suerte de contar desde mi ingreso en la academia, tanto civiles como militares. De ellos he adquirido valores y conocimientos, que sin duda me ayudarán a lo largo del resto de mi carrera militar.

Por último, me gustaría agradecer de un modo especial a mis tutores de este trabajo, así como a todo el personal de la Academia de Aviación, por ayudarme en todo momento y poner a mi disposición todas las herramientas que he necesitado para llevar a cabo mi investigación.



RESUMEN

El presente trabajo trata de dar a conocer la problemática que acarrea el sector de la aviación de cara al futuro y la posible viabilidad de incorporar nuevos sistemas de propulsión al sector aeronáutico.

De forma histórica, la mayor parte de los avances tecnológicos se han dado en el mundo militar, pasando posteriormente a ocupar un espacio en el entorno civil. Metafóricamente, en este caso no es así. El desarrollo de nuevos sistemas de propulsión no es un objetivo a corto plazo para los ejércitos de todo el mundo. En este momento, la tecnología que rodea a los motores convencionales aeronáuticos, así como su infraestructura, se encuentran tan desarrollados que resulta fácil de entender la falta de interés por parte de las fuerzas armadas. Es por ello que en esta memoria se trata de analizar las formas de propulsión alternativas más eficientes y prometedoras, que permitan al entorno militar dar un salto generacional, apoyándose en sistemas más potentes y fiables, además de contar con la independencia de los combustibles fósiles tradicionales. Actualmente la aviación, tanto civil como militar, se encuentra inmersa en una problemática muy extendida en el panorama internacional actual: la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera y el cambio climático. La evolución de los motores de turbina convencionales, con queroseno como combustible, ha permitido alcanzar ratios de eficiencia y unas bajas emisiones inimaginables hace tan solo medio siglo. Sin embargo, y pese a esta mejora en la eficiencia aeronáutica, el tráfico aéreo no ha dejado de crecer. De hecho, se espera que continúe haciéndolo en las próximas décadas.

Evidentemente, los objetivos fijados en materia de emisiones tanto por organizaciones internacionales como por la legislación propia de cada país son difícilmente asumibles teniendo en cuenta el estado del arte de la tecnología presente en aviación, la cual es reticente al cambio debido a los altos estándares de operatividad y seguridad aérea que debe prestar.

Para tratar de dar solución a esta problemática cada vez más acuciante, son numerosas las posibilidades que se han planteado con el fin de reducir la huella de carbono que emite este sector. Por un lado, se ha planteado la implementación de combustibles alternativos, similares a biocombustibles, pero empleados para aviación convencional, tanto ala fija como rotatoria. En parte esta opción beneficiaría al sector debido al bajo esfuerzo que se debería de llevar a cabo en términos de reforma de infraestructura, pues este tipo de combustible opera de forma muy similar a los de tipo fósil.

Por otro lado, se plantean opciones más ambiciosas, pero más prometedoras a medio y largo plazo, como lo son los sistemas de propulsión alternativos para aviación. Esencialmente en este proyecto se desarrollan en profundidad dos de ellos: los sistemas eléctricos y la propulsión de hidrógeno.

Finalmente, y de forma objetiva, se ha tratado de trasladar toda esta información a una conclusión orientada al entorno de las Fuerzas Armadas españolas, tratando de dar visibilidad a las posibilidades que se presentan de cara al futuro, haciendo un especial énfasis en las aeronaves de ala rotatoria del Ejército de Tierra.

PALABRAS CLAVE

Reducción de emisiones, propulsión eléctrica, hidrógeno.



ABSTRACT

The aim of this work is to present the problems that the aviation sector is facing in the future and the possible feasibility of incorporating new propulsion systems to the aeronautical sector.

Historically, most technological advances have taken place in the military world, and then moved to the civilian environment. Metaphorically, this is not the case here. The development of new propulsion systems is not a short-term goal for militaries around the world. At this point in time, the technology surrounding conventional aero engines, as well as their infrastructure, is so developed that it is easy to understand the lack of interest on the part of the armed forces. That is why this report tries to analyze the most efficient and promising alternative forms of propulsion, which allow the military environment to make a generational leap, relying on more powerful and reliable systems, in addition to the independence from traditional fossil fuels. Aviation, both civil and military, is currently immersed in a very widespread problem on the current international scene: the emission of greenhouse gases into the atmosphere and climate change. The evolution of conventional turbine engines, with kerosene as fuel, has made it possible to achieve efficiency ratios and low emissions that were unimaginable only half a century ago. However, despite this improvement in aeronautical efficiency, air traffic has continued to grow. In fact, it is expected to continue to do so in the coming decades.

Evidently, the emission targets set both by international organizations and by each country's own legislation are difficult to achieve given the state of the art of aviation technology, which is reluctant to change due to the high standards of operability and air safety that it must provide.

To find a solution to this increasingly pressing problem, numerous possibilities have been put forward to reduce the carbon footprint emitted by this sector. On the one hand, the implementation of alternative fuels, like biofuels, but used for conventional aviation, both fix and rotary wing, has been proposed. In part, this option would benefit the sector due to the low effort that would have to be made in terms of infrastructure reform, since this type of fuel operates in a very similar way to fossil fuels.

On the other hand, there are more ambitious options, but more promising in the medium and long term, such as alternative propulsion systems for aviation. Essentially, two of them are developed in depth in this project: electric systems and hydrogen propulsion.

Finally, and in an objective way, we have tried to transfer all this information to a conclusion oriented to the Spanish Armed Forces environment, trying to give visibility to the possibilities for the future, with special emphasis on the rotary wing aircraft of the Spanish Army.

KEYWORDS

Emission reduction, electric propulsion, hydrogen, SAF.



INDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN.....	II
ABSTRACT.....	III
INDICE DE CONTENIDO	IV
INDICE DE FIGURAS.....	V
INDICE DE TABLAS	VI
ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS.....	VII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA.....	3
2.1. OBJETIVOS Y ALCANCE	3
2.2. METODOLOGÍA	3
3. EL RETO DE LA DESCARBONIZACIÓN EN EL SECTOR AERONÁUTICO... 5	5
3.1. Prólogo.....	5
3.2. Marco teórico	6
3.3. Plan de compensación y reducción de carbono para la aviación internacional (CORSIA)	7
3.3.1. Contexto histórico	7
3.3.2. Ámbito geográfico de aplicación del RCDE UE y CORSIA.....	9
3.3.3. Articulación del programa	10
4. SISTEMAS DE PROPULSIÓN.....	11
4.1. PREFACIO.....	11
4.2. MARCO TEÓRICO: FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR TURBOEJE CONVENCIONAL.....	11
4.3. SUSTAINABLE AVIATION FUEL (SAF).....	13
4.3.1. Tipos de SAF	14
4.3.2. Vías de producción	14
4.3.3. Uso y producción de combustibles de aviación sostenibles en la UE	15
4.3.4. Capacidad real y futura demanda de SAF en la UE	16
4.3.5. Barreras en la producción y uso de SAF	16
4.4. AERONAVES ELÉCTRICAS.....	17
4.4.1. Generalidades	17
4.4.2. Concepto More Electric Aircraft (MEA).....	17
4.4.3. Baterías y motores eléctricos	19



4.4.3.1.	Estado de desarrollo de baterías convencionales.....	20
4.4.3.2.	Motores eléctricos.....	22
4.4.3.3.	Configuraciones híbridas y turboeléctricas	23
4.5.	PROPULSIÓN DE HIDRÓGENO	25
4.5.1.	El hidrógeno y sus posibilidades	25
4.5.2.	El hidrógeno como vector energético	26
4.5.3.	Pila de combustible de hidrógeno	27
4.5.4.	Almacenamiento de hidrógeno en aviación	28
4.5.5.	Retos del hidrógeno en aviación	30
4.6.	EL FUTURO DE LAS AERONAVES DE ALA ROTATORIA EN LAS FUERZAS AEROMÓVILES DEL EJÉRCITO DE TIERRA.	31
4.7.	SELECCIÓN DEL SISTEMA DE PROPULSIÓN A PRIORIZAR A TRAVÉS DE LA METODOLOGÍA AHP	33
4.7.1.	Evaluación de criterios.....	34
4.7.2.	Evaluación de las alternativas	35
4.7.3.	Jerarquización de alternativas	36
5.	CONCLUSIONES	37
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40
	ANEXOS	45
	ANEXO I ENTREVISTAS Y RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN CON EL PERSONAL DE LA ACADEMIA DE AVIACIÓN DEL EJÉRCITO DE TIERRA.	45



INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Emisiones globales de CO ₂	6
Figura 2. Gases emitidos por una turbina convencional.	7
Figura 3. Contribución de las medidas adoptadas para la reducción de GEI.....	8
Figura 4. Fases de implementación del programa CORSIA.	10
Figura 5. Motor turboeje con eje de potencia libre (motor de helicóptero).	13
Figura 6. Diferencias entre una aeronave convencional y una aeronave MEA.	19
Figura 7. Arquitectura turboeléctrica.	24
Figura 8. Funcionamiento de una pila tipo PEM..	28
Figura 9. Densidad del hidrógeno dependiendo de la presión aplicada..	29
Figura 10. Diagrama de árbol AHP.	34



INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Obtención de hidrógeno a partir de energías renovables.....	27
Tabla 2. Escala de Saaty	34
Tabla 3. Matriz de comparación por pares de los criterios	35
Tabla 4. Matriz de comparación en función del criterio potencia específica.....	35
Tabla 5. Matriz de comparación en función del criterio peso de la aeronave.....	35
Tabla 6. Matriz de comparación en función del criterio energía específica	35
Tabla 7. Matriz de comparación en función del criterio coste de desarrollo	36



ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS

Acrónimos	Español	Inglés
AAF	Combustibles Alternativos Aviación	Alternative Aviation Fuels
AEA	All electric aircraft	Aeronave totalmente eléctrica
AHP	Método de Jerarquización Analítica	Analytic Hierarchy Process
AIE	Agencia Internacional Energía	International Energy Agency
APU	Unidad de potencia auxiliar	Auxiliary Power Unit
ASTM	Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales	American Society for Testing and Materials
BRICS	Brasil, Rusia, India, China, Sudáfrica	Brasil, Russia, India, China, South Africa
CORSIA	Plan de Compensación y Reducción de Carbono para la Aviación	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation
EASA	Agencia de Seguridad Aérea Europea	European Aviation Safety Agency
EEE	Espacio Económico Europeo	European Economic Space
ET	Ejército de Tierra	Army
EVTOL	Aeronave Eléctrica de Despegue y Aterrizaje Vertical	Electric Vertical Take-off and Landing
FAA	Administración Federal Aviación	Federal Aviation Administration
FAMET	Fuerzas Aeromóviles del Ejército de Tierra	Army Aviation
FAS	Fuerzas Armadas	Armed Forces
GEI	Gases de Efecto Invernadero	Greenhouse Effect Gases
HEFA	Ácidos y Ésteres Hidroprocesados	Hydroprocessed Esters and Fatty Acids
IATA	Asociación de Transporte Aéreo Internacional	International Air Transport Association
MEA	Aeronaves Más Eléctricas	More electric aircraft
OACI	Organización Aviación Civil Internacional	International Civil Aviation Organization
OTAN	Organización Tratado Atlántico Norte	North Atlantic Treaty Organization
PEM	Pila de Membrana de Intercambio de Protones	Polymer Electrolyte Membrane Electrolysis
RCDE UE	Régimen de Comercio de Derechos de Emisión de la Unión Europea	European Union Emissions Trading System
RED I/II	Directiva de Energías Renovables	Renewable Energy Directive
RI	Razón de Inconsistencia	Inconsistency Reason
RSB	Mesa Redonda Combustibles Sostenibles	Roundtable on Sustainable Biofuels
SAF	Combustible Aviación Sostenible	Sustainable Aviation Fuel
SARPs	Normas y métodos recomendados	Standards and Recommended Practices
SS2HS	Tanque de Almacenamiento de Hidrógeno en Estado Sólido acoplado	Fuel cell coupled solid state hydrogen storage tank
UE	Unión Europea	European Union



1. INTRODUCCIÓN

Con un recorrido histórico que apenas supera los 100 años, el sector de la aviación ha experimentado en este período de tiempo una evolución sin precedentes, constituyendo un elemento clave en diferentes ámbitos como lo son la defensa de la integridad territorial y del espacio aéreo nacional, el comercio, o el turismo.

Actualmente la aviación se enmarca como un pilar fundamental sobre el que se sustenta buena parte de la economía global, pues este sector representa aproximadamente un 3% del producto interior bruto mundial, con una clara tendencia al alza, pues se espera un crecimiento en la flota total de aeronaves de aproximadamente el 5% anual durante los próximos 20 años (World Aviation Flight Academy, 2021).

Uno de los más notables aportes que la aviación ha dado al mundo se trata de la aceleración del proceso de globalización, en parte gracias a las altas velocidades y los escasos periodos de tiempo en los que se pueden conectar dos partes del planeta. El intercambio de bienes, así como las relaciones comerciales y diplomáticas, se han convertido en un proceso más sencillo.

Sin embargo, la globalización se trata de un proceso en continuo desarrollo y expansión, por ello es esperable que la afluencia de pasajeros, así como de mercancías que son aerotransportadas, continúe al alza, como lo lleva haciendo en los últimos años. Este proceso plantea diferentes retos y dudas. Por un lado, el aumento en la afluencia de pasajeros, especialmente aquellos que provienen de países del entorno asiático como lo son China o India (cuyos habitantes han visto como su poder adquisitivo se incrementaba en los últimos años), se ha convertido en un importante reto para la industria aeronáutica. Dado que en el marco de su desarrollo económico también se plantea la dificultad de suplir con medios aéreos las demandas de la zona más poblada del planeta, sin duda tendrá consecuencias económicas positivas en prácticamente todos los ámbitos que aborda el sector.

De este modo, un mayor número de aeronaves serán necesarias en el futuro, lo cual, naturalmente, crea la necesidad de aumentar el tamaño de las plantas de producción. Numerosas empresas han expandido en los últimos años sus factorías a lo largo del mundo, allí donde los costes de producción son menores, creando una fuerte dependencia entre estados y grandes empresas aeronáuticas, y contribuyendo una vez más a la globalización. Boeing y Airbus son un ejemplo de multinacionales que se ven inmersas en este proceso de descentralización.

Por otro lado, un mayor número de aeronaves supone la necesidad de formar y cualificar a un mayor número de pilotos, asistentes de vuelo, controladores, etc., siendo todos ellos demandantes de una alta especialización. Quedan patentes las numerosas oportunidades que aguardan al futuro de la aviación, lo que lo ha convertido en un sector altamente estratégico con una proyección a largo plazo que parece casi impensable hoy en día. Sin embargo, este pronóstico de crecimiento plantea una problemática muy presente en la actualidad: la protección del medio ambiente.

En este sentido, es esencial ser consciente de la tecnología y las capacidades que se poseen actualmente, y saber dónde se encuentran los límites de nuestra tecnología. A raíz de las sucesivas conferencias sobre el cambio climático a partir de Tokio 1992, la reducción de emisiones de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero se ha convertido en un imperativo para cualquier industria. Tanto es así que en los últimos años se ha marcado como fecha límite el año 2050 para alcanzar las cero emisiones de gases contaminantes en la Unión Europea. España por su parte estableció el borrador en 2019 sobre su plan de reducción de emisiones de acuerdo con el Tratado de París firmado en 2015 dentro de la Convención Marco



de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Según este acuerdo, se estableció como requisito mínimo a alcanzar la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero un 40% con respecto al total de las emisiones que se produjeron en el año 1990, cuyo fin no es otro sino el de ralentizar el incremento de la temperatura media global, que se establece en unos 2 grados Celsius aproximadamente según pronósticos para finales de siglo, e intentar atenuar este incremento a 1,5 grados aproximadamente.

Evidentemente la aviación y la industria relacionada con la producción de aeronaves se encuentran en el punto de mira, pues se trata de un sector que emite grandes cantidades de gases contaminantes a la atmósfera. Esto se ha traducido en una creciente preocupación, así como en una inversión en investigación y desarrollo de sistemas de propulsión alternativos como lo motores híbridos, eléctricos, o de hidrógeno. Si bien es cierto que su desarrollo es mínimo y se encuentra aún lejos de llegar a la aviación comercial, los primeros pasos ya se han dado y todo parece apuntar a aeronaves, tanto aviones como helicópteros, propulsados por sistemas alternativos en los años venideros, siendo el más prometedor el hidrógeno, debido a su increíble eficiencia y poder energético (supera hasta en 2,5 veces el poder calorífico que entrega el queroseno).

Se han planteado últimamente numerosas propuestas y alternativas tanto a los motores como a los combustibles usados en aviación, esencialmente el queroseno con sus diferentes variantes, aunque también existen pequeños motores de gasolina, sobre todo en helicópteros y aviones de pequeño tamaño. Una de las propuestas que se barajan como alternativa a los combustibles fósiles convencionales no es otro sino el SAF (Sustainable Aviation Fuel). Su origen se encuentra en materias primas sostenibles y presenta una composición química muy similar a los combustibles fósiles convencionales, no obstante, la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera se reduce drásticamente (hasta en un 80%).

En los últimos 60 años las emisiones producidas por la aviación han disminuido notablemente, de hecho, las aeronaves con motor de turbina son hasta un 80% más eficientes de lo que lo eran en aquella época. Sin embargo, el tráfico aéreo se ha multiplicado desde entonces. Por lo tanto, la mejora en eficiencia no es suficiente y esto plantea la problemática y el reto de sustituir los motores convencionales por nuevos modelos de propulsión, más eficientes, y cuyas emisiones de gases de efecto invernadero sean prácticamente nulas.

Actualmente la tendencia lleva a crear aeronaves más grandes, capaces de transportar más gente y más mercancía en un único vuelo, con el fin de ahorrar en combustible y reducir así las emisiones. También se barajan nuevos conceptos de diseño, como por ejemplo mejorar la aerodinámica de las alas en el caso de los aviones, construyéndolas más largas y tratando de disminuir la resistencia inducida en el perfil y por lo tanto el consumo de combustible, no obstante, estructuralmente incurre en un necesario aumento de la resistencia del fuselaje, que se traduce en un aumento de peso y, por consiguiente, un aumento del consumo de la aeronave.

En el caso de los helicópteros se trata de crear perfiles más aerodinámicos en las palas, así como de reducir el coeficiente de resistencia aerodinámica que presenta el propio diseño del fuselaje. Sin embargo, se trata de un proceso difícil pues el helicóptero es aerodinámicamente inestable por diseño, y las ligeras correcciones de diseño que se le pueden dar no son suficientes para disminuir el alto consumo de combustible que las turbinas necesitan para poder mantener la máquina en vuelo. Estas propuestas, aunque interesantes, simplemente se tratan de pequeños parches a corto plazo para intentar mitigar y reducir las emisiones de gases nocivos a la atmósfera mientras se desarrollan las aeronaves del futuro, que indiscutiblemente, como ya se ha mencionado con anterioridad, deberán recurrir a sistemas de propulsión alternativos.



2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

2.1. OBJETIVOS Y ALCANCE

Se ha fijado como objetivo general de este trabajo de investigación el estudio de las principales causas de la emisión de gases de efecto invernadero en el mundo aeronáutico y las posibles soluciones que se plantean con el fin de minimizar la contaminación que este sector produce.

Se fija como objetivo principal el análisis de las capacidades tecnológicas que posee actualmente la industria aeronáutica y el desarrollo de nuevas tecnologías en materia de reducción de emisiones de gases perjudiciales a la atmósfera.

Para ello, se llevará a cabo un estudio exhaustivo de las principales y más prometedoras alternativas de propulsión para aeronaves (ala fija y ala rotatoria) que se han planteado hasta la fecha y su proyección de cara a la posible implementación progresiva en el mundo de la aviación.

Finalmente, se tratará la temática militar como posible beneficiaria de esta evolución tecnológica, evaluando su posible implementación en las flotas de aeronaves de estado españolas, llevando a cabo una conclusión objetiva y realista que manifieste dónde se encuentra esta tecnología a día de hoy y hasta dónde y qué se espera de ella en los próximos años.

El alcance del proyecto se plantea de modo interno dentro del entorno de las Fuerzas Armadas, a las que, con carácter informativo, a través del análisis de toda la bibliografía e información suministrada, se trata de proporcionar una visión sobre aquellos sistemas de propulsión aeronáuticos que actualmente no se encuentran disponibles debido a su limitado grado de desarrollo o elevado coste. No obstante, en un determinado momento, con una tecnología lo suficientemente desarrollada, es muy probable que algunos de los sistemas descritos a continuación terminen por ser integrados de forma plenamente operativa en el sector de la aviación militar española.

2.2. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo la redacción del siguiente proyecto, la metodología general se ha organizado en tres secciones.

Por un lado, se ha efectuado una amplia investigación de fuentes bibliográficas sobre cada uno de los diferentes apartados descritos en el trabajo, fundamentalmente a través de libros, artículos académicos sobre temas relacionados y páginas especializadas en la materia aeronáutica.

En segundo lugar, se ha llevado a cabo la recopilación de información relacionada con la temática aeronáutica de forma personal en aquellos aspectos en los que se ha considerado necesario que así sea. Esto es, a través de métodos cualitativos como en este caso son las entrevistas con personal especializado en la materia. Durante este proceso de obtención de información se han entrevistado a numerosas personas con una amplia experiencia en el mundo de la aviación, así como en helicópteros del Ejército de Tierra. Muchos de los grupos entrevistados se corresponden con profesores tanto de vuelo como de asignaturas teóricas de la Academia de Aviación del Ejército de Tierra, como lo son el comandante D. Luis Comas, así como mecánicos e ingenieros aeronáuticos como el teniente D. Gabriel Ruedas, destinado como ingeniero aeronáutico en la academia con un amplio conocimiento en el sector.

Por su parte, toda la información recabada a partir de las entrevistas realizadas a personal



especializado en la materia ha servido principalmente para la selección de la mejor de las alternativas expuestas a partir de la metodología AHP, ya que esta precisa de una serie de opiniones de expertos para poder discriminar entre unos criterios u otros, así como para llevar a cabo una comparación entre los sistemas descritos y de esta manera llegar a una conclusión coherente. En el anexo se incluyen los resultados de dichas entrevistas.

Por otro lado, se han añadido en diversos apartados suplementos de información contrastada con el personal entrevistado, especialmente en aquellos aspectos y apartados en los que tienen una mayor experiencia y conocimiento acerca del mismo, dándole así una visión más personal a los sistemas descritos y ayudando a entender las ventajas que pueden ofrecer.

Por último, se ha obtenido información de varias empresas del sector de la aviación, así como administraciones nacionales como el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, que ha facilitado información sobre aspectos legales relacionados con las emisiones de gases de efecto invernadero en el ámbito aeronáutico y el futuro de la aviación en cuanto a nuevos sistemas de propulsión.

Asimismo, la obtención de información a partir de la investigación de bibliografía especializada en la materia ha servido como pilar fundamental para desarrollar de forma coherente el trabajo, extrayendo una serie de conclusiones de cada uno de los diferentes textos analizados que más tarde se han visto plasmadas en el texto escrito, si bien parte de esta información no se encontraba de una forma directamente relacionada con la temática aeronáutica. Esta carencia de datos específicos puede deberse al momento en el que nos encontramos, donde numerosas multinacionales compiten por desarrollar un sistema operativo, pudiéndose considerar, en muchos casos, la dificultad de acceso a información concreta debido al secreto empresarial.

De esta manera se ha tratado de generar una visión simple de cada uno de los aspectos que abarca en el presente la aviación, tanto en el ámbito civil como en el militar, teniendo este último una especial relevancia en el ambiente en el que se plantea este proyecto. Por ello, se ha tratado de realizar una síntesis orientada al entorno de las Fuerzas Armadas en general y en especial de las Fuerzas Aeromóviles del Ejército de Tierra. Entorno en el que ha nacido la iniciativa para llevar a cabo el presente trabajo y al cual se orienta toda la investigación de alternativas para una aviación sostenible en el futuro.

Finalmente se han redactado una serie de conclusiones generales que reflejan de una forma general la situación tecnológica actual, las posibilidades existentes a día de hoy y las que aguardan el día de mañana.



3. EL RETO DE LA DESCARBONIZACIÓN EN EL SECTOR AERONÁUTICO

3.1. Prólogo

En los últimos años, la concienciación acerca del cambio climático ha tenido un fuerte impacto en la sociedad, convirtiendo la lucha contra la contaminación medioambiental en uno de los imperativos a corto y medio plazo a los que se enfrentan en la actualidad casi la totalidad de las naciones del mundo. No obstante, la hoja de ruta para combatir las emisiones de gases de efecto invernadero, en adelante GEI, varía en función del país, dependiendo principalmente de la capacidad económica de este, pues la transición energética demanda de una alta inversión monetaria que países en vías de desarrollo no están preparados para llevar a cabo.

Conscientes de este problema de coordinación, los estados miembros de la UE (Unión Europea), acordaron declarar la "emergencia climática" en vista a unir esfuerzos y determinar una estrategia común para llevar a cabo el reto de la descarbonización. Desde la sede central de la UE en Bruselas se mandan órdenes al resto de los estados en materia de reducción de emisiones. Así es, por ejemplo, la reducción de emisiones concertada para el año 2030 para vehículos de combustión de un 40% (mediante la electrificación de la flota de automóviles y camiones principalmente). Esta cifra, pese al esfuerzo económico que supondrá para la sociedad europea, se materializará en la reducción de únicamente un 1% de las emisiones de CO₂ globales. Se hace patente de este modo que la mayor parte de los gases de efecto invernadero emitidos en la actualidad no provienen de nuestro continente, sino de estados cuya masiva industrialización representa una gran parte de las emisiones globales de gases nocivos. Un ejemplo de estos pueden ser los países relacionados con el bloque de los BRICS, cuyo desarrollo económico e industrial, muy por detrás en muchos ámbitos del europeo o norteamericano, sirve como justificación para la alta emisión de contaminantes sin necesidad de implementar medidas restrictivas, usando como pretexto la ingente cantidad de gases nocivos que países desarrollados han emitido desde los primeros años de la industrialización en el siglo XIX (Unión Europea, s.f.).

Por su parte, la aviación supone un significativo porcentaje en términos de emisión de gases de efecto invernadero a nivel global, llegando a representar el 2% del total de emisiones de dióxido de carbono (ver figura 1), principal causante del efecto invernadero, en 2018, con estimaciones que apuntan a que la aviación supondrá el 3% de las emisiones totales de GEI para el año 2050 (Parlamento Europeo, 2022).



EMISIONES GLOBALES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO POR SECTOR

Las emisiones globales de gases de efecto invernadero fueron 49,4 mil millones de toneladas de CO₂eq.

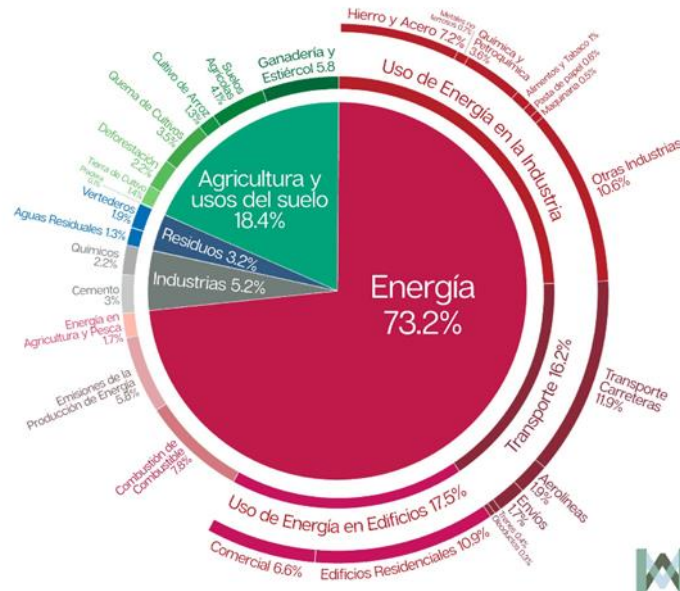


Figura 1. Emisiones globales de CO₂, donde el sector aeronáutico representa el 2% de las emisiones totales de GEI. Fuente: <https://www.bolsamania.com/capitalbolsa/noticias/social/emisiones-globales-de-gases-de-efecto-invernadero-por-sectores--7924436.html>. Consultado el 15 de octubre de 2022.

3.2. Marco teórico

Esencialmente existen dos tipos de contaminación producida por cualquier tipo de aeronave. Se trata de la contaminación química (emisión de gases) y la contaminación sonora, la cual acarrea su propia legislación con el fin de mitigar los efectos de los altos ruidos producidos por la aviación (Torres, 2020). En este proyecto se trata únicamente la contaminación química y las medidas que se están abordando en la actualidad para reducirla al máximo.

Las sustancias químicas emitidas por las aeronaves convencionales (ver figura 2), propulsadas por turbinas que utilizan el queroseno como combustible, se pueden dividir en dos tipos:

- Aquellas sustancias que tienen un efecto perjudicial para la salud de los seres humanos. Entre estas sustancias se incluyen:
 - Óxidos de nitrógeno, tanto monóxido de NO como dióxido de NO₂, nombrados usualmente como NO_x.
 - Óxidos de azufre, que incluyen el dióxido de azufre (SO₂) y el anhídrido sulfúrico u óxido de azufre (SO₃), nombrados en su conjunto como SO_x.
 - El hollín (material particulado), compuesto en su práctica totalidad por carbono, aunque también puede presentar pequeños porcentajes de hidrógeno en su estructura. El hollín es un subproducto de la combustión incompleta de materiales orgánicos como madera y combustibles. El polvo negro puede



contener sustancias muy peligrosas para la salud como lo son el arsénico, el cadmio o el plomo.

- El monóxido de carbono (CO).
- Aquellos porcentajes de combustible no quemados.
- Las sustancias que no suponen un peligro para la salud de los seres humanos pero que sí tienen un peso importante en cuanto al cambio climático se refiere:
 - Dióxido de carbono (CO₂).
 - El agua en estado gaseoso, emitida a altas temperaturas por los motores.
 - Óxido nitroso (N₂O).

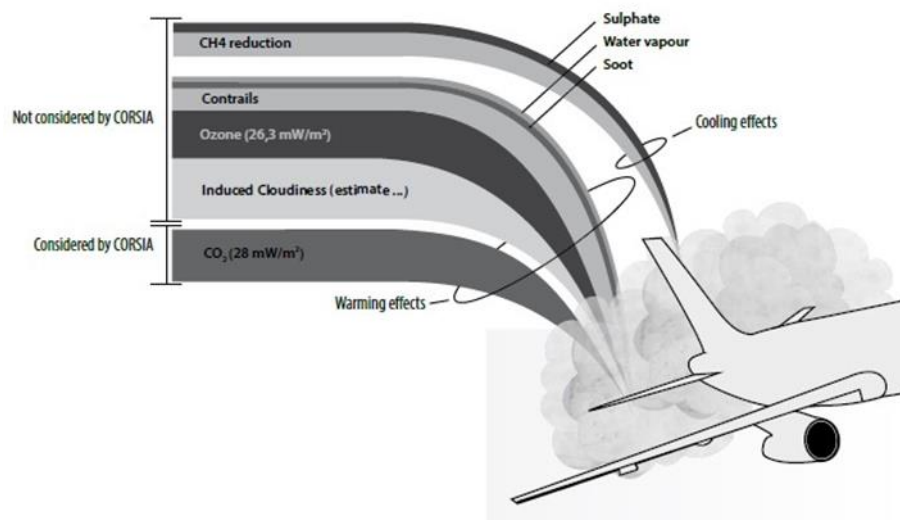


Figura 2. Gases emitidos por una turbina convencional. Fuente: <https://www.ecopost.info/la-aviacion-es-3-veces-mas-danina-para-el-clima-que-lo-declarado-por-la-industria/>. Consultado el 13 de octubre de 2022.

3.3. Plan de compensación y reducción de carbono para la aviación internacional (CORSIA)

3.3.1. Contexto histórico

En los últimos años, tanto gobiernos de numerosos países, conscientes de la necesidad de minimizar la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera, así como la industria y el sector aeronáutico, se encuentran en pleno desarrollo del primer programa internacional de compensación de la emisión de carbono.

CORSIA nació como un proyecto cuyo desarrollo fue liderado por España y Canadá, si bien participaron muchas más naciones en él. Una vez el trabajo estuvo hecho, fue en la 39ª Asamblea de la OACI celebrada en 2016 donde se aprobó el Plan de compensación y reducción de carbono para la aviación internacional. Como ha sido expuesto anteriormente con el caso de la Unión Europea, CORSIA no se trata de un programa de desarrollo aislado, sino que sirve como complemento para las innumerables medidas de reducción de emisiones en la aviación a nivel internacional, así como para los mecanismos de mercado cuyo objeto de estudio se centra en



reducir emisiones sin afectar a la operatividad del sector aeronáutico. Entre otros, se introducen mejoras como la gestión avanzada del tráfico aéreo e infraestructuras y la inversión en desarrollo y producción de Sustainable Aviation Fuel (SAF).

CORSIA¹ ha fijado el ambicioso objetivo de alcanzar un crecimiento neutro en emisiones de carbono para la industria aeronáutica a partir del año 2020.

En el año 2013, durante la celebración de la 38ª Asamblea General de la OACI (Organización de Aviación Civil Internacional), se debatió y aprobó el requerimiento al Consejo de la organización a fin de elaborar una hoja de ruta que fijase un plan de reducción de emisiones de dióxido de carbono a nivel mundial encuadrado en el marco de las Medidas de Mercado Aplicables a las emisiones de la aviación.

Una vez establecidos los requisitos, el nuevo programa se concibe como una herramienta complementaria a las ya existentes medidas establecidas por la organización y cuyo fin no es otro sino la lucha contra el cambio climático. Este programa establece como primera meta a alcanzar la limitación del aumento de emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente CO₂, de la aviación civil internacional por encima de los datos establecidos en el año 2020 (ver figura 3), denominado como Carbon Neutral Growth 2020 -Crecimiento Neutro de Carbono 2020- (IATA, 2010).

Por otro lado, el mencionado programa sirve también como contribución a lo dispuesto en la conferencia de París de 2015, ya citada anteriormente, donde se firmaron los primeros tratados vinculantes al problema climático, según los cuales se acordó la reducción de las emisiones globales con el fin de limitar el aumento de la temperatura media global a 2 grados Celsius.

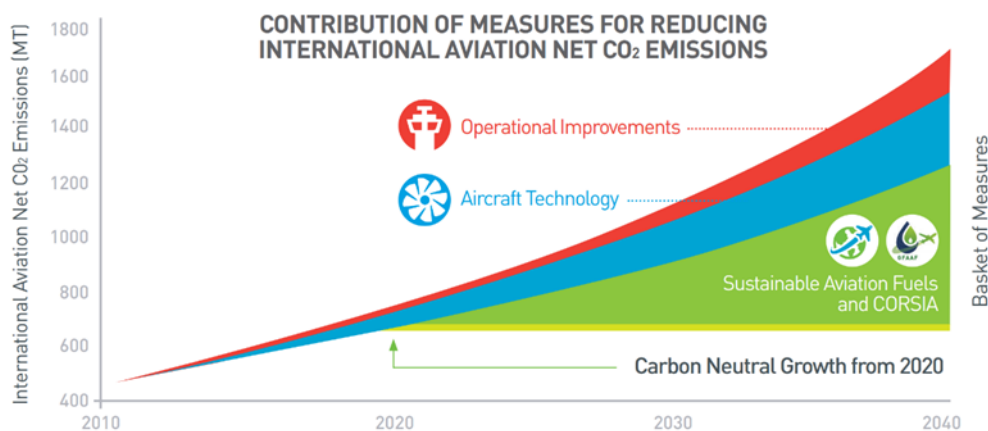


Figura 3. Contribución de las medidas adoptadas para la reducción de GEI. Fuente: https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Brochure/CorsiaBrochure_SPA-Mar2019_Web.pdf. Consultado el 15 de octubre de 2022.

¹ Por sus siglas Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (Plan de compensación y reducción de carbono para la aviación internacional).



3.3.2. Ámbito geográfico de aplicación del RCDE UE y CORSIA.

En 2018 se aprobó por primera vez la edición del Anexo 16, Volumen IV, del Convenio sobre Aviación Civil Internacional, el cual enumera las normas y métodos recomendados (SARPs) para que el programa CORSIA sea aplicado de la forma más efectiva posible. Finalmente, el proyecto fue aprobado por amplia mayoría (superior a dos tercios del Consejo de la OACI), pues únicamente Rusia, Argelia, India y China votaron en contra de la implementación.

Un SARP del Volumen IV del Anexo 16 de la OACI sirve como guía de referencia para agilizar los procedimientos a seguir por las naciones conforme a lo establecido en la legislación del CORSIA, cuya aplicación se hizo obligatoria a partir de enero de 2019. La OACI ha desarrollado una serie de materiales de referencia para la correcta aplicación de los estatutos del programa por parte de los agentes implicados en él, como bien pueden ser las aerolíneas, los estados e incluso la propia OACI. Dichos informes de apoyo se denominan “Elementos de Implementación” y su único fin es la facilitación para los miembros de la organización. Finalmente, a partir de junio de 2019, se hizo efectiva la obligatoriedad para los explotadores de aeronaves comerciales de notificar las emisiones de CO₂ producidas (OACI, 2018).

Inicialmente (previo a la imperatividad por parte del programa de notificación de emisiones) las actividades del CORSIA se iniciaron con un plan de observación de las emisiones y se propuso que la agencia estatal de seguridad aérea pertinente para cada nación redactase una hoja de ruta común para la notificación de emisiones por parte de aerolíneas nacionales previo al inicio de notificación obligatoria de emisiones de CO₂.

Cada empresa explotadora de aeronaves civiles (por norma general aerolíneas comerciales) se ve en la obligatoriedad de recabar los datos sobre emisiones de todas sus aeronaves y debe facilitarlos a un órgano competente que autentifique la veracidad acerca de la cantidad de CO₂ emitido en el periodo de tiempo estipulado por la autoridad competente. Seguidamente, el programa dicta que estos datos verificados se entregarán al estado, quien debe también inspeccionar dichos informes previo a proporcionar los datos al sistema de registro de CORSIA en la OACI. Finalmente, la OACI realizará una evaluación de emisiones y notificará a los estados la tasa de crecimiento o decrecimiento de sus emisiones en el sector aeronáutico con el fin de que cada gobierno tome las medidas oportunas con el fin de tratar de minimizar el crecimiento o invertirlo.

En el RCDE UE (Régimen de Comercio de Derechos de Emisión de la Unión Europea) se incluye también el sector aeronáutico desde 2012. Dicho sistema trataba, en sus orígenes, de cubrir todas las emisiones que producían aquellos vuelos que se desplazaban tanto dentro del Espacio Económico Europeo como aquellos tráficos que tenían como origen o destino el EEE y provenían de terceros países. No obstante, pronto se hizo patente la imposibilidad de cumplir con los acuerdos sobre reducción de emisiones. Con el fin de dar impulso a lo estipulado por la OACI y de marcar la línea a seguir para alcanzar un enfoque global para la reducción de emisiones de la aviación internacional, se adoptaron medidas en el seno de la Unión Europea que limitaron el ámbito geográfico de aplicación del RCDE UE limitando su aplicación únicamente al tránsito dentro de la EEE, excluyendo por lo tanto los vuelos que tenían como origen o destino terceros países.

Sin embargo, estas medidas se establecieron como temporales, a la espera de la evolución de la situación a nivel internacional. En 2017, durante una revisión de la Directiva que enuncia el RCDE, se tuvo a bien implementar el programa CORSIA mediante una modificación del estatuto del RCDE, analizando las características esenciales de CORSIA e implementándolas en el programa europeo.

En cuanto a la unificación de ambos programas, la UE estableció como necesidad imperante



la coherencia entre ambos. De tal modo, se mantiene el objetivo de emisiones de la Unión Europea para 2030, de conformidad con los Acuerdos de París y el principio de no retroceso (lo pactado no contempla un aumento de emisiones, a pesar de haber incluido la aviación en el Régimen de Comercios de Derechos de Emisiones a sabiendas de la dificultad que supone la reducción de GEI en este sector).

Por tanto, y con el fin de dejar claro el firme apoyo de la Unión Europea al compromiso de reducción de emisiones en el panorama global, se estableció una reducción al ámbito de aplicación en términos aeronáuticos del RCDE, dando como resultado final su aplicación únicamente en vuelos de carácter doméstico y europeo. Por el momento, esta disposición sigue vigente hasta su próxima revisión en 2023 en lo que se conoce como Ámbito Reducido (Consejo Europeo, 2022).

3.3.3. Articulación del programa

CORSIA se articula en tres etapas (ver figura 4). Inicialmente se establecieron las dos primeras etapas que comprenden desde 2021 hasta 2026, en las cuales la participación en el programa de notificación y actuación en materia de reducción de emisiones es voluntaria. La tercera etapa, que comprende desde 2027 hasta 2035 es de carácter obligatorio para los estados miembros de la OACI.

Cabe destacar la exención de participación en la etapa obligatoria para aquellos países que por determinadas circunstancias no puedan cumplir con las premisas establecidas en el anexo. Algunas de dichas circunstancias comprenden la incompetencia económica para asumir la descarbonización de la aviación, haciendo referencia a los países en vías de desarrollo o incluso para aquellos estados cuyo tránsito aéreo es tan reducido que las emisiones no llegan a los máximos permitidos (OACI, 2018).



Figura 4. Fases de implementación del programa CORSIA. Fuente: https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Brochure/CorsiaBrochure_SPA-Mar2019_Web.pdf.

Consultado el 17 de octubre de 2022.



4. SISTEMAS DE PROPULSIÓN

4.1. PREFACIO

La industria aeronáutica actual se ha encaminado en los últimos años en la búsqueda de un sistema de propulsión que reduzca de forma significativa las emisiones de GEI a la atmósfera, para de esta forma poder cumplir con la legislación previamente descrita en los capítulos anteriores. De esta forma, es inevitable pensar en que, de una forma u otra, el futuro de la aviación no pasa por los motores de turbina convencionales con queroseno como combustible.

Tanto es así, que la mayor parte de los esfuerzos de desarrollo de nuevos sistemas de propulsión se centran actualmente en dos: sistemas eléctricos y en base al hidrógeno. Ambos sistemas son descritos a continuación, exponiendo tanto los puntos fuertes como las debilidades que presentan. Además de describir los sistemas previamente mencionados, también se trata una de las alternativas más factibles a corto plazo: el combustible de aviación sostenible. Este combustible presenta una serie de ventajas, principalmente el mantenimiento de una infraestructura prácticamente idéntica a la actual, aunque presenta una serie de inconvenientes como su elevado coste actual, todo ello tratado de forma detallada a continuación.

Los sistemas descritos son analizados en un último apartado que trata de enfocar el posible uso e incorporación de estos a las aeronaves que conforman el Ejército de Tierra, así como el resto de las aeronaves militares españolas, y su viabilidad analizada desde diferentes puntos de vista.

4.2. MARCO TEÓRICO: FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR TURBOEJE CONVENCIONAL

Históricamente, la aviación convencional ha utilizado dos tipos de sistemas de propulsión: los motores de combustión interna de gasolina o diésel (la tirada de estos últimos ha sido más bien limitada debido al mayor peso que presenta un bloque motor diésel), y la propulsión en base a la turbina. El primer tipo proporciona unas prestaciones limitadas, siendo usado exclusivamente en aviones y helicópteros ligeros, si bien es cierto que su uso en instrucción y escuelas está muy extendido debido a su bajo coste de mantenimiento. El segundo tipo, el motor de turbina, se trata del sistema de propulsión más extendido en el mundo aeronáutico, gracias a su alta relación potencia/peso y gran fiabilidad, aunque generalmente son más caros de operar.

Es importante destacar que el principio de funcionamiento de las turbinas que operan los helicópteros varía con respecto al funcionamiento de la turbina de un avión convencional, si bien la base fundamental de ambos sistemas es el mismo: el aprovechamiento de un chorro de aire a alta velocidad que conforme a lo establecido por la Ley de Acción-Reacción (Tercera Ley de Newton), produzca un desplazamiento en la dirección deseada. A continuación, se desarrolla el funcionamiento de un sistema de turboeje, la planta de potencia de un helicóptero convencional.

El principio de funcionamiento de una turbina de gas es prácticamente idéntico, salvando las distancias, al de un motor de pistón convencional como el que utilizan los automóviles, siendo las diferentes etapas la admisión, compresión, explosión y escape, si bien los gases que en un automóvil son desechados, en un motor de turbina cobran especial relevancia pues estos son aprovechados para proporcionar el empuje a la aeronave (Cutler, 2022).

La turbina de un helicóptero está formada por un compresor, generalmente centrífugo, una



cámara de combustión, un sistema de turbinas en diferentes etapas, una caja de accesorios acoplada y una tobera de escape (FAA, Actualizado 2022), como a continuación se expone:

- Compresor.

La turbina generalmente se compone de un compresor de aire centrífugo, uno axial, o en ocasiones, de una combinación de ambos. Un compresor axial se compone de dos elementos principales: un rotor y un estátor.

El rotor consta de una serie de palas fijadas en un husillo giratorio y se asemeja a un ventilador. A medida que gira el rotor, el aire es aspirado hacia dentro. Las palas del estator están dispuestas en filas fijas entre las palas del rotor actuando como un difusor en cada etapa de compresión para disminuir la velocidad del aire y aumentar su presión, pudiendo haber más de una fila de palas de rotor y paletas de estator. Cada fila constituye una etapa de compresión, y el número de etapas depende de la cantidad de aire y del aumento de presión necesarios para el motor en concreto.

Un compresor centrífugo consta de un impulsor, un difusor, y un colector. El impulsor, que es un disco forjado con palas integradas, gira a alta velocidad para aspirar aire y expulsarlo a un ritmo acelerado. Luego el aire pasa a través del difusor, que ralentiza el aire. Cuando la velocidad del aire se ralentiza, la presión estática aumenta (principio de Bernouilli), dando como resultado un aire comprimido a alta presión. El aire a alta presión luego pasa a través del colector del compresor donde es distribuido a la cámara de combustión a través de tubos de descarga.

- Cámara de combustión.

A diferencia de un motor de pistón, la combustión en un motor de turbina es continua. La bujía de encendido sólo sirve para encender la mezcla de combustible y aire al arrancar el motor. Una vez que la mezcla de aire y combustible se enciende, se produce una combustión continua mientras la mezcla de aire y combustible sigue estando presente. Si hay una interrupción de combustible, aire, o ambos, cesa la combustión. Esto se conoce como un "flameout", y el motor debe reiniciarse o volver a encenderse. Algunos helicópteros están equipados con encendido automático, que activa de forma autónoma los encendedores para reiniciar la combustión si el motor se apaga.

- Turbina.

La turbina de dos etapas consta de una serie de turbinas que se utilizan para proporcionar energía a la sección del compresor y otros componentes indispensables del helicóptero como bombas de aceite, combustible e hidráulico. Otras turbinas aprovechan la energía producida para mover otros componentes conectados a la caja de accesorios. Ambas etapas pueden consistir en una o más ruedas de turbina. La primera etapa generalmente se conoce como la productora de gas (N1 o NG) mientras que la segunda etapa se denomina comúnmente turbina de potencia (N2 o NP)².

En la mayoría de las turbinas implementadas en helicópteros, la primera y segunda etapa no son mecánicamente solidarias entre sí. Esto es porque están montadas sobre ejes independientes, uno dentro del otro, y pueden girar libremente entre sí. Esto se conoce como una "turbina libre". Cuando un motor de turbina libre está funcionando, los gases de combustión pasan por la turbina de primera etapa (N1) para impulsar el compresor y otros componentes,

² La letra N se usa para indicar la velocidad de rotación en revoluciones por minuto.



para luego pasar por la turbina independiente de segunda etapa (N2), que hace girar la caja de potencia y accesorios para impulsar el eje de salida (cuyo fin principal es el movimiento del eje de potencia del rotor del helicóptero), así como otros componentes misceláneos.

- Caja de accesorios.

La caja de accesorios del motor alberga todos los engranajes necesarios para accionar los numerosos componentes del helicóptero. Se proporciona energía a la caja de accesorios a través de los ejes independientes conectados a N1 y a las ruedas de la turbina de N2. La etapa de N1 impulsa los componentes necesarios para completar el ciclo de la turbina, haciendo que el motor autosostenible. Componentes comunes impulsados por el N1 son el compresor, la bomba de aceite, la bomba de combustible el motor de arranque/generador, entre otros.

La etapa N2 está dedicada a conducir los principales sistemas de accionamiento del rotor y del rotor de cola y otros accesorios como como generadores, alternadores y aire acondicionado.

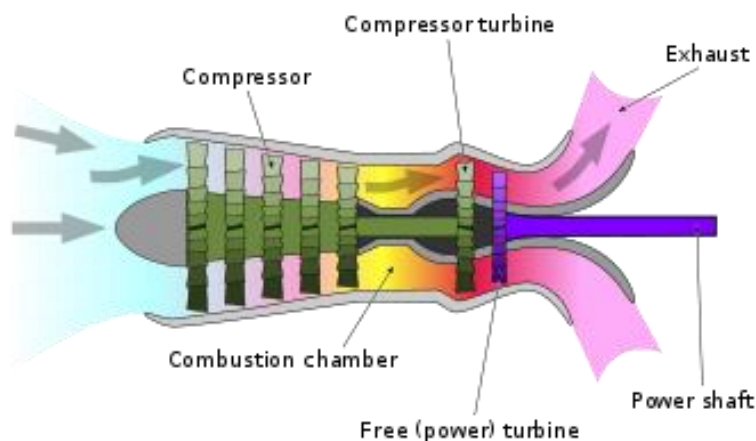


Figura 5. Motor turbopropulsor con eje de potencia libre (motor de helicóptero). Fuente: https://www2.anac.gov.br/anacpedia/esp_por/tr1175.htm. Consultado el 22 de octubre de 2022.

4.3. SUSTAINABLE AVIATION FUEL (SAF)

La exposición en el capítulo anterior del funcionamiento de un sistema de propulsión convencional de aviación plantea la duda sobre la posibilidad de mantener esta tecnología en el sector debido al alto grado de desarrollo que posee a día de hoy. En el presente capítulo se trata de plasmar una de las posibilidades de cara al futuro que plantea esta salida a la reducción de la huella de carbono: los combustibles sostenibles.

Tras el final de la Segunda Guerra Mundial, los avances tecnológicos dotaron a las aeronaves de turbina, cuyo principio de funcionamiento variaba con respecto a los motores de combustión de gasolina utilizados hasta aquel entonces, tal y como se ha expuesto en el apartado anterior. Con el desarrollo de la turbina se incrementaron notablemente las prestaciones de las aeronaves permitiendo a estas alcanzar velocidades y altitudes prácticamente impensables en la época. No obstante, estas nuevas capacidades necesitaban de un nuevo tipo de combustible entre cuyas características se encontrase, por ejemplo, un bajo punto de congelación. Comienza de esta forma a extenderse en la aviación el queroseno, un combustible con una alta eficiencia además de otorgar a las turbinas de un bajo consumo.

Hasta la actualidad, el combustible de aviación tal y como se conoce, se compone de una



serie de hidrocarburos producidos a través del fraccionamiento del queroseno a partir del petróleo crudo. No es ningún secreto el aumento incesante del tráfico aéreo a nivel mundial, y la alta cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente CO₂, que dicho sector produce. Es por ello que numerosos países, aerolíneas y empresas han tomado la determinación de iniciar el desarrollo de un tipo de combustibles sostenibles de uso directo, es decir, que no precisen de variaciones en los motores convencionales, cuyas emisiones reduzcan drásticamente la huella de carbono generado. Nacen así los combustibles sostenibles para la aviación.

El combustible de aviación sostenible, o SAF (por sus siglas en inglés), es un combustible de aviación procedente de materias primas de origen biológico, como el aceite de cocina usado, aunque también aquellos productos que se encuentran al final de su vida útil como plásticos. Es un sustituto sostenible del combustible fósil, perfectamente compatible con el combustible de aviación convencional, apto para motores de todos los tipos de turbina aeronáutica y no compromete los procesos ni el rendimiento de la máquina. El SAF reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente el CO₂, hasta en un 85 % en comparación con el combustible fósil (McCausland, 2022).

4.3.1. Tipos de SAF

Los biocombustibles de uso directo (combustibles sintéticos que se pueden utilizar en motores convencionales) son hidrocarburos líquidos con las mismas propiedades que los combustibles de aviación convencionales. La OACI distingue los combustibles alternativos de aviación (AAF) obtenidos de fuentes distintas del petróleo, como carbón, gas natural, biomasa y grasas y aceites hidrogenados, que probablemente se producirán de manera sostenible; y SAF, que son AAF que cumplen con los estándares de sostenibilidad. SAF no tiene una definición única internacionalmente. Los estándares de sostenibilidad de AAF se han definido en el programa de reducción y compensación de carbono de la aviación internacional (CORSIA). En el marco de la UE, la Directiva de Energías Renovables (RED) adoptada en 2009 estableció requisitos de sostenibilidad para los biocombustibles.

Con respecto a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), bajo CORSIA, el SAF debería lograr reducciones de emisiones de al menos un 10% en comparación con una línea base de combustibles fósiles como el queroseno (EASA, 2022). Según RED, para calificar a los biocombustibles como fuentes de energía renovable, los combustibles deben lograr una reducción un 65% mayor en las emisiones frente a una línea base de combustibles fósiles convencionales (ITAérea, 2022).

4.3.2. Vías de producción

Existen varias vías para los combustibles de base biológica, con diferentes niveles de madurez y preparación para la comercialización, que se obtienen al convertir diversas materias primas y residuos en combustible. Según las especificaciones de las normas de la Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales (ASTM), hasta junio de 2020, se habían certificado ocho vías de producción para su uso en la aviación civil. Otras vías están en proceso de aprobación. Siete vías implican la mezcla de combustibles sintéticos con combustible de aviación convencional y la octava implica el procesamiento de materias primas de origen biológico junto con materias primas fósiles en una refinería. La mezcla es necesaria porque ciertos componentes de combustible convencionales harán que el anillo de sello se expanda en motores más antiguos y evitará fugas de combustible. El uso de combustible de aviación sostenible sin mezclar se ha probado en aviones militares. Según las fuentes analizadas, dos son las vías que dan el nivel de preparación suficiente para la comercialización (Bioenergy Technologies Office, 2020):



- Vías de aceite a combustible, donde los aceites vegetales y/o las materias primas de lípidos animales (denominados HEFA), ésteres y ácidos grasos hidro procesados, son el método más utilizado para producir SAF disponibles comercialmente.
- Vía de producción de combustible mediante la síntesis de Fischer-Tropsch (FT), que utiliza biomasa, como residuos agrícolas.

Los SAF deben ser certificados como sostenibles por entidades independientes de reconocido prestigio. Esta certificación se centra en la materia prima de la que está compuesto el combustible y su cumplimiento con los criterios de sostenibilidad, que hace referencia al impacto causado en tres variables: social, económica y ambiental. Una empresa certificadora de SAF, como es la RSB, tiene un sistema de certificación y normas de sostenibilidad mundial que reconoce a los productores de biocombustible y biomasa que cumplen con los criterios estrictos de responsabilidad social y medioambiente (Roundtable on Sustainable Biofuels (RSB), 2010).

4.3.3. Uso y producción de combustibles de aviación sostenibles en la UE

Varias aerolíneas han utilizado biocombustibles para vuelos de prueba desde 2008. Según la Asociación de Transporte Aéreo Internacional (IATA), a nivel mundial en diciembre de 2019 más de 215.000 vuelos comerciales habían utilizado SAF, 40 aerolíneas tenían experiencia en combustibles sostenibles y 6 mil millones de litros (4,8 millones de toneladas) en contratos de compra. Varios aeropuertos han acordado suministrar biocombustibles a través de sus sistemas, por ejemplo, Oslo (desde 2015), el Aeropuerto Internacional de Los Ángeles (desde 2016), el Aeropuerto de Estocolmo (desde 2017) y el Aeropuerto de Bergen (desde 2017).

A pesar de estos desarrollos y del creciente interés en SAF, el consumo actual es muy bajo en comparación con el consumo total de combustible de aviación. Según la Agencia Internacional de Energía (AIE), la producción de biocombustibles de aviación de aproximadamente 15 millones de litros (aproximadamente 12 mil toneladas), lo que en 2018 representó menos del 0,1% del consumo total de combustible de aviación. Un estudio de 2019 conocido como la “iniciativa de facilitación” de SAF, encargado por la Agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA), situó la cifra de SAF en el 0,004% del combustible de aviación total utilizado por los operadores comerciales en todo el mundo en 2017. Mientras tanto, la Comisión Europea estimó el uso de SAF en la UE en un 0,05% del consumo total de combustible de aviación en ese mismo año (EASA, Actualizado 2022).

La producción ha crecido más rápidamente en los Estados Unidos gracias en gran parte a la disponibilidad de programas de apoyo a los productores y programas de incentivos para el uso de combustible. En Europa, SAF no se ha utilizado a gran escala y la mayor parte de la producción y el uso hasta ahora ha sido con fines de demostración y / o investigación e innovación. La mayoría de los SAF utilizados por los operadores europeos son importados de terceros países.

A modo de ejemplo para tratar de poner en contexto lo desarrollado previamente, KLM es la única aerolínea europea que utiliza SAF de forma regular, obteniendo su combustible de EE. UU (KLM Royal Dutch Airlines, 2022). SAS ha anunciado que utilizó 100 toneladas de combustible alternativo para aviones en el período 2016-2018. Neste ha producido y suministrado lotes encargados y Lufthansa ha probado y utilizado SAF en sus vuelos (Neste, 2022). La UE ha financiado varios proyectos de investigación y desarrollo en relación con SAF como, por ejemplo, Bio4A, Jetscreen, Flexjet, BeCool, BioMates, ABC-Salt y HyFlexFuel. Como se puede ver, realmente la inversión en combustibles sostenibles de aviación es aún conservadora. Únicamente una reducción en costes de producción de este tipo de combustible podría proporcionar un salto cualitativo a la implementación del SAF en aviación a todos los



niveles.

4.3.4. Capacidad real y futura demanda de SAF en la UE

Hay una serie de refinerías en Europa que están planeando producir o están produciendo biocombustibles y que podrían cambiar su producción para producir SAF, siempre que surjan incentivos del mercado o legislativos. La mayoría de ellos se centran en productos del proceso HEFA, utilizando aceites usados o grasas animales. Así encontramos algunas refinerías en España (Dr Chris Malins, 2022).

Un estudio de 2019 encargado por la EASA sobre el 'sistema de seguimiento' de SAF proporciona estimaciones de la capacidad de producción. La producción potencial anual de combustibles renovables en la UE, parte de la cual podría utilizarse para la producción de SAF, se estima en 4 millones de toneladas en 2020, aumentando a más de 7 millones de toneladas en 2025. Se estima que a corto plazo aproximadamente el 80% de la capacidad potencial para SAF provendrá de las refinerías de HEFA.

Teniendo en cuenta las tasas de rendimiento de diferentes rutas (por ejemplo, el rendimiento de SAF de las refinerías de HEFA se estima en un 50%), la producción anual potencial de SAF en la UE se calculó en 1,95 millones de toneladas en 2020 y 3,66 millones de toneladas en 2025 y 2030. Esto representa aproximadamente el 6% del consumo total de combustible de aviación. A nivel mundial, las estimaciones de la OACI sitúan la capacidad de producción en 2030 en más de 14.000 millones de litros (aproximadamente 11 millones de toneladas), pero destacan que existe incertidumbre sobre la cantidad de producción que se destinará a SAF en comparación con otros combustibles.

Por el lado de la demanda, los planes actuales de promoción de SAF en los países europeos podrían llevar a que la demanda de SAF aumente al 2,23% en 2025 y al 6,4% del uso de combustible para aviación en 2030 (1,35 millones de toneladas y 4,07 millones de toneladas, respectivamente). Se espera que esto aumente si se introducen más incentivos y medidas (PROSOSTENIBLE, 2022).

Mientras tanto, el escenario de desarrollo sostenible de la AIE prevé que los biocombustibles alcancen alrededor del 10% de la demanda de combustible de aviación y un consumo de SAF de 37 mil millones de litros (aproximadamente 30 millones de toneladas) para 2030 en todo el mundo. Al comparar las estimaciones de producción y demanda en la UE, se percibe que la demanda a corto plazo basada en las medidas políticas actuales podría cubrirse con la capacidad potencial existente para producir SAF, pero requeriría incentivos para cambiar de producción de combustible a producción de SAF en refinerías capaces de producir SAF y se necesitaría capacidad de producción adicional si aumentara la demanda impulsada por las políticas. Estas estimaciones fueron compiladas antes de la pandemia de coronavirus, que ha provocado una caída en la actividad de las aerolíneas; sin embargo, la industria de la aviación ha reiterado su compromiso de eliminar las emisiones de carbono en el futuro, al tiempo que pide inversiones en descarbonización, como combustibles sostenibles (EASA, 2021).

4.3.5. Barreras en la producción y uso de SAF

La baja producción y uso de SAF se ha atribuido a una serie de obstáculos. Una barrera importante para la demanda de combustibles de aviación sostenibles es el costo, cuyo precio oscila entre aproximadamente dos y ocho veces el del combustible de aviación convencional, según un análisis del Consejo Internacional de Transporte Limpio.

Los procesos de producción pueden ser complejos, dependiendo de la ruta, y el costo de la materia prima puede ser alto, mientras que las medidas políticas existentes, como el RCDE UE,



no parecen ser incentivos suficientes para impulsar la demanda. Se considera que las vías HEFA tienen menores costes de inversión (los costes de capital estimados oscilan entre 0,40 € y 1,50 € por litro de capacidad anual) que otras vías con procesos de producción relativamente simples. Sin embargo, se han asociado con preocupaciones sobre la disponibilidad y el costo de la materia prima, incluidas las restricciones actuales y futuras sobre el uso de materia prima a base de alimentos. Además, los residuos utilizados en el proceso HEFA (como aceite de cocina usado y sebo) también se utilizan para la producción de biodiésel en el sector vial, que tiene un proceso de producción más simple y menos costoso y, por lo tanto, puede ser una opción más atractiva para los productores (Raffin, 2022).

Se espera que aumente la competencia por la materia prima entre el sector de la carretera y la aviación a medida que se adopten medidas políticas más ambiciosas para descarbonizar el sector del transporte. También se ha señalado que el proceso de autorización de SAF puede presentar obstáculos importantes. Mientras tanto, las partes interesadas de la industria, como los operadores de aeronaves y los propietarios de equipos terrestres, requieren una demostración a escala industrial del rendimiento del producto como prueba de madurez técnica. Por otro lado, la transición a combustibles de aviación sostenibles, debido al Covid-19, ha sufrido un golpe muy duro. Muchos de los esfuerzos para la transición de SAF han caído en saco roto. Muchas aerolíneas líderes ya están aplazando los pedidos por lotes comprometidos en 2020/21 y la brecha de precios entre el costo del combustible SAF vs Jet A1 por USG (galón) es mucho más difícil de justificar a las partes interesadas a corto plazo, cuando se ahorra en empleos y la supervivencia de la propia aerolínea está en juego (Bobillo, 2022).

De acuerdo con una de las aportaciones que realiza el teniente Ruedas (en las entrevistas realizadas conforme se ha mencionado en el apartado de Metodología), en la actualidad remarca que hay dos vías de producción que dan el nivel suficiente para su comercialización, como son las vías de mezcla de aceites vegetales a combustible, o HEFA; o la vía de producción de combustibles mediante síntesis de biomasa (residuos forestales y agrícolas), conocidas como Fischer-Tropsch (FT). En este aspecto remarca que aún queda mucho margen de mejora para el futuro pero que la implementación en el sector aeronáutico es posible si se tiene en cuenta una hipotética inversión en su desarrollo y por lo tanto un aumento de la oferta de este tipo de combustibles, lo cual implicaría una bajada de sus precios y un aumento de interés por parte de las grandes aerolíneas o incluso de los ejércitos.

4.4. AERONAVES ELÉCTRICAS

4.4.1. Generalidades

En el apartado anterior se plantea una de las posibilidades que permitirían no solo reducir las emisiones de GEI sino también mantener una infraestructura aeronáutica muy similar a la existente en la actualidad. Sin embargo, esta no es la única solución. En el presente capítulo se detallan en profundidad las características y posibilidades que plantea la electrificación de la aviación.

4.4.2. Concepto More Electric Aircraft (MEA)

El sector aeronáutico se ha visto inmerso en un proceso acelerado de desarrollo y evolución sin precedentes, las aeronaves actuales son extremadamente fiables y capaces de realizar sin problema aquel trabajo para el que fueron diseñadas tanto en el ámbito civil como en el militar, donde la consecución de una alta operatividad en prácticamente todas las aeronaves, tanto aviones como helicópteros, permite a los ejércitos llevar a cabo sus misiones sin contratiempos debido a los fallos estructurales, mecánicos o de diseño que pueda sufrir la aeronave.



More Electric Aircraft busca la simplificación de los sistemas que incorporan las aeronaves actuales y su progresiva sustitución por subsistemas gestionados y alimentados por motores eléctricos, para de este modo reducir el consumo de combustible (la independencia de subsistemas requiere de menos potencia generada por el motor principal), el peso y las emisiones de gases de efecto invernadero, así como alargar los ciclos de mantenimiento y abaratar los costes de las revisiones.

Por otro lado, la implementación de este concepto en la aeronáutica precisa de una alta fiabilidad de los sistemas, una elevada energía por unidad de masa, así como una potencia específica de los sistemas que satisfaga las necesidades. Precisamente son los subsistemas eléctricos los que cumplen de la mejor manera con esta serie de requerimientos, mejorando de forma notable las especificaciones técnicas que presentaban sus homólogos mecánicos convencionales, además de reducir el coste monetario de dichos sistemas.

No obstante, la electrificación de los sistemas genera problemas en distintos campos: la instalación e integración de dispositivos, así como la gestión eléctrica y de electrónica. Por otro lado, las altas demandas de potencia y la mayor dificultad para certificar un sistema eléctrico respecto a la certificación de un sistema convencional reducen el interés que puedan llegar a suscitar este tipo de sistemas de nueva generación en el sector aeronáutico. MEA establece, a sabiendas de las dificultades técnicas y económicas que acarrea la transición a sistemas eléctricos, que la electrificación total de la aeronave a largo plazo pasa por la electrificación parcial y progresiva de los sistemas secundarios a corto y medio plazo. Concretamente, este concepto busca la eliminación de la necesidad de producir un sangrado del motor de turbina, así como restringir el uso de la caja de accesorios del motor (a la cual se incorporan tomas de fuerza para la mayoría de los sistemas convencionales que incorpora una aeronave como lo puede ser su sistema hidráulico o de combustible).

Como se ha mencionado previamente, la transición natural y paulatina de los sistemas convencionales de una aeronave a eléctricos lleva a introducir el concepto de All Electric Aircraft -AEA- (Schafer, 2019), según el cual todos los sistemas de la aeronave (incluida la planta de potencia) serán eléctricos. A día de hoy, este concepto entra en conflicto con la realidad, puesto que la tecnología disponible no permite aun la incorporación de motores eléctricos en aeronaves de gran tamaño debido al aumento de peso que se produciría con la instalación de las baterías. De este modo, al menos en la actualidad, el concepto AEA queda todavía lejano, si bien el MEA presagia un futuro para el sector de la aviación que ya está llegando, con la instalación de los primeros sistemas eléctricos en sustitución de los convencionales (ver Figura 6).

Una arquitectura convencional de aeronave supone el uso del combustible íntegramente para producir una combustión en el motor al ser mezclado este con aire a una alta presión. La combustión de la turbina se puede aprovechar para dos fines principalmente: por un lado, se aprovecha la salida de los gases a altas velocidades para producir bien un empuje o bien un giro de un eje acoplado a una caja reductora que mueve un sistema rotor, como es el caso de un helicóptero, mientras que los sistemas secundarios de la aeronave también aprovechan esta energía cinética para alimentar sus bombas de hidráulico, combustible, etc. a través de una caja de accesorios acoplada a la salida de la cámara de combustión. En una arquitectura convencional, la potencia no aprovechada para producir el empuje se destina a alimentar una serie de sistemas que, aunque se traten como secundarios, no dejan de ser esenciales para el correcto funcionamiento de la aeronave (Luongo, 2009). Estos son:

- Potencia neumática: obtenida a través del sangrado de aire extraído de alguna de las etapas de compresión de la turbina (varía dependiendo del modelo). Se trata de una potencia utilizada casi de forma exclusiva por aeronaves de ala fija para producir movimiento en los actuadores aerodinámicos de las alas, aunque también gestiona el



correcto funcionamiento del sistema de presurización de la aeronave, así como abastece de aire caliente los sistemas antihielo de cristales y alas.

- **Potencia mecánica:** esta potencia es extraída a través de un eje que gira con unas determinadas revoluciones, denominado N1, y cuya velocidad de giro varía dependiendo del sistema. Esta potencia alimenta las bombas de hidráulico, esenciales para gobernar la aeronave. También produce energía mecánica para el generador de corriente.
- **Potencia hidráulica:** se trata de sistemas esenciales en toda aeronave y especialmente en aquellas de gran tamaño, asisten al piloto al mando a gobernar a través de actuadores movidos por presión hidráulica generada en las bombas. También es la encargada de gestionar la apertura de puertas, así como el despliegue del tren de aterrizaje.
- **Potencia eléctrica:** obtenida a través de los generadores, proporciona soporte eléctrico, electrónico y de iluminación a la aeronave.

El futuro de la aviación es incierto aun, y requerirá de grandes esfuerzos tanto de investigación como económicos. El futuro del sector y su compromiso con el medio ambiente exigirá una completa reestructuración de los sistemas que incorporan las aeronaves, transformando estos de una forma progresiva hasta alcanzar el concepto de aeronave íntegramente eléctrica. Por el momento, las altas demandas de potencia que generan tanto los aviones como los helicópteros obligan a continuar empleando motores de combustión convencionales. El tiempo que tome esta lenta evolución dependerá en gran medida de los intereses políticos y de las inversiones de capital de las grandes empresas en investigación.

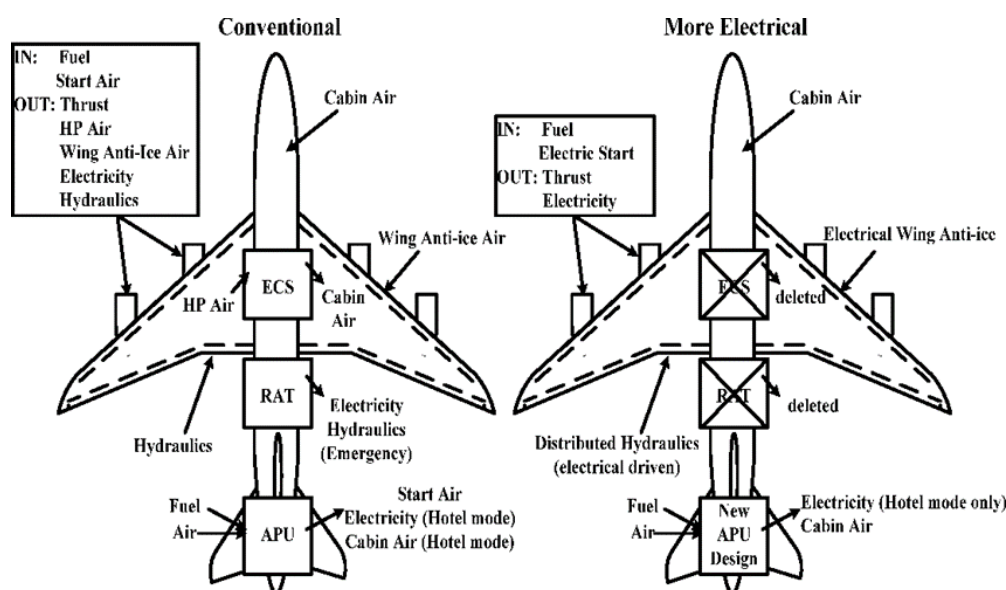


Figura 6. Diferencias entre una aeronave convencional y una aeronave MEA. Fuente: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Review-of-More-Electric-Aircraft-Abdelhafez-Forsyth/e61045a91d88bb2e8a03a418737c883e67eaaea8>. Consultado el 24 de octubre de 2022.

4.4.3. Baterías y motores eléctricos

Una de las más prometedoras formas de propulsión que se encuentran actualmente en desarrollo es la eléctrica. Si bien se trata de la forma más limpia de generación de energía (las emisiones a la atmósfera de cualquier tipo de gas contaminante son nulas), también presenta una serie de desventajas que, si se tiene en cuenta la tecnología disponible actualmente, limitan considerablemente su implementación en el sector aeronáutico.



4.4.3.1. Estado de desarrollo de baterías convencionales

La introducción en el mercado de baterías de ion de litio supuso una revolución en términos de la autonomía que un dispositivo eléctrico podría prestar sin la necesidad de encontrarse conectado a la red de forma permanente. Esta revolución se vio reflejada, además de en un avance masivo en las tecnologías de la comunicación, en la electrificación del sector del transporte, siendo los vehículos de carretera los primeros en salir al mercado ofreciendo mecánicas híbridas y sistemas de propulsión íntegramente eléctricos.

No obstante, y pese a los grandes avances que se han producido en los últimos años en términos de electrificación de medios de transporte, aún es pronto para hablar de las primeras aeronaves eléctricas plenamente funcionales.

De una forma más ilustrativa, volviendo al concepto de capacidad energética por unidad de masa para una batería de ion-litio, y comparando esta con la capacidad energética del queroseno por unidad de masa, se puede observar que mientras una batería convencional puede almacenar unos 250Wh/Kg (vatios hora por kilogramo), un kilogramo de queroseno puede proporcionar unos 11900Wh. Dicho de otra forma, por cada kg de queroseno serían necesarios casi 50 kg de baterías de ion litio para almacenar la misma energía, planteando de esta manera un problema de peso que por el momento tiene una difícil solución.

Actualmente se están llevando a cabo una serie de proyectos de desarrollo de baterías cuyos componentes químicos varían con respecto a los tradicionales de las baterías de ion de litio. Tanto las baterías de litio-oxígeno (LiO_2) como las de litio-sulfuro (LiS) se encuentran en un estado de desarrollo avanzado, siendo este último compuesto químico el que más energía por unidad de masa puede almacenar. Bien es cierto que los inconvenientes también son notables (la cantidad de azufre que contienen causa frecuentemente sobrecalentamiento de las baterías debido a la baja conductividad de este y provoca que las baterías se hinchen). Aunque existen una serie de inhibidores como los electrolitos que ayudan a mejorar su capacidad para conducir la energía eléctrica, esto supondría un considerable aumento de peso, volviendo de nuevo al problema original. De esta forma, queda patente la baja fiabilidad de las nuevas baterías, al menos por el momento, limitando notablemente su posible incorporación en el mercado aeronáutico (Castro, 2019).

Por otro lado, se espera que el propio desarrollo de las baterías de ion litio evolucione hacia una reducción de peso considerable en los próximos años, optimizando de esta manera el almacenaje de energía y facilitando la implementación de este tipo de propulsión en aeronaves de todo tipo.

Recuperando la problemática del peso en aeronaves, se deben tener en cuenta varios factores a la hora de incorporar baterías de gran tamaño. En primer lugar, la colocación de una batería de grandes dimensiones acarrea una serie de problemas, pues como se ha comentado previamente, la energía específica de una batería convencional es tan limitada que incurre en un inevitable aumento de peso (si el objetivo es mantener niveles de rendimiento convencionales), y muy posiblemente de diseño. Como es bien sabido, en una aeronave de tipo ala fija, la mayor parte de combustible se almacena en las alas, así como en los helicópteros es almacenado en la panza media del helicóptero (salvando excepciones), algo que sería inviable manteniendo los estándares de diseño actual de cualquier aeronave. Finalmente, se deben tener en cuenta las altas temperaturas que alcanzan las baterías, haciendo necesarios sistemas de ventilación más grandes, presurizados y próximos a las fuentes de alimentación, creando la necesidad de rediseñar todo el compartimento en el que se alojen estos sistemas de alimentación.

De una forma general, el combustible convencional de aeronaves, así como los sistemas de almacenamiento y distribución de este no requieren de una tarea de mantenimiento exigente,



pues la mecánica de estos es simple y muy fiable. En cambio, existen una serie de factores limitantes a tener en cuenta a la hora de implementar baterías, siendo las principales el ciclo de vida de una batería, el coste de proporcionar la energía eléctrica necesaria para cargar las baterías, la velocidad a la que estas pueden llegar a cargarse o su mantenimiento. Evidentemente, todas estas tareas requieren de un elevado presupuesto, que muchas empresas aún no están dispuestas a asumir.

El motivo principal por el cual la aviación ha alcanzado un nivel de desarrollo tan elevado en tan poco tiempo radica en la capacidad que este sector tiene para transportar personal y mercancías muy lejos en poco tiempo. En relación con esta premisa, otro de los problemas que plantean los motores eléctricos es el tiempo total que se perdería mientras una batería se recarga, traduciendo dicha pérdida de tiempo en una pérdida económica. Con el fin de mitigar este problema logístico se han llegado a plantear alternativas como el intercambio de las baterías descargadas de la aeronave por otras que sí se encuentren al máximo de su capacidad de forma automática como si se tratase de un repostaje de combustible convencional.³

Es, por lo tanto, esencial remarcar que la potencia máxima disponible disminuye conforme lo hace el nivel de carga de la batería, si bien, al contrario de como ocurre en una aeronave convencional, el peso no disminuye de forma proporcional, sino que este se mantiene constante, convirtiéndose en factores decisivos a tener en cuenta por las tripulaciones de vuelo a la hora de llevar a cabo sus cálculos de prestaciones y limitaciones. Económicamente hablando, los costes de operación de una aeronave convencional se diferencian notablemente con respecto a los costes de aeronaves eléctricas. A modo de comparación, un repostaje de queroseno vendría a ser equivalente a una recarga de baterías, incurriendo por lo tanto en un gasto de conexión a la red eléctrica que variará dependiendo de la región del mundo donde se encuentre la aeronave, creando una mayor fluctuación de precios de la que existe en torno a los combustibles fósiles tradicionales, más aún en la actualidad si tenemos en cuenta los problemas de abastecimiento de energía eléctrica en ciertas partes del globo (Asia, por ejemplo) y la constante fluctuación al alza de los precios del WH (vatio/hora).

Además de estos problemas fruto de la situación de incertidumbre energética en la que el mundo se encuentra inmerso hoy en día, el sector aeronáutico, y en concreto las empresas que decidan apostar por este tipo de propulsión en el futuro, deberán afrontar una serie de gastos que se pueden achacar a mantenimiento rutinario como son el cambio gradual de los sistemas de baterías dependiendo de su esperanza de vida. Objetivamente, se refleja la gran complejidad logística y el bajo nivel de desarrollo que presenta esta alternativa a los combustibles fósiles, si bien el futuro pasa por sistemas de propulsión limpios, actualmente este tipo de sistemas no son tratados como una prioridad por las grandes empresas aeronáuticas, que muy posiblemente decidan apostar por el uso de SAF con el fin de reducir emisiones y mantener una cadena logística de abastecimiento de combustibles y mantenimiento que se encuentra ya muy desarrollada en torno al motor de turbina convencional.

En el mundo civil son numerosas las aeronaves que, con el fin de iniciar rutas alternativas

³ La rapidez con la que varía la recarga de una batería se mide con el C-Rate, que indica el ratio con el que se puede cargar o descargar una batería con respecto a su capacidad máxima. Las baterías colocadas actualmente en vehículos eléctricos tienen un ratio 5C, lo que significa que, si almacenan, por ejemplo, 100 Ah, pueden proporcionar 500 A durante 12 minutos. Se espera que las futuras baterías de aeronaves alcancen ratio 10C (Buchmann, 2021).



en torno a los motores eléctricos, han introducido en sus aeronaves (aviones mayormente) sistemas eléctricos auxiliares con el fin de rebajar consumos de combustible y tratar de cubrir los pequeños sistemas adicionales con potencia eléctrica. Empresas como Boeing o Airbus, gigantes del sector aeronáutico, introdujeron a partir de 2014 grandes innovaciones si bien es cierto que se dieron una serie de contratiempos como incendios en vuelo de las baterías, obligando a dejar en tierra la flota de dichos aviones y perdiendo millones de dólares. Actualmente los certificados de aeronavegabilidad son más exigentes con aeronaves que incorporan sistemas secundarios eléctricos, encareciendo de nuevo su implementación y reduciendo el interés que suscita a corto plazo la aviación eléctrica.

4.4.3.2. Motores eléctricos

La realidad es que un motor eléctrico por definición es más simple que la mayoría de los motores de combustión interna, pues estos transforman la energía química que proporciona una batería en energía magnética que posteriormente se transformará en energía mecánica. En virtud de la ley de Lorentz, se determinó que, si por un conductor circula una corriente eléctrica y esta se encuentra dentro de la acción de un campo magnético, las líneas de fuerza tienden a desplazarse perpendicularmente a las líneas de flujo de dicho campo magnético produciendo así la rotación de un eje que posteriormente será el generador de potencia de la planta motriz.⁴

Los motores eléctricos pueden catalogarse, con sus defectos y virtudes, en motores de corriente continua y motores de corriente alterna. El primer tipo ofrece un control elevado sobre la velocidad rotacional del eje, así como una entrega de par motor a bajas vueltas mientras que el segundo tipo de motor se caracteriza por su simpleza y, por lo tanto, mayor fiabilidad, menores costes de mantenimiento y, por lo tanto, una vida útil más larga.

Si bien es cierto que una aeronave eléctrica supera en peso a una aeronave convencional de motor de turbina, también es una realidad que un motor eléctrico es capaz de aprovechar de una forma más eficiente la potencia, generando unos rendimientos que rozan el 80% mientras que un motor de combustión interna apenas roza el 40%, compensando de esta forma el extra de peso debido a las baterías.

Actualmente solo existen aeronaves eléctricas ligeras, tanto de ala fija como ala rotatoria, siendo este último tipo el que se está viendo más desarrollado debido a la alta acogida que tienen los drones de pequeño tamaño a nivel mundial. En el caso concreto de aeronaves de ala fija, Rolls-Royce, empresa con décadas de experiencia en el sector aeronáutico como productor de motores para aeronaves de todo tipo, presentó hace apenas un año su primer motor funcional instalado en una aeronave ligera que completó exitosamente su primer vuelo de prueba (Rolls-Royce, 2022).

En lo referente al tamaño de motores eléctricos, actualmente solo existen motores para aeronaves de pequeña escala, lo cual no significa que no sea posible diseñar un motor a gran escala para aeronaves pesadas, sin embargo, no es objeto de investigación o desarrollo por el momento, puesto que la verdadera limitación para estos motores no viene de su planta de potencia propiamente dicha, sino más bien de su fuente de energía, es decir, de sus baterías.

La realidad es que los grandes motores eléctricos existen en el sector del transporte, si bien es cierto que la mayoría de ellos se encuentran instalados en trenes o barcos cuyas limitaciones

⁴ Puede ampliar la información sobre electromagnetismo consultando <http://rsefalicante.umh.es/TemasElectromagnetismo/Electromagnetismo12.htm>



de peso no son una restricción a la hora de tratar de conseguir una mayor potencia (Roland Berger, 2017).

Entre las aeronaves cuyos primeros vuelos han sido un éxito merece destacar el "Spirit of Innovation", de Rolls Royce, ya mencionado previamente, cuyas prestaciones lo han convertido en el avión eléctrico más rápido del momento, llegando a sobrepasar sin dificultad los 600 km/h gracias a su planta de 400 kW (kilovatios, es decir, más de 500 caballos de vapor), y las baterías con la mayor densidad de energía ensambladas en un avión hasta la fecha. Hitos como el que marcó dicha aeronave abren las puertas a un futuro en el que grandes empresas ya trabajan con el objetivo de desarrollar aeronaves eléctricas capaces de llevar a cabo las mismas misiones que desarrollan las aeronaves convencionales. Por su parte la empresa alemana Siemens trabaja desde 2015 en el desarrollo de motores eléctricos con una alta densidad de potencia, llegando a presentar el motor SP260 y sus sucesivas evoluciones, el cual genera una de las mayores relaciones de potencia peso del mercado superando la potencia de 260 kW para sus insignificantes 50 kg (Lombardo, 2017).

Una de las principales ventajas que proporciona un motor eléctrico para la aviación se basa en la indiferencia de estos ante los cambios de altura en vuelo, ofreciendo un rendimiento idéntico para un determinado momento del vuelo a cualquier altura, a diferencia de lo que ocurre en una turbina, cuyo compresor debe admitir un flujo de aire mayor a medida que aumenta la altitud con el fin de contrarrestar la disminución de densidad de partículas de oxígeno en el aire. Además, por no quemar combustible, estos motores producen menos ruido que una turbina convencional, viéndose la mayor parte del producido debido a la rotación a velocidades transónicas (próximas a la velocidad del sonido) de las puntas de pala de los rotores. Indirectamente esta reducción de contaminación acústica se puede traducir en una ampliación de los horarios de vuelo de ciertos aeropuertos próximos a ciudades, donde la legislación impide volar a ciertos tipos de aeronaves dependiendo de la hora y dirección del viento. Evidentemente, al ahorrar tiempo y acelerar el tráfico nocturno, la microeconomía ligada al sector aeronáutico se vería beneficiada.

Continuando en la línea del principio de More Electric Aircraft (MEA), la electrificación total de una aeronave permitiría reducir peso al no ser necesaria una unidad de potencia auxiliar de combustión interna (APU), pues la generación de presión hidráulica o presión en las bombas de combustible, por ejemplo, sería asumida por los motores eléctricos alimentados directamente de las baterías principales. No obstante, la reducción de peso total en la aeronave no estaría garantizada si se tiene en cuenta la necesidad de implementar líneas redundantes de suministro de energía eléctrica a cada uno de los sistemas -toda aeronave, para alcanzar su certificado de aeronavegabilidad aprobado por la OACI, debe cumplir una serie de parámetros entre los cuales se encuentra la necesidad de duplicar ciertos sistemas para que, en caso de fallo de uno de ellos, el secundario pueda asumir la misión del sistema inoperativo (Durán, 2019).

4.4.3.3. Configuraciones híbridas y turboeléctricas

Con el propósito de desbloquear el estancamiento en el que se encuentran inmersos los sistemas de propulsión eléctricos, al menos hasta que el desarrollo de las baterías permita construir aeronaves de gran tamaño enteramente eléctricas y completamente funcionales, se han ingeniado nuevos sistemas de propulsión que combinan motores convencionales con sistemas eléctricos, consiguiendo de este modo evitar la necesidad de instalar baterías en las aeronaves. De este modo, además de optimizar los sistemas de la aeronave, también se reducen significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera (Scholten, 2020).



El primero de los modelos híbridos de propulsión se trata de la arquitectura turboeléctrica, sistema de propulsión muy similar al convencional de motor de combustión. Este sistema alimenta los motores eléctricos a través de un motor turboeje, cuya energía de rotación es transformada en un generador en energía eléctrica con el fin de alimentar aquellos motores eléctricos y los subsistemas adyacentes (ver figura). Existe una variación de la arquitectura turboeléctrica cuya diferencia radica en la sustitución del motor turboeje por un turbofán, cuyo fin es producir al mismo tiempo tanto empuje como energía eléctrica aprovechando las vueltas del eje de potencia. La reducción de emisiones es prácticamente nula pues los motores son convencionales y los consumos muy similares, incluso mayores si se tiene en cuenta la demanda de potencia de los generadores. No obstante, el objetivo principal de este tipo de hibridación radica en la aplicación e implementación progresiva de sistemas eléctricos como la propulsión distribuida y su contribución a reducir el coeficiente aerodinámico de la aeronave.

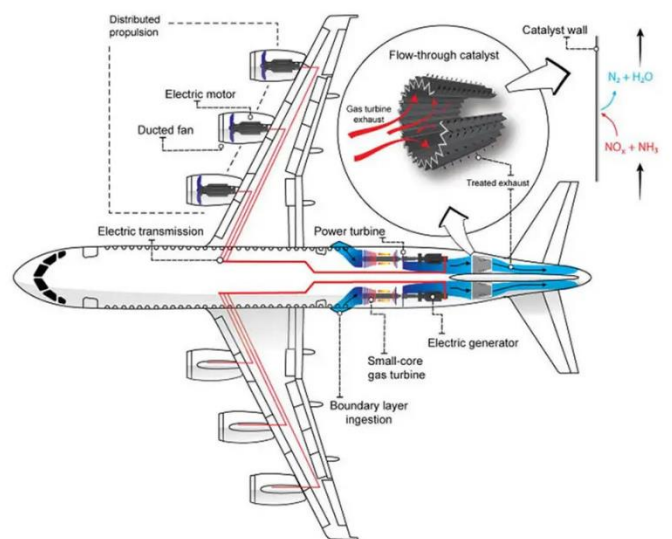


Figura 7. Arquitectura turboeléctrica. Fuente:

<https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/avion-hibrido-electrico-mit-sistema-propulsion-limpio-grandes-aviones/20210209113629042346.html>. Consultado el 25 de octubre de 2022.

La segunda arquitectura por describir se queda a medio camino entre el sistema turboeléctrico y el completamente eléctrico, absorbiendo de ambos conceptos ciertas características que permiten a la aeronave utilizar tanto baterías como hidrocarburos para el almacenaje de energía, y tanto motores turbofán como eléctricos para convertir esa energía en empuje o la producción de giro en un eje de potencia. Estos motores híbridos se componen tanto de sistemas de propulsión convencional en base a combustibles fósiles como de sistemas de propulsión eléctricos cuya fuente de energía son las baterías instaladas en la aeronave, de esta forma las aeronaves que incorporan esta ingeniería aprovechan tanto los sistemas de turbofán como los motores eléctricos para dotar de empuje a la aeronave (empuje referido tanto a la propulsión de una aeronave de ala fija como a la gestión de un sistema de engranajes transmisores de potencia para una aeronave de ala rotatoria). Esta tecnología se diferencia en tres tipos principales.

- Por un lado, se presenta la configuración en paralelo. Este sistema se basa en un motor turbofán convencional de aviación sobre cuyo eje de potencia se incorpora además un motor eléctrico que gira solidario a este. De esta forma se consigue que



cualquiera de los dos motores sea capaz de mover el compresor del fan en cualquier momento del vuelo.

- La segunda configuración, en serie, incorpora unos motores eléctricos que reciben energía eléctrica a través de unos generadores instalados en la salida de potencia de un motor turboeje, convirtiendo a los motores eléctricos en la única forma de propulsión eficaz de la aeronave.
- El último de los subsistemas de propulsión se trata de una mezcla de los previamente desarrollados denominado serie-paralelo. La gran ventaja que proporciona esta arquitectura es la capacidad de mezclar todos los sistemas de propulsión, así como de obtención de energía disponibles presentados en los dos subsistemas anteriores (Hoelzen, 2018).

La incorporación de los motores eléctricos a sistemas de propulsión híbridos ofrece una serie de capacidades a una aeronave con las que no contaría en caso de simplemente contar con un sistema de propulsión convencional. A corto plazo, los motores térmicos continuarán siendo los más utilizados a la hora de gestionar y producir la energía necesaria para gobernar una aeronave, si bien es cierto que los motores eléctricos pueden asistir, de forma puntual, a cubrir aquellas carencias que poseen los motores de combustión interna como ocurre en el momento en el que, por una serie de motivos, las vueltas del compresor caen y estas se ven necesitadas de un aporte de potencia extra que puede ser proporcionada por los motores eléctricos. Los puntos críticos del vuelo se corresponden con los momentos demandantes de una cantidad superior de potencia, y es precisamente en ese momento cuando los sistemas eléctricos gestionan el aporte extra de energía necesaria para evitar una pérdida de vueltas del motor.

4.5. PROPULSIÓN DE HIDRÓGENO

4.5.1. El hidrógeno y sus posibilidades

Tras haber sido expuesta en el capítulo anterior la propulsión eléctrica, una de las más prometedoras que plantea la aviación, es en el presente capítulo donde se trata uno de los sistemas más complejos en cuanto a tecnología y necesidad de desarrollo se refiere, si bien podría llegar a ocupar el primer puesto como principal vector energético y de propulsión para la aviación de todo tipo en los años venideros. Este sistema no es otro sino la propulsión de hidrógeno.

El uso del hidrógeno como vector energético en forma de pila de combustible para la generación de electricidad se trata como uno de los sistemas a desarrollar que más interés suscita entorno al mundo de la aviación, puesto que además de contar con una alta energía específica, también contribuye al desarrollo sostenible del sector aeronáutico, limitando la dependencia del uso de combustibles fósiles (Sergi Alcalde, 2022).

Como se explica en el apartado anterior dedicado a los motores eléctricos, el problema real que presentan los de hidrógeno no viene determinado tanto por los propios motores sino por las fuentes de energía que alimentan a estos, ya que debido a la baja densidad de energía por unidad de masa que presentan las baterías convencionales, el aumento de peso haría inviable la construcción de la mayoría de las aeronaves pesadas (Llorente, 2020).

La alternativa que se presenta propone la implementación de sistemas de generación de hidrógeno a través de diversos métodos que aún se encuentran bajo desarrollo, así como de pilas de combustible, todo ello como un único sistema integrado, capaz de proporcionar a la aeronave la energía eléctrica necesaria para alimentar todos los sistemas bajo el concepto All



Electric Aircraft (aeronave totalmente eléctrica, ya explicado previamente).

No obstante, pese a tener la energía específica más alta de todos los combustibles utilizados hasta el momento, el hidrógeno presenta la problemática de contar con una baja potencia específica por unidad de masa (es decir, la cantidad máxima de energía de la que se puede disponer en un momento determinado), lo cual implica la imposibilidad de cubrir altas demandas de potencia que ciertas partes del vuelo puedan requerir. Como solución a este problema se plantea el uso de sistemas híbridos formados por pilas de hidrógeno que puedan suplir momentos del vuelo que demanden baja potencia, y baterías eléctricas convencionales que sean capaces de proporcionar la potencia necesaria bajo circunstancias demandantes como puede ser una aproximación (Calatayud, 2011).

El hidrógeno plantea un futuro con tantas posibilidades como retos, muchos de los cuales limitan su implementación en el sector aeronáutico, como su problemática relacionada con el almacenamiento y su bajo punto de condensación. Por otro lado, su implementación en la aeronáutica revolucionará la industria, a modo ilustrativo, el hidrógeno proporciona aproximadamente tres veces la energía por unidad de masa del combustible convencional de aviación y más de 100 veces la de las baterías de iones de litio.

4.5.2. El hidrógeno como vector energético

Por vector energético se entienden aquellas sustancias que son capaces de almacenar y suministrar energía de forma controlada, pero no son consideradas como fuentes de energía primarias dado que no se encuentran en ese estado en la naturaleza, siendo necesaria una inversión de energía previa para su elaboración (Llorente, 2020). Pese a tratarse del elemento más abundante del universo, el hidrógeno siempre lleva asociado otros elementos, formando compuestos, y es necesaria la inversión de energía para disociarlo y aislarlo.

Actualmente la mayor fracción de hidrógeno proviene del tratamiento de combustibles fósiles, superando este método de generación de hidrógeno el 95% de la fracción del total producido. Principalmente la mayor parte de este proviene del gas natural, a través de un proceso de disociación con vapor de agua llamado “steam reforming”⁵. El hidrógeno forma parte de numerosos procesos industriales como el refinamiento del petróleo y, desde el punto de vista que ocupa este proyecto, el hidrógeno lleva años siendo utilizado como combustible en el sector aeroespacial, y este hito ha marcado una guía a seguir para su implementación en el sector de la aviación (Iglesias, 2020).

Por otro lado, existe la producción de hidrógeno a través del aprovechamiento de energías renovables, lo cual a su vez permite solventar uno de los mayores problemas que este tipo de energías acarrea: su almacenamiento, y es que la mayoría de las fuentes de energía renovables, con la salvedad de la biomasa, son difíciles de almacenar. Se presenta de este modo el proceso de obtención de hidrógeno denominado electrólisis, que, mediante una aportación de energía eléctrica a un determinado volumen de agua, produce hidrógeno con un alto grado de pureza y oxígeno, ambos en estado gaseoso. En la tabla 1 se presentan los métodos de obtención de hidrógeno a partir de energías renovables.

5 Para ampliar información sobre el reformado de hidrógeno a partir de gas natural: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming>



Tabla 1. Obtención de hidrógeno a partir de energías renovables. Fuente: Elaboración propia

Tecnología	Materia prima utilizada	Proceso	Energía utilizada
Solar alta temperatura	Agua	Termólisis	Fotónica
	Agua	Electrólisis	Eléctrica
	Fósiles	Químico	Fotónica
Eólica	Agua	Electrólisis	Eléctrica
Biomasa/biocombustibles	Biomasa	Químico	Materia prima

En cualquier caso, la producción de hidrógeno a corto y medio plazo se realizará a partir de combustibles fósiles puesto que se trata de la vía de obtención de hidrógeno más asequible. Se plantea entonces una contradicción entorno a la sostenibilidad del hidrógeno como vector de energía, dado que, pese a tratarse de una fuente energética que no produce ningún tipo de emisión contaminante, su producción, al menos por el momento, sí lo hace.

4.5.3. Pila de combustible de hidrógeno

Una pila de combustible de hidrógeno se trata de un dispositivo que además de generar corriente eléctrica, también genera agua y calor a partir de una reacción química que se produce fruto de una reacción química entre hidrógeno y oxígeno. Se debe tener en cuenta que una pila de combustible, a diferencia de una batería convencional, recibe un suministro continuo de reactivos mientras que una batería presenta una capacidad limitada dependiendo de su máxima capacidad de almacenamiento. Ambos sistemas funcionan según el mismo principio que rige la transformación de energía química en energía eléctrica de forma directa, a diferencia de, por ejemplo, el proceso de transformación de energía que debe llevar a cabo un generador de corriente convencional de aeronave. De esta forma se consigue optimizar el proceso, ahorrar energía y desperdiciar la mínima posible en forma de calor, alcanzando picos de eficiencia que llegan a rozar el 50% (Aguirre, 2009).

Una pila de combustible se compone de una sucesión de bloques o celdas de combustible apiladas produciendo cada una de ellas una diferencia de potencial relativamente baja. Como la tensión individual de cada celda es baja, el apilamiento de varios bloques consigue sumar un potencial adecuado que pueda suministrar la corriente requerida por el sistema demandante.

Cada conjunto de celdas es denominado "Stack", que vendría a traducirse como apilamiento, de ahí que se denomine pila de combustible. Cada stack cuenta con conductos que proporcionan de manera ininterrumpida la cantidad necesaria de hidrógeno y oxígeno para producir la energía, así como también cuenta con conductos de drenaje de agua y calor, con el fin de mantener el conjunto de pilas de combustible operando bajo una temperatura óptima para la producción de energía eléctrica. Además de todos los sistemas de alimentación y drenaje mencionados, la pila de combustible necesita también de una serie de sistemas de control que monitorizan de forma continua y regulan el correcto funcionamiento de estas. Todos estos subsistemas son inherentes a la pila de combustible.



Dentro de las pilas de combustible existen varios tipos. De todas ellas, la que presenta las mejores perspectivas de futuro en cuanto a desarrollo y potencial se denomina Pila de Membrana de Intercambio de Protones -PEM en adelante- (Barreras, 2012).

Una pila de combustible del tipo PEM⁶ se trata de un sistema electroquímico que produce energía eléctrica a partir de una reacción química que, como se expuso antes, utiliza el hidrógeno como combustible y el oxígeno como oxidante evitando la necesidad de partes móviles. Este dispositivo no pierde rendimiento debido a posibles rozamientos o pérdidas de calor, como sí ocurre en un generador convencional. Las partes principales que conforman una pila de tipo PEM son dos placas bipolares, dos capas difusoras de gases, un ánodo, un cátodo y una membrana (ver figura) (Asalva, 2012).

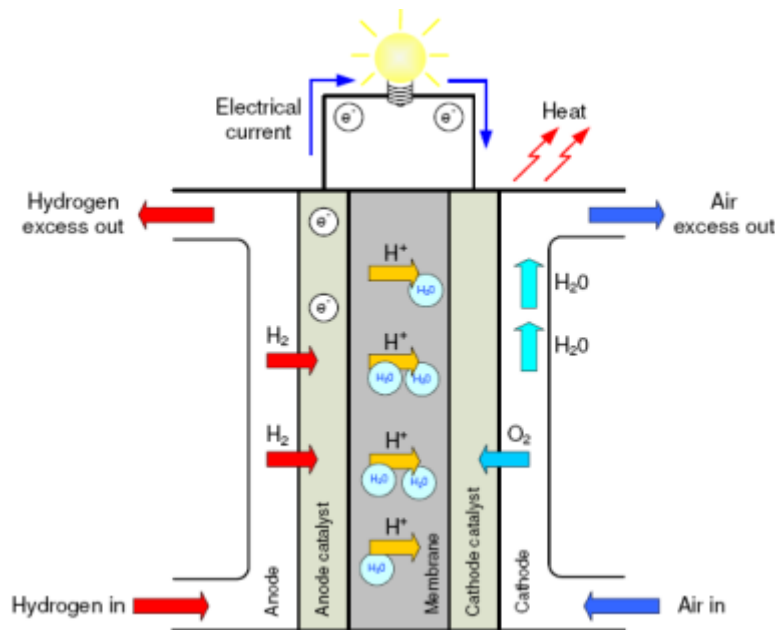


Figura 8. Funcionamiento de una pila tipo PEM. En el lado del ánodo, el hidrógeno que llega se disocia en protones y electrones. Los protones son conducidos a través de la membrana al cátodo, pero los electrones están forzados a viajar por un circuito externo (produciendo energía) ya que la membrana está aislada eléctricamente. Fuente: <https://www.iri.upc.edu/project/show/47>. Consultado el 25 de octubre de 2022.

4.5.4. Almacenamiento de hidrógeno en aviación

Como se ha comentado previamente, el hidrógeno marcará la hoja de ruta del cambio progresivo a la aviación sostenible del futuro, sin embargo, al igual que ocurre con muchas otras nuevas tecnologías que aspiran a implementarse en el sector de la aviación, se presentan una serie de problemas que buscan solución a través del desarrollo, siendo este efectivo únicamente si la inversión y credibilidad en este nuevo combustible es ampliamente aceptada en el sector

⁶ Como ampliación de información acerca del funcionamiento de una pila de combustible de tipo PEM, consultar en Centro Nacional de Hidrógeno: <https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/#:~:text=En%20el%20lado%20del%20C3%A1nodo,la%20membrana%20est%C3%A1%20aislada%20el%C3%A9ctricamente.>



aeronáutico.

El hidrógeno presenta una altísima energía por masa, es decir, una alta energía específica, sin embargo, presenta a su vez una baja densidad de energía por unidad de volumen con respecto a otros combustibles, debida en gran parte a su baja densidad como elemento. Dicho de otro modo, aunque presente una alta capacidad energética por unidad de masa, debido a su baja densidad, 1 kg de hidrógeno necesitaría ocupar un volumen de espacio mucho mayor del que necesitaría 1 kg de queroseno. Este problema se torna especialmente relevante si hablamos de su posible aplicación en el sector aeronáutico, donde el diseño y distribución de pesos juegan un papel muy importante (Gómez, 2016).

Con el fin de conseguir almacenar hidrógeno de la forma más eficiente posible en depósitos de aeronaves, se han planteado tres alternativas: (i) el almacenaje de hidrógeno comprimido; (ii) hidrógeno criogénico; y (iii) el hidrógeno mezclado con un compuesto sólido. La dificultad de su almacenaje como hidrógeno líquido radica en su bajísimo punto de ebullición de $-252,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. (Badía, 2005).

Almacenar el hidrógeno como un gas presurizado es la forma más común de presentar este gas como combustible, puesto que es la tecnología más desarrollada y extendida para su difusión. Debido a su baja densidad, presenta un alto grado de compresibilidad, permitiendo reducir en gran parte su volumen en condiciones normales (Carretero, 2017). Sea como fuere, se debe tener en cuenta que la compresión del hidrógeno requiere de un alto aporte de energía que aumenta conforme mayor es la presión alcanzada (ver figura).

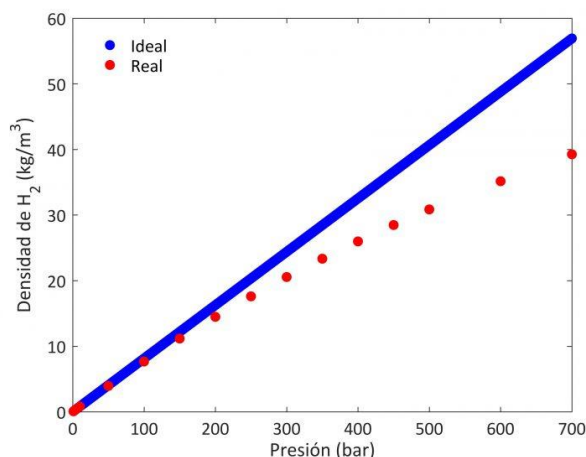


Figura 9. Densidad del hidrógeno dependiendo de la presión aplicada. Supuesto de un gas ideal (en azul) y un gas real (en rojo). Fuente: <https://apilados.com/blog/el-hidrogeno-como-gas-real-factor-de-compresibilidad/>. Consultado el 28 de octubre de 2022.

El hidrógeno líquido, también llamado hidrógeno criogénico a 23 grados Kelvin (K en adelante), se constituye como una de las formas más eficientes de almacenar el hidrógeno, con un volumen muy inferior al del hidrógeno en estado gaseoso, pero manteniendo una densidad energética mucho mayor que este. Se solucionan de esta forma la mayor parte de los problemas de almacenamiento, no siendo necesarios depósitos tan grandes y pesados.

No obstante, este tipo de almacenaje plantea la dificultad de alcanzar las temperaturas de -240°C a los que el hidrógeno ebulliciona. El proceso más extendido de licuefacción del hidrógeno se compone de 4 etapas y se denomina ciclo Linde o ciclo de expansión de Joule-Thompson. La primera etapa se basa en hacer pasar el gas a través de un compresor, aumentando su presión



a temperatura de ambiente. En la segunda etapa, el hidrógeno se enfría en un intercambiador de calor alcanzando la temperatura de $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ aproximadamente. Durante la tercera etapa el gas atraviesa una válvula a partir de la cual se expande con entalpía⁷ constante, generando pequeñas gotas de hidrógeno condensado. La cuarta etapa consiste en reconducir al compresor todo aquel gas que no se ha depositado en estado líquido (Cacheiro, 2019).

Por último, el almacenamiento de hidrógeno mezclado con compuestos sólidos se sitúa en el mercado como una alternativa a los grandes depósitos de combustible, tanto de hidrógeno presurizado en estado gaseoso como de hidrógeno en estado criogénico. La Universidad de Turín llevó a cabo entre los años 2011 y 2015 un proyecto de investigación y desarrollo de una alternativa a las vías convencionales de almacenaje de este combustible. Financiado por la UE, el proyecto SS2HS (Fuel cell coupled solid state hydrogen storage tank) estudió la posibilidad de mezclar borohidruros de metales mezclados e hidruro de magnesio de litio. La disposición del sistema incluía sendos tubos de dichos compuestos distribuidos de forma paralela y material de relleno entre ellos, los cuales absorbían el hidrógeno. Se permite así el almacenaje y transporte de hidrógeno a una presión muy inferior con respecto al transporte en su forma gaseosa. De esta forma se convierte en un método mucho más seguro de transportar este combustible, algo que se considera idóneo para la aviación, donde la seguridad es un dogma (Unión Europea, 2015).

4.5.5. Retos del hidrógeno en aviación

El principal reto que plantea la aviación con el hidrógeno es la forma en la que este se almacena en las propias aeronaves. Actualmente, los depósitos de hidrógeno criogénico tienen un tamaño relativamente grande debido a la baja densidad del combustible y la necesidad de transportar un gran volumen de este si el objetivo es completar un vuelo equivalente al que se haría con una aeronave convencional. A título ilustrativo, el hidrógeno proporciona más energía por unidad de masa, pero menos por unidad de volumen si se compara con el queroseno. A una presión atmosférica estándar, se necesitarían aproximadamente 3000 litros de hidrógeno gaseoso para sustituir la energía proporcionada por un litro de queroseno, mientras que si este estuviera en estado líquido criogenizado la equivalencia se reduciría drásticamente a 6 a 1. No obstante, el hecho de necesitar 6 litros de hidrógeno por cada litro de queroseno plantea un problema de almacenamiento importante (Aviación Digital, 2021). Suponiendo que el hecho de tener que usar tanques de combustible más grandes que puedan incurrir en el diseño de la aeronave, se crea la problemática técnica y tecnológica de poder mantener durante todo un vuelo dichos depósitos con las condiciones necesarias para el mantenimiento del hidrógeno en estado líquido, es decir, a unos 20 K. Los depósitos utilizados actualmente cuentan con un recubrimiento de doble capa y varios compuestos aislantes que minimizan las pérdidas térmicas a través de las paredes del tanque.

Aparentemente, todo esto no debería suponer un gran problema para el sector aeronáutico, pues la industria espacial ha utilizado el hidrógeno como combustible desde hace varias décadas. Sin embargo, la diferencia que radica entre ambos sectores es que, mientras que un cohete espacial solamente realiza la explotación de sus sistemas una vez durante toda su vida útil, las aeronaves comerciales deberán ser capaces de sostener la cadena logística de mantenimiento acarreada al uso continuado de sistemas de combustible en base al hidrógeno, algo que

⁷ La variación de entalpía expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, o, lo que es lo mismo, la cantidad de energía que tal sistema puede intercambiar con su entorno. (<https://www.quimica.es/enciclopedia/Entalp%C3%ADa.html>)



realmente no ha podido ser testado hasta la fecha. Según expertos en la materia, se espera que los primeros depósitos de hidrógeno para aviación sean conformados con metales, lo cual generará ciertos problemas relacionados con el incremento de peso de las aeronaves, aunque también se pronostica que los materiales empleados en el futuro sean compuestos y mucho más ligeros.

Evidentemente, el método clásico de almacenaje de combustible en los aviones (en las alas) así como en los helicópteros (normalmente en la panza de este), son concepciones que entran en contradicción con una posible implementación de sistemas alimentados por hidrógeno. Naturalmente la incorporación de grandes depósitos de hidrógeno a una aeronave condiciona su diseño, y, por ende, también a su aerodinámica, implicando una completa revisión del concepto presente a día de hoy sobre las aeronaves y un más que probable rediseño. Es por ello que, previsiblemente, las aeronaves que surcarán los cielos en los años venideros serán muy distintas a lo que han acostumbrado hasta ahora (Llorente, 2020).

4.6. EL FUTURO DE LAS AERONAVES DE ALA ROTATORIA EN LAS FUERZAS AEROMÓVILES DEL EJÉRCITO DE TIERRA.

Pese a haber sido desarrollado durante la Segunda Guerra Mundial por el ejército alemán como aeronave de observación del campo de batalla, el helicóptero no estuvo operativo en los ejércitos hasta la década de los 50. Desde entonces, ha redefinido la forma de planear y conducir acciones de combate y apoyo. Gracias a su gran versatilidad, es capaz de cumplimentar múltiples misiones, tan variadas como el transporte de tropas o evacuaciones médicas.

No fue hasta el año 1965 que llegaron los primeros helicópteros al Ejército de Tierra español, naciendo así las Fuerzas Aeromóviles del Ejército de Tierra (FAMET en adelante) con sede central en la actual base “Coronel Maté” en Colmenar Viejo, Madrid. Siendo plenamente conscientes de la revolución táctica que estaba suponiendo el uso del helicóptero en la guerra de Vietnam (1955-1975), el ET llevó a cabo la adquisición de más unidades de diferentes modelos, haciendo necesaria la ampliación de unidades. Desde entonces, la aviación del Ejército de Tierra ha ampliado y adaptado sus capacidades al cambiante escenario internacional. En la actualidad, las Fuerzas Aeromóviles cuentan con 11 unidades y más de 100 aeronaves de diferentes modelos (Ejército de Tierra, s.f.).

Actualmente, el ET se encuentra inmerso en una fase de cambio de capacidades. Se están llevando a cabo numerosos programas de actualización y compra de nuevos sistemas de armas, con el fin de mantener unas FAS eficaces dentro del nivel de ambición establecido. Este concepto se ha denominado como “Fuerza 35” (Ejército de Tierra, 2019). Se trata de un proceso de actualización de los medios y de reestructuración de unidades a medio plazo que marca como fecha límite el año 2035. Por supuesto, dentro de este concepto se enmarcan las FAMET, pilar fundamental del ET como medio de proyección y respuesta rápida. Fuerza 35 marca para la aviación de Ejército una hoja de ruta que, en resumidas cuentas, trata de simplificar las flotas de aeronaves y, por ende, su mantenimiento. La futura flota de helicópteros del Ejército de Tierra se constituirá por solo 4 modelos (Boeing-Vertol Chinook F, NH90, Eurocopter EC-135 y Eurocopter Tigre).

Todos y cada uno de los modelos previamente descritos poseen una característica principal en común: su propulsión es convencional, un motor turboeje que utiliza como combustible el queroseno. Estas previsiones sobre la futura flota que mantendrá en servicio el ET en el año 2035 y posteriores, hace ver que la reducción de emisiones y sostenibilidad en base a helicópteros híbridos y eléctricos no es una prioridad para el ejército. De hecho, tampoco se trata



la reducción de emisiones de GEI como una prioridad en ningún otro ejército del mundo. Se debe tener en cuenta que económicamente supondría una inversión multimillonaria apostar por sistemas de propulsión híbridos o eléctricos, con el riesgo que conlleva. Un ejército se presupone como una entidad capaz de operar en todo momento y en todo lugar, de este modo, apostar por una serie de nuevas tecnologías aun en un estado demasiado prematuro, sería un riesgo para la operatividad que evidentemente ningún ejército desea correr.

Los principales problemas que se oponen a este cambio vienen dados por la limitación de una infraestructura apta para la implementación de sistemas eléctricos o de energía en base al hidrógeno. Son necesarios numerosos cambios tecnológicos previo a la transformación de las aeronaves a estos avanzados sistemas de propulsión, a lo que además hay que sumar el importante esfuerzo económico y de instrucción para tripulaciones sobre mantenimiento de sistemas tan avanzados y complejos. De forma simplificada, las limitaciones vienen dadas por el débil aparato económico militar que poseen la mayoría de los ejércitos, con unos presupuestos de defensa realmente insuficientes como para poder abordar estos sustanciales cambios.

Por otro lado, uno de los ejércitos más poderosos del mundo, no solo en cuanto a potencial militar se refiere, sino en cuanto a desarrollo de nuevas tecnologías y capacidades, el ejército estadounidense, tiene sobre la mesa proyectos que suponen una transición a nuevos sistemas de propulsión como el eléctrico en base a drones tripulados y helicópteros de pequeña entidad, como el concepto de futura aeronave de despegue vertical con propulsión eléctrica (eVTOL). Conscientes de que pese a suponer una importante inversión económica, las ventajas que estas aeronaves pueden proporcionar al entorno táctico son numerosas, como un aumento de la autonomía, una mayor potencia disponible, una reducción sustancial del ruido con respecto al generado por una turbina convencional, o el hecho de no estar limitado por la reducción de oxígeno con la altura (Rippl, 2021).

Por su parte, la OTAN (OTAN, 2019) ha oficializado recientemente un proyecto sobre el desarrollo de una aeronave común para países aliados, cuya principal característica se trata de la transición a un sistema de propulsión híbrido, con una autonomía muy extendida con respecto a motores convencionales, así como unas prestaciones muy superiores (OTAN, 2022). Este proyecto se espera reemplace las actuales flotas de helicópteros de la Alianza Atlántica que verán el final de su vida útil en los próximos 20 años. España, pese a haber sido invitada a participar en el proyecto conjunto, aún no ha confirmado su participación, si bien países como Francia, Alemania, Países Bajos o el Reino Unido ya se han adherido al desarrollo de este helicóptero.

Uno de los principales temas tratados en este trabajo, el SAF, parece ser que sí tiene una mayor probabilidad de ser incorporado como combustible en la aviación militar a corto plazo. Las razones son simples, no precisa de una infraestructura específica diferente a la del queroseno. Aunque actualmente la producción de combustibles sostenibles en el entorno militar es mínima, se espera que en el futuro se convierta en una de las formas de reducción de emisiones más asequibles y eficaces, al menos hasta la llegada de sistemas de propulsión alternativos. A modo de curiosidad, durante el pasado día de la Hispanidad (12 de octubre), la patrulla Águila utilizó un biocombustible creado por Repsol.

A modo de conclusión, la transición hacia helicópteros híbridos y eléctricos militares es aún una aspiración a largo plazo para el entorno internacional, no obstante, esto no quiere decir que no se encuentren proyectos relacionados con la aviación sostenible. En un futuro próximo la aviación militar, y precisamente los helicópteros, no verán llegar nuevos sistemas de propulsión debido a la alta complejidad y aún bajo nivel de desarrollo que presentan estos sistemas. España, por su parte se mantendrá en la línea del resto de países del entorno europeo, cuyas aspiraciones en términos de eficiencia energética y reducción de emisiones en el ámbito militar



no está aún muy clara. Evidentemente, tarde o temprano los sistemas híbridos y eléctricos llegarán a los helicópteros militares dentro del concepto de MEA para finalmente pasar al concepto AEA, aunque este proceso se ve aún muy lejano. Probablemente esta tecnología será implementada de forma gradual en la aviación civil, y de ser factible, llegará al mundo militar, no sin antes haber demostrado de forma certera su viabilidad, fiabilidad y capacidades. Como en todos los campos del desarrollo de nuevas tecnologías, la incorporación de sistemas de propulsión híbridos y eléctricos llegará con una mayor rapidez al mercado militar dependiendo de la inversión económica de los países y de su interés por estas capacidades.

4.7. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE PROPULSIÓN A PRIORIZAR A TRAVÉS DE LA METODOLOGÍA AHP

A modo de priorizar la elección de uno de los combustibles o sistemas de propulsión alternativos descritos previamente en el trabajo como sistema más factible para la transición a una aviación sostenible se ha optado por la realización del Método de Jerarquización Analítica (AHP), debido a su metodología de decisión multicriterio rigurosa y su amplia extensión en el ámbito profesional. Este método permite la incorporación de varias alternativas y su evaluación en función de unos criterios elegidos (NANTES, 2019).

De tal modo, se han determinado 3 alternativas a analizar: combustible sostenible de aviación (SAF), propulsión eléctrica y propulsión de hidrógeno. El resultado de la aplicación del método determinará, a ojos de los expertos que han determinado los criterios y su rango de importancia, cuál de las alternativas previamente descritas debería llevarse una mayor inversión de capital de cara a avanzar en su desarrollo y su acelerar su implementación en el sector aeronáutico.

De acuerdo con los expertos consultados, los criterios más importantes a tener en cuenta a la hora de evaluar las alternativas son: potencia específica, energía específica, peso de la aeronave y coste de desarrollo.

La potencia específica se trata como la cantidad de trabajo por unidad de tiempo y por masa. Esta influye de forma positiva a la hora de calcular el valor del criterio, es decir, a mayor potencia, mayor es la probabilidad de que esta alternativa sea la elegida para optimizarse.

La energía específica se define como la cantidad de energía que puede almacenar un sistema por unidad de peso. De la misma manera, a mayor energía específica mayor será el valor de la alternativa.

El peso de la aeronave repercute de forma negativa en la elección de la alternativa. Este criterio debe tener una especial atención pues como ya se ha explicado previamente, el peso en aeronáutica es sinónimo de menor rendimiento, mayor consumo, y, por supuesto, mayor coste de operación y mantenimiento.

El coste de desarrollo de la tecnología a implementar tiene una relación inversa a su valor, es decir, a mayor coste de desarrollo, menor será la probabilidad de que esta alternativa sea la elegida.

La evaluación de las alternativas en función de sus características principales y el estudio sobre su capacidad de implementación en el sector aeronáutico en función de los criterios elegidos ha sido llevada a cabo por una serie de expertos que incluyen tanto a pilotos de helicóptero de la ACAVIET como a ingenieros aeronáuticos adscritos a la misma. Los valores de



las siguientes tablas reflejan los resultados aportados por el grupo de expertos y la importancia relativa de cada criterio con respecto al resto. En el anexo incluido al final de la memoria se describen de forma más detallada los criterios según los cuales se ha generado el método de jerarquización AHP, así como las preguntas realizadas al personal entrevistado, y sus opiniones sobre los resultados.

La siguiente ilustración refleja el problema de decisión al que nos encontramos a través de un diagrama de árbol con jerarquización de componentes y las interrelaciones entre ellos.

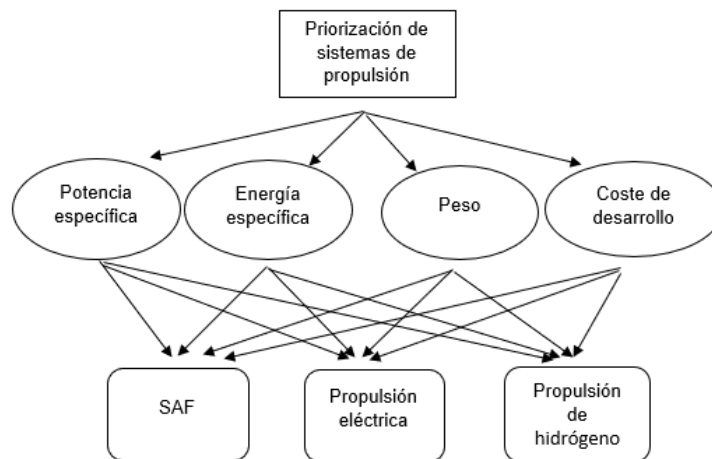


Figura 10. Diagrama de árbol sobre la priorización de sistemas de propulsión conforme a los principales criterios. Fuente: elaboración propia.

4.7.1. Evaluación de criterios

Para llevar a cabo la evaluación de los criterios y la evaluación de alternativas se contó con el mismo grupo de expertos de la fase previa. Con este método lo que se busca es que los expertos expongan su opinión acerca de la importancia relativa de cada uno de los criterios (potencia específica, energía específica, peso y coste de desarrollo) frente al resto. De este modo, cada uno de ellos podrá ser considerado como más importante, igual o menos importante que el criterio con el que se está comparando.

Con el fin de comparar los criterios dos a dos, se le solicitó al grupo de expertos que hiciese una comparación por pares, comparando criterio a criterio respecto a los demás, aplicando el valor correspondiente según la escala de Saaty, recogida en la siguiente tabla.

Tabla 2. Escala de Saaty

Valor	Definición
1	Igual importancia
3	Importancia moderada
5	Importancia grande
7	Importancia muy grande
9	Importancia extrema



Con esta serie de valores se obtuvo una matriz de criterios por pares, con la que se obtuvo el vector de los pesos relativos de los criterios (W). La siguiente tabla muestra dichos resultados y los pesos relativos asociados a cada uno de los criterios. Según dichos resultados se considera el peso de la aeronave como el criterio con mayor peso W en la priorización de los elementos, como no podía ser de otra manera. En segundo lugar, aparece la potencia específica con el mismo valor que la energía específica (0,17) seguido del coste de desarrollo como el criterio con menor trascendencia.

Tabla 3. Matriz de comparación por pares de los criterios

CRITERIOS	Potencia específica	Energía específica	Peso	Coste de desarrollo	PESOS (W)
Potencia específica	1	1	1/5	5	0,17
Energía específica	1	1	1/5	5	0,17
Peso	5	5	1	7	0,61
Coste de desarrollo	1/5	1/5	1/7	1	0,05

La razón de inconsistencia RI de la tabla se sitúa en 0,0785, siendo esta menor que 0,1. De este modo, se puede comprobar que no existen contradicciones en los juicios emitidos por los expertos.

4.7.2. Evaluación de las alternativas

Seguidamente, se solicitó al comité de expertos que evaluaran cada una de las alternativas frente al resto (comparación dos a dos) utilizando la escala de Saaty. Se obtuvieron 4 matrices de comparación de alternativas, es decir, una por criterio, y los correspondientes pesos (W) de cada una de las alternativas. A continuación, las siguientes tablas recogen los datos recabados en las matrices de comparación de alternativas para cada uno de los criterios.

Tabla 6. Matriz de comparación en función del criterio potencia específica

Potencia específica	SAF	Propulsión eléctrica	Propulsión hidrógeno	PESOS (W)
SAF	1	1/5	1/3	0,11
Propulsión eléctrica	5	1	3	0,63
Propulsión hidrógeno	3	1/3	1	0,26
RI				0,0334

Tabla 5. Matriz de comparación en función del criterio peso de la aeronave

Energía específica	SAF	Propulsión eléctrica	Propulsión hidrógeno	PESOS (W)
SAF	1	3	1/5	0,19
Propulsión eléctrica	1/3	1	1/7	0,08
Propulsión hidrógeno	5	7	1	0,72
RI				0,0567

Tabla 4. Matriz de comparación en función del criterio energía específica

Peso	SAF	Propulsión eléctrica	Propulsión hidrógeno	PESOS (W)
SAF	1	1/7	1/3	0,08
Propulsión eléctrica	7	1	5	0,72
Propulsión hidrógeno	3	1/5	1	0,19
RI				0,0567



Tabla 7. Matriz de comparación en función del criterio coste de desarrollo

Coste de desarrollo	SAF	Propulsión eléctrica	Propulsión hidrógeno	PESOS (W)	
SAF	1	1/5	1/7	0,07	
Propulsión eléctrica	5	1	1/3	0,28	
Propulsión hidrógeno	7	3	1	0,64	
				RI	0,0565

4.7.3. Jerarquización de alternativas

Para finalizar este proceso de decisión se procede a darle a cada una de las alternativas un orden de prioridad calculando una valoración de forma global para cada alternativa según el peso W de dicha alternativa para cada criterio y el peso W de cada uno de los criterios. A mayor valoración mayor es la prioridad para dicha alternativa. En la siguiente tabla se puede consultar el orden final de prioridades.

CRITERIOS/SUBCRITERIOS	PESOS	SAF	Propulsión eléctrica	Propulsión hidrógeno
Potencia específica	0,17	0,11	0,63	0,26
Energía específica	0,17	0,19	0,08	0,72
Peso	0,61	0,08	0,72	0,19
Coste de desarrollo	0,05	0,07	0,28	0,64
		0,11	0,58	0,32

De acuerdo con la tabla, la alternativa marcada como la más potenciabile y en la que se deben focalizar los esfuerzos de desarrollo se trata de la propulsión eléctrica. Como ya se venía comentando en los apartados anteriores, esta tecnología es probablemente la más prometedora en cuanto a cómputo global, cuya única característica que restringe su implementación se basa en el peso de las baterías convencionales.



5. CONCLUSIONES

Para finalizar la memoria del proyecto, se han extraído una serie de conclusiones generales que aportan, a modo de breve resumen, una idea general de lo expuesto a lo largo del trabajo complementada a su vez por una serie de reflexiones que tratan de aportar un argumento crítico sobre el futuro de la aviación.

En primer lugar, se ha tratado de generar una visión global sobre los problemas medioambientales que debe afrontar el sector del transporte, y en especial el sector aeronáutico en el que se centra este trabajo. La descarbonización trata de dar una solución viable a la problemática que genera la continua emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera. De no ralentizar la emisión de estos gases, la temperatura media del planeta se estima llegará a ascender más de 2 grados Celsius con respecto a la temperatura media actual para antes de final de siglo. De este modo, se ha planteado una serie de legislación en el marco de la OACI y otras organizaciones como la UE que tratan de regular a corto y medio plazo las emisiones que genera la aviación no solo entendida como aviones y helicópteros sino todo el sector que abarca su industria. Para tratar de frenar esta escalada de emisiones del sector, se han propuesto una serie de medidas, así como también se encuentran en desarrollo nuevas tecnologías que den finalmente el salto a nuevos sistemas de propulsión.

La realidad es que la tecnología disponible actualmente no tiene el grado de desarrollo y madurez necesario como para realizar una implementación a gran escala en aviación a corto plazo. Se debe tener en cuenta que este sector se basa en tecnología muy avanzada, pero a su vez muy fiable, con décadas de experiencia a sus espaldas que prueban la fiabilidad de los materiales y las técnicas empleadas. De este modo, es fácil entender el porqué de una transición tan lenta; la aeronáutica debe ser certera, segura.

Por otro lado, se debe tener en cuenta que no todo depende de los avances científicos y tecnológicos, también existen una serie de intereses económicos tanto a nivel político como a nivel empresarial entre las grandes corporaciones. La evolución que está por llegar a la aviación cambiará casi con total seguridad cualquier concepción actual sobre una aeronave convencional. Esto implica una renovación completa de la infraestructura, nuevos diseños de las aeronaves que se adapten a los nuevos sistemas de propulsión, así como un nuevo sistema de mantenimiento, posiblemente más centrado en la aviónica que en la parte mecánica. Por todo ello, la inversión que deberán llevar a cabo los estados y las grandes empresas requerirá de inversiones millonarias que, como es lógico, necesitan de un alto nivel de confianza en la plena operatividad de los nuevos sistemas para ser llevadas a cabo.

A corto plazo, el desarrollo del SAF parece ser una de las soluciones más factibles a modo de reducir las emisiones de GEI. Este tipo de combustible sostenible pese a ser similar en cuanto a características que el queroseno, es notablemente más caro que este, reduciendo, de forma lógica, la inversión de capital en él. La pandemia de coronavirus en el año 2020 ralentizó de forma abrupta numerosas inversiones que varias empresas aeronáuticas habían realizado en estos tipos de combustibles. Tras la crisis de COVID-19 y con los precios de los combustibles al alza, todos los acuerdos que parecía estaban firmados, cayeron en saco roto debido al encarecimiento del SAF con respecto al queroseno. No obstante, a corto plazo parece ser una de las pocas opciones que las aerolíneas tienen si su objetivo es cumplir con la legislación impuesta por la OACI, por lo que es probable que su uso se extienda cada vez más en los próximos años.

De cara al futuro las apuestas que aspiran a alcanzar el objetivo de cero emisiones de gases de efecto invernadero son aún más arriesgadas. Por un lado, se ha expuesto la posibilidad de



implementar propulsión en base a motores eléctricos en aviación. Esta tecnología de propulsión, pese a haberse implementado ya en muchos otros sectores del transporte como el ferroviario o el automovilístico, parece aun lejana en el sector aeronáutico debido al peso añadido de las baterías convencionales. El rápido desarrollo de las nuevas tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica puede suponer una revolución que implique la rápida incorporación de sistemas de propulsión eléctricos en el sector.

Dicho de esta forma, queda patente que el sistema de propulsión eléctrico parece ser uno de los más prometedores hasta la fecha. Sin embargo, se debe plantear también que, aunque las emisiones generadas por los motores eléctricos son nulas, no ocurre así con las baterías eléctricas, las cuales contaminan y generan numerosos residuos perjudiciales para la naturaleza. La forma de generar electricidad actualmente también cae en esta cuestión. En España, por ejemplo, la generación de electricidad durante el año pasado fue aun mayormente a partir de energías no renovables, como el carbón o el gas natural. Este tipo de producción plantea que indirectamente un motor eléctrico sí estaría produciendo gases de efecto invernadero⁸.

Por último, se ha tratado la cuestión del hidrógeno como vector de energía y sistema de propulsión. Este ambicioso proyecto que se encuentra en un estado avanzado plantea una serie de problemas para la aviación como puede ser el almacenamiento del combustible de hidrógeno teniendo en cuenta sus características especiales como el bajo punto de ebullición o su baja densidad, haciendo necesario el transporte de una alta cantidad de este combustible para generar la energía necesaria para un vuelo común, si bien es cierto que la alta potencia que es capaz de suministrar este combustible se equipara con la del queroseno. Numerosas empresas aeronáuticas como Airbus han apostado de forma tajante por este tipo de propulsión y espera poder presentar al mundo la primera aeronave de transporte de pasajeros de hidrógeno antes del año 2035.

Refiriéndose a la temática militar, es indispensable tener en cuenta las capacidades con las que cuentan nuestras Fuerzas Armadas a día de hoy. Previamente se ha descrito la flota de aeronaves con la que cuenta el Ejército de Tierra, toda ella basada en sistemas de propulsión convencional. Evidentemente, la capacidad económica de defensa no permite, por el momento, plantear una transición a nuevos sistemas de propulsión, más aún cuando algunos de los helicópteros de reciente incorporación, como el NH90 o el Chinook F aún no han alcanzado su nivel óptimo de operatividad. En el marco de la OTAN, como se ha comentado previamente, existen una serie de proyectos relacionados con un nuevo sistema de ala rotatoria para el conjunto de los países de la alianza, si bien España no ha dejado claras aún sus intenciones de participar en el programa.

En el marco del proyecto de la Fuerza 35, no se hace referencia en ninguno de los apartados a la temática de las emisiones en el entorno de las Fuerzas Aeromóviles, limitándose únicamente a describir la flota que se prevé en el marco del ejército del futuro. De forma oficial, aún no se han emitido por parte del gobierno las intenciones de limitar o reducir las emisiones que provocan las aeronaves en dotación en nuestras Fuerzas Armadas, en parte muy probablemente debido a la situación económica que propicia la incapacidad para realizar el salto generacional a nuevos sistemas de propulsión. Por el momento, es previsible que durante los próximos 25 años las aeronaves que forman parte de las Fuerzas Aeromóviles del Ejército de Tierra sigan operando con motores de turbina convencional, si bien esta afirmación es susceptible de cambio en caso

⁸ Para ampliar información sobre generación de electricidad en España:
<https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/electricidad-generacion>



de que las condiciones de desarrollo de nuevas tecnologías avancen y el coste de integración de nuevos sistemas se vea reducido.

De acuerdo con las personas a las que se ha podido preguntar a lo largo de la realización del trabajo, la aviación actual se encuentra inmersa en una evolución con el fin de adaptarse a las futuras legislaciones sobre emisiones de gases de efecto invernadero. Todo este proceso involucra por supuesto una gran inversión de capital que solo las grandes empresas del sector son capaces de llevar a cabo, es decir, la inversión en el desarrollo de futuros sistemas de propulsión alternativos. En parte, es por ello que mucha de la información sobre estos sistemas no se encuentra disponible por el momento y la bibliografía al respecto es aún escasa.

Añaden también que posiblemente las futuras aeronaves tanto de ala fija como de ala rotatoria pasen por sistemas de propulsión híbridos, a medio camino entre sistemas convencionales y sistemas de propulsión eléctricos, dado que es aún pronto para hablar de aviación en base al hidrógeno, debido a la dificultad que acarrea su almacenaje en las aeronaves principalmente. A corto y medio plazo es factible que las aeronaves comiencen a usar combustibles sostenibles de aviación (SAF) con el fin de limitar sus emisiones, cumplir con la legislación, y retrasar al máximo la importante inversión de capital que supone la renovación de las flotas de aeronaves.

De acuerdo con las personas entrevistadas, es poco factible que se pueda ver un salto tecnológico en cuanto a aeronaves militares se refiere a corto y medio plazo, pues en este entorno se busca la operatividad y la alta disponibilidad de una serie de sistemas que ya están lo suficientemente probados como para llegado el momento, ser usados conforme a una infraestructura altamente desarrollada y que difícilmente generaría problemas logísticos o de mantenimiento. No obstante, se mostraron más precavidos con respecto al SAF, el cual sí ven como una solución factible a medio plazo como sustituto de los combustibles convencionales, siempre y cuando los costes que acarreen estos combustibles de nueva generación se rebajen.

Las aeronaves militares, especialmente las de ala rotatoria del Ejército de Tierra, afrontan una serie de desafíos de cara al futuro.

Indiscutiblemente la tecnología aeronáutica está a punto de sufrir una revolución. Este cambio y su magnitud dependerán en gran medida del interés que suscite entre los grandes inversores la implementación de estos sistemas. La realidad es que el futuro de la aviación es ahora tan apasionante como lo fue hace 100 años, cuando comenzaba su andadura. Actualmente nadie puede prever cual será el sistema de propulsión implementado en las aeronaves, o si será una mezcla de todos los expuestos en este proyecto, sin embargo, el salto técnico en la aviación ya ha comenzado con la incorporación de nuevos sistemas híbridos en el marco de MEA, lo cual presagia la leve ventaja que tiene la propulsión eléctrica por encima del resto de sistemas.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguirre, A. M., 2009. *Descripción y modelado de una pila de combustible de membrana de intercambio protónico*. [En línea] Disponible en: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/6055/PFC_Antonio_Mayandia_V2.pdf [Último acceso: 10 2022].

Asalva, 2012. *INTRODUCCIÓN A LA TECNOLOGÍA DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE TIPO PEM*. [En línea] Disponible en: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/70387/fichero/Capitulo+2.+Introduccion+a+la+tecnologia+de+las+pilas+de+combustible+tipo+PEM.pdf> [Último acceso: 10 2022].

Aviación Digital, 2021. *Los depósitos de Hidrógeno líquido. Un reto*. [En línea] Disponible en: <https://aviaciondigital.com/airbus-espana-deposito-hidrogeno-liquido/> [Último acceso: 10 2022].

Badía, C. F.-B., 2005. *Almacenamiento del Hidrógeno*. [En línea] Disponible en: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/3823/fichero/3.2+Almacenamiento+del+Hidr%C3%B3geno.pdf> [Último acceso: 10 2022].

Barreras, A. L. F., 2012. *Hidrógeno. Pilas de combustible de tipo PEM.* [En línea] Disponible en: <http://www.energia2012.es/sites/default/files/Hidr%C3%B3geno.%20Pilas%20de%20combustible%20de%20tipo%20PEM.pdf> [Último acceso: 10 2022].

Bioenergy Technologies Office, 2020. *Sustainable Aviation Fuel*. [En línea] Disponible en: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/09/f78/beto-sust-aviation-fuel-sep-2020.pdf> [Último acceso: 09 2022].

Bobillo, A. G., 2022. *El mercado actual de combustibles sostenibles no es suficiente para alcanzar la descarbonización aérea en 2050*. [En línea] Disponible en: <https://www.businessinsider.es/no-hay-suficiente-saf-satisfacer-demanda-aerolineas-1014535> [Último acceso: 2022].

Buchmann, I., 2021. *Battery University*. [En línea] Disponible en: <https://batteryuniversity.com/article/bu-402-what-is-c-rate> [Último acceso: 10 2022].

Cacheiro, A., 2019. *Licuefacción del hidrógeno*. [En línea] Disponible en: https://oa.upm.es/57269/11/TFG_ALEJANDRO_CACHEIRO_HERNANDEZ.pdf [Último acceso: 10 2022].

Calatayud, J. d. T., 2011. [En línea] Disponible en: https://www.udc.es/export/sites/udc/gem/galeria_down/congresos/Copinaval_2011_103_USO_DE_HIDRxGENO_de_Troya_Calatayud_y_otros.pdf [Último acceso: 2022].



Carretero, O. R., 2017. *Apilados (El hidrógeno como gas real. Factor de compresibilidad)*. [En línea]

Disponible en: <https://apilados.com/blog/el-hidrogeno-como-gas-real-factor-de-compresibilidad/>
[Último acceso: 2022].

Castro, E. S., 2019. *Diseño preliminar de un sistema de propulsión eléctrico*. [En línea]

Disponible en: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/92687/fichero/TFG-2687+SANTIAGO+CASTRO.pdf>
[Último acceso: 10 2022].

Consejo Europeo, 2022. *Decisión sobre los requisitos de compensación de las emisiones de la aviación (CORSIA)*. [En línea]

Disponible en: <https://www.consilium.europa.eu/es/press/press-releases/2022/05/20/decision-corsia-carbon-offsetting-and-reduction-scheme-for-international-aviation-le-conseil-adopte-sa-position/>
[Último acceso: 2022].

Cutler, C., 2022. *How does a turbofan engine work?*. [En línea]

Disponible en: <https://www.boldmethod.com/learn-to-fly/aircraft-systems/how-does-a-jet-engine-turbofan-system-work-the-basic-steps/>
[Último acceso: 10 2022].

Digital, A., 2021. *Los depósitos de hidrógeno líquido un reto para el ZEDC de Airbus en España*.

Disponible en: <https://aviaciondigital.com/airbus-espana-deposito-hidrogeno-liquido/>

Dr Chris Malins, D. C. S., 2022. *Los biocombustibles para aviación el Estado Español*. [En línea]

Disponible en: <https://www.ecologistasenaccion.org/wp-content/uploads/2022/01/informe-biocombustibles-aviacion.pdf>
[Último acceso: 2022].

Durán, C. D., 2019. *Nuevas configuraciones de propulsión*. Disponible en:

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/126201/D%C3%ADaz%20-%20Nuevas%20configuraciones%20de%20propulsi%C3%B3n%20en%20la%20transici%C3%B3n%20hacia%20la%20aviaci%C3%B3n%20el%C3%A9ctrica.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
[Último acceso: 10 2022].

EASA, 2021. *ReFuelEU Aviation initiative*. [En línea] Disponible en:

[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/698900/EPRS_BRI\(2022\)698900_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/698900/EPRS_BRI(2022)698900_EN.pdf)
[Último acceso: 2022].

EASA, 2022. *European Aviation Environmental Report*. [En línea]

Disponible en: <https://www.easa.europa.eu/eco/eaer/topics/sustainable-aviation-fuels/figures-and-tables>
[Último acceso: 09 2022].

EASA, Actualizado 2022. *Sustainable Aviation Fuels*. [En línea]

Disponible en: <https://www.easa.europa.eu/eco/eaer/topics/sustainable-aviation-fuels>
[Último acceso: 09 2022].

Ejército de Tierra, 2019. *FUERZA 35*. [En línea]

Disponible en: https://ejercito.defensa.gob.es/de/Galerias/Descarga_pdf/EjercitoTierra/Publicaciones/fuerza_35.pdf
[Último acceso: 10 2022].



Ejército de Tierra, s.f. *Fuerzas Aeromóviles del Ejército de Tierra*. Disponible en: <https://ejercito.defensa.gob.es/unidades/Madrid/famet/> [Último acceso: 10 2022].

FAA, Actualizado 2022. En: *Helicopter Flying Handbook*. s.l.:s.n., pp. capítulo 4 (8-10).

Gómez, L. S., 2016. *Pilas de combustible y sistemas de almacenamiento o generación de hidrógeno para propulsión de UAVs eléctricas de gran autonomía*. [En línea] Disponible en: https://oa.upm.es/43480/1/TFG_LEONARDO_SORIANO_GOMEZ.pdf [Último acceso: 10 2022].

Hoelzen, J., 2018. *Conceptual Design of Operation Strategies for*. Disponible en <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/1/217/htm> [Último acceso: 2022].

IATA, 2010. *Carbon Neutral Growth by the year 2020*. Disponible en <https://www.iata.org/en/pressroom/2009-releases/2009-06-08-03/> [Último acceso: 2022].

Iglesias, M. F. R., 2020. *Análisis económico de una planta de producción de hidrógeno*. Disponible: <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/85297/TFG-2139-RAMOS.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Último acceso: 10 2022].

ITAérea, 2022. *Qué es el SAF, el combustible sostenible de aviación*. Disponible en: <https://www.itaerea.es/saf-combustible-sostenible-aviacion> [Último acceso: 09 2022].

KLM Royal Dutch Airlines, 2022. *KLM further expands approach for Sustainable Aviation Fuel*.: <https://news.klm.com/klm-further-expands-approach-for-sustainable-aviation-fuel/> [Último acceso: 2022].

Llorente, F. B., 2020. *Felipe Benjumea Llorente*. Disponible en: <https://felipebenjumealllorente.com/hidrogeno-aerolineas/> [Último acceso: 10 2022].

Llorente, F. B., 2020. *Felipe Benjumea Llorente*. Disponible en: <https://felipebenjumealllorente.com/glosario/vector-energetico/> [Último acceso: 2022].

Lombardo, T., 2017. *Inside Siemens' Record-Breaking Electric Aircraft Motor*. [En línea] Disponible en: <https://www.engineering.com/story/inside-siemens-record-breaking-electric-aircraft-motor> [Último acceso: 2022].

Luongo, C. A., 2009. *Next Generation More-Electric Aircraft*.: [En línea] Disponible en: https://snf.ieeecsc.org/sites/ieeecsc.org/files/LuongoC_2AP01.pdf [Último acceso: 10 2022].

McCausland, R., 2022. *Net zero 2050: sustainable*. [En línea] Disponible en: <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet---alternative-fuels/> [Último acceso: 09 2022].

NANTES, E. A., 2019. *EL MÉTODO ANALYTIC HIERARCHY PROCESS PARA LA TOMA DE DECISIONES*. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/epio/article/download/26474/28219/78112#:~:text=El%20>



m%C3%A9todo%20Analytic%20Hierarchy%20Process, mediante%20una%20escala%20de%20preferencia.

[Último acceso: 2022].

Neste, 2022. *Sustainable Air Travel*. Disponible en: https://www.neste.com/products/all-products/saf?gclid=Cj0KCQjwkt6aBhDKARIsAAyeLJ0rcvOGGCF842EIR67Ota4FknTNFn76dPY3RGFjX4F_5mvjDMCEuoaAgF_EALw_wcB#6f68cdeb

[Último acceso: 2022].

OACI, 2018. *Anexo 16, volumen IV. Protección del medio ambiente*. [En línea] Disponible en: <http://www.anac.gov.ar/anac/web/uploads/normativa/anexos-oaci/anexo-16-vol-i.pdf>

[Último acceso: 09 2022].

OACI, 2018. *CORSIA*. Disponible en: https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/CorsiaBrochure_8Panels-SPA-Web.pdf

[Último acceso: 2022].

OTAN, 2019. *Aircraft Electric Propulsion...The Future*. [En línea] Disponible en: <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/STO-MP-AVT-323/MP-AVT-323-01.pdf>

[Último acceso: 10 2022].

OTAN, 2022. *Next Generation Rotorcraft Capability*. [En línea] Disponible en: https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/2021/2/pdf/2102-factsheet-ngrc.pdf

[Último acceso: 10 2022].

Parlamento Europeo, 2022. *Acciones de la UE para reducir las emisiones de aviones y barcos*. [En línea] Disponible en:

<https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20220610STO32720/acciones-de-la-ue-para-reducir-las-emisiones-de-aviones-y-barcos>

[Último acceso: 09 2022].

PROSOSTENIBLE, 2022. *Combustible sostenible para la aviación del futuro*. [En línea]

Disponible en: <https://prosostenible.es/combustible-sostenible-para-la-aviacion-del-futuro/>

[Último acceso: 2022].

Raffin, C., 2022. *La inflación verde del avión: las aerolíneas se conjuran por digerir los nuevos combustibles*.

Disponible en: https://www.elconfidencial.com/empresas/2022-02-27/aviones-sostenibilidad-aerolineas_3381923/

[Último acceso: 2022].

Rippl, M. D., 2021. *SIZING ANALYSIS FOR AIRCRAFT UTILIZING HYBRID AND ELECTRIC PROPULSION*.

Disponible en: <https://scholar.afit.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2352&context=etd>

[Último acceso: 10 2022].

Roland Berger, 2017. *Aircraft Electrical Propulsion – the next chapter of aviation*. Disponible en: https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_aircraft_electrical_propulsion.pdf

[Último acceso: 2022].

Rolls-Royce, 2022. *Our decarbonisation strategy*. Disponible en: <https://www.rolls-royce.com/innovation/net-zero/our-decarbonisation-strategy.aspx>



[Último acceso: 10 2022].

Roundtable on Sustainable Biofuels (RSB), 2010. *Pautas de la RSB sobre los principios y criterios para la producción sostenible de biocombustibles*. Disponible en: https://rsb.org/wp-content/uploads/2017/03/12-08-24-RSB-GUI-01-000_es.pdf

[Último acceso: 09 2022].

Schafer, A., 2019. *Technological, economic and enviromental prospects of all electric aircraft*. Disponible:

https://usir.salford.ac.uk/id/eprint/53195/8/5008_3_revised_manuscript_marked_up_49820_pgpgg4.pdf

[Último acceso: 10 2022].

Scholten, I. B., 2020. *ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE AERONAVES HÍBRIDAS Y ELÉCTRICAS*.

Disponible en: https://ddd.uab.cat/pub/tfg/2020/tfg_287417/TFG_FINAL.pdf

[Último acceso: 2022].

Sergi Alcalde, 2022. *National Geographic*. [En línea]

Disponible en: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/propiedades-hidrogeno-h_18653

[Último acceso: 20 10 2022].

Torres, A. M., 2020. *ANÁLISIS Y EVOLUCIÓN DE LAS EMISIONES PRODUCIDAS*.

Disponible en:

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/330924/ANALISIS%20Y%20EVOLUCION%20DE%20EMISIONES%20PRODUCIDAS%20POR%20AERONAVES.pdf?sequence=1&isAlloved=y>

[Último acceso: 09 2022].

Unión Europea, 2015. *Fuel Cell Coupled Solid State Hydrogen Storage Tank*. [En línea]

Disponible en: <https://cordis.europa.eu/article/id/90483-hydrogen-storage-goes-solidstate/es>

[Último acceso: 10 2022].

Unión Europea, s.f. *Web oficial de la Unión Europea*. [En línea]

Disponible en: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework_es

[Último acceso: 09 2022].

World Aviation Flight Academy, 2021. *PREVISIÓN DE CRECIMIENTO DE LA AVIACIÓN 2021 - 2040*.

Disponible en: <https://worldaviationato.com/es/prevision-de-crecimiento-de-la-aviacion/>

[Último acceso: 2022].



ANEXOS

Anexo I Entrevistas y recopilación de información con el personal de la Academia de Aviación del Ejército de Tierra.

Durante las prácticas externas que tuvieron lugar entre los meses de septiembre y octubre de 2022 en la base “Coronel Maté” de las Fuerzas Aeromóviles del Ejército de Tierra, se tuvo la oportunidad de llevar a cabo una serie de entrevistas, así como una recopilación de información acerca de algunos de los sistemas de propulsión presentados en este trabajo.

La redacción del presente trabajo se ha apoyado en la ayuda prestada tanto por profesores y personal destinado en la Academia de Aviación del Ejército de Tierra, como en personal que pese a no pertenecer de forma directa a la estructura orgánica que forma la academia, no dudó en prestar su ayuda para la resolución de dudas, así como para ofrecer su punto de vista y opinión en base a la notable experiencia acumulada en el sector aeronáutico.

Debido a la escasa bibliografía precisa, que tratase de forma clara y concisa los diferentes apartados desarrollados, fue de vital importancia contar con el apoyo y la aportación de conocimientos que prestó de forma desinteresada el personal destinado en el hangar de mantenimiento de aeronaves de la Academia de Aviación, así como muchos de los profesores de vuelo de esta.

En cierto modo, por el hecho de tratarse aún de tecnologías en estado temprano de desarrollo, muchos de los temas tratados en el trabajo no se encontraban en el área de conocimiento de las personas a las que se le plantearon cuestiones. Pese a todo esto, se solicitó ayuda para llevar a cabo un análisis con metodología AHP comparando las tres principales alternativas a las que se enfrenta el sector en los próximos años con el fin de limitar la emisión de GEI y de esta forma, en base a sus opiniones, establecer los criterios según los cuales un sistema se encuentra aventajado con respecto a los otros.

Por un lado, el teniente Gabriel Ruedas, destinado en la academia en el área de mantenimiento de helicópteros, proporcionó una serie de documentación y bibliografía sobre los combustibles para aviación sostenibles (SAF). Esta información sirvió para llevar a cabo un estudio detallado de las ventajas que esta tecnología puede brindar al desarrollo de una aviación con bajas emisiones. Sus opiniones también sirvieron de gran ayuda a la hora de determinar la importancia de los criterios con la metodología AHP.

Durante la realización de este método analítico, se le plantearon al teniente Ruedas una serie de preguntas acerca de los sistemas de propulsión:

1. ¿Cuál cree que es el mayor inconveniente que presenta la propulsión eléctrica?
2. ¿Ve factible la integración de SAF en aviación a una gran escala?
3. ¿Cree que los sistemas de propulsión eléctricos llegarán a integrarse de una forma universal en todos los ámbitos de la aviación?
4. ¿Es posible que los sistemas híbridos de propulsión basados en motores eléctricos alimentados por pilas de combustible de hidrógeno sean el futuro de la aeronáutica?
5. ¿Cuál cree que es el factor determinante a partir del cual debe comenzar a



diseñarse una aeronave?

6. ¿Pueden existir diferencias en cuanto a nivel de desarrollo entre los aviones y helicópteros del futuro debido a las altas demandas de potencia y limitada autonomía de estos últimos?
7. ¿Es realmente factible una transición a corto y medio plazo a nuevos sistemas de propulsión en el ámbito de nuestras Fuerzas Armadas?
8. ¿Cuáles son los criterios esenciales a la hora de plantear el desarrollo de un nuevo sistema de propulsión?
9. ¿Es asumible la transición a nuevos sistemas de combustión para cumplir con las fechas marcadas según la legislación europea de reducción de emisiones?
10. ¿De ser así, afectará de la misma forma a las flotas de aeronaves militares o serán estas una excepción?
11. ¿Priorizaría una alta energía específica, aunque esta suponga un notable incremento de peso? ¿Ocurre lo mismo con la potencia específica?
12. ¿Cree realmente que, llegado el momento, los costes de desarrollo de un sistema de propulsión realmente tendrían un gran peso?
13. De acuerdo con el criterio peso, ¿en cuál de los sistemas este adquiere una mayor importancia?
14. De acuerdo con el criterio de potencia específica, ¿cuál de los sistemas es capaz de suministrar la mayor? ¿Y de acuerdo al criterio energía específica?
15. ¿Por qué el criterio energía y potencia específica adquieren un peso en el cómputo global mayor que el criterio costes de desarrollo?
16. ¿Existe alguna forma de reducir el peso de los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica manteniendo sus características principales?
17. ¿De acuerdo con la escala de Saaty, es correcto aplicar un nivel de importancia superior al criterio peso?
18. ¿Está de acuerdo con el método de resolución AHP y el resultado según el cual el sistema de propulsión más prometedor de cara al futuro es el eléctrico?
19. ¿Cree que los combustibles sostenibles son un parche temporal a la problemática de las emisiones o realmente una inversión económica podría propiciar la integración de estos en el sector a un nivel generalizado?

La resolución de las preguntas previamente expuestas por parte del teniente, así como las conversaciones mantenidas sobre la temática aeronáutica y su enfoque de cara al futuro han servido de forma muy notable a la resolución del diagrama AHP, así como a entender de una mejor forma el desarrollo de los futuros sistemas de propulsión.

Por otro lado, se le plantearon al comandante Comas una serie de preguntas relacionadas con el entorno militar y las posibilidades que se plantean en este sector de cara al futuro:

1. ¿Cree que el sector aeronáutico militar deberá cumplir de igual manera que el entorno aeronáutico civil la legislación de acuerdo con la reducción de emisiones?
2. ¿Cuáles son las principales ventajas que proporcionarían a las fuerzas armadas la integración de estos sistemas de propulsión?



3. ¿Está realmente el Ejército de Tierra capacitado para asumir económicamente el coste que supondría un cambio radical tanto de la flota de aeronaves como de infraestructura?
4. ¿Opina que es realmente factible comenzar a ver aeronaves con sistemas de propulsión eléctricos o de hidrógeno a corto plazo en nuestras Fuerzas Armadas a medio y largo plazo?
5. ¿Es factible la implementación de combustibles sostenibles (SAF) en el sector aeronáutico de defensa en los próximos años?

Como es lógico, tanto los sistemas de propulsión eléctricos como los sistemas de propulsión de hidrógeno aun no son una necesidad imperante para la industria aeronáutica y mucho menos para la industria de defensa. De esta forma, de acuerdo con las personas con las que se ha podido hablar sobre el tema, es muy probable que pasen aun décadas hasta ver implementadas estas tecnologías en las aeronaves militares, si bien es cierto que algunos de ellos discernían en cuanto al posible aprovechamiento de los combustibles sostenibles, pues veían aquí una gran oportunidad de cumplir con las futuras leyes de emisiones sin la necesidad de cambiar la infraestructura ni tampoco las aeronaves en dotación actualmente en nuestras Fuerzas Armadas.

A la hora de llevar a cabo el estudio del sistema más conveniente o aquel sistema en el que se debería invertir una mayor cantidad de recursos con el fin de poder implementarlo más rápidamente, se determinaron una serie de criterios, convenientemente elegidos por el personal al que se solicitó su opinión al respecto. Según ellos, los sistemas podrían compararse de una forma objetiva atendiendo a los criterios de potencia específica, energía específica, el peso y el coste de desarrollo de cada sistema por separado.

Una vez más, y de acuerdo con una de las conclusiones a las que se llega al finalizar el trabajo, fue que el peso del sistema contaría como un factor determinante a la hora de elegir un sistema u otro, si bien tanto la potencia como la energía específica también tienen un papel especialmente relevante para cualquier tipo de aeronave, pasando a ocupar un último puesto en este escalafón los costes de desarrollo. Este último factor, de acuerdo con el resto de las personas entrevistadas, pierde una gran relevancia si se tiene en cuenta que el desarrollo de este tipo de tecnología es necesario y más aún cuando las grandes multinacionales aeronáuticas compiten entre sí por desarrollar el sistema de propulsión más eficiente del mercado.

La realización de la metodología de jerarquización analítica trata de dar visibilidad a las opiniones del personal entrevistado. De esta manera, ellos han dado su opinión sobre cuáles son los factores más relevantes a la hora de realizar el desarrollo de una nueva aeronave, en base a los cuatro criterios previamente descritos. Además, no solo se ha comparado un sistema con respecto a los otros, sino que también se han comparado los criterios dependiendo de cada uno de los sistemas, con el fin de obtener una serie de información que permitiese de forma transparente entender por qué, a ojos de la mayoría, el sistema de propulsión eléctrico representa el futuro de la aviación.

De esta forma, tanto los profesores de vuelo de la Academia de Aviación, principalmente el comandante D. Luis Comas, como los ingenieros aeronáuticos entrevistados, entre los que destaca de nuevo el teniente D. Gabriel Ruedas, como yo personalmente en base al conocimiento acumulado tras la recopilación de bibliografía, pudimos llegar a la conclusión definitiva de que el modelo de propulsión sostenible de cara al futuro pasa por una aviación electrificada, si bien esta dependerá de un correcto desarrollo de unas baterías con una capacidad energética mayor por unidad de masa.

