



Trabajo Fin de Grado

COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN AVIACIÓN Y SU APLICACIÓN MILITAR

Autor

C.A.C. D. Miguel Rubio García

Director/es

Director académico: D. Joaquín Mur Amada
Director militar: Comandante D. Miguel Ángel Madiedo Valdés

Centro Universitario de la Defensa-Academia General Militar
2021-2022



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer el interés demostrado a mi director académico, el profesor D. Joaquín Mur Amada, que ha tenido en cuenta mi trabajo y se ha interesado por la temática todo lo que ha estado en su mano, así como su disponibilidad y buenas palabras. Igualmente agradecer el interés y consejo de mi tutor militar, el comandante Miguel Ángel Madiedo Valdés.

En segundo lugar, agradecer a la Academia de Aviación del Ejército de Tierra, por tener en cuenta las vicisitudes que tenemos los alumnos estando aún en este período de formación, dándonos el tiempo disponible, aunque haya sido poco, para poder completar este trabajo.

Por último, agradecer a mis padres, por ser esa guía que siempre me ha obligado a esforzarme, permitiéndome llegar aquí, y además poder sentir ese apoyo y comprensión, así como los ratos de celebración y diversión que no pueden faltar en nuestra familia. A mi pareja, Sara, que ha sido vital para salir de algunos momentos de frustración estos años, pero sobre todo ha sido compañía y disfrute, ayudándome a hacer del curso y el trabajo algo provechoso y ligero en lo posible.





RESUMEN

El suministro energético basado en fuentes de combustibles fósiles es limitado. Por esta razón se han de buscar combustibles alternativos, así como probarlos para asegurarse de que la aviación militar pueda mantener su desempeño y fiabilidad.

En consecuencia, este documento estudia la viabilidad del uso de combustibles alternativos en la aviación militar. El uso de nuevas fuentes de energía debe considerarse por diferentes razones como el medioambiente, la seguridad nacional, o la dependencia energética en el exterior.

Se han investigado tres tipos diferentes de tecnologías alternativas para este informe: los combustibles sintéticos, los biocombustibles y las pilas de hidrógeno. Estas tres opciones se han seleccionado porque son las que tienen más visos de aunar una autonomía suficiente de vuelo, un peso reducido y plantas motrices de elevada fiabilidad y potencia, requerimientos imprescindibles para la aviación militar y en especial para las aeronaves de ala rotatoria.

Con la intención de evaluar si alguna de las tres constituye una opción viable, se ha dividido el desarrollo del documento en cuatro partes. La primera explica cada tecnología en sí, y por qué resultan prometedoras para la Aviación del Ejército de Tierra. La segunda trata el nivel de madurez tecnológica en la que se encuentran cada una de las fuentes de energía. La tercera analiza el ciclo de vida de cada una de ellas por separado, teniendo en cuenta la producción, transporte y empleo de cada combustible. La última completa con información sobre los costes económicos como de seguridad nacional asociados al desarrollo de estas nuevas fuentes de combustible.

La información recopilada procede de diferentes empresas y organizaciones públicas como la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) entre otras. Toda esta información se compara con el estándar actual: los combustibles producidos a partir del petróleo, como el queroseno o la versión militar del mismo, el JP8 (*Jet Propellant*).

Finalmente, este estudio muestra que, aunque haya más opciones disponibles que supongan una alternativa al petróleo, las tres que han sido elegidas son las que tienen los resultados más prometedores para su aplicación militar. La unión del sector de la aviación civil, y la aviación militar podría desarrollar una fuente de combustible alternativa que reuniese todas las características para cumplir con los requerimientos de rendimiento de los helicópteros militares, reducir la dependencia nacional en el petróleo extranjero y proteger el medioambiente, creando empleo al mismo tiempo.

PALABRAS CLAVE

Aviación, Biocombustibles, Combustibles Sintéticos, Hidrógeno, Emisiones de Gases de Efecto Invernadero.



ABSTRACT

There is a limited supply of fossil fuel-based energy sources. For that reason, an alternative fuel source must be researched, tested, and proven to ensure military aviation maintains its performance and reliability.

Therefore, this document studies the viability of alternative fuels in military aviation. The use of new energy sources must be considered for many different reasons such as the environment, the national security, or the energy dependence on foreign resources.

Three different types of alternative fuel sources have been researched for this report: synthetic fuel, biofuel, and hydrogen fuel cell. These three options have been selected because of the flight autonomy, the reduced weight and the high reliability and power of the engines, essential requirements for the military aviation, especially for the rotary wing aircrafts.

In order to evaluate if any of the three technologies constitutes a viable option, the document has been divided in four parts. The first one explains each technology, and why it is promising. The second one treats the technology readiness level of each energy source. The third one analyzes the life cycle regarding the production, the transportation, and the employment of each fuel source. The last one completes the study with monetary and national security cost associated with the alternative fuel sources.

The collected information is extracted from different companies and public organizations such as the International Civil Aviation Organization (ICAO). Everything is compared to the present standard: oil-based fuels, such as kerosene or the military version JP8 (Jet Propellant).

Finally, the study shows that while there are more than three types of alternative fuel sources available, the three alternatives chosen for this paper show the most promising technologies when applied to military aviation. The partnership of the civilian aviation sector and the military can develop an alternative fuel source that will meet the power requirements, reduce the national dependence on foreign oil, and protect the environment, while creating jobs.

KEYWORDS

Aviation, Biofuels, Synthetic Fuels, Hydrogen, Greenhouse Gases (GHG) Emissions.



INDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN.....	V
ABSTRACT	VI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS COMBUSTIBLES	2
1.2 EMISIONES.....	2
1.3 DIFERENCIAS ENTRE JP8 Y JET A1.....	4
1.4 FLOTA DE HELICÓPTEROS DE LAS FAMET.	4
2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA.....	6
2.1 OBJETIVOS Y ALCANCE.....	6
2.2 METODOLOGÍA	6
3. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO.....	8
4. DESARROLLO: ANÁLISIS Y RESULTADOS	10
4.1 COMBUSTIBLES SINTÉTICOS	10
4.2 BIOCOMBUSTIBLES.....	11
4.3 PILAS DE HIDRÓGENO	14
4.4 MADUREZ TECNOLÓGICA	16
4.5 CICLO DE VIDA	18
4.5.1 Jet propellant 8 (JP8).....	18
4.5.2 Combustibles sintéticos	19
4.5.3 Biocombustibles.....	21
4.5.4 Pilas de hidrógeno.....	22
4.6 COSTES	23
4.7 SECTOR ESTRATÉGICO. SEGURIDAD NACIONAL.....	25



4.8	ALTERNATIVAS RECHAZADAS EN EL ESTUDIO.....	26
5.	CONCLUSIONES.....	27
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	29
ANEXOS.....		32



INDICE DE FIGURAS

Ilustración 1: Emissions from a typical two-engine jet aircraft during 1-hour flight with 150 passengers (EASA, EEA y Eurocontrol, 2016)	3
Ilustración 2 Emisiones de la aviación. (Yves, 2020)	4
Ilustración 3 Fischer-Tropsch (Kolosz et al., 2020)	10
Ilustración 4 Ciclo de producción del biofuel. (Gielen et al., 2021)	12
Ilustración 5 Prueba de empleo de biofuel en la turbina del reactor JAS 39 sueco (Swedish Armed Forces Headquarter, 2020).....	13
Ilustración 6: Pila de hidrógeno. (AIRBUS, 2020)	14
Ilustración 7 Esquema de empleo del hidrógeno. (Energydinamics, 2016)	15
Ilustración 8Technology Readiness Levels (Elaboración propia)	18
Ilustración 9 Ciclo de vida de la gasolina. (ICAO/OACI, 2020)	18
Ilustración 10 Energía requerida y emisiones de CO2 en % por MJ de Jet A-1 (Kolosz et al., 2020)	19
Ilustración 11 Proceso de producción de combustibles sintéticos a partir de materias fósiles. (GSTC, 2019)	20
Ilustración 12 Camión cisterna de JET FUEL JP8_FT1 50/50 (USAF, 2012).....	21
Ilustración 13 Estudio del potencial global de materias primas para la producción de biofuel entre 2010 y 2050. (Gielen et al., 2021).....	21
Ilustración 14 Ciclo de vida del biofuel. (ICAO/OACI, 2020)	22
Ilustración 15 Ciclo de vida renovable en base al hidrógeno producido por hidrólisis. (Gizem, 2018)	23
Ilustración 16 Distribución porcentual del petróleo importado por España en 2020, por país de origen. (El Economista, 2021)	24



ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS

- Aceites Vegetales Hidrotratados (HVO)
- Aviación del Ejército de Tierra (AVIET)
- Aviation and Missile Research, Development and Engineering Center* (AMRDEC)
- Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation* (CORSIA)
- Dióxido de carbono (CO₂)
- Ésteres Hidroprocesados y Ácidos Grasos (HEFA)
- European Aviation Safety Agency* (EASA)
- European Environment Agency* (EEA)
- External power unit* (EPU)
- Feria Internacional de la Defensa (FEINDEF)
- Fischer-Tropsch (FT)
- Fuerzas Aeromóviles del Ejército de Tierra (FAMET)
- Greenhouse Gases (GHG)
- Grupo Logístico FAMET (GLFAMET)
- Horizonte 2020 (H2020)
- Instituto Español de Estudios Estratégicos IEEE
- Instituto Nacional de Estadística (INE)
- Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC)
- International Civil Aviation Organization* ICAO
- International Renewable Energy Agency* IRENA
- Jet Propellant (JP)
- Naciones Unidas (UN)
- National Aeronautics and Space Administration* NASA
- Organización de Aviación Civil Internacional (OACI)
- Proton exchange membrane* (PEM)
- Technology Readiness Levels* (TRLs)
- U.S. Department of Energy* (DOE)
- United States Air Force* USAF
- Unmanned aerial vehicles* (UAVs)



1. INTRODUCCIÓN

En este documento se tratará de analizar las posibles fuentes de energía alternativas al petróleo que hay en la actualidad, así como su desarrollo, costes, y posible aplicación a la aviación militar.

La primera reflexión de este trabajo es: ¿Son importantes los combustibles alternativos para el ejército y para España? La respuesta es evidente, ya que hay un compromiso del Ejército por reducir la huella de carbono, objetivos incluidos en Fuerza 2035 y en los Objetivos de Desarrollo Sostenible séptimo (Energía asequible y no contaminante) y treceavo (Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos). Los combustibles fósiles no son ilimitados, por lo que hay que estudiar alternativas que nos garanticen el completo funcionamiento de la flota en todos los teatros y con las mismas prestaciones sin hacer uso del petróleo.

A lo largo de este trabajo se desarrollarán temas como las emisiones de carbono, lo cuál es el eje principal sobre el que gira la transición energética de fuentes fósiles a fuentes renovables; o la dependencia energética del exterior, la cual en España se situaba en 73,9% en 2017 según datos del Instituto Nacional de Estadística (INE). Asimismo, se tratarán los diferentes programas para favorecer el uso de estas fuentes de energía alternativas, tanto en el ámbito estatal, como europeo e internacional.

En concreto la transición energética tiene un como objetivo conseguir la descarbonización de la aviación y las emisiones neutras en carbono. Para ello se han tratado diferentes formas de avanzar en el seno de la Unión Europea, como podemos ver en el informe conjunto de la *European Aviation Safety Agency* (EASA), la *European Environment Agency* (EEA), y Eurocontrol, de 2016:

- Mejoras aerodinámicas de las aeronaves.
- Mejoras de rendimiento y eficiencia en los materiales y combustibles.
- Agilización del tráfico aéreo.
- El uso de combustibles bajos en carbono.

En este informe sólo se va a tratar la última, el uso de nuevos combustibles bajos en carbono. El gran problema de la aviación ante esto, a diferencia de otros medios de transporte como el naval o el de carretera, proviene de la falta de flexibilidad a la hora de aplicarlo. Por ejemplo, soluciones que vemos actualmente como los vehículos de gas natural licuado, híbridos o incluso funcionando con hidrógeno, como los autobuses que acaban de entrar en funcionamiento en Moscú, son opciones que se están actualmente probando para la aviación, pero que no constituyen aún una opción viable.

Teniendo esto en cuenta, la mejor opción de la industria aeronáutica para avanzar hacia esos objetivos en el corto-medio plazo, es continuar el uso de los motores ya existentes usando combustibles líquidos de menor impacto ambiental. Estos requisitos, como se podrá ver más adelante, son cumplidos principalmente por dos fuentes alternativas: los combustibles sintéticos (1) y los biocombustibles (2). De forma menos viable, pero con mucho potencial teórico, las pilas de hidrógeno (3) también cumplirían estos requisitos, siendo esta la tercera alternativa a tratar en el documento.

La estructura del informe comienza con una descripción de las mejores alternativas al queroseno, en la que se expone el funcionamiento, ventajas e inconvenientes principales de ellas. Despues hace una comparación entre ellas, para determinar su nivel de madurez. Hasta aquí el documento se centra en el ámbito de las emisiones y el medioambiente. Posteriormente se estudia las ventajas y desventajas en otros ámbitos, como es el económico y el de seguridad nacional. Por último, una conclusión, que une los diferentes ámbitos tratados en el documento,



para expresar una única realidad.

A continuación, se explican en dos apartados introductorios, las características de los combustibles propios de la aviación y las emisiones que estos producen, para poder posteriormente dar paso al desarrollo. Para facilitar la comprensión del informe desarrollado dentro de un marco militar, pero con gran parte de la información del sector civil, se añaden otros dos apartados introductorios para entender la diferencia entre el queroseno militar y el civil, así como los medios que dispone la Aviación del Ejército de Tierra (AVIET).

1.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS COMBUSTIBLES

Debido a que la función principal del combustible es la de proporcionar energía a la aeronave, tanto la cantidad de energía como la calidad de la combustión son las propiedades más importantes a tener en cuenta. Además de estas características, también se debe considerar la estabilidad, lubricación, fluidez, volatilidad, corrosividad o el crecimiento microbiano. El punto de inflamabilidad, la conductividad eléctrica o el punto de congelamiento también afectan a los límites de operación del combustible (Hemighaus et al., 2007).

A la hora de elegir el combustible adecuado, y teniendo en cuenta las propiedades anteriores, obtenemos esta lista para el combustible aeronáutico ideal (Gizem y Turan, 2018):

- Alta energía específica, y alta densidad de energía.
- Buena atomización, evaporación rápida, buenas propiedades de combustión, incluyendo la capacidad de reducir el riesgo de explosión.
- Alta capacidad de calor específico, no contaminante, bajo contenido de carbono.
- Baja viscosidad y alta lubricidad, buenas características de almacenamiento, incluyendo un punto de congelamiento bajo.
- Alta estabilidad térmica, amplia disponibilidad, precio aceptable y respetuoso con el medioambiente.

Esto teniendo en cuenta que la alternativa deseada será mejor si no necesita ninguna adaptación para poder utilizarse igual que el queroseno convencional, o mezclarse con este.

1.2 EMISIONES

Las emisiones son los productos de la reacción de combustión. En el caso de los hidrocarburos, cuando son completamente quemados se transforman en dióxido de carbono y agua. Sin embargo, la realidad es que también se emiten óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, hidrocarburos sin quemar y partículas debido a la combustión imperfecta y a la composición e impurezas que contienen los combustibles.

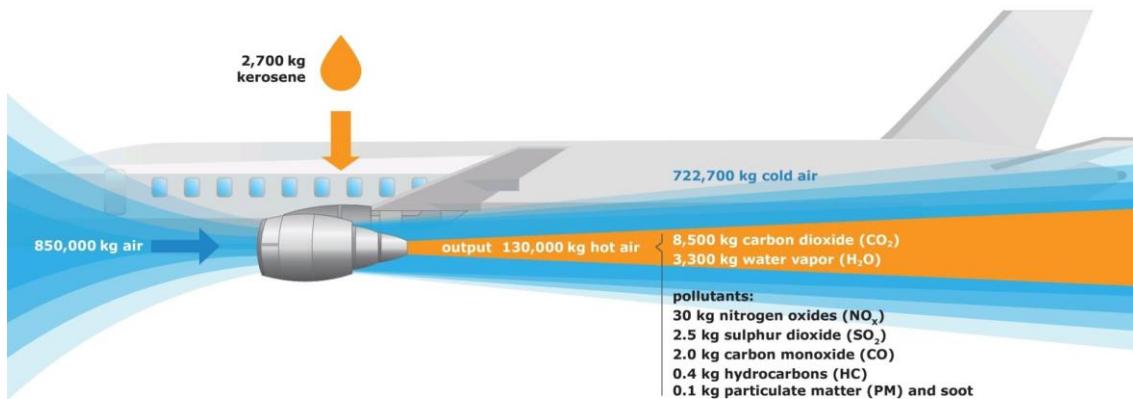


Ilustración 1: Emissions from a typical two-engine jet aircraft during 1-hour flight with 150 passengers (EASA, EEA y Eurocontrol, 2016)

Desde el inicio de la aviación, las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera han ido en aumento. En las últimas décadas, según afirma *Our World in Data* la emisión de CO₂ se ha doblado de 1990 a 2018, pasando de 520 millones de toneladas al año en 1990, a las 1.04 billones de toneladas al año 2018. Sin embargo, si vemos la aviación dentro de todas las emisiones globales podemos apreciar que no ha habido cambio a penas desde sus inicios, constituyendo un 2% del total de emisiones en 1990, hasta un 2,5% en 2018. Si además de eso, extrapolamos los datos a las emisiones de gases de efecto invernadero por pasajero-kilómetro, durante el mismo periodo de tiempo estas se han visto reducidas en un 19% (Prussi, O'Connell y Lonza, 2019). Esta reducción específica en las emisiones por pasajero-kilómetro se debe únicamente a mejoras técnicas y renovación de la flota.

La industria de la aviación actual es un sector que trata de reducir sus emisiones en un esfuerzo coordinado a escala mundial. Por ello está intentando reducirla trabajando de manera conjunta con las Naciones Unidas (UN) y la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) desarrollando planes globales con los apoyos gubernamentales de los países involucrados en estas organizaciones.

Es importante tener en cuenta que las emisiones no sólo provienen de la combustión en los motores, sino que se han de estudiar a lo largo de todo el ciclo de vida de los combustibles, como se desarrollara más adelante.

También se han de tener en cuenta otros impactos al medioambiente como puede ser el cambio en el uso de las tierras y el agua, que puede resultar en el encarecimiento o escasez de otros productos. En el siguiente gráfico se detallan la mayoría de las emisiones de la aviación en general.

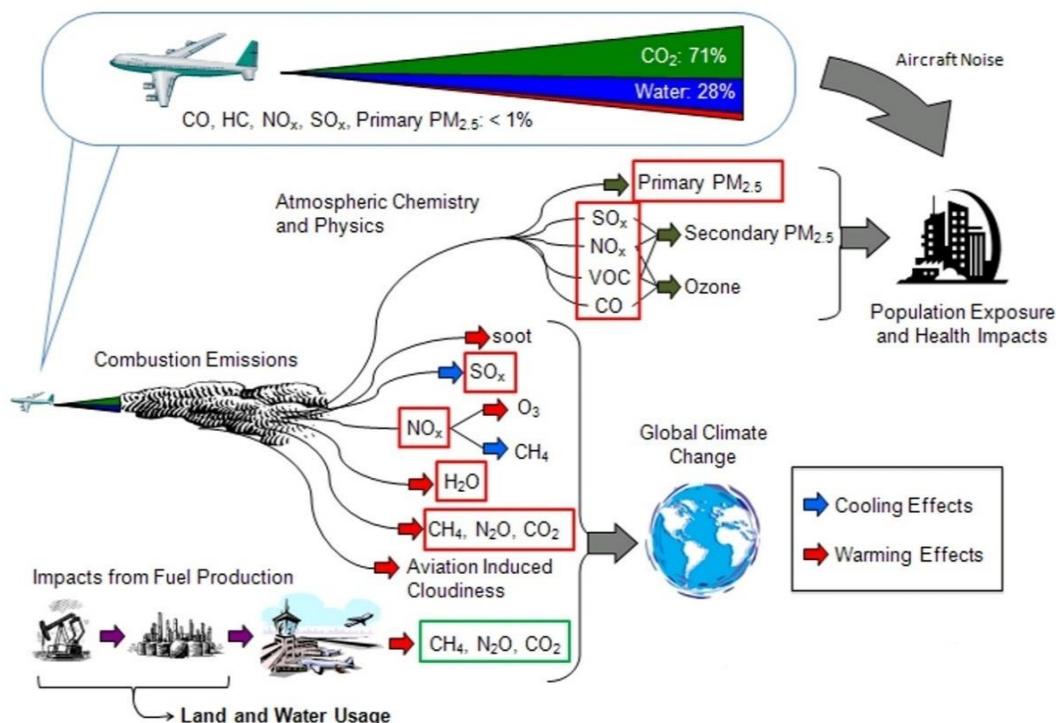


Ilustración 2 Emisiones de la aviación. (Yves, 2020)

1.3 DIFERENCIAS ENTRE JP8 Y JET A1

Los estudios civiles que se han realizado de las fuentes de energía alternativas suelen estar referidos, o más bien comparados, con las prestaciones que ofrece el Jet A1, que es el combustible de turbina (jet en inglés) más usado en aviación civil. Para este estudio, y para otros estudios militares se comparará con el JP-8 o el JP-5 (Jet Propellant).

La diferencia principal entre los combustibles JP y el Jet A1 son tres aditivos que deben llevar para cumplir con la especificación MIL-DTL-83133, cuyas propiedades son, inhibidor de corrosión/mejora de lubricación (1), antihielo (2), aditivo mejorador de la conductividad (3). El JP-5 es para el uso en aeronaves embarcadas en portaviones, con un punto de inflamación más alto para minimizar el riesgo de incendio a bordo.

1.4 FLOTA DE HELICÓPTEROS DE LAS FAMET.

El ámbito de aplicación del proyecto son las unidades de helicópteros de las Fuerzas Aeromóviles del Ejército de Tierra (FAMET), así como los elementos de apoyo que intervienen en el ciclo del combustible como son, unidades de repostaje, mantenimiento o laboratorio de combustibles.

Conviene conocer los helicópteros en dotación para así entender las necesidades y volúmenes de trabajo. Los diferentes modelos son los siguientes:

- Chinook HT-17
- HA-28 (Tigre)
- HE-26
- HT-27 (Cougar)



- HU-21 (Super Puma)
- NH90

En el Anexo I se detalla la relación de unidades que tienen en dotación los diferentes helicópteros.



2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

2.1 OBJETIVOS Y ALCANCE

La preocupación mundial en términos tanto económicos, como políticos, como medioambientales está aumentando a cerca del futuro de las energías. Por ello, en este informe se tratarán de abordar el futuro de estas energías, para así estimar la opción más viable para el Ejército de Tierra en materia de combustibles alternativos para la aviación militar. Este será el objetivo general del trabajo

Para ello se tendrá en cuenta el estado de la tecnología actual, el empuje económico necesario para afrontar esos cambios, la ventaja que se obtiene de ellos y la necesidad que tiene el Ejército de realizarlos. También se analizará la tendencia global y el mercado actual, así como la logística de estas nuevas energías, para poder estimar la viabilidad en territorio nacional y en zona de operaciones.

En base a esto, los objetivos específicos a cubrir en este informe serán:

- Diferenciar las alternativas al petróleo más viables para la aviación.
- Conocer las ventajas e inconvenientes que dan los diferentes combustibles alternativos.
- Estudiar la rentabilidad de las energías alternativas para la aviación militar, tanto en territorio nacional como en zona de operaciones.
- Comparar el desarrollo civil actual con el de otros ejércitos y el español, así como estimar un nivel de madurez para estas tecnologías.
- Determinar las necesidades a cubrir para su implantación, y que cambios supondría.

El desarrollo de estos objetivos permitirá esbozar una idea de las alternativas al petróleo más susceptibles de ser implantadas para su uso en los helicópteros del Ejército de Tierra en el medio plazo, así como de sus principales ventajas e inconvenientes.

En este proyecto se pretende evaluar cuales de las disponibles conforman las mejores opciones para el uso de combustibles alternativos en la Aviación del Ejército de Tierra. Sin embargo, está limitado al análisis cualitativo de los aspectos mencionados anteriormente, faltando así un análisis cuantitativo de laboratorio, y posteriormente de campo, para determinar exactamente su viabilidad. Tampoco se aborda el aspecto legal que supondría en materia de certificación.

2.2 METODOLOGÍA

Con el fin de cumplir todos los objetivos previamente mencionados, se ha seguido una serie de métodos cualitativos. Los métodos empleados son:

- Observación de las técnicas y procedimientos, así como del material en la unidad de combustibles del Grupo Logístico FAMET (GLFAMET). En concreto la observación del laboratorio, para así determinar las variables del queroseno y poder comparar con los nuevos combustibles. También para observar el material disponible para la recepción y suministro.
- Revisión documental, de artículos y revistas, así como los portales web de otros ejércitos, para conseguir la información más actualizada. También se han empleado los manuales del Curso de Combustibles del Ejército del Aire, así como los manuales de toma de muestras de JP8 del GLFAMET.
- Comparación, con el empleo y avances en la materia por parte de otros ejércitos y



empresas del sector civil.

- Entrevista a expositores en la Feria Internacional de la Defensa (FEINDEF), en la que se expusieron varias de las tecnologías tratadas el informe con especial recurrencia en el hidrógeno como combustible para drones.

Estas herramientas han permitido la recopilación de información relevante para su posterior análisis y comparación, permitiendo así entender la situación y tendencias actuales en materia de energías alternativas.



3. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

El uso del queroseno en la aviación se remonta al inicio de la Segunda Guerra Mundial, cuando por falta de gasolina debido a su empleo en la guerra, se inventó un motor de aviación que funcionaba con queroseno para lámparas, uso que se remonta a la primera mitad del siglo XIX.

Este hecho marcó el inicio del empleo del queroseno en la aviación, y posteriormente se fueron desarrollando diferentes categorías del mismo, en bases a nuevos y más demandantes estándares. Ejemplos de ello fueron el JP1, JP2, JPmix y otros tantos intentos de estándares inicialmente militares, de los cuales se utilizan hoy en día el JP5, esencialmente para repostaje en navíos, y el JP8, así como el Jet A1 en el sector civil.

Sin embargo, años más tarde la sociedad entendió que el uso del petróleo traía consecuencias insostenibles provocadas por las emisiones que contaminan la atmósfera, como el cambio climático. Esto dio lugar a diferentes acciones (Marshall, 2006) de las cuales se destacan:

- En la década de 1970 el *U.S. Department of Energy (DOE)* realiza una serie de estudios a cerca de un futuro calentamiento global.
- Sólo unos años después, en 1979, tiene lugar la primera Conferencia Climática Mundial, que adopta el cambio climático como un problema mayor.
- En 1992, 154 naciones firman en Rio la Convención por el Cambio Climático.
- En 1997, se firma el Protocolo de Kyoto, en el que ya se limitan las emisiones a los países industrializados, poniendo como meta el año 2010 para alcanzar unos estándares que ningún país siquiera intentó, para no frenar el crecimiento económico.
- En la década de los 2000 numerosas agencias y organismos, como el *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, creada en 1988 por las Naciones Unidas, comienzan a mostrar el cambio climático como algo irreversible, cuyas consecuencias, en términos económicos, superarían a los costes de prevenirlo.
- En 2015 se adopta el Acuerdo de París, que plantea las acciones necesarias para limitar el calentamiento global a 2°C.

Entre estos hechos se suceden las catástrofes medioambientales más devastadoras de la historia, como sunamis o huracanes, pero en especial olas de calor. Desde 1950 se han sucedido varios récords de temperaturas globales más altas, así como el deshielo de glaciares y polos.

En consecuencia, a todo esto, numerosas organizaciones y gobiernos han ido tomando acciones para intentar reducir las emisiones contaminantes. Muchas de estas se centran en las nuevas energías como medio para conseguirlo, y de ellas se han tenido especialmente en cuenta las dedicadas a la aviación.

Por ello, este informe está basado en la documentación disponible de las organizaciones más relevantes en este tema, como son:

- *International Civil Aviation Organization ICAO/OACI*.
- *National Aeronautics and Space Administration NASA*.
- *European Aviation Safety Agency EASA*.
- *U.S. Department of Energy DOE*
- *International Renewable Energy Agency IRENA*
- *European Environment Agency EEA*



Así como las empresas pioneras en tecnologías aplicables a esto, tales como:

- REPSOL.
- AIRBUS.

También otros ejércitos cuyas tecnologías están siendo probadas con estos nuevos combustibles,

- *United States Air Force USAF*.
- *Swedish Armed Forces*.

Así como otras autoridades en estudios de la seguridad nacional,

- Instituto Español de Estudios Estratégicos IEEE.

Para el estudio también se ha utilizado la opinión de diferentes medios de prensa, como El Orden Mundial, o *France24*.

Sin embargo, la mayor parte de la información procede de los más recientes artículos de investigación realizados por especialistas tanto militares como civiles.



4. DESARROLLO: ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1 COMBUSTIBLES SINTÉTICOS

Una de las opciones más factibles en estos momentos para hacer competencia al petróleo son los combustibles sintéticos. Estos mayoritariamente se producen a partir de materiales ricos en carbono como el carbón o el gas natural (Daggett et al., 2008).

La producción se lleva a cabo en varias fases, una primera fase en la que el carbón se convierte en monóxido de carbono, hidrógeno, gases y otros residuos. Ese monóxido de carbono y el hidrógeno se procesan y se obtienen hidrocarburos de cadena corta, esencialmente metano. Tanto el metano como el hidrógeno son productos gaseosos, que podrían ser utilizados como fuentes de energía (Urbansky, 2020). Sin embargo, las prestaciones necesarias en aviación necesitan de combustibles líquidos. La segunda fase va a convertir esos productos en el objetivo final, combustibles líquidos, transformando ese metano en hidrocarburos de cadena más larga, usando por lo general el proceso de síntesis de Fischer-Tropsch (FT). (Urbansky, 2020)

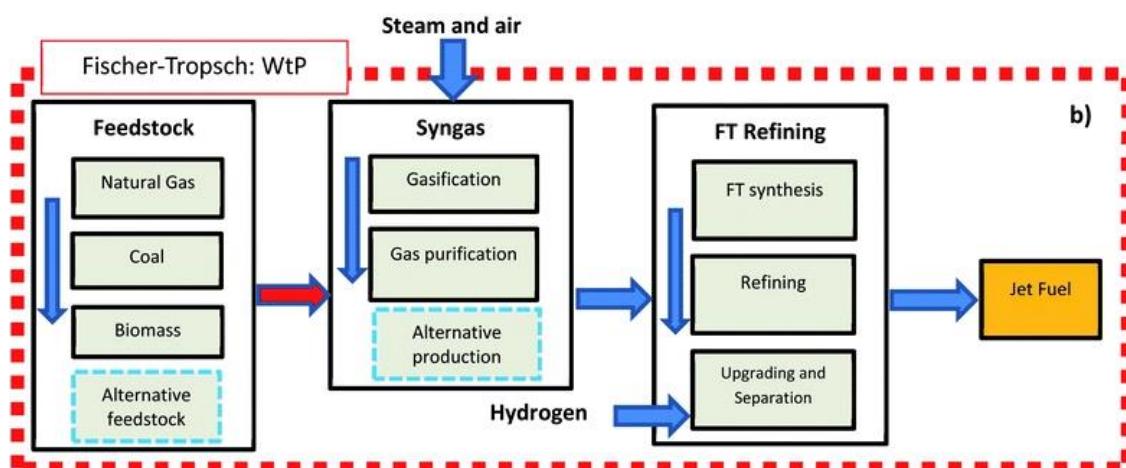


Ilustración 3 Fischer-Tropsch (Kolosz et al., 2020)

Los atributos positivos de los combustibles producidos a través de FT incluyen (1) que son más limpios ya que no emiten azufre en su combustión y (2) tienen mayor estabilidad térmica, lo que resulta en menores limitaciones técnicas en los depósitos de combustibles, gran ventaja a la hora de emplearse en aeronaves militares de altas prestaciones (Daggett et al., 2008).

En comparación con los combustibles convencionales, estos combustibles ofrecen mejores prestaciones a bajas temperaturas, manteniendo baja viscosidad a bajas temperaturas exteriores. Esto es de gran utilidad teniendo en cuenta las bajas temperaturas que se dan a los niveles de vuelo habituales, por lo que mejora la operatividad a grandes alturas y permite el arranque a bajas temperaturas. Los resultados de las pruebas muestran como también estos combustibles emiten menos partículas en suspensión (Daggett et al., 2008).

En diciembre de 2006, la *Air Force* americana completó los primeros vuelos de prueba sobre B-52 utilizando una mezcla al 50/50 de JP-8 y combustible sintético, funcionando en sus ocho motores. Desde entonces se han sucedido las certificaciones de todas las aeronaves del ejército americano, como la Boeing C-17 Globemaster III, pero también aviones de ataque como el F-15 Eagle, o el F-22 Raptor. En abril de 2012 alcanzó el 100 por ciento de la flota certificada para la mezcla.

A pesar de esto, los combustibles sintéticos, tienen numerosos atributos negativos asociados como: peores propiedades de lubricación, menor capacidad calorífica volumétrica, y el incremento de emisiones de gases de efecto invernadero en el proceso de producción.



La falta de lubricación es a causa de la falta de azufre en el combustible, que ha de ser suplido con aditivos, o como se ha visto anteriormente, mezclándolo con queroseno derivado del petróleo. El incremento de emisiones de CO₂ en la producción es del 1.8, casi el doble de emisiones, y el consumo de agua necesaria para la misma también se dispara.

Sin embargo, el mayor de los problemas es que, aunque es la alternativa más factible hoy en día, no supone una verdadera solución al problema medioambiental, ya que como se puede apreciar no es un combustible renovable, sino que se extrae de las reservas fósiles de gas natural o carbón. Más adelante se expondrá que ciertos procesos como el Fischer-Tropsch podrán ser utilizados de igual forma con otras materias renovables ricas en carbono, incluso hay empresas que emplean la captación de CO₂ del aire (Urbansky, 2020).

Esto supone que los combustibles sintéticos, aunque mejoran en cierta medida las emisiones durante la combustión en las aeronaves, sólo sirven para diversificar la producción y que no toda la producción de combustible sea a partir del petróleo.

4.2 BIOCOMBUSTIBLES

Entre las opciones más atractivas para cumplir con los requerimientos a la hora de reducir esas emisiones de efecto invernadero, manteniendo los estándares de la aviación actual son los biofuels. Los biofuels son combustibles líquidos que han sido extraídos de fuentes renovables, como pueden ser cultivos o grasas animales. Dependiendo de esa fuente se dividen en tres categorías. Cuando la materia prima proviene de fuentes comestibles se denominan de primera generación. Entre estos es conocido el etanol de maíz. Sin embargo, tanto el etanol como el metanol tienen masas y poder calorífico volumétricos bajos, por lo que por lo general no son aptos para usarlos en aviación (Atwood, 2009)

Aquellos biofuels cuya materia prima proviene de fuentes no comestibles son de segunda generación. Estos son los más prometedores ya que provienen esencialmente de cultivos como la jatropha, o la camelina (Tao et al., 2017), que son de bajo coste y alto rendimiento, a los que se extrae el aceite que se hidroprocesa para convertirlos en ésteres y ácidos grasos. Estos cultivos se pueden incluir en la rotación de cereales favoreciendo que no haya una competencia entre los cultivos comestibles y los dedicados a biofuel.

Los biofuels de tercera generación, al igual que los de segunda, utilizan materia prima procedente de fuentes no comestibles. Sin embargo, estos alcanzan resultados idénticos a los combustibles basados en petróleo. Por ejemplo, ciertas especies de algas han resultado muy prometedoras ya que los combustibles que se han obtenido ofrecen buenas prestaciones, pero no sólo eso, además ofrecen mayor eficiencia fotosintética, mayores rendimientos en aceite, crecen en tierras no fértiles y toleran el agua de diversas fuentes (agua dulce, salobre o salada) (Rocca et al, 2015).



FIGURE 9. Technology pathway categories for the production of biojet fuels

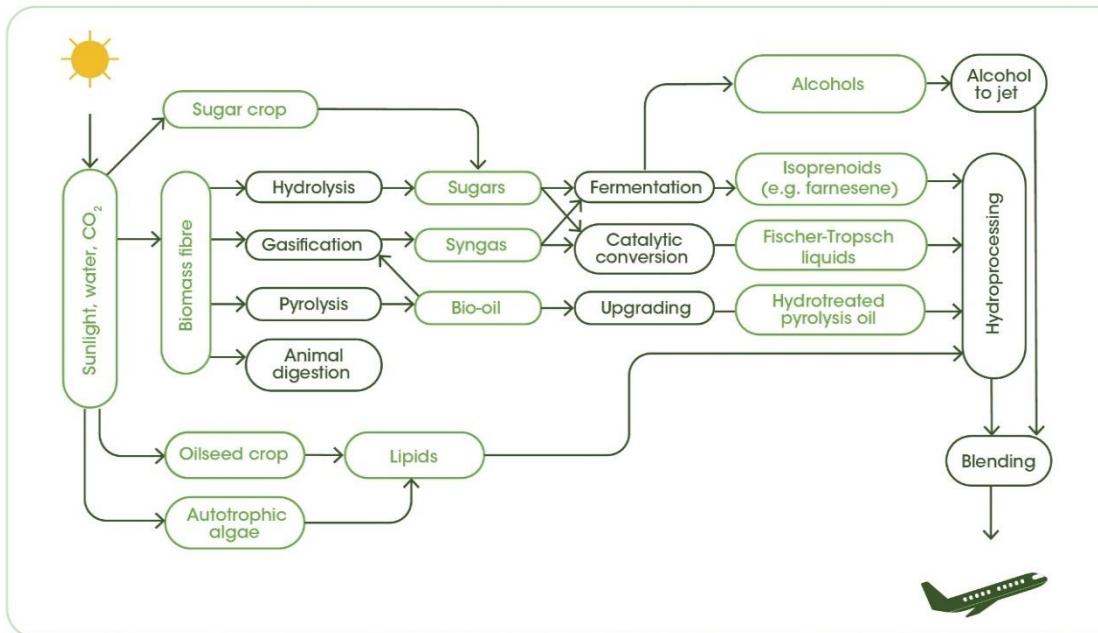


Ilustración 4 Ciclo de producción del biofuel. (Gielen et al., 2021)

Actualmente, estos biocombustibles pueden ser producidos según varios procedimientos, dependiendo de las necesidades del producto. Según el informe europeo (EASA, EEA y Eurocontrol, 2016), los más comunes para el uso en aviación son:

- Combustibles procedentes del hidrotratamiento de aceites vegetales o grasas animales que se convierten en Ésteres Hidropresados y Ácidos Grasos / Aceites Vegetales Hidrotratados (HEFA/HVO por sus siglas en inglés);
- Combustibles sintetizados por el proceso Fischer-Tropsch obtenidos de biomasa;
- Combustibles iso-parafínicos sintéticos obtenidos de la conversión de azúcares.

Estos tres tipos de combustibles ya han sido aprobados para el uso en aviación comercial ya que cumplen con los requerimientos necesarios, en mezclas, con el queroseno convencional, del 50% para los dos primeros y del 10% para las iso-parafinas sintéticas.

Entre las principales desventajas de utilizar biocombustibles se encuentran una mayor solubilidad del agua en estos, que normalmente proviene del vapor de agua que forma parte del aire. Además, aunque el agua en sí ya es un problema, aumenta la facilidad para el crecimiento microbiano. Estos mismos problemas también los tiene el queroseno convencional, y han desencadenado en accidentes graves provocando taponamientos del sistema de combustible. Ahora se da un tratamiento a los depósitos y tanques de almacenamiento, además de tratar de llenarlos siempre al máximo para evitar que haya aire que pueda condensar (Goltz et al., 2011).

La mayor higroscopidad y crecimiento microbiano de los biocombustibles suponen un reto para su almacenamiento y el mantenimiento de los sistemas de combustible debido a su degradación más rápida de éstos. Por tanto, los biocombustibles requieren de una mayor monitorización, más frecuente y exigente.

Por otro lado, se ha de valorar el problema económico que supondría sumar a la industria de la aviación a la competencia existente en la industria de la agricultura, ya que la producción existente es en base a residuos de grasas y aceites, pero también de cultivos dedicados a la producción directa para biocombustibles.

Los defensores de los biocombustibles argumentan que la plantación de cultivos dedicados a su producción, alimentados por el sol, proporciona energía limpia y renovable año tras año. Por



el contrario, los críticos argumentan un gran número de problemas asociados a la explotación de los biocombustibles, desde deforestación de los campos, al aumento de los precios de la comida e incluso las emisiones de carbono.

Según el artículo publicado por el departamento de asuntos públicos de *Aviation and Missile Research, Development and Engineering Center* (AMRDEC) en 2014, el *U.S. Army* inició un programa de pruebas de *biofuels* para su flota de helicópteros. El *UH60 Black Hawk* completó más de 180 horas de vuelo usando una mezcla al 50% de biocombustible con JP8. No hubo ninguna pérdida en las prestaciones de los motores, y las inspecciones técnicas no mostraron ningún defecto en el material.

Completada esta fase iniciaron una segunda fase con el helicóptero *CH47 Chinook*. El primer vuelo, considerado un completo éxito por ellos, fue el 15 de septiembre de 2014. Los ensayos terminaron a finales de octubre con un total de 30 horas de vuelo sin ninguna novedad. Tras esto comenzaron con los preparativos para certificar ese combustible como sustituto del JP8.

Tras esta segunda fase, George Bobula, ingeniero jefe de la *AED's Propulsion Division*, dijo *“From what we have heard to this point, flying with this fuel blend hasn't given us any technical surprises. In all likelihood, this fuel blend will be incorporated into the jet fuel specification for Army use.”* (ARMDEC, 2014)

Según el informe del *Swedish Armed Forces Headquarter* de 2020, afirma que han completado sus pruebas con una mezcla de 50/50 biofuel y JP8 en busca de diferencias en prestaciones y funcionamiento de los motores del reactor JAS 39. Según las palabras del *Brigadier General Gabor Nagy*, el resultado ha sido el siguiente: *“The tests showed that the engine using biofuel had unchanged performance both regarding thrust power and fuel consumption, as compared to traditional fuel.”*

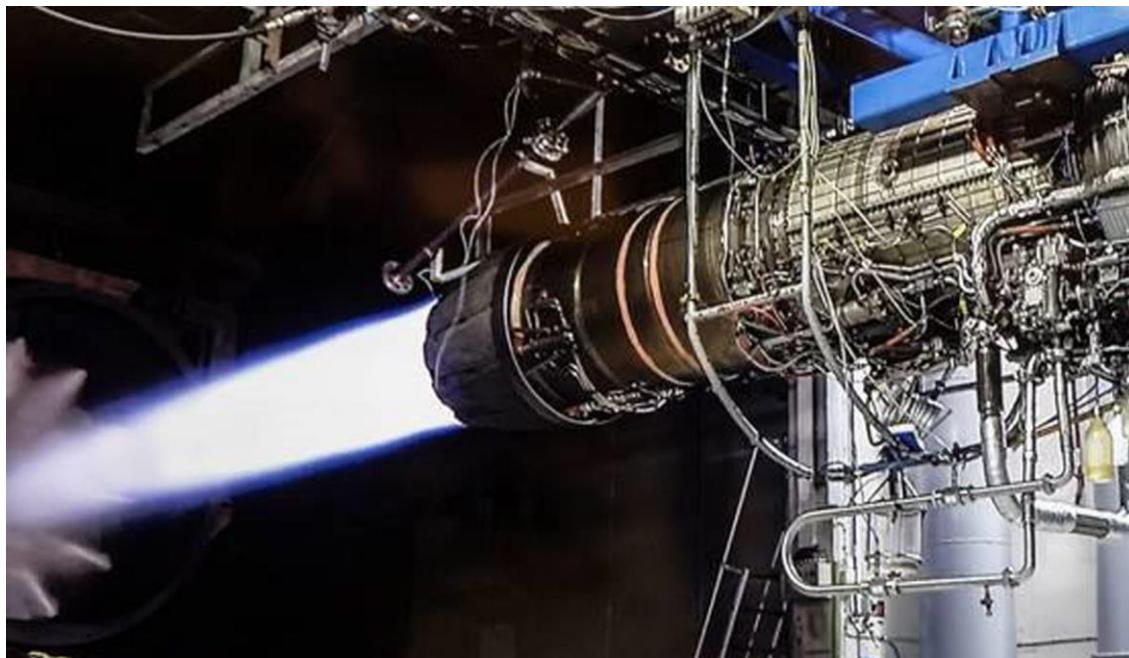


Ilustración 5 Prueba de empleo de biofuel en la turbina del reactor JAS 39 sueco (Swedish Armed Forces Headquarter, 2020)

Sin embargo, aunque todo parece estar a favor de la utilización de los biofuels, en este caso lo limitante es la producción. Hay estudios que afirman que si toda la agricultura actual se dedicase a la producción de combustibles apenas conseguiría un 10% del combustible que se usa anualmente. Es por ello que resulta primordial el estudio de la producción de biocombustibles de tercera generación para conseguir alcanzar unas cifras que permitan situar a los



biocombustibles en el mercado, de forma sostenible y manteniendo el resto de la producción agrícola sin alterar.

4.3 PILAS DE HIDRÓGENO

El hidrógeno es el elemento más abundante en el mundo. Sin embargo, no existe de manera natural en su forma molecular gaseosa (H_2) en grandes concentraciones debido a su alta reactividad. Debe ser producido a partir de otras fuentes, como el agua, biomasa, o combustibles fósiles. Esta última es la que menos energía requiere para su producción, y por tanto la mayoritaria.

Las pilas de hidrógeno, también llamadas pilas de combustible hidrógeno, son lo último en las tendencias de nuevos combustibles alternativos, debido al alto potencial que presenta esta tecnología en términos de eficiencia energética y los beneficios que aporta a la descarbonización del sector, y de la industria en general.

Hoy en día, esta tecnología ya es empleada en diversas aplicaciones como:

- Energía de reserva de emergencia para instalaciones críticas en hospitales.
- Reemplazar a la red eléctrica para asegurar continuidad en ciertas cargas críticas como los centros de datos.
- Diferentes medios de transporte como coches, buses o trenes.

Funcionan de manera similar a las baterías, convierte la energía almacenada en moléculas en electricidad a través de una reacción electroquímica. Se compone de dos electrodos, ánodo y cátodo, separados por una membrana electrolítica.

Una pila de hidrógeno (AIRBUS, 2020) funciona típicamente del modo siguiente:

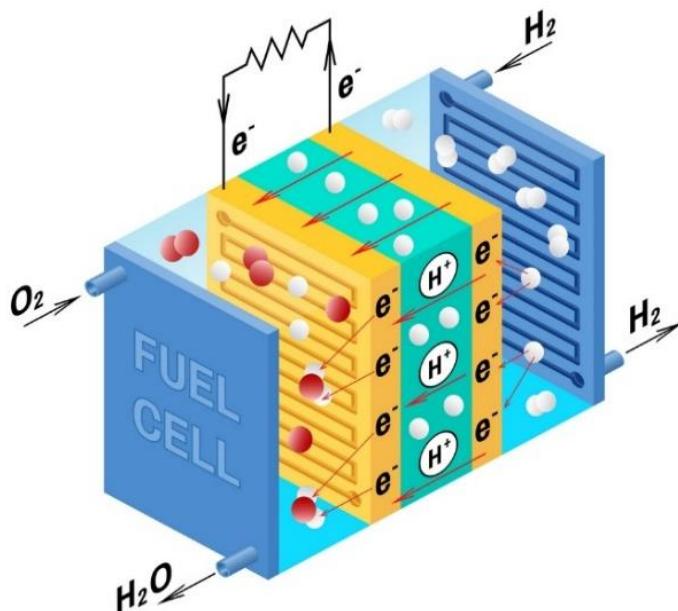


Ilustración 6: Pila de hidrógeno. (AIRBUS, 2020)

- El hidrógeno entra en la pila por el ánodo. En ese momento los átomos de hidrógeno reaccionan con el catalizador y se separan en electrones y protones. El oxígeno ambiental entra por el otro lado, a través del cátodo.
- Los protones positivamente cargados atraviesan la membrana electrolítica y pasan al



cátodo. Los electrones negativamente cargados salen de la pila generando la corriente eléctrica, pudiendo ser usada para dar energía a una propulsión eléctrica o híbrida.

- En el cátodo, los protones y el oxígeno se combinan produciendo agua.

En este caso, podemos observar que la fuente y el funcionamiento nos aseguran una forma limpia de obtener energía eléctrica en la aeronave, después se tratará la obtención del combustible.

Otras ventajas principales son; no necesitan ser recargadas a pesar de dar electricidad, sólo necesitan combustible, por lo que reducimos tiempos de espera (1); reducción de ruido a niveles mínimos, ya que no hay partes móviles (2).

Sin embargo, esta tecnología aún está en una fase de desarrollo inicial. Aún ninguna empresa pública ni privada la utiliza en sus aeronaves. El hidrógeno es un gas con muy poca densidad y explosivo, por lo que su almacenamiento, transporte y empleo son críticos. Su almacenamiento aún supone un reto, y su obtención deja numerosas dudas de sus beneficios medioambientales ya que la mayoría del hidrógeno se extrae actualmente de hidrocarburos, y requiere de mucha energía.

Asimismo, supone un problema prioritario el hecho de que, excepto algunos pequeños drones que funcionan con motores eléctricos, la gran mayoría de aeronaves, y todas las de la flota de las Fuerzas Armadas, funcionan con motores de combustión. Usan queroseno, no electricidad. Esto supondría un rediseño completo de las plantas de potencia, elevando el coste y el tiempo de desarrollo y certificación. Por ello se hace evidente que no resulta una opción viable en el corto medio plazo.

A pesar de esto suponen una opción para energizar sistemas auxiliares, como las *external power unit* (EPU), unidades de potencia externas que asisten en los arranques de las aeronaves proporcionando corriente continua en especial a los equipos de control del motor y a los arrancadores.

También la logística supondría un problema a la hora de usar hidrógeno. Conseguir acceso a JP8 es sencillo tanto en aeropuertos como en el campo de batalla, pero los requerimientos, especialmente de presión y temperatura que tiene el hidrógeno dificultan mucho su transporte a zonas de combate y requerirían de nuevas instalaciones tanto en zonas de combate como en territorio nacional.

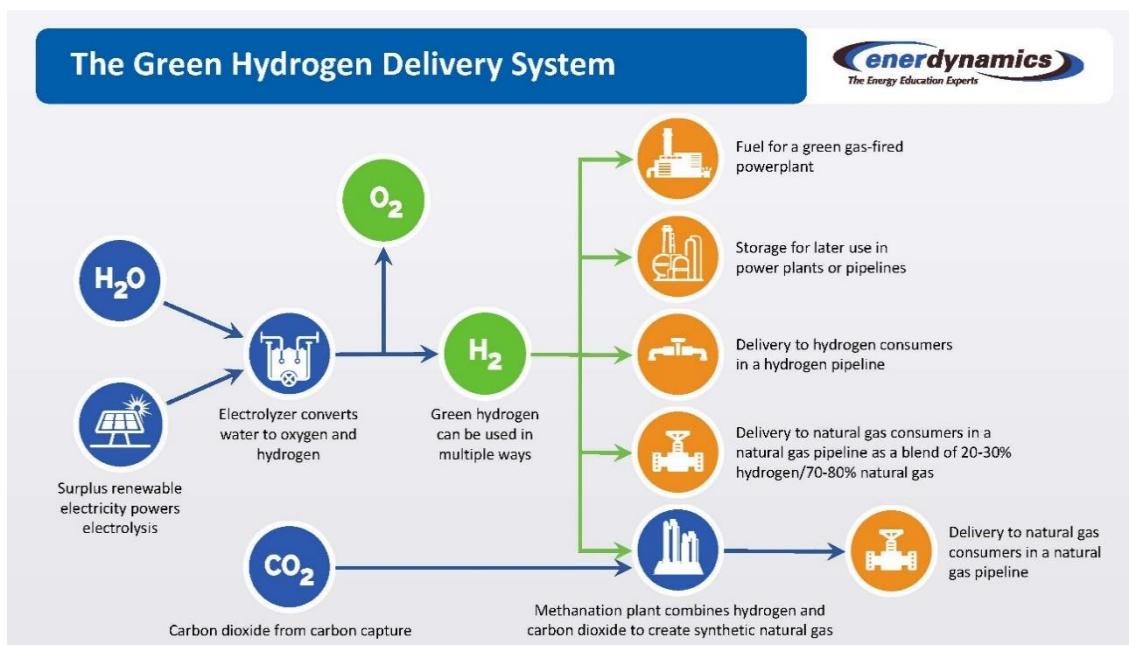


Ilustración 7 Esquema de empleo del hidrógeno. (Energydynamics, 2016)



Para que su empleo sea factible en aviación tiene que haber antes un salto tecnológico, al que seguramente precedan todos los medios de transporte tanto terrestres como marítimos, porque, como se ha mencionado anteriormente, los requerimientos técnicos de la aviación hacen que sea el transporte menos flexible ante cambios tan sustanciales.

Es precisamente por esto que las únicas pruebas que ha habido son en *unmanned aerial vehicles* (UAVs). Insitu, una compañía de Boeing completó el primer vuelo de su vehículo aéreo no tripulado (UAV) ScanEagle3, impulsado por una celda de combustible de membrana de intercambio de protones (PEM), totalmente eléctrica, alimentada con hidrógeno (en inglés, *proton exchange membrane (PEM) fuel cell*) (Bingen, 2021).

El proyecto es financiado por el *U.S. Army*, con resultado satisfactorio. Esta tecnología es capaz de suministrar más de 10 horas de autonomía, y también se está ensayando la tecnología para llenar los depósitos de hidrógeno, también con resultado satisfactorio (Bingen, 2021). Ambas tecnologías, demostrando así ser una gran promesa para el futuro de la aviación.

Según dijo Andrew Duggan, el director gerente de Insitu Pacífico: “*For our global Defence customers, fuel-cell-powered UAS in this Group 2 space represent a significant game changer in the battlespace. Operationally, fuel-cell-powered platforms provide the potential for longer endurance missions, increased power availability for payloads, as well as significant reductions in noise signature.*”

4.4 MADUREZ TECNOLÓGICA

En este apartado se tratará de comparar las opciones expuestas anteriormente, para analizar la viabilidad de su implantación.

En primer lugar, tanto los combustibles sintéticos procedentes de otras fuentes fósiles, como los biocombustibles se están empleando en la actualidad, habitualmente como combustibles *drop-in*¹, cosa que el hidrógeno no permite. Esta característica hace muy sencilla la transición al uso de los dos primeros, y dificulta la del hidrógeno, que requeriría una transformación de las instalaciones logísticas, laboratorios, depósitos, pero sobre todo de los sistemas de combustible y potencia de las aeronaves.

Los rendimientos que ofrecen estas fuentes de energía dan el mismo punto de vista que el párrafo anterior. Por lo general, los combustibles líquidos, es decir, combustibles sintéticos y biocombustibles, dan un rendimiento similar al queroseno, con pérdidas entre el 0.8% y el 3.3% con respecto a este. Sin embargo, el hidrógeno consume mucha energía para su obtención, compresión, transporte, repostaje, etcétera, permitiendo obtener sólo un ≈17% de rendimiento comparado con el del queroseno (Huang y Zhang, 2011). Esto evidencia que con la tecnología actual utilizar el hidrógeno no sólo sería costoso, sino que no tendría muchos beneficios.

Por otra parte, la materia prima necesaria para cada uno de ellos, con la tecnología actual, supone que sólo los biofuels procederían de una fuente renovable, y su ciclo es sostenible, mientras que los sintéticos y el hidrógeno conllevarían como mínimo el uso de fuentes fósiles no renovables, además de la energía consumida para la obtención de la materia prima.

Por el momento la captación de CO₂ del aire, que supondría un ciclo renovable para los sintéticos, necesita demasiada energía por lo que el ciclo no es sostenible (Urbansky, 2020). Asimismo, la extracción de hidrógeno por electrólisis del agua permite que las emisiones en el ciclo sean cero, pero la energía necesaria para ello hace que no sea sostenible y el coste sea muchas veces mayor que el del queroseno convencional (*U.S. DOE*, 2009a). Sólo cabe la posibilidad de hacer que estas dos opciones sean sostenibles si la energía necesaria para su

¹ Drop-in significa que esos combustibles pueden ser utilizados directamente en los mismos motores que usan queroseno convencional. Eso les permite ser mezclados con el queroseno.



producción proviene de fuentes renovables como eólica, solar, geotérmica o hidroeléctrica.

Haciendo hincapié en el concepto académico de madurez tecnológica, se pueden clasificar según los *Technology Readiness Levels (TRLs)*, concepto que surge primeramente de la NASA, que, aunque puede aplicarse a cualquier proyecto de cualquier ámbito, es ideal para su aplicación en proyectos aeronáuticos o espaciales (Ibañez de Aldecoa, 2014).

Se consideran 9 niveles para definir el espectro entre el inicio básico de principios y conceptos de la nueva tecnología, hasta llegar a las pruebas con éxito en un entorno real. Según el *U.S. DOE (2009b)*, en su guía de asesoramiento de niveles de madurez de la tecnología, los hitos principales conseguidos en cada uno de los niveles son:

TRL 1: Principios básicos observados y reportados.

TRL 2: Concepto y/o aplicación tecnológica formulada.

TRL 3: Función crítica analítica y experimental y/o prueba de concepto característica.

TRL 4: Validación de componente y/o disposición de los mismos en entorno de laboratorio.

TRL 5: Validación de componente y/o disposición de los mismos en un entorno relevante.

TRL 6: Modelo de sistema o subsistema o demostración de prototipo en un entorno relevante.

TRL 7: Demostración de sistema o prototipo en un entorno real.

TRL 8: Sistema completo y certificado a través de pruebas y demostraciones.

TRL 9: Sistema probado con éxito en entorno real.

Teniendo en cuenta estas premisas y los ejemplos más actualizados de pruebas reales, explicados al final de cada uno de los tres puntos anteriores, se podría clasificar los niveles de madurez de las tres alternativas contempladas en el documento, correspondiendo:

El nivel de madurez TRL 8-9 para los combustibles sintéticos ya que han sido probados en entorno real durante la última década, tanto en empresas privadas como en diferentes ejércitos.

El nivel de madurez TRL 6-8 para los biocombustibles (sólo los producidos mediante los procedimientos descritos en apartado 4.2) ya que han sido demostrados y certificados en el entorno real, pero su escasa producción actual no permite que haya sido probado en funcionamiento en ningún ejército, y en aerolíneas privadas con mezclas no superiores al 5%.

El nivel de madurez TRL 3-5 para las pilas de hidrógeno, ya que el concepto ha sido llevado a prototipos que se han probado en drones, es decir a escala mucho menor, por lo que aún no se han hecho pruebas relevantes en helicópteros ni aviones, ni ningún ejército lo tiene en funcionamiento.



Technology Readiness Levels: Combustibles alternativos

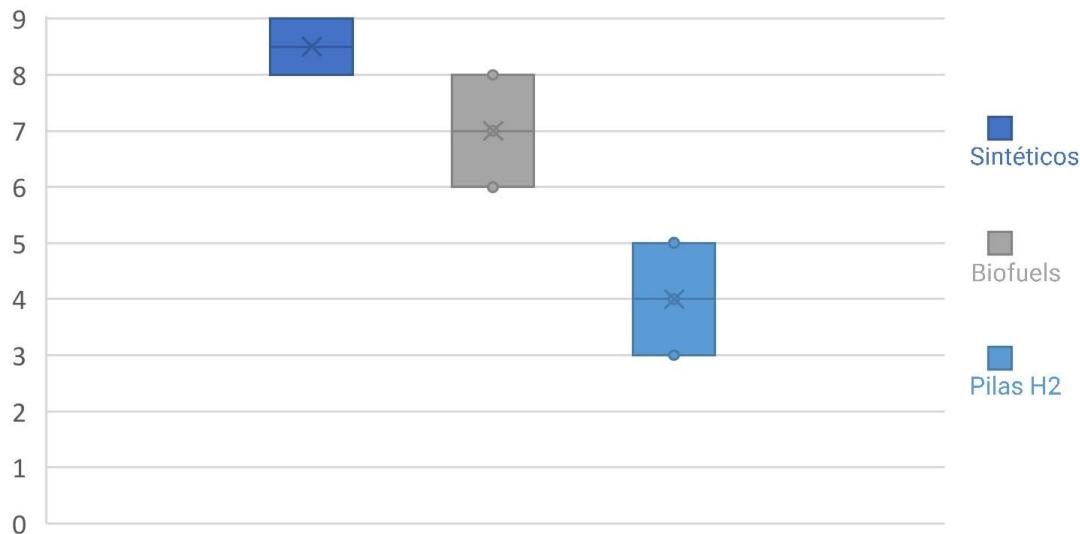


Ilustración 8 Technology Readiness Levels (Elaboración propia)

4.5 CICLO DE VIDA

Una vez se han descrito las características principales de los combustibles alternativos conviene explicar más detenidamente el proceso que ha de seguir desde la obtención de la materia prima hasta su uso en las aeronaves. Esto puede ser de utilidad a la hora de identificar todas las estaciones por las que pasa y poder plasmarlo en situaciones reales como la base de Colmenar Viejo.

4.5.1 Jet propellant 8 (JP8)

En primer lugar, se va a definir el ciclo de vida que sigue el queroseno convencional, en este caso aditivado para cumplir esos estándares militares que se definen en la introducción del documento. Hay que destacar que este “ciclo” es lineal, ya que se necesitan de millones de años para cerrarlo, lo cual permite considerarlo lineal.

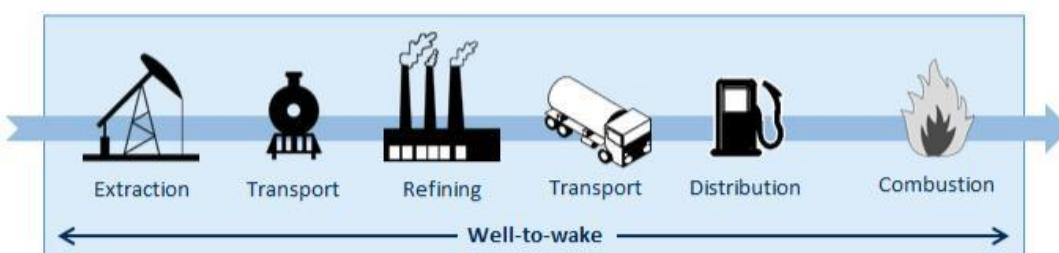


Ilustración 9 Ciclo de vida de la gasolina. (ICAO/OACI, 2020)

Inicialmente se extrae el petróleo, que para tener todo en cuenta a la hora de estimar unas emisiones y gasto de energía total depende mucho de la técnica utilizada para ello. De manera general existen dos tipos de técnicas, las convencionales y las no convencionales.

Las técnicas convencionales extraen el petróleo denominado ligero o medio de tal manera que, tras perforar la superficie, por lo general de forma vertical, este tiene una densidad y viscosidad tales que puede ser extraído del subsuelo usando bombas de presión. Suele ser



líquido a presión y temperatura ambiente, lo que le permite fluir por los oleoductos. Su producción se da tanto en tierra como en mar, y es más barata tanto su extracción como su posterior procesamiento.

Las técnicas no convencionales consiguen extraer el petróleo más pesado mediante la perforación horizontal y la fractura hidráulica. Por ejemplo, se emplean para la extracción de petróleo en arenas bituminosas que no serían capaces de fluir por métodos convencionales. Estas técnicas resultan mucho más costosas, no sólo en términos de dinero, sino que necesitan de mucha energía tanto eléctrica como térmica, y contaminan mucha cantidad de agua, además de las filtraciones que producen y los movimientos de tierras. Además, después en las refinerías debe ser retirada toda el agua y las sales utilizadas para su extracción, dejando un producto menos limpio.

Tras ser extraído el petróleo se ha de transportar a las refinerías. En esto la industria española es puntera. España importa petróleo, pero exporta gasolina. En 2017, sólo Alemania e Italia produjeron más que las refinerías españolas en Europa. En las refinerías se calienta el crudo y se separan todos los componentes del petróleo para generar diferentes productos entre los que están los combustibles. Desde butano, hasta asfalto y plásticos, pasando por el queroseno. En esta fase también se producen muchas emisiones.

Una vez terminados los productos, en concreto el queroseno, es aditivado y transportado hasta las instalaciones del aeropuerto, en camiones cisterna generalmente, donde es analizado y guardado en depósitos. De estos depósitos se extraerá el combustible para, con el camión de distribución, llenar los depósitos de cada una de estas aeronaves. Esta fase es la menos contaminante, pero aun así su transporte genera emisiones.

Por último, se da la combustión, donde se generan la gran mayoría de emisiones de gases de efecto invernadero, en torno al 80%, que mayoritariamente son de CO₂, mientras que en las anteriores fases predomina la liberación de Metano CH₄ y NO₂, así como la contaminación de aguas y tierras. Esta fase da como producto la energía necesaria para el movimiento de las aeronaves, cerrando así el “ciclo”.

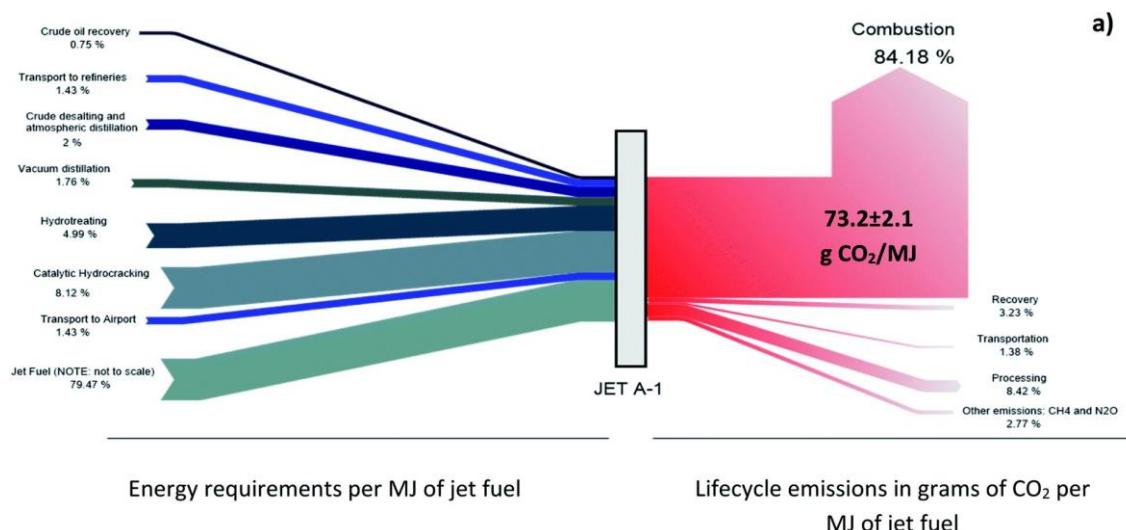


Ilustración 10 Energía requerida y emisiones de CO₂ en % por MJ de Jet A-1 (Kolosz et al., 2020)

4.5.2 Combustibles sintéticos

Para los combustibles sintéticos producidos a partir de carbón y gas natural no se contempla el proceso de producción de la materia prima, al igual que el caso anterior con el petróleo, ya que al ser materiales fósiles resulta insostenible. Por lo que el primer paso es, de nuevo como en el caso anterior, la extracción de estos.

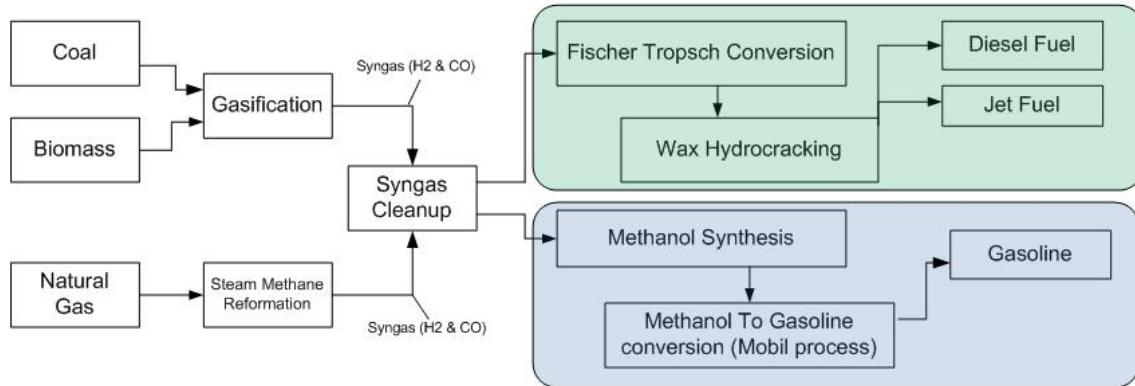


Ilustración 11 Proceso de producción de combustibles sintéticos a partir de materias fósiles. (GSTC, 2019)

Cuando el combustible sintético se extrae de combustibles fósiles, el menor impacto ambiental en la extracción, elaboración y transporte se produce cuando la fuente primaria es el gas natural. Después de su extracción sólo necesita una fase de purificación para eliminar componentes pesados. Sin embargo, existe un gran problema para su extracción cuando el gas natural está ligado a un yacimiento de petróleo; en esos casos se considera subproducto y se quema en antorchas.

En lo concerniente a la extracción del carbón cabe destacar que el impacto inicial depende mucho de la profundidad a la que esté, pudiendo darse tanto la minería a cielo abierto, como la minería subterránea, siendo esta última la mayoritaria. En este caso hay que tener en cuenta el impacto que suponen los drenajes de la mina que pueden filtrarse en los cursos de agua, con influencia directa en las poblaciones circundantes. También es importante la emisión de metano que es liberado al aire durante la producción, siendo este uno de los gases con mayores consecuencias para el efecto invernadero.

Una vez extraídos ambos se procedería a transportarlos para su posterior síntesis. En el caso del carbón el transporte más empleado en tierra son el ferroviario o el de carretera, y en ámbito internacional por vía marítima. No necesita condiciones específicas para su transporte, por lo que resulta muy flexible. En el caso del gas natural ocurre todo lo contrario, tiene mayores necesidades técnicas de presión y temperatura para su almacenamiento y transporte. Esto aumenta mucho la inversión necesaria para su empleo, y además conlleva ciertas pérdidas, aunque se estiman inferiores al 1%.

Posteriormente se extraen de ellos los componentes necesarios para el procesamiento Fischer Tropsch, siendo más fácil del gas natural, en el que prevalece de forma natural el gas metano. Tras este proceso pueden ser directamente utilizados en las turbinas, ya que son un producto *drop-in*. A partir de aquí seguiría la misma cadena que sigue el JP8, pudiendo ser almacenado en tanques, camiones cisterna hasta su utilización en las aeronaves con unas mezclas al 50/50. Esta mezcla suele ser conocida como Jet Fuel JP8-FT1 50/50.

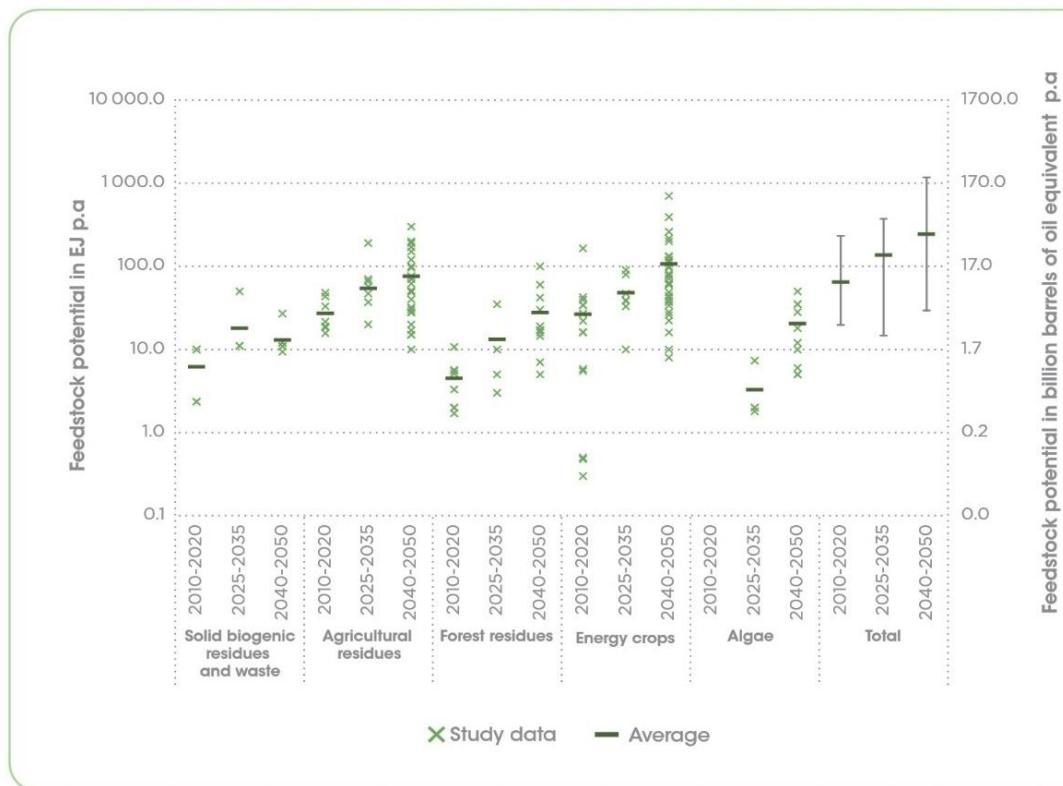


Ilustración 12 Camión cisterna de JET FUEL JP8_FT1 50/50 (USAF, 2012)

4.5.3 Biocombustibles

En este caso la materia prima ha de ser producida y no meramente extraída. Multitud de fuentes son válidas para ello, tanto cultivos vegetales o de algas, como grasas animales, como residuos de producción o alimenticios. En el siguiente gráfico se exponen los diferentes tipos de categorías de materia prima, y se puede observar que, aunque las algas sean muy prometedoras su producción no lo es. A la cabeza se encuentran los residuos de la agricultura y la plantación específica de cultivos para la producción de biocombustibles.

FIGURE 7. Summary of global estimates of biomass feedstock potential



Source: IRENA (2016a).

Ilustración 13 Estudio del potencial global de materias primas para la producción de biofuel entre 2010 y 2050. (Gielen et al., 2021)

Resulta importante destacar que en esta fase del ciclo la biomasa utilizada es mayoritariamente de origen vegetal por lo que hay consumo de CO₂. Esto permite que el ciclo



sea cerrado en cuanto a emisiones. A diferencia de los fósiles, que en ninguna fase consumen ninguno de los gases de efecto invernadero, sólo los emiten.

Sin embargo, respecto al agua, es contaminada con fertilizantes, abonos, insecticidas y además su uso es desviado de otras actividades tanto agrícolas, como ganaderas, industriales o para el consumo directo. Lo mismo ocurre con las tierras dedicadas a la producción de biocombustibles, pudiendo tener consecuencias devastadoras en la alimentación o la ganadería.

También es importante tener en cuenta todas las emisiones que produce la maquinaria que asiste en la producción, recolección y transporte hasta los centros de tratamiento.

Una vez la materia prima se encuentra dispuesta para su tratamiento aparecen múltiples caminos para ello, dependiendo de cuál sea la materia prima, tal y como está expuesto en el apartado 4.1. Todos esos *pathways* llevan asociados ciertas emisiones y empleo de diferentes recursos, ya sea agua, compuestos ricos en hidrógeno, calor, presión, etc.

Teniendo todas esas situaciones en cuenta, al final del proceso se encuentran en combustibles de tipo *drop-in* como en los casos anteriores, por lo que el proceso a seguir desde que salen de las “refinerías” seguiría el mismo camino que hace el queroseno convencional.

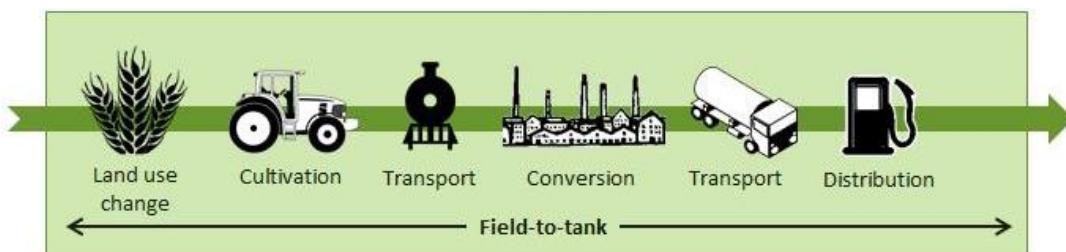


Ilustración 14 Ciclo de vida del biofuel. (ICAO/OACI, 2020)

4.5.4 Pilas de hidrógeno

En el caso del hidrógeno, también son múltiples las formas de obtenerlo. La opción más común y barata resulta de hacer reaccionar el gas natural con vapor a muy altas temperaturas. A este proceso se le llama gasificación, y es el que se emplea para la gran mayoría de la producción. En este caso la contaminación y empleo del agua, así como la necesidad térmica influyen mucho en las emisiones totales del ciclo.

Existen otras opciones que podrían hacer este ciclo renovable. La más común es la electrólisis del agua, que consiste en hacer pasar una gran corriente que separe el agua en sus dos componentes, el hidrógeno y el oxígeno. Para que sea renovable esa electricidad sólo puede venir de fuentes renovables como la solar o la eólica. En este caso el hidrógeno sería también una fuente de energía renovable. La única emisión sería O₂.

Posterior a esta fase vendría su almacenamiento y transporte, que exige unas condiciones muy limitantes y requeriría infraestructura, pero sobre todo de energía para garantizar las presiones necesarias, o de mucha más para licuar el hidrógeno y almacenarlo en tanques. Teniendo esto en cuenta, esta fase es mucho más contaminante en comparación con el queroseno convencional ya que además el hidrógeno tiene mucha menor densidad. Esto implica que, para transportar el combustible necesario para un vuelo, el hidrógeno requiere de mayor volumen, por tanto, más unidades de transporte y mayor consumo.

Hay estudios que hablan de hasta 40 veces más demanda de energía para la misma cantidad de energía que el queroseno convencional, por lo que aún es obvio que necesita de un salto tecnológico para ser económica y medioambientalmente rentable.

Una vez distribuido y listo para su empleo en las aeronaves viene el problema, de su



depósito en aeronaves. Por las necesidades de presión y temperatura los depósitos tal y como están planteados actualmente no son viables. Se necesitarían depósitos mucho más grandes, y por ejemplo, en el caso de los aviones no permitirían llevarlos en las alas. Esto haría el peso de la aeronave mucho mayor, haciéndola más limitada en las fases críticas del vuelo que son el despegue y el aterrizaje.

Sin embargo, aunque todo lo anterior no arroje aún mucha luz, las emisiones producidas en ese empleo final en los motores si lo hace. Sólo producen agua, H_2O , que es muy importante a la hora de comparar entre las alternativas.

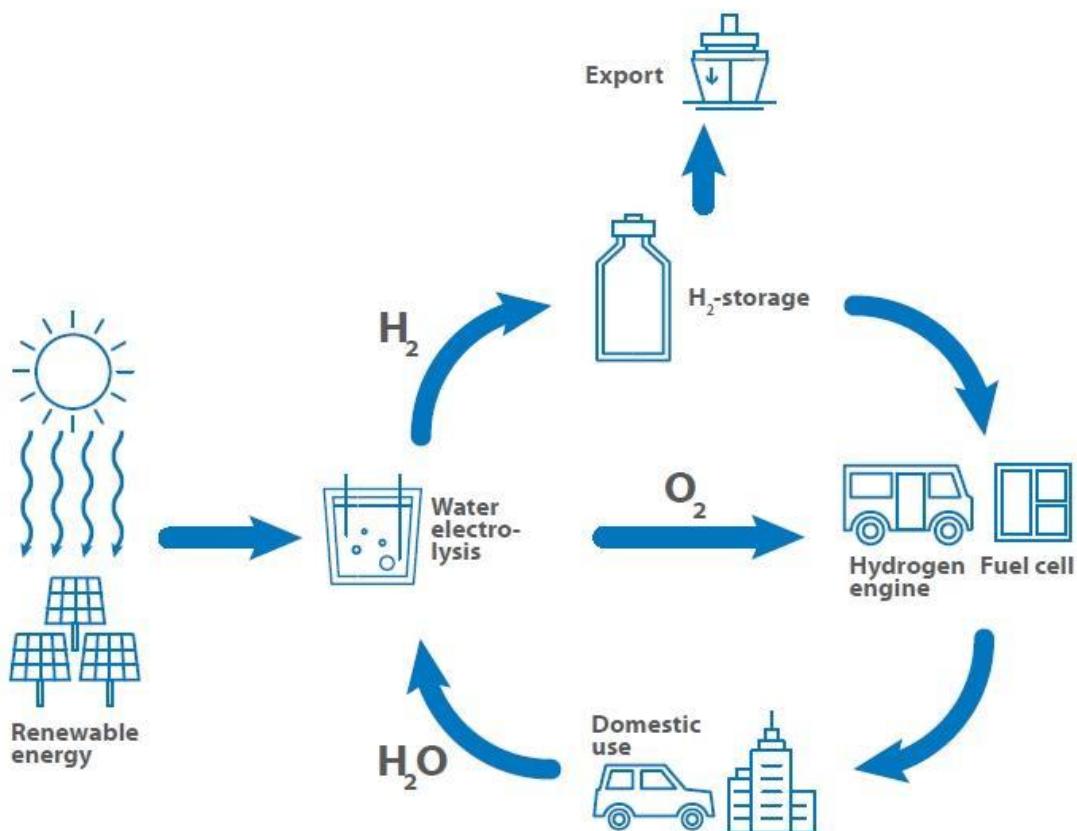


Ilustración 15 Ciclo de vida renovable en base al hidrógeno producido por hidrólisis. (Gizem, 2018)

4.6 COSTES

Hasta este punto el informe se centra en las diferentes fuentes de energía disponibles en el momento para la aviación que podrían ser aplicables en el corto medio plazo, y sus consideraciones medioambientales, así como la viabilidad técnica de su implantación. Todas ellas tienen puntos positivos y negativos a tener en cuenta.

En lo referido a costes, se pueden tener en cuenta costes económicos, medioambientales, o el coste para la seguridad nacional. En este informe se abordarán todos de manera separada sin entrar en su valoración.

España sólo produce el 0.14% del petróleo que consume, y el 0.3% del gas natural. La dependencia energética es absoluta, por ello es importante la diversificación de las fuentes, para garantizar pleno abastecimiento ante la pérdida de cualquier país proveedor. En 2020 España importó petróleo principalmente de Nigeria, y otros países (consultar gráfico).

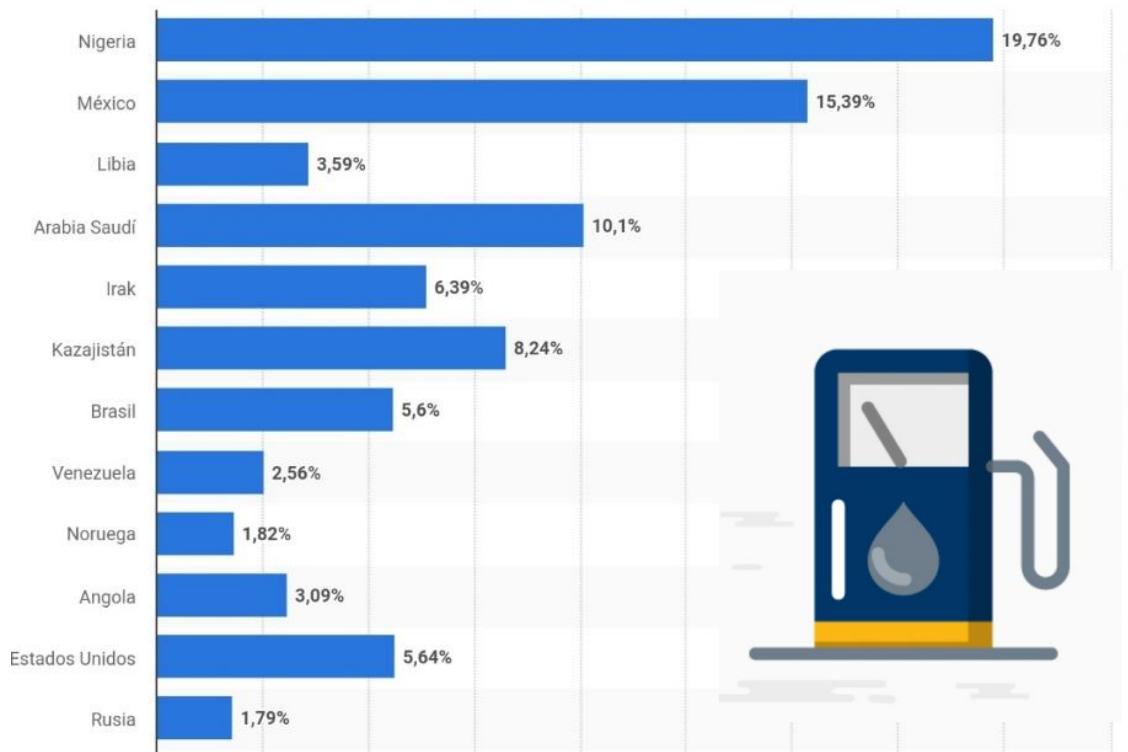


Ilustración 16 Distribución porcentual del petróleo importado por España en 2020, por país de origen. (El Economista, 2021)

El encarecimiento de la energía en estos últimos meses está pasando factura a los países que son dependientes energéticamente, y como se ha visto España es uno de ellos. Según los datos de comercio exterior del mes de julio, el gasto en energía superó los 2.000 millones de euros.

Estos datos podrían ser mejores si España invirtiese en la producción de estos combustibles alternativos y redujese la importación o exportase parte de estos a otros países. Pero por el momento es muy costosa su producción por lo que aún no es viable económicamente.

Los datos existentes a cerca de la venta de biocombustibles no son públicos. Sin embargo, se conoce el precio de venta real en Rotterdam que tuvo en septiembre de 2020, y se pagó 2124.47 USD/tonelada, lo que supone aproximadamente 1.7 USD/litro. En comparación con el combustible jet convencional es entre 3 y 6 veces más caro. (Gielen et al., 2021)

Todavía existe un salto significativo entre el precio de los combustibles convencionales y los sostenibles, debido esencialmente al alto coste de producción de la materia prima. El proceso de transformación de esta materia prima en combustible conlleva un coste muy similar al del refinamiento del petróleo para la obtención de queroseno. Sin embargo, hay que tener en cuenta la huella de carbono que dejan los combustibles, ya que según lo contaminantes que sean se están aplicando diferentes medidas en el seno de la Unión Europea, que encarecen los más contaminantes y subvencionan los más sostenibles.

Estas medidas provienen, en gran medida, del programa lanzado por la OACI en octubre de 2016, *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)* (OACI, 2020). El objetivo es que no se emitan más emisiones en los años siguientes, que el nivel alcanzado en 2020, así como reducir al 50% las emisiones de la aviación para 2050. La Unión Europea ha tomado el proyecto como propio aplicándolo a la Zona Económica Europea. El resultado es un seguimiento completo de las emisiones de las aerolíneas, y lo que es más importante para este informe, un seguimiento completo de la producción de los combustibles.

Para que un combustible sea sostenible dentro del programa CORSIA, las emisiones deben



demostrar una disminución mínima de un 10% con respecto al queroseno convencional. Además, la producción de la materia puede reducir las emisiones netas del ciclo de vida entre el 20 y el 95%, comparado con los derivados del petróleo. Esto significa que, cumpliendo estas medidas, tanto sintéticos como biocombustibles pueden beneficiarse.

El hecho de que estos combustibles sostenibles se vean beneficiados en este programa ayuda a que sean viables económicamente. Esto seguramente reduzca los costes de producción, que junto a las tasas impuestas al carbono que afectan al precio del queroseno convencional, y seguramente sigan aumentando, hace que el salto de precios entre ambos se vaya estrechando.

En 2020, la Unión Europea demostró gran interés por la descarbonización y los combustibles sostenibles con el programa Horizonte 2020 (H2020), subvencionando hasta 84.8 millones de euros €, de los cuales España aportó 2,8€ millones. (Adami et al., 2021)

Respecto al hidrógeno no hay datos concluyentes de su aplicación en aeronaves de gran tamaño. Asimismo, la tecnología aún está en una fase primitiva por lo que no es conveniente estimarlos.

4.7 SECTOR ESTRATÉGICO. SEGURIDAD NACIONAL

En 1973 tuvo lugar la guerra del Yom Kippur, iniciada por Siria y Egipto contra Israel, que provocó que los estados árabes cortasen los suministros de petróleo contra las naciones que apoyaban a Israel (El Orden Mundial, 2021). En estas últimas décadas Rusia ha usado las exportaciones de petróleo y gas para presionar económicamente a Ucrania debido a las tensiones entre ambas naciones, para obtener así concesiones políticas (Pardo de Santayana, 2021). En Ucrania temen que se complete el nuevo viaducto *Nordstream 2* que permite el suministro directo a Alemania sin pasar por Ucrania, entonces Putin tendrá el poder de cortar el gas a placer, y puede que sea este invierno.

El tráfico de drogas en México ha dado suficiente poder y control a los cárteles, como los Zetas, que lideran la exportación ilegal de gasolina robada a empresas como PEMEX (El Mundo, 2017), afectando enormemente a los precios. La disputa entre Marruecos y Argelia ha supuesto la ruptura de relaciones entre ellos y el cierre del suministro de gas argelino a España a través de Marruecos, lo que ha conllevado acciones diplomáticas desde el gobierno español para asegurar todo el suministro por la vía directa, empeorando la relación España-Marruecos (El Economista, 2021).

Todos estos ejemplos ilustran la magnitud de la influencia que tienen las políticas internacionales y los conflictos en la disponibilidad y el precio del petróleo en España, y en el mundo en general. La energía supone para España una dependencia completa de la importación, lo que constituye un gran problema de seguridad nacional, ya que cualquier disputa con los países exportadores puede tener un gran impacto en la disponibilidad de combustible y puede llegar a crear situaciones de emergencia nacional, como se ha podido observar en los últimos meses en Reino Unido, donde ha tenido que intervenir el ejército británico para paliar la necesidad de transportistas. (France24, 2021)

La energía resulta una herramienta coercitiva a merced de unos pocos países, y conseguir la independencia energética es la única medida para reducir esa influencia y aumentar la soberanía.

Como hemos visto en apartados anteriores, la realidad de los combustibles sintéticos y de las pilas de hidrógeno es que las materias primas utilizadas para su producción también son combustibles fósiles, y España no tiene reservas ni de petróleo ni de gas, y la extracción de carbón es de las más caras de Europa. Por lo que para reducir la dependencia energética la mejor de las optativas resulta de la producción de biocombustibles.



4.8 ALTERNATIVAS RECHAZADAS EN EL ESTUDIO

Las alternativas energéticas al petróleo que existen o se están estudiando en la actualidad no son todas las que se han tratado en el trabajo. Hay algunas que incluso parecerían evidentes porque están siendo empleadas en drones o en otro tipo de aeronaves, pero en este apartado se discutirá por qué han sido rechazadas para su empleo en helicópteros militares.

El caso más evidente es el de baterías eléctricas como las que se están utilizando en los drones de menor tamaño. Estas baterías son generalmente de polímeros de ion Litio, y se emplean en dispositivos de bajo peso, proporcionando una autonomía que varía entre los 10 y los 30 minutos en drones de ala rotatoria. Esta tecnología es rechazada por la autonomía tan limitada, así como la potencia insuficiente para desempeñar el tipo de misiones de helicópteros, en los que se carga peso y se mantiene vuelo estacionario, situación en la que más demanda de potencia hay.

Además, también supone una limitación la carga de las baterías, ya que es habitual en los helicópteros los denominados repostajes en caliente, en los que la aeronave aterriza en un puesto de repostaje montado en cualquier lugar, y sin parar los motores se rellena el tanque de combustible de nuevo. El hecho de necesitar tiempo para cargar las baterías en caso de poder usarse limita mucho los tiempos de uso.

Otra de las alternativas al petróleo sería la combustión de hidrógeno, como se utiliza en los motores cohete. En esta alternativa apenas se encuentran ventajas, porque para poder obtener la cantidad de hidrógeno necesaria para hacer funcionar tantas aeronaves sería imposible hacerlo de manera sostenible, y vendría también de reservas fósiles de gas natural.

Además, la combustión de hidrógeno es ideal para motores cohete porque no tienen partes móviles, no requieren enfriamiento incluso trabajando por encima del punto de fusión de los materiales de la cámara y tobera, sin embargo, es el que más ruido produce y en algunos casos no se puede detener la reacción. Todo esto lo hace totalmente inviable para el empleo en aeronaves, sin siquiera tener en cuenta que sería necesario incorporar el comburente con un sistema similar al del combustible. Todo hace evidente que sólo es útil para aplicaciones espaciales.



5. CONCLUSIONES

El desarrollo y uso de combustibles alternativos en la aviación militar se puede justificar desde diferentes perspectivas: el desarrollo de nuevas fuentes de energía para reducir el cambio climático, el desarrollo de combustibles alternativos para reducir la dependencia de las importaciones de petróleo y electricidad, reducir la influencia de los países exportadores sobre España y su política exterior, apoyar la industria estatal con la consecuente creación de empleo o la vida limitada de los combustibles fósiles, son razones que ejemplifican la necesidad del desarrollo de los combustibles alternativos.

Esa necesidad de desarrollar diferentes alternativas al petróleo es la base desde la que se desarrolla este trabajo. Por esa razón se han tratado las más viables, para poder determinar que le supondría al Ejército de Tierra hacerle frente a este cambio. De ello se sacan varias conclusiones clave:

- Para el uso de combustibles alternativos en la aviación militar, primero su producción ha de ser rentable para las empresas productoras. Aún no lo es, pero puede conseguirse mediante ayudas gubernamentales o por mejoras tecnológicas que abaraten los costes de fabricación. El precio tiene que ser menor que producir combustible a partir del petróleo.
- Las Fuerzas Armadas sólo podrían emplear los combustibles alternativos si el sector civil, o las Fuerzas Armadas en cooperación con este los desarrollan. Para ello es primordial la cooperación y subvención por parte del gobierno y de las arcas europeas. Muchas empresas civiles como Airbus o Repsol ya están usándolos y desarrollándolos con resultados positivos. Fuera de las fronteras españolas, empresas como Boeing o la NASA también lideran las investigaciones de este mercado.
- Los combustibles sintéticos y los biocombustibles constituyen el mayor potencial, tal y como muestra el análisis hecho en el documento. Las pilas de hidrógeno no suponen una alternativa actualmente, debido a la logística, las limitaciones técnicas de su empleo, y la transformación absoluta que necesitarían las aeronaves.
- Aunque los combustibles sintéticos han demostrado cumplir los requerimientos de operatividad para su uso en aviación militar, no suponen una solución para los problemas medioambientales. Por ello, los biocombustibles son los más prometedores para atajar todas las perspectivas desde una solución conjunta.

Gracias a toda la información estudiada podemos afirmar que los biocombustibles son los más prometedores. Por ello también se definen unas claves para su uso y desarrollo:

- Los biocombustibles son renovables, *drop-in* y compatibles con los motores actuales. Las mezclas de hasta el 50% con combustibles fósiles cumplen todos los requisitos para su uso en aeronaves, por lo que sus motores no requieren de ninguna adaptación. Los ensayos en aeronaves militares en otros ejércitos así lo han demostrado, y en aviación civil grandes aerolíneas usan mezclas del 5-10% de biocombustible de forma habitual.
- Se ha de acelerar y desarrollar la producción de la materia prima, principalmente la de tercera generación, o al menos de cultivos rotacionales, para así evitar desplazar en el mercado a la agricultura y que sea viable su producción en las mismas tierras. Esto tendrá como consecuencia mayores consumos de agua y de químicos que deberán ser evaluados para no agravar problemas de fertilidad en las tierras y contaminación de aguas.
- Aunque todo suceda de forma ideal, la producción sólo podría cubrir un cierto porcentaje del consumo de queroseno convencional, por lo que el resultado será mezclas de combustible, por lo que habrá que certificar diferentes mezclas de biocombustibles con



queroseno convencional o sintético a través del proceso Fischer-Tropsch.

- El coste de producción de los biocombustibles todavía es elevado. Sin embargo, el coste del hidroprocesamiento de los aceites es similar al proceso de refinado del petróleo. Esto hace evidente la necesidad de mejorar la eficiencia de producción de aceites, potencialmente con las algas y materias primas de tercera generación para la producción de biofuels.

Por último, creo que las necesidades de información a cubrir para completar este análisis y estimar un proyecto completo a cerca del empleo de biocombustibles en la Aviación del Ejército de Tierra son: un análisis de disponibilidad de terrenos aptos para la producción de materia prima, así como un análisis de costes que contemplase la producción de materia prima, la creación de la industria necesaria para cubrir la producción, y los costes de producción y transporte del biocombustible.



6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adami, R., Lamberti, P., Tucci, V., Guadagno, L., Valdés, R. A., Zaporozhets, O., Wacnik, P. & Burmaoglu, S. (2021). "Alternative fuels for aviation: possible alternatives and practical prospects of biofuels". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1024(1). DOI: 10.1088/1757-899X/1024/1/012113 [Consultado 02-10-2021]
- AIRBUS (2020). *Hydrogen Fuel cells, explained*. Disponible en: <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2020-10-hydrogen-fuel-cells-explained> [Consultado 28-09-2021]
- Arat, H. T. & Sürer, M. G. (2018). "State of art of hydrogen usage as a fuel on aviation". *European Mechanical Science*, 2(1), pp. 20–30. DOI: 10.26701/ems.364286
- Atwood, S. K. (2009). *Alternative Fuel Sources for Military Aviation*. Degree of Master of Military Studies. Marine Corps University
- CAPP (2018). *Crude Oil Extraction and Drilling Methods*. Disponible en: <https://www.capp.ca/oil/extraction/> [Consultado 30-09-2021]
- Daggett, D. L., Hendricks, R. C., Walther, R., & Corporan, E. (2008) National Aeronautics and Space Administration (NASA). *Alternate Fuels for Use in Commercial Aircraft*. Disponible en: <http://www.sti.nasa.gov> [Consultado 28-09-2021]
- El Economista (2021). "El Gobierno activa la maquinaria diplomática para garantizar el suministro de gas a España en medio de la disputa entre Argelia y Marruecos". *El Economista*, 29 de septiembre. Disponible en: <https://www.eleconomista.es/energia/noticias/11410681/09/21/El-Gobierno-activa-la-maquinaria-diplomatica-para-garantizar-el-suministro-de-gas-a-Espana-en-medio-de-la-disputa-entre-Argelia-y-Marruecos.html> [Consultado 30-09-2021]
- El Mundo (2017). "El millonario negocio de gasolina de los narcos mexicanos". *El Mundo Internacional*. Disponible en: <https://www.elmundo.es/internacional/2017/05/13/5915d341e2704e39188b4579.html> [Consultado 06-10-2021]
- El Orden Mundial (n.d.). "17 de octubre de 1973: el embargo árabe provoca una crisis del petróleo". *El Orden Mundial EOM*. Disponible en <https://elordenmundial.com/hoy-en-la-historia/17-octubre/17-de-octubre-de-1973-el-embargo-arabe-provoca-una-crisis-del-petroleo/> [Consultado 06-10-2021]
- European Aviation Safety Agency, European Environment Agency, & Eurocontrol. (2016). *European aviation environmental report 2016*. DOI: 10.2822/385503
- France24 (2021). "Pénurie de carburant au Royaume-Uni : l'armée approvisionnera dès lundi les stations-service". *France24*, 2 de octubre. Disponible en: <https://www.france24.com/fr/europe/20211002-p%C3%A9nurie-de-carburant-au-royaume-uni-l-arm%C3%A9e-approvisionnera-d%C3%A8s-lundi-les-stations-service> [Consultado 02-10-2021]
- Gielen, D., Kang, S., Durrant, P., Masuyama, T., Saddler, J., & van Dyk, S. (2021) International Renewable Energy Agency. *Reaching zero with renewables: Biojet fuels*. Disponible en www.irena.org [Consultado 29-09-2021]
- Goltz, M. N., Bleckmann, C. A., Mackay, D. M., Vuong, K., & Mccomb, J. P. (2011) Air Force Institute of Technology. "Unintended Consequences: Potential Downsides of the Air Force's Conversion to Biofuels". *Air & Space Journal*. Disponible en <http://www.airpower.au.af.mil> [Consultado 01-10-2021]



- Hemighaus, G., Boval, T., Bacha, J., Barnes, F., Franklin, M., Gibbs, L., Hogue, N., Jones, J., Lesnini, D., Lind, J., & Morris, J. (2007) Chevron. *Aviation Fuels Technical Review*. Disponible en <http://www.chevron.com/productsservices/aviation/> [Consultado 02-10-2021]
- Huang, W. D., & Zhang, Y. H. P. (2011). "Energy efficiency analysis: Biomass-to-wheel efficiency related with biofuels production, fuel distribution, and powertrain systems". *PLoS ONE*, 6(7). DOI: 10.1371/journal.pone.0022113
- Ibáñez de Aldecoa Quintana, J. (2014). "Niveles de madurez tecnológica: Technology readiness levels: TRLs: una introducción". *Economía industrial*, 1(393). Disponible en <https://www.mincetur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/393/NOTAS.pdf> [Consultado 03-10-2021]
- Insitu (2021). *Insitu advances its Fuel Cell Strategy*. Disponible en: <https://www.insitu.com/news/insitu-advances-its-fuel-cell-strategy> [Consultado 08-10-2021]
- Instituto Nacional de Estadística (INE). (2019). *España en cifras 2019*. Disponible en https://www.ine.es/prodyser/espa_cifras/2019/40/#zoom=z [Consultado 07-10-2021]
- International Civil Aviation Organization. (2019). *Resolution A40-19: Consolidated statement of continuing ICAO policies and practices related to environmental protection - Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)*. Disponible en https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Assembly/Resolution_A40-19_CORSIA.pdf [Consultado 01-10-2021]
- Keith, R (2014). U.S. Army. *Engineers test biofuel in helicopters*. Disponible en: https://www.army.mil/article/136334/engineers_test_bio_fuel_in_helicopters [Consultado 02-10-2021]
- Kolosz, B. W., Luo, Y., Xu, B., Maroto-Valer, M.M., Andresen, J.M. (2020). "Life cycle environmental analysis of 'drop in' alternative aviation fuels: a review". *The Royal Society of Chemistry, Sustainable Energy & Fuels*, 7, pp. 3229–3263. DOI: 10.1039/c9se00788a
- Marshall, M. (2006). "Timeline: Climate Change". *NewScientist*. Disponible en <https://www.newscientist.com/article/dn9912-timeline-climate-change/> [Consultado 25-10-2021]
- Pardo De Santayana, J. (2021). "¿Por qué a Rusia le interesa tanto Ucrania?". *Instituto Español de Estudios Estratégicos, Documento Análisis*, pp. 1–14. Disponible en http://www.ieee.es/Galerias/fichero/docs_analisis/2021/DIEEA25_2021_JOSPAR_Rusia.pdf [Consultado 06-10-2021]
- Prussi, M., O'Connell, A., & Lonza, L. (2019). "Analysis of current aviation biofuel technical production potential in EU28". *Biomass and Bioenergy*, 130, pp. 1–8. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105371> [Consultado 02-10-2021]
- Repsol (2016). *Refinación del petróleo y obtención de sus productos derivados*. Disponible en: <https://www.repsol.com/es/conocenos/que-hacemos/refino/index.cshtml> [Consultado 04-10-2021]
- Ritchie, H (2020). "Climate change and flying: what share of global CO2 emissions come from aviation?" *Our World In Data*, 22 de octubre. Disponible en: <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-aviation> [Consultado 28-09-2021]
- Rocca, S., Agostini, A., Giuntoli, J., & Marelli, L. (2015). "Biofuels from algae: technology options, energy balance and GHG emissions". DOI: 10.2790/125847
- Swedish Armed Forces Headquarters.(2020). *Successful test with fossil-free fuel*. Disponible en: <https://www.forsvarsmakten.se/en/news/2020/12/successful-tests-with-fossil-free-fuel/> [Consultado 03-10-2021]



Tao, L., Milbrandt, A., Zhang, Y., & Wang, W. C. (2017). "Techno-economic and resource analysis of hydroprocessed renewable jet fuel". *Biotechnology for Biofuels*, 261(10), pp. 1–16. DOI: 10.1186/s13068-017-0945-3

The FreedomCAR and Fuel Partnership. (2009). *Hydrogen Production: Overview of Technology Options*. Disponible en

https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/h2_tech_roadmap.pdf

[Consultado 01-10-2021]

Urbansky, F. (2020). "The Potential of Synthetic Fuels". *MTZ Worldwide*, 81(1), pp. 8–13.

U.S. Department of Energy (2009). *Technology Readiness Assessment Guide*. Disponible en www.directives.doe.gov [Consultado 07-10-2021]



ANEXOS

Anexo I: Distribución de las unidades FAMET

Las FAMET, Fuerzas Aeromóviles del Ejército de Tierra, se encuentran, bajo el Mando de un General de Brigada, desplegadas de la siguiente forma:

- Cuartel General de las FAMET en Colmenar Viejo (Madrid).
- Batallón de Helicópteros de Ataque I en Almagro (Ciudad Real), en base al helicóptero Tigre.
- Batallón de Helicópteros de Emergencia II en Bétera (Valencia), en base al helicóptero Cougar/Superpuma.
- Batallón de Helicópteros de Maniobra III en Agoncillo (La Rioja), en base al helicóptero NH-90.
- Batallón de Helicópteros de Maniobra IV en Dos Hermanas (Sevilla), en base al helicóptero Cougar/Superpuma.
- Batallón de Helicópteros de Transporte V en Colmenar Viejo (Madrid), en base al helicóptero Chinook.
- Batallón de Cuartel General de las FAMET en Colmenar Viejo (Madrid), en base al helicóptero Cougar.
- Grupo Logístico de las FAMET en Colmenar Viejo (Madrid).

Otras Unidades de Aviación del ET, vinculadas a las FAMET, y con dependencia orgánica a otros Mandos son:

- Batallón de Helicópteros de Maniobra VI en La Laguna (Santa Cruz de Tenerife), en base al helicóptero Cougar. Orgánicamente pertenece al MACAN.
- Academia de Aviación del Ejército de Tierra (ACAVIET), en base al helicóptero EC-135. Orgánicamente pertenece al MADOC.
- Parque y Centro de Mantenimiento de Helicópteros (PCMHEL). Orgánicamente pertenece al MALE.