Universitat Autònoma
de Barcelona

Investigación sobre el nuevo motor de pila de combustible impulsado por Hidrógeno del nuevo proyecto ZEROe de la compañía Airbus.

Memoria del Trabajo Fin de Grado en Gestión Aeronáutica

realizado por

Juan Antonio Linares Gallego

y dirigido por

Ramon Anton Piera Eroles

Escuela de Ingeniería

Sabadell, junio de 2023

El abajo firmante, **Ramon Anton Piera Eroles** director del Trabajo de Fin de Grado, profesor de la Escuela de Ingeniería de la UAB,

CERTIFICA:

Que el trabajo al que corresponde la presente memoria ha sido realizado bajo su dirección por

Juan Antonio Linares Gallego

Y para que conste firma la presente en Sabadell, junio de 2023.

RAMON ANTON PIERA EROLES - DNI 46656113S

Firmado digitalmente por RAMON ANTON PIERA EROLES - DNI 46656113S
Fecha: 2023.06.28 17:49:33 +02'00'

Firmado: **Ramon Anton Piera Eroles**

UAB
Universitat Autònoma de Barcelona

HOJA DE RESUMEN – TRABAJO DE FIN DE GRADO DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA

Título del Trabajo de fin de grado: Investigación sobre el nuevo motor de pila de combustible impulsado por Hidrógeno del nuevo proyecto ZEROe de la compañía Airbus. Recerca sobre el nou motor de pila de combustible impulsat per Hidrogen del nou projecte ZEROe de la companyia Airbus. Research on the new hydrogen-powered fuel cell engine of the new Airbus ZEROe project.	
Autora: Juan Antonio Linares Gallego	**Data:** Junio 2023
Tutoras: Ramon Anton Piera Eroles	
Titulación: Grado en Gestión Aeronáutica	
Palabras clave • Castellano: Hidrógeno (H_2), Airbus, Combustible de Aviación Sostenible (SAF), combustibles fósiles, emisiones de CO_2, queroseno, Vueling. • Català: Hidrogen (H_2), Airbus, Combustible d'Aviació Sostenible (SAF), combustibles fòssils, emissions de CO_2, querosè, Vueling. • English: Hydrogen (H_2), Airbus, Sustainable Aviation Fuel (SAF), fossil fuels, CO_2 emissions, kerosene, Vueling.	
Resumen del Trabajo de Fin de Grado • Castellano: En este trabajo se realiza una investigación sobre el nuevo motor de pila de combustible impulsado por hidrógeno. Para llevarlo a cabo se ha realizado un estudio sobre el proyecto ZEROe de la compañía Airbus. Además, se han analizado las diferentes implicaciones técnicas, económicas y legislativas, así como posibles cambios a nivel aeroportuario. • Català: En aquest treball es realitza una recerca sobre el nou motor de pila de combustible impulsat per hidrogen. Per a dur-ho a terme s'ha realitzat un estudi sobre el projecte ZEROe de la companyia Airbus. A més, s'han analitzat les diferents implicacions tècniques, econòmiques i legislatives, així com possibles canvis a nivell aeroportuari. • English: In the present work, an investigation of the new hydrogen-powered fuel cell engine is carried out. To carry it out, a study of the ZEROe project of the Airbus company has been carried out. In addition, the different technical, economic, and legislative implications have been analyzed, as well as possible changes at the airport level.	

Índice de Contenido

1. INTRODUCCIÓN 8
1.1. Objetivos 9
1.2. Motivación 9
1.3. Introducción sobre el Hidrógeno 10
1.4. Hidrógeno verde para la aviación 11
2. AIRBUS ZEROE 12
2.1. Road Map Airbus 13
2.2. Presentación de los modelos ZEROe 15
2.3. Configuración Turboprop 15
2.3.1. Configuración "Pod" 16
2.4. Configuración Turbofan 17
2.5. Configuración Blended-Wing Body 17
2.6. Alcance de los modelos ZEROe 19
3. LÍNEA TEMPORAL DEL PROYECTO 20
3.1. Sustainable Aviation Fuel - SAF 21
3.1.1. Cómo se elabora el SAF 21
3.2. Estado actual del proyecto 22
3.2.1. Distribución de los nuevos sistemas en el fuselaje 23
3.3. Próximos años 25
4. IMPLICACIONES TÉCNICAS 26
4.1. Implicaciones técnicas en referencia al diseño 26
4.2. Implicaciones técnicas en referencia a la fabricación. 27
4.3. Cómo almacenar hidrógeno líquido 28
4.4. Vuelo híbrido y eléctrico 29
5. IMPLICACIONES ECONÓMICAS 30
5.1. Inversión en investigación y desarrollo 30
5.2. Inversión en nuevas infraestructuras 30
5.3. Medidas gubernamentales 31
5.4. Modificaciones en el mantenimiento de aeronaves 31
5.5. Mecanismos de financiación 32
5.5.1. Mecanismos de financiación nacional 32
5.5.2. Mecanismos de financiación europea 32
5.6. Comparación de costes entre la actualidad y un posible escenario económico del proyecto ZEROe 33
6. IMPLICACIONES LEGISLATIVAS 35
6.1. Estándares y regulaciones 35
6.2. Instrumentos regulatorios 36

6.2.1. Simplificación administrativa y eliminación de barreras regulatorias 36
6.2.2. Regulaciones en el transporte aéreo 36
6.3. Regulación de emisiones e impuestos o incentivos relacionados 36
6.4. Certificados de aeronaves, centros de mantenimiento y personal 37
6.5. Evolución hasta 2050 de implicaciones legislativas 38
6.6. Evolución hidrógeno en los próximos años 39
7. IMPLICACIONES A NIVEL DE MODELO DE GESTIÓN AEROPORTUARIA 40
7.1. Nuevas infraestructuras aeroportuarias 40
7.1.1. Producción de hidrógeno 41
7.1.2. Almacenamiento de hidrógeno 41
7.2. Nuevos equipos de suministro para aviones 42
7.3. Modificaciones en procesos de escala 43
7.3.1. Proceso de reabastecimiento de hidrógeno 43
7.3.2. Proceso de carga de pasajeros y equipaje 44
7.4. Estrategia de AENA 45
8. PUNTO DE VISTA DE UN OPERADOR – VUELING 47
8.1. Opinión de Vueling sobre el proyecto ZEROe 47
8.1.1. Mejora de la eficiencia de las operaciones 48
8.1.2. Uso de SAF como combustible 48
8.1.3. Renovación de la flota y reducción de peso 49
9. ROAD MAP DE AIRBUS EN LA REDUCCIÓN DE CO2 50
9.1. Evolución hasta 2035 y transición a SAF 52
9.2. Evolución a partir de 2035 53
10. CONCLUSIONES 54
10.1. Conclusiones sobre objetivos 54
10.2. Conclusiones personales 55
Referencias 57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figure 1. Proceso de producción de Hidrógeno. Fuente: TÜV SÜD 10
Figure 2. ZEROe concept aircraft. Fuente: AIRBUS 12
Figure 3. Road Map. Fuente: AIRBUS 13
Figure 4. Aviation's path towards zero emissions. Fuente: AIRBUS 14
Figure 5. Tabla comparativa de los diferentes modelos ZEROe. Fuente: Elaboración propia 15
Figure 6. Turboprop Concept. Fuente: AIRBUS 16
Figure 7. The "Pod" configuration. Fuente: AIRBUS 16
Figure 8. Turbofan Concept. Fuente: AIRBUS 17
Figure 9. Blended-Wing Body Concept. Fuente: AIRBUS 18
Figure 10. Alcance de 2.000 nm desde Francia. Fuente: AIRBUS 19
Figure 11. Alcance de 1.000 nm desde Francia. Fuente: AIRBUS 19
Figure 12. Evolución en la investigación de vuelos eléctricos. Fuente: AIRBUS 20
Figure 13. The lastest generation of fue-efficient AIB Family aircraft. Fuente: AIRBUS 21
Figure 14. How is SAF made? Fuente: Air bp 22
Figure 15. Demostrador de combustión de hidrógeno. Fuente: AIRBUS 22
Figure 16. Ubicación de los tanques de hidrógeno. Fuente: AIRBUS 23
Figure 17. Objetivos de Airbus durante los próximos años. Fuente: AIRBUS 25
Figure 18. Principales fuerzas en vuelo. Fuente: Flightdemy 26
Figure 19. Disposición de los tanques de hidrógeno. Fuente: AIRBUS 28
Figure 20. Liquid H2 tank. Fuente: AIRBUS 28
Figure 21. Aircraft hybridisation principles during the flight phases. Fuente: AIRBUS 29
Figure 22. Cost Comparison of H2 short-range aircraft versus kerosene and synfuel aircraft. FUENTE: CleanSky2 33
Figure 23. Comparación de costes LH2 - Queroseno 34
Figure 24. Road map - integración medidas legislativas 38
Figure 25. Three primary hydrogen supply chain/pathways into the airport. FUENTE: Aerospace Technology Institute 40
Figure 26. Three primary hydrogen supply chain/pathways into the airport. FUENTE: Aerospace Technology Insistute 41
Figure 27. 20 m diameter LH2 storage tank in NASA Kennedy Space Centre. FUENTE: Aerospace Technology Institute 42
Figure 28. Hydrogen supply chain inside the airport. FUENTE: Aerospace Technology Institute 42
Figure 29. Options for hydrogen aircraft refuelling at the gate. FUENTE: Aerospace Technology Institute 44
Figure 30. Inversiones AENA periodo 2021-2030. FUENTE: AENA 45

Figure 31. Programas sostenibilidad AENA. FUENTE: AENA 45
Figure 32. Transición estratégica de sostenibilidad AENA. FUENTE: AENA 46
Figure 33. Objetivos de sostenibilidad de Vueling. FUENTE: Vueling 47
Figure 34. Mejora de la eficiencia en el uso del cielo europeo. FUENTE: Vueling 48
Figure 35. Proceso repostaje. FUENTE: Vueling 48
Figure 36. Nuevo A321 NEO - EC-NYD. FUENTE: Vueling 49
Figure 37. Aviation CO2 reduction roadmap. FUENTE: AIRBUS 50
Figure 38. Airbus engagement on SAF. FUENTE: AIRBUS 51
Figure 39. Market Based Measures. FUENTE: AIRBUS 52
Figure 40. Modelos de avión de nueva generación. FUENTE: AIRBUS 52
Figure 41. A surrogate for renewable energy, key enabler for aviation's targets. FUENTE: AIRBUS 53

1. INTRODUCCIÓN

Con el paso de los años la aviación ha ido ganando importancia en la sociedad actual, una sociedad cada vez más acostumbrada a poder viajar, además de transportar diversos tipos de mercancía, como carga o correo, de la forma más veloz posible. Por lo que dicha sociedad es incapaz de concebir un futuro sin la disposición de un medio de transporte, el transporte aéreo, el cual nos dota de un gran número de ventajas.

Sin embargo, somos conocedores de que la aviación no únicamente nos presta ventajas, sino que durante los últimos años desde el sector se presenta una preocupación, la cual es la cantidad de toneladas de Dióxido de Carbono o CO_2 emitidas a nuestra atmosfera.

En el año 2019, último año durante el cual la aviación registró un número de operativa sin ninguna alteración provocada por la crisis pandémica del COVID19, se registraron únicamente en Europa un total de 4.065.462 kilotoneladas de equivalente de CO_2. Según *The Intergovernamental Panel on Climate Change* (IPCC), la cantidad de emisiones procedentes del sector aeronáutico representan un 4% del total [1].

Consecuentemente, este factor en el cual convivimos podría provocar, junto a otras emisiones de gases de efecto invernadero provocaría superar en 1,5ºC y 2ºC el calentamiento global [2].

Por parte del sector aeronáutico, el cual permanentemente está en evolución y buscando mejorar esta modalidad de transporte, para ser el transporte más seguro y eficiente del mundo, se proponen diferentes soluciones ante esta problemática, como podrían ser la implementación de nuevas tecnologías de aeronaves, mejoras operativas, combustibles alternativos, entre otros.

Mediante el contexto anterior, el presente Trabajo de Fin de Grado (TFG) se centrará en desarrollar la solución la cual implementa la utilización de hidrógeno como alternativa al queroseno tradicional, mediante el nuevo proyecto Zero-Emission de la compañía Airbus.

Este estudio se centrará en explicar brevemente, para disponer de un contexto, sobre la utilización del hidrógeno y todo lo relacionado con el proyecto ZEROe, para posteriormente centrarnos en explicar el proyecto presentado por Airbus, así como una comparativa con la utilización del combustible tradicional. Además de realizar el estudio referente a la viabilidad técnica y económica, y de los cambios y/o modificaciones que conllevaría.

Asimismo, en el presente Trabajo de Fin de Grado se podrá encontrar un apartado dedicado a explicar un poco la estrategia que tiene una compañía Aérea, en este caso Vueling, en relación con la mitigación de emisiones de carbono y de la opinión que tienen sobre el proyecto ZEROe propuesto por Airbus. Pues como se sabe, actualmente dicha compañía opera con diferentes modelos de aeronave de Airbus.

1.1. Objetivos

A continuación, se presentarán los objetivos principales que presenta la realización de este trabajo. Dichos objetivos surgen a raíz de los conocimientos adquiridos en las diferentes materias realizadas durante la totalidad de los años el grado en Gestión Aeronáutica, como podrían ser las materias de Operaciones Aeroportuarias I, en primer curso. Operaciones Aeroportuarias II y Economía del Transporte Aéreo, en segundo curso. Operaciones de Aerolíneas, Técnicas de Navegación y Control de Tráfico Aéreo y Derecho Aeronáutico, en tercer curso. Mantenimiento, Sostenibilidad y Fiabilidad de la Mención en Logística del Transporte Aéreo de último curso, entre muchas otras asignaturas realizadas en el grado. A continuación, se encuentran numerados los objetivos esperados de este Trabajo de Fin de Grado.

1. Investigación sobre el uso de hidrógeno como combustible y de su aplicación en el proyecto ZEROe de Airbus.
2. Estudio sobre la rentabilidad técnica sobre la utilización de este tipo de combustible, así como de los motores.
3. Estudio sobre la rentabilidad económica sobe la implementación de este tipo de combustible, así como de los motores.
4. Investigación sobre los cambios que causaría en las instalaciones aeroportuarias.
5. Realizar un estudio sobre si este cambio de combustible podría afectar al centro de gravedad del avión.

Los resultados esperados a partir de los objetivos anteriormente expuestos son los siguientes:

1. Analizar el proyecto de Airbus, sobre sus motores impulsados por hidrógeno, cuál es su objetivo y hasta donde pretenden llegar con este proyecto.
2. Analizar las ventajas que presenta la utilización de esta alternativa al queroseno tradicional, así como su viabilidad económica y técnica.
3. Analizar que modificaciones se deberían de hacer en las infraestructuras aeroportuarias o en las cercanías de éstas, para la implementación de estos nuevos motores.
4. Analizar el impacto que tendrían estos nuevos motores en cuanto al centro de gravedad del avión, y todo lo que involucraría dicho cambio.
5. Realización de conclusiones de este estudio.

1.2. Motivación

El motivo del presente TFG nace como propuesta de Ramon Anton Piera Eroles, profesor de la facultad de Ingeniera de la Universidad Autónoma de Barcelona, además de mi inquietud acerca de las futuras evoluciones del sector aeronáutico.

Como sabemos el sector aeronáutico se encuentra continuamente en constante evolución y desarrollo para seguir establecido como el transporte más seguro del mundo; es por eso que durante los últimos años y por causa de la gran problemática del calentamiento global y la mancha de carbono desde el sector se ha estado buscando la solución para mitigar estas emisiones emitidas por la gran cantidad de operaciones realizadas continuamente, y así ajustarse a los objetivos mundiales para poder tener una mejor situación climática.

Desde mi punto de vista, considero que la integración de aviones impulsados por hidrógeno, sustituyendo así la utilización del queroseno tradicional, empleado hasta día de hoy, es la mejor solución delante del escenario actual.

Sin embargo, se presentan ciertas problemáticas que hoy en día hacen inviable este cambio a nivel mundial, que más adelante será expuesto en este Trabajo de Fin de Grado.

1.3. Introducción sobre el Hidrógeno

Entendemos el hidrógeno como el primer elemento de la tabla periódica, siendo éste el elemento químico más ligero que existe, y en condiciones normales se encuentra en estado gaseoso, siendo insípido, incoloro e inodoro [3].

La producción de este elemento puede variar según diversas materias primas, energías utilizadas y procesos. El resultado dependerá de los elementos utilizados, dependiendo de la materia prima escogida y del tipo de energía empleado podremos diferenciar de un proceso totalmente renovable, fósil o híbrido.

Por lo que dependiendo del método de producción tendremos como resultado diferentes variantes de hidrógeno. Entre los cuales podemos distinguir entre:

- **Hidrógeno Verde**. Cuando se habla de esta variante de hidrógeno se hace referencia a una variante de hidrógeno la cual ha sido obtenida sin generar emisiones contaminantes. Un combustible que ya ha sido presentado como un vector energético clave para lograr la descarbonización mundial y cumplir los compromisos para 2050 en la lucha contra el cambio climático [4].
- **Hidrógeno Amarillo**. Es una variante similar al anterior, pues tiene el mismo proceso de producción que el hidrógeno verde, pero en este caso se utiliza la energía solar [5]
- **Hidrógeno Azul.** Esta variante es producida a partir de segregación del gas natural, separando hidrógeno y CO_2, mediante el reformado de metano con vapor [6].
- **Hidrógeno Gris**. Es una variante similar a la anterior, es decir, es producida a partir de combustibles fósiles como el carbón o el gas natural. A diferencia del caso anterior, el CO_2 es liberado a la atmosfera. [7]

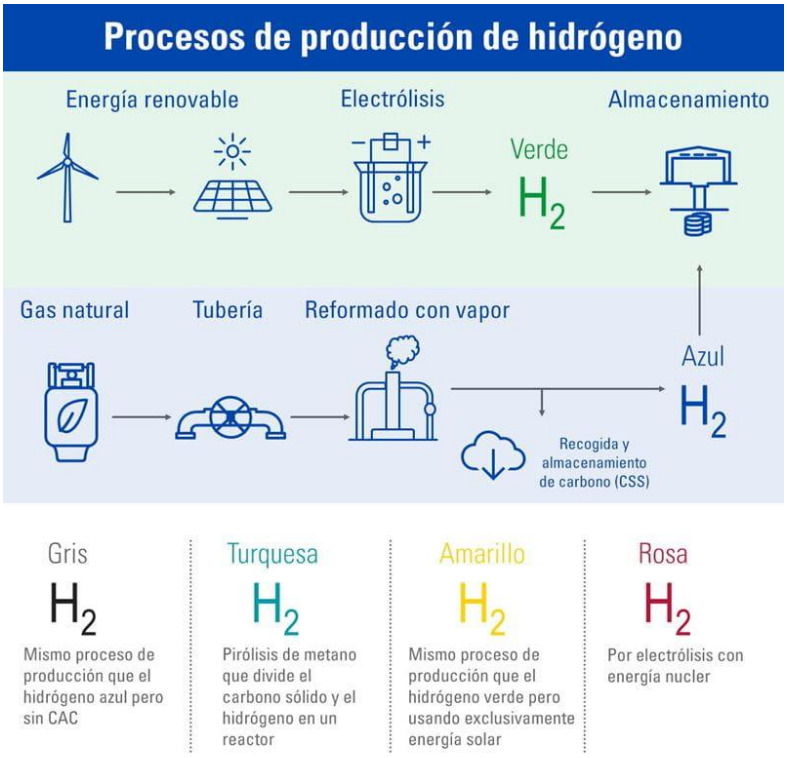

Figure 1. Proceso de producción de Hidrógeno. Fuente: TÜV SÜD

1.4. Hidrógeno verde para la aviación

Como se ha mencionado anteriormente, la alternativa del hidrógeno verde es obtenida a mediante energías renovables en el proceso de producción, lo cual lo convierte en la alternativa más sostenible y con cero índices de contaminación, siendo una de las mejores alternativas de cara a su implementación como combustible en el futuro de esta sociedad.

Cuando necesitemos convertirlo en energía, el hidrógeno almacenado en tanques específicos se canaliza hacía una celda de combustible donde se une, nuevamente, con el oxígeno del aire obteniendo así electricidad que se encargará de producir la fuerza que moverá las hélices del avión [8].

En el caso de aeronaves con turbina, en vez de hélice, sería necesario la implementación de hidrógeno líquido, generando una combustión directa de este combustible a través de una turbina de gas, lo que requeriría la licuefacción[1] del hidrógeno [9].

La utilización del hidrógeno como alternativa al queroseno tradicional presenta diversas aplicaciones potenciales para mitigar la huella de carbono generada por la aviación. Hoy en día ya se implementa como materia prima de combustible y para pilas de combustible de hidrógeno en aeronaves experimentales [10].

Sin embargo, la implementación del hidrógeno como combustible presenta diferentes desventajas, que desde el sector aeronáutico y los diferentes grupos de interés deberán intentar de solventar. A continuación, se enumeran estos inconvenientes:

- Mayor coste. La energía necesaria para producir este tipo de hidrógeno es más cara que el resto de las energías necesarias para producir otro tipo de hidrógenos, de la misma forma que es más caro que el queroseno tradicional.
- Su implementación requiere una fuerte inversión. Se cree que será necesario 300 mil millones durante los próximos años para diferentes infraestructuras e investigación [11].
- Mayor gasto energético. La producción del hidrógeno requiere más energía que otros combustibles [12].
- Elemento volátil e inflamable. Requiere mayores requisitos de seguridad para evitar posibles fugas y/o explosiones.

La adopción de este tipo de combustible presentaría un cambio significativo en las infraestructuras aeroportuarias, así como en condiciones operativas y diferentes procedimientos de seguridad, temas que se tratan más adelante en el presente trabajo.

[1] Conversión de un gas en líquido por compresión a muy bajas temperaturas.

2. AIRBUS ZEROE

Durante el año 2020 la empresa francesa Airbus anunció al mundo el inicio de su investigación e intención de realizar un cambio en el mundo aeronáutico, presentando así su idea de implementar aviones con cero emisiones de carbono.

El motivo de su investigación y desarrollo en tecnologías de hidrógeno vienen argumentadas debido al fuerte crecimiento de las emisiones de CO_2 provocadas por el sector aéreo, basándonos en cifras, estas emisiones de dióxido de carbono al mundo han aumentado en un 70% desde 2005 [13].

Debido a esta situación, una de las mayores preocupaciones del sector es la implementación de alternativas al queroseno tradicional para minimizar la huella de carbono causada por el sector aeronáutico. Por este motivo Airbus presentó tres diseños distintos cuya fuente primaria de energía será el hidrógeno, sustituyendo así el Jet-A1[2] empleado hasta la actualidad. Dichos motores únicamente expulsarían vapor de agua, evitando así emitir CO_2.

El hidrógeno líquido, empleado como combustible, se quema con el oxígeno en una turbina de gas, que posteriormente crea un sistema hibrido de propulsión eléctrica altamente eficiente, lo cual hace que las emisiones resultantes de dióxido de hidrógeno se liberan en la atmosfera libres de contaminantes, la única tecnología real de cero emisiones que es posible en el mercado hoy en día.

El factor decisivo es que el combustible de hidrógeno puede funcionar con la tecnología aeronáutica existente, pudiendo así igualar relativamente parte del potencial del combustible tradicional para aviones.

Al modificar la forma en que funciona el motor de un avión únicamente es necesario actualizar los motores a cualquier fuselaje existente, este es el motivo por el cual Airbus sea tan optimista de lanzar estos modelos al mercado para 2035.

Los tres conceptos de aeronave propuestos por Airbus son Turbofan, Turbopop y Blended-Wing Body, que más adelante se detallarán.

Figure 2. ZEROe concept aircraft. Fuente: AIRBUS

[2] JET-A1. Combustible exclusivamente de uso para aviones de turbina.

2.1. Road Map Airbus

Desde Airbus se presentó el siguiente "Road Map" el cual nos permite saber, cuáles son sus intenciones en referencia a la evolución de sus aeronaves.

Como se puede observar, en su proyecto para mitigar la huella de carbono causada por las aeronaves, emplearan una serie de combustibles alternativos al queroseno tradicional. Entre éstos podemos observar que Airbus únicamente contará con SAF, hidrógeno y electricidad.

Inicialmente, se tiene pensado implementar el SAF como combustible para los aviones, de hecho, en la actualidad ya se está utilizando este tipo de alternativa al queroseno. Sin embargo, el objetivo principal de la compañía es llegar a un modelo de avión que sea completamente eléctrico, el cuál únicamente disponga de una pila de combustible que sea transformado en energía sin ni ningún tipo de baterías, este objetivo se pretende conseguir con el modelo Blended Wing Body.

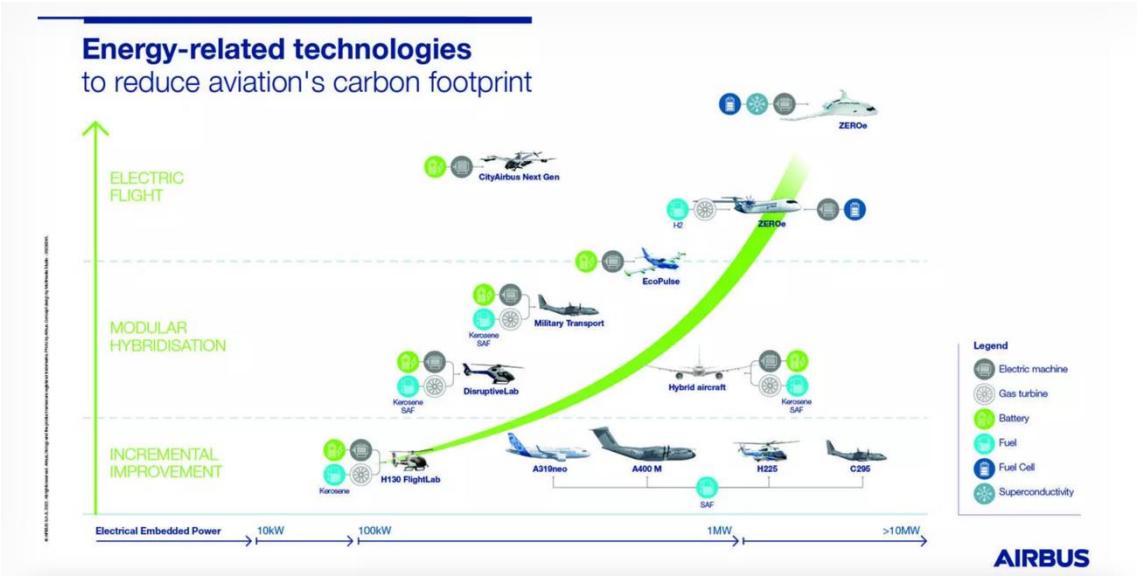

Figure 3. Road Map. Fuente: AIRBUS

Asimismo, también podemos observar, que además de buscar una evolución en el modelo hacía una aeronave que permita realizar operaciones completamente eléctricas, también se pretende realizar una evolución en los niveles de energía eléctrica incorporada, siendo uno de los motivos que permitan realizar este tipo de vuelos 100% eléctricos. El objetivo que se presenta desde Airbus para poder conseguir este tipo de aeronaves es conseguir que los niveles de energía eléctrica incorporada en sus modelos de aviones sean de más de 10MW[3].

En cuanto a las fechas de incorporación de estos modelos, que más adelante en el presente trabajo se encuentran explicados en detalle, aún no son exactas pues dicho proyecto aún se encuentra en una fase teórica. Sin embargo, se espera que en el año 2035 se incorpore a la aviación comercial el modelo Turboprop.

En la siguiente ilustración podemos observar el camino que pretenden seguir, así como la evolución en reducción de emisiones por parte de sus aeronaves.

[3] MW: El megavatio, representado como MW, es una unidad de potencia equivalente a un millón de vatios.

Figure 4. Aviation's path towards zero emissions. Fuente: AIRBUS

Como se puede apreciar, hablando de reducción de emisiones de CO_2. Nos encontramos en la mitad del camino, gracias a la incorporación de los modelos NEO de Airbus.

En referencia al proyecto Zero Emissions se encuentra en el inicio del camino, como vemos en la figura 4 se ha reducido un 50% de las emisiones por pasajero kilómetro. Para conseguir mitigar el 50% restante vemos las siguientes mejoras, en las que el sector aeronáutico tiene que trabajar:

1. Mejora de la gestión del tránsito aéreo y de las operaciones de las aeronaves.
2. Desarrollar nuevas tecnologías para motores y aeronaves.
3. Disponer de una mayor cantidad de SAF para la aviación.

La principal cuestión que surge a partir de este road map y fechas en las que Airbus planea dar estos aviones aptos para operar, es si realmente serán capaces de llegar a su objetivo, presentando en 2060 su modelo "*target*" Blended-Wing Body, juntamente con el desarrollo de una operativa la cual nos asegure un 0% de huella de carbono por parte de la aviación.

2.2. Presentación de los modelos ZEROe

En el presente apartado se presenta una tabla comparativa entre los diferentes modelos propuestos por Airbus en su proyecto Zero Emissions. Representando así, sus principales características. Para tener una mayor información sobre cada uno de estos modelos, en los siguientes apartados se desarrollará en mayor profundidad cada uno de ellos.

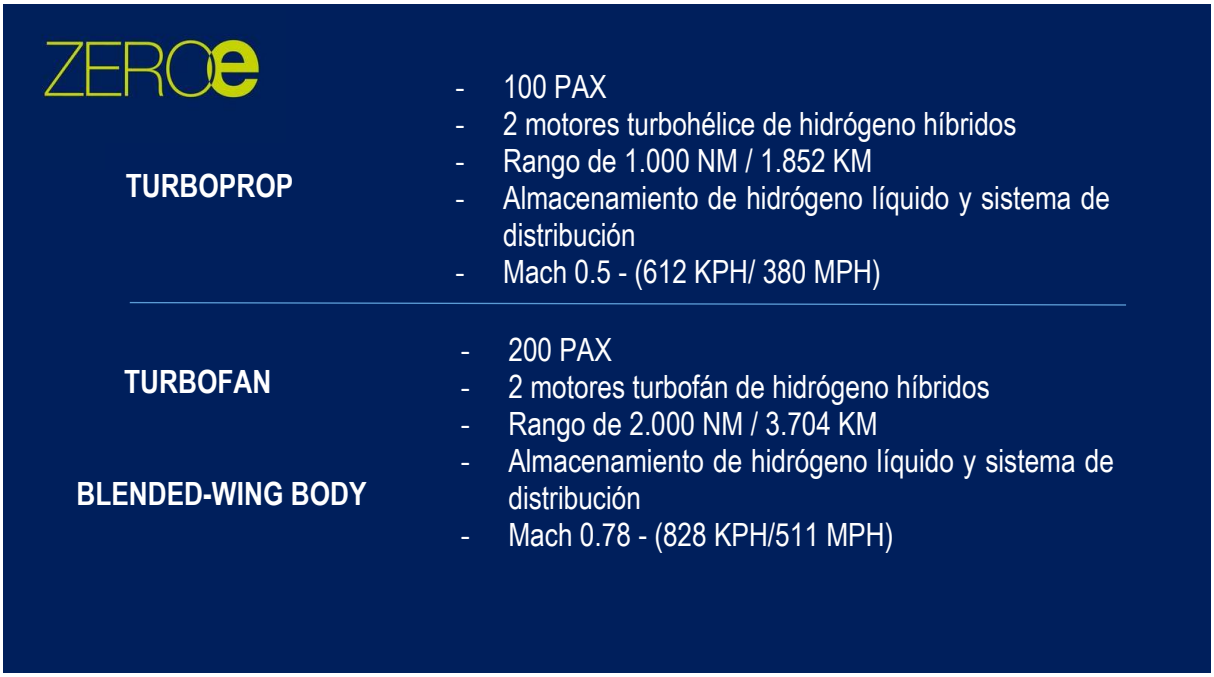

Figure 5. Tabla comparativa de los diferentes modelos ZEROe. Fuente: Elaboración propia

2.3. Configuración Turboprop

Este modelo es muy similar al ATR72 o al Q400, los cuales son utilizados principalmente en las redes regionales en la actualidad.

La configuración Turboprop es un diseño con turbohélice propulsado por combustión de hidrógeno en motores de turbina de gas modificados, permitiendo viajar más de 1.000 millas náuticas, que es lo mismo que 1.852 km. Siendo la opción perfecta para vuelos de corta distancia, como por ejemplo vuelos nacionales. Además, será capaz de poder transportar hasta 100 pasajeros [14].

Cruise speed[4]: Mach[5] 0.5 (612 KPH/ 380 MPH).

Figure 6. Turboprop Concept. Fuente: AIRBUS

2.3.1. Configuración "Pod"

Dentro del modelo Turboprop, encontramos una variante denominada como configuración *"Pod"*, una configuración totalmente diferente a lo acostumbrado a ver en pista.

Figure 7. The "Pod" configuration. Fuente: AIRBUS

La principal característica que podemos encontrar en esta variante son sus seis propulsores ubicados en los planos alares de la aeronave, cada uno de estos propulsores consta de ocho palas. Cada una de estas cápsulas es un sistema de propulsión de hélice independiente entre ellos, que son alimentados por pilas de combustible de hidrógeno [15].

Cabe destacar que estos seis motores son extraíbles, pudiéndose cambiar si fuese necesario de una forma más simple, esta configuración podría facilitar las tareas de mantenimiento que se

[4] Cruise Speed: Velocidad constante y uniforme que puede llevar una aeronave en condiciones normales de presión y temperatura, sin sufrir perturbación o variación de velocidad, altura, tracción y resistencia en el vuelo.
[5] Mach. Medida de velocidad relativa que se define como el cociente entre la velocidad de un objeto y la velocidad del sonido en el medio en que se mueve dicho objeto.

deberían realizar, permitiendo que se realizasen de una forma más rápida. Este hecho también podría ser de ayuda para facilitar el reabastecimiento de hidrógeno en los aeropuertos.

2.4. Configuración Turbofan

Este modelo se asemeja a las actuales aeronaves que podemos encontrarnos cuando vamos a realizar un viaje, como podría ser los A319, A320-NEO, A321-NEO o incluso el A350, con la única diferencia de que no causará emisiones.

La presente configuración presenta un diseño con turbofán, siendo capaz de transportar entre 120-200 pasajeros. Podría tener un alcance de 2.000 millas náuticas, o lo que es equivalente a 3.704 km, siendo capaz de realizar operaciones de más larga distancia en comparación con el modelo anteriormente presentado. Pudiendo así, realizar vuelos entre diferentes ubicaciones continentales [16].

Cruise speed: Mach 0.78 (828 KPH/511 MPH)

Figure 8. Turbofan Concept. Fuente: AIRBUS

La forma de utilizar el hidrógeno como fuente de energía para la propulsión de este modelo sería mediante la combustión de hidrógeno en una turbina de gas modificada. Además, existe la posibilidad de que el uso de una turbina de gas sea compatible con pilas de combustible, estableciendo así una estructura híbrida.

El hidrógeno líquido se almacenaría y distribuiría usando tanques que estarían ubicados detrás del mamparo presurizado trasero.

2.5. Configuración Blended-Wing Body

Sin lugar a duda, este es el concepto más interesante que ha planteado Airbus, rompiendo así con los modelos de avión vistos hasta la fecha, transportando pasajeros y carga de una manera completamente diferente a lo precedido hasta la fecha.

A primera vista podeos destacar su diseño con cuerpo de ala mixta, siendo capaz de transportar hasta 200 pasajeros. En cuanto a sus principales características, este modelo tendrá un alcance de 2.000 NM, igual que el modelo anterior, y de la misma forma presentará dos motores turbofanes hibrido de hidrógeno [17].

Según Jean-Brice Dumont, vicepresidente ejecutivo de ingeniería, afirma que la estructura permite más espacio, más volumen para almacenar hidrógeno. Por lo que da mucha más libertad en cuanto a optimizar el espacio de la aeronave en comparación a los dos modelos anteriores [18].

Cruise speed: Mach 0.78 (828 KPH / 511 MPH).

Figure 9. Blended-Wing Body Concept. Fuente: AIRBUS

Cabe destacar que el fuselaje el cual presenta una disposición bastante futurista por su amplitud podría permitir múltiples opciones para el almacenamiento y distribución del hidrógeno, así como para la configuración de su cabina. Siendo el modelo más interesante por su posible optimización del espacio.

Actualmente, no se dispone de mucha información sobre este modelo de aeronave, siendo las suposiciones extraídas a través de los estudios e investigaciones que han ido realizando hasta la fecha.

2.6. Alcance de los modelos ZEROe

Como se ha expuesto anteriormente, en los apartados correspondientes, en cada uno de los tres modelos presentados por Airbus estos presentan un alcance entre las 1.000 NM y las 2.000 NM, que equivalen 1.852 KM y 3.704 KM.

Como se puede apreciar este rango únicamente cubriría vuelos regionales y/o continentales, es decir, vuelos que no presentan una gran cantidad de horas de vuelo. En las Figuras 5 y 6 se puede apreciar el rango de estos aviones desde Francia.

Figure 11. Alcance de 1.000 nm desde Francia. Fuente: AIRBUS

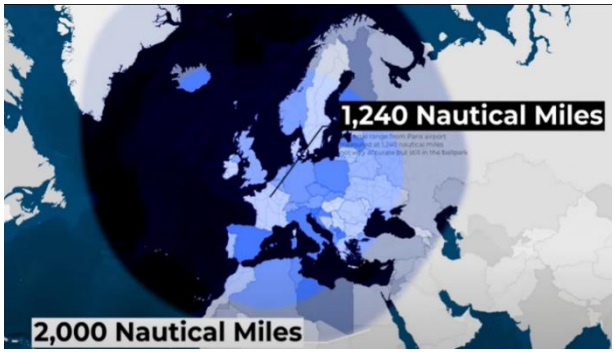

Figure 10. Alcance de 2.000 nm desde Francia. Fuente: AIRBUS

Como podemos observar, la autonomía ofrecida por este tipo de aviones es mucho menor que la ofrecida por las aeronaves actuales, por lo que no tendrían la capacidad para llevar a cabo operaciones que cubran un rango superior al que se puede observar en las Figuras 6 y 7, es decir, todavía existiría la necesidad de aviones de larga distancia que emplearían queroseno para unir ciudades distantes, por lo que estaría fuera del alcance del proyecto ZEROe de AIRBUS.

Sin embargo, teniendo esta posibilidad de alcance y en un escenario en el cual se pudiera disponer del hidrógeno necesario se podrían reducirse la gran mayoría de vuelos mundiales que utilizan queroseno.

Si nos basamos en la información ofrecida por ENAIRE, gestionaron cerca de dos millones de vuelos (1.980.990) durante el año 2022. De este número de vuelos, 416.632 fueron nacionales, 1.124.987 internacionales y los restantes sobrevuelos con origen y destino en aeropuertos no españoles [19].

Teniendo en cuenta estos datos, y conociendo que la distancia media recorrida por la gran mayoría de vuelos es de 1.240 NM, es decir, vuelos de corto y medio radio, la posibilidad de operar este número de vuelos por aviones impulsados por hidrógeno resultaría una gran mitigación de emisiones de carbono por parte de la aviación.

3. LÍNEA TEMPORAL DEL PROYECTO

Para poder comprender de donde precede este proyecto, tenemos que remontarnos a la pasada década. Teniendo siempre como objetivo principal conseguir mitigar las emisiones de carbono, desarrollando tecnología innovadora que permita continuar mejorando el transporte aéreo.

El inicio de este camino hacia la electrificación de aeronaves comenzó en 2010, cuando Airbus desarrolló el primer avión acrobático de cuatro motores totalmente eléctricos del mundo, conocido como CriCri. Desde ese momento la compañía se embarcó en este camino vital para la descarbonización procedente por parte de la aviación.

Durante los siguientes años, continuó desarrollando nueva tecnología e implementando cambios innovadores para sus aeronaves. E-Fan 1.1 fue el primer avión totalmente eléctrico y de doble hélice, el cual consiguió cruzar el canal inglés de forma exitosa.

Sin embargo, los diferentes estudios e innovaciones, juntamente con sus respectivas implementaciones, no únicamente se realizaban en aviones. En 2019 fue la inauguración, en Alemania, de E-Aircraft System House (EAS) la cual se convirtió en las instalaciones de Airbus dedicadas a los sistemas de propulsión alternativos [20].

En la siguiente futura se puede ver en mayor detalle la evolución de las diferentes implementaciones en referencia a los vuelos eléctricos.

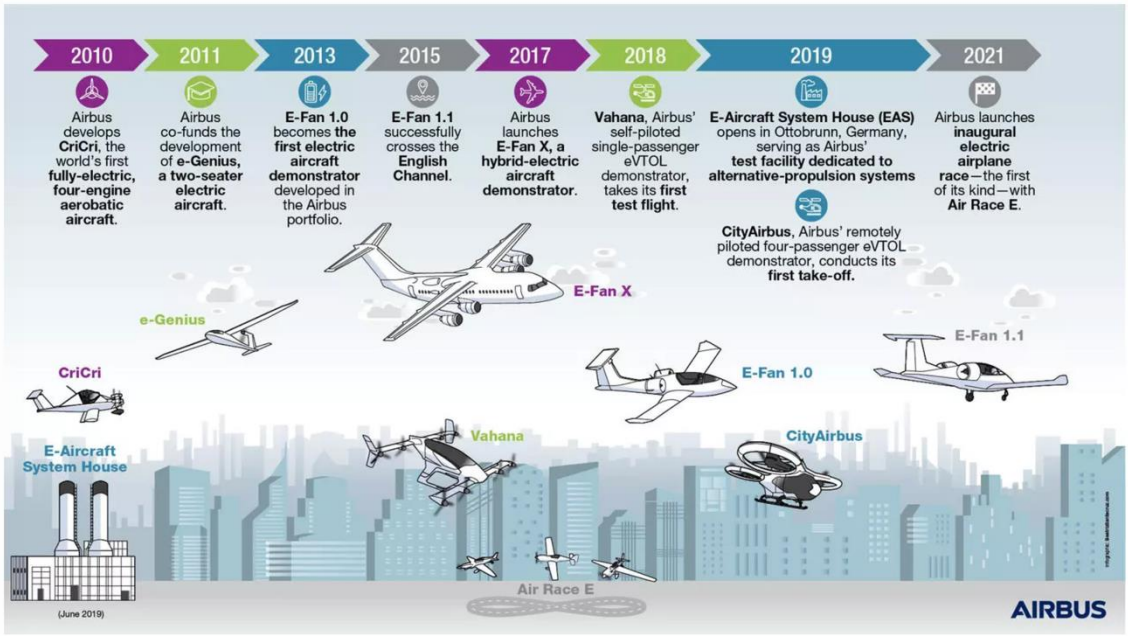

Figure 12. Evolución en la investigación de vuelos eléctricos. Fuente: AIRBUS

Otra de las patas que ha servido como base al proyecto, es sin duda alguna la innovación en sus motores. La implementación de los modelos NEO dentro de la familia de Airbus, así como los modelos A220 y A350, ayudaron en gran medida a reducir el impacto ambiental por parte de la aviación, pues estos modelos de avión son más eficientes en el consumo de combustibles que los aviones que los precedían.

Figure 13. The lastest generation of fue-efficient AIB Family aircraft. Fuente: AIRBUS

Gracias a la anterior ilustración, proporcionada por Airbus, se puede apreciar como cada uno de estos modelos, como mínimo, reduce en un 20% las emisiones de CO_2, juntamente con sus características principales de una mayor ratio de aérea dinámica con coeficientes de fricción menores.

3.1. Sustainable Aviation Fuel - SAF

El combustible de aviación sostenible (SAF) es una alternativa más limpia para propulsar aviones. Se produce utilizando materias primas renovables, como aceites usados y residuos agrícolas. El SAF es capaz de reducir las emisiones de dióxido de carbono de la aviación hasta en un 80% [21].

Este tipo de combustible es vital para que la aviación pueda llegar a cero emisiones netas en el año 2050, que es el objetivo que se han marcado en el sector aéreo y desde todas las partes de la aviación, desde aerolíneas, aeropuertos o fabricantes de aeronaves están involucradas para poder llegar a este objetivo. Como podemos observar en los anteriores apartados, el proyecto de ZEROe y consecuentemente la utilización de hidrógeno en vez de un combustible tradicional todavía es una incógnita, debido a que nos encontramos en una fase muy temprana de éste, y no se sabe con certeza cuando podrán estar listos. Es por ello por lo que desde el sector se está apostando mucho por la implementación del SAF, hasta que los nuevos sistemas de propulsión estén listos.

3.1.1. Cómo se elabora el SAF

La producción de este tipo de combustible se logra a partir de una serie de etapas, empezando por la producción de materias primas, las cuales podrían ser aceite de cocina, residuos forestales, entre otros. Después de ser recolectados se lleva a un centro donde se someterán a un

pretratamiento para cumplir con los requisitos de los procesos de conversión. Una vez haya pasado dicho filtro esta materia recogida en la primera etapa serán transformados en SAF.

Figure 14. How is SAF made? Fuente: Air bp

Durante este proceso tanto el CO_2 cómo el hidrógeno juega un papel importante en la elaboración de SAF.

Puede parecer un poco incongruente que se emplee CO_2 para la elaboración de un combustible que busca reducir las emisiones. Sin embargo, es justamente eso, se busca utilizar en un continuo ciclo el CO_2 existente en nuestra atmosfera manteniendo los mismos niveles, evitando así aumentar la huella de carbono [22].

3.2. Estado actual del proyecto

En la actualidad, Airbus sigue con sus investigaciones y desarrollo de nueva tecnología para poder presentar su modelo de cero emisiones y que esté preparado para su entrada en servicio en el año 2035. Próximamente, la compañía juntamente con la familia de motores de turbofán CFM, iniciará pruebas en tierra y en vuelo del motor de pila de combustible adaptado a su aeronave A380 MSN1, adaptando este avión para el transporte de tanques de hidrógeno líquido, así como

Figure 15. Demostrador de combustión de hidrógeno. Fuente: AIRBUS

sus sistemas de distribución de hidrógeno. Se prevé que las pruebas de vuelo comenzarán en el año 2026 [23].

CFM International, empresa que ya se encargó del desarrollo de los motores CFM56-5B4P utilizado por la flota de aviones A320, ahora se encargará del desarrollo y de las modificaciones del motor GE Passport, el cual es un motor turbofán, modificando la cámara de combustión, el sistema de combustible y el sistema de control.

El motor estará ubicado en la parte trasera del fuselaje del MSN1, permitiendo controlar las emisiones del motor. En la zona trasera del interior del avión estarán establecidos los cuatro depósitos de hidrógeno, teniendo un peso de 100 kg por deposito.

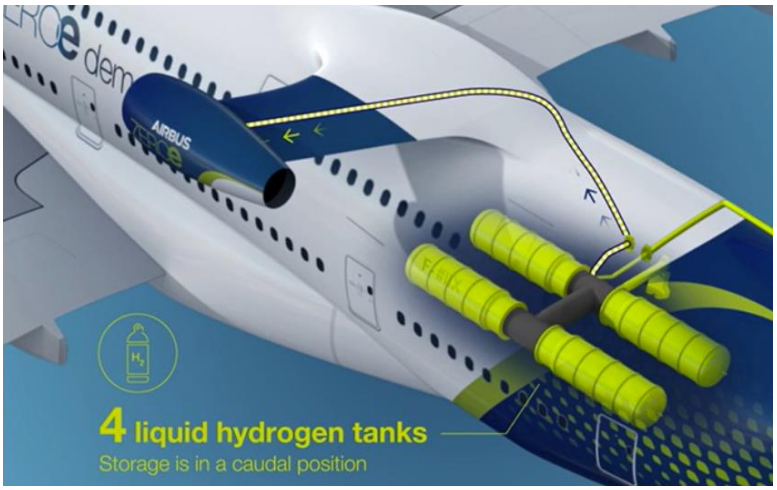

Figure 16. Ubicación de los tanques de hidrógeno. Fuente: AIRBUS

Desde Airbus se ha establecido un equipo en la cabina el cual se encargará de la medición y captación de datos los cuales serán transmitidos a la estación de tierra.

Además, en los controles del cockpit de este A380 se dispondrá de otro throttle, encargado exclusivamente de controlar el motor de hidrógeno, así como un display donde se podrán ver todos los datos y parámetros del motor de hidrógeno [24].

3.2.1. Distribución de los nuevos sistemas en el fuselaje

En el presente subapartado se expondrá una posibilidad de cómo podría estar distribuido y organizado el fuselaje en un avión de hidrógeno. Aunque todavía no se sabe nada en referencia a cuál es la distribución definitiva del fuselaje de cada uno de los tres modelos.

Debemos tener en cuenta que, al integrar nuevos elementos al interior de la aeronave, en comparación con las tradicionales, se deberá de tener en cuenta la distribución de todo tipo de carga, así como el peso de cada sistema o carga que vaya a transportar la aeronave.

En primera instancia hay que tener presente los nuevos sistemas y elementos necesarios para operar este tipo de aeronaves. La ubicación de los sistemas de propulsión, como las baterías eléctricas o los tanques de hidrógeno. Por tal de mantener un centro de gravedad adecuado para la seguridad del vuelo, se podrían disponer estos sistemas en el centro del fuselaje. Esto es debido a que la carga transportada, como pueden ser pasajeros, cargo o correo es un elemento variante,

el cual no es igual en cada vuelo. Aun así, dependería de varios factores, como pueden ser la distribución de carga y la disposición de los sistemas de la aeronave.

En el único modelo, el cual sabemos dónde irán ubicados los tanques de hidrógeno es en el modelo que se utilizará para el vuelo de prueba. Como justo se ha mencionado en el anterior apartado, irían instalados en la parte trasera del fuselaje. Debemos recordar que al ser un vuelo de prueba no habría un gran cambio en referencia a los límites de peso de la aeronave.

Airbus deberá de tener en cuenta la ubicación de la carga, la capacidad de almacenamiento en bodega, o la configuración de asientos. Recordemos que siempre se debe de mantener dentro de unos límites los cuales establecerá la misma compañía, dónde indicará cual es la carga máxima para garantizar la seguridad del vuelo.

Es importante destacar que la utilización de hidrógeno contra el queroseno tradicional presenta cambios significativos. Pues el hidrógeno presenta una menor densidad en comparación a los combustibles fósiles, por lo tanto, requeriría un mayor volumen de almacenamiento. En el cuarto apartado del presente trabajo el cual hace referencia a las implicaciones técnicas se habla sobre este aspecto en detalle.

Es importante tratar sobre cuál será la secuencia de admisión de pasajeros, recarga de hidrógeno o carga de equipaje, entre otros servicios necesarios para el avión. Hay que mencionar que de la misma forma que en la disposición de la carga en estos modelos de avión todavía no se sabe cómo será, en este aspecto ocurre algo similar, por lo que todo lo mencionado en este TFG son meras suposiciones o recomendaciones de carácter propio. En el apartado en el cual se hace referencia a las modificaciones aeroportuarias se menciona cual podría ser la secuencia de embarque de este tipo de aviones.

3.3. Próximos años

Durante los próximos años Airbus se centrará en seguir desarrollando su tecnología para poder llevar a cabo el vuelo de prueba mencionado en el apartado anterior.

Aunque a largo plazo surgirán muchos interrogantes y una serie de pesquisas, el objetivo de Airbus es el mismo que se ha ido explicando anteriormente en el presente Trabajo de Fin de Grado.

Para el año 2030, Airbus planea tener el 100% de capacidad de SAF en todas sus aeronaves, pudiendo así operar utilizando combustibles alternativos a los que estamos acostumbrados hasta ahora.

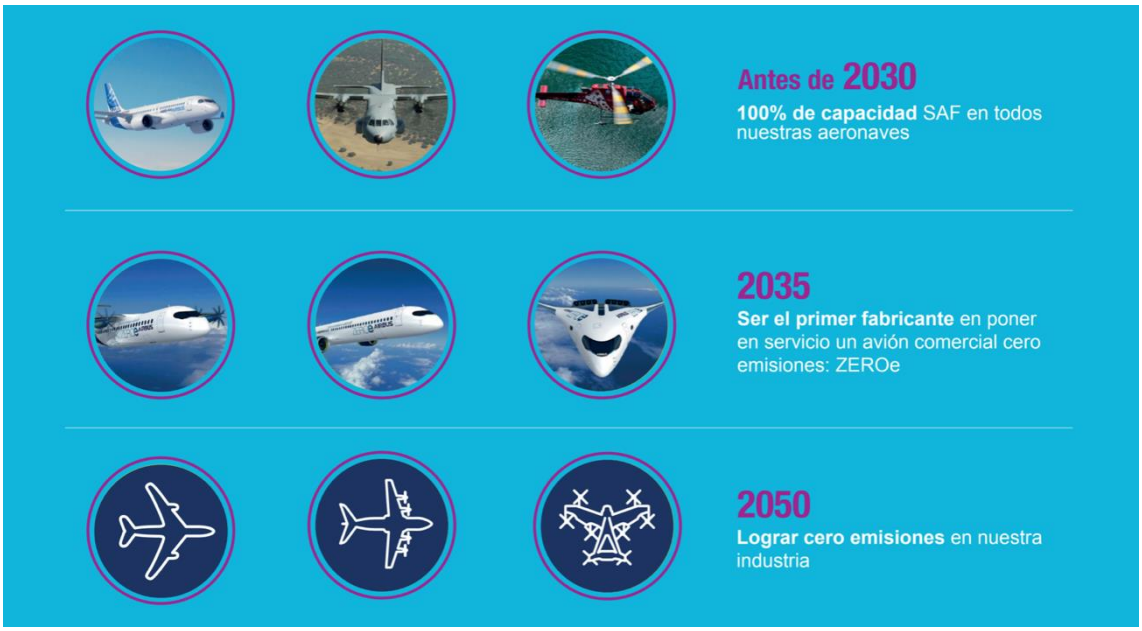

Figure 17. Objetivos de Airbus durante los próximos años. Fuente: AIRBUS

Seguido de esto, concretamente cinco años después, se planea poder poner en servicio el primer avión del proyecto ZEROe, y durante el paso de los años ir integrando el resto de los modelos que se han desarrollado en segundo apartado.

Por último, para el año 2050 se plantea haber conseguido lograr las cero emisiones en toda la industria de la aviación.

4. IMPLICACIONES TÉCNICAS

En el presente apartado podemos encontrar desarrolladas las diferentes implicaciones técnicas que presentaría la entrada en servicio de los modelos presentados por la compañía Airbus con su proyecto Zero – Emission.

En los siguientes apartados, se presentarán las implicaciones técnicas, que están directamente relacionadas entre ellas, en términos de diseño, construcción y operación.

4.1. Implicaciones técnicas en referencia al diseño

En referencia a términos de diseño, las aeronaves propuestas por Airbus deberán de ser diseñadas teniendo en cuenta los cambios estructurales y de peso que podrían implicar la implementación de las nuevas tecnologías que se utilizarán en los modelos anteriormente presentados.

Los cambios de diseño en estos modelos de aeronave implicarían diferentes cambios significativos en la tecnología de propulsión, como ya está investigando CFM, comentado anteriormente en el apartado 3.1 del presente trabajo. La principal necesidad es la de requerir un motor eléctrico o celda de combustible para proporcionar la energía necesaria a la aeronave para permitir su operativa en el aire. El motor eléctrico sería el encargado de convertir la energía eléctrica almacenada en las baterías en energía mecánica para poder propulsar el avión. La celda de combustible utilizaría el hidrógeno o biocombustible como el SAF, anteriormente explicado en el apartado 3.1, para generar electricidad y propulsar el avión.

El hecho de diseñar y fabricar un modelo de motor diferente a los vistos hasta la actualidad debería tener en consideración diversos factores, como la eficiencia energética, de la misma forma que se tuvo en el cambio de motores entre los A320 y A320 NEO. Además, también se debería de tener en cuenta el espacio requerido para el correcto funcionamiento del avión, pues como hemos visto, los motores eléctricos necesitarían de pilas de combustible lo suficiente eficientes para poder almacenar el hidrógeno necesario con el cual poder garantizar un vuelo seguro.

La aerodinámica del avión es un punto clave, por el cual estos aviones tendrían que ser diseñados en cuanto a forma y tamaño de tal forma que se pueda maximizar la eficiencia energética y reduciendo lo máximo posible la resistencia del aire al avance de la aeronave, optimizando así el empuje realizado por los motores.

Figure 18. Principales fuerzas en vuelo. Fuente: Flightdemy

La aerodinámica es un punto clave para tener en cuenta en la fabricación de las aeronaves, pues presenta un impacto directo en la operativa de la aeronave. Para ello, es vital que en el proceso de fabricación de la aeronave se tenga en cuenta la forma del fuselaje y de las alas.

Pues como podemos ver en el prototipo con el cual se pretende hacer el vuelo de prueba, se pretende posicionar un motor adicional, encargado de la utilización de hidrógeno, en la parte trasera del fuselaje.

Entendemos que son los primeros testeos con relación a pruebas prácticas de este proyecto. Sin embargo, no es la forma más eficiente de carga a optimizar la aerodinámica de un avión, pues este motor adicional generaría una resistencia tanto parásita como inducida adicional.

Por lo que, una buena opción sería la de integrar un diseño del plano alar, fuselaje y estabilizadores, como podría ser el modelo Blended Wing Body el cual presenta un plano alar integrado al fuselaje, que podría garantizar la reducción de estas resistencias permitiendo así un vuelo más eficiente.

4.2. Implicaciones técnicas en referencia a la fabricación.

La fabricación de los diferentes modelos del proyecto ZEROe también presentaría implicaciones técnicas importantes.

- **Materiales más ligeros y resistentes**. Para poder reducir el peso de la aeronave y mejorar así su eficiencia con relación a la sustentación y resistencia al avance, se requeriría de materiales más ligeros y resistentes. Una buena opción para ello podrían ser los compuestos de fibra de carbono, pues son ampliamente utilizados en la industria aeronáutica debido a su alta resistencia y baja densidad. Estos materiales podrían ayudar a reducir el consumo de combustible durante el vuelo, pudiendo tener así un mayor rango de autonomía.
- **Sistemas de gestión de energía y control.** Estas aeronaves deberían de llevar integrados sistemas de gestión de energía y control, con tal de administrar y monitorear los componentes de propulsión y energía de forma eficiente. Incluyéndose sistemas de control y monitoreo de la energía almacenada, sistemas de seguridad y redundancia para garantizar un funcionamiento confiable y sistemas de gestión de temperaturas para evitar sobrecalentamientos de los componentes.

4.3. Cómo almacenar hidrógeno líquido

Una de las mayores implicaciones técnicas y quebraderos de cabeza de este del proyecto ZEROe ha sido como poder almacenar el hidrógeno de una forma la cual pueda garantizar la seguridad del vuelo y de todas las personas que van en éste.

Figure 19. Disposición de los tanques de hidrógeno. Fuente: AIRBUS

Más allá de las ventajas que puede presentar la utilización de hidrógeno, el almacenamiento de éste en la aeronave plantea varios retos. Cabe mencionar, que, a presión atmosférica estándar, es decir, 1013 hPa [25] sería necesario en torno a 3.000 litros de hidrógeno gaseoso para lograr la misma cantidad de energía que un litro de queroseno tradicional.

Una posible propuesta sería la de presurizar el hidrógeno a 700 bares, reduciendo así los 3.000 litros a solo seis, sin embargo, no es una solución factible para la aviación. La idea que se contempla desde Airbus es mantener este hidrógeno almacenado en un tanque, el cual lo mantendrá a una temperatura de -253ºC provocando que cambie su estado, pasando a ser hidrógeno líquido, y por lo tanto siendo más seguro [26].

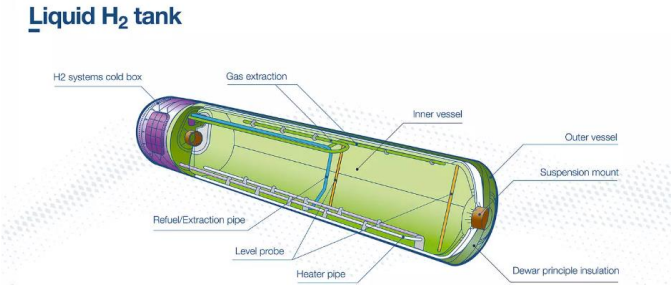

Figure 20. Liquid H2 tank. Fuente: AIRBUS

Al mantener el hidrógeno en un estado líquido aumenta aún más su densidad de energía, por lo que con cuatro litros de hidrógeno líquido serían el equivalente a un litro de combustible fósil. El motor de estos aviones estará alimentado por cuatro tanques criogénicos, cada tanque contendrá 100 kilogramos de LH_2 [6] [27].

[6] LH_2. Hidrógeno líquido.

4.4. Vuelo híbrido y eléctrico

Cuando se habla de un vuelo híbrido nos referimos a que la aeronave emplea distintas fuentes de energía durante el vuelo. Estas fuentes de energía pueden alternarse o ser en tándem. Este tipo de vuelos, permiten tanto reducir el consumo de combustible como optimizar la eficiencia energética. Una de las combinaciones que serían más comunes de este tipo de vuelos híbridos sería la combinación de SAF o en su defecto combustible tradicional con electricidad.

Las fuentes de energía eléctrica podrían venir dadas gracias a baterías o pilas de combustible, como las del proyecto ZEROe, las cuales como se ha comentado anteriormente, transformarían el hidrógeno en electricidad [28].

Desde Airbus plantean un esquema en el cual podemos apreciar cuales serían las fases de vuelo de operar un avión híbrido.

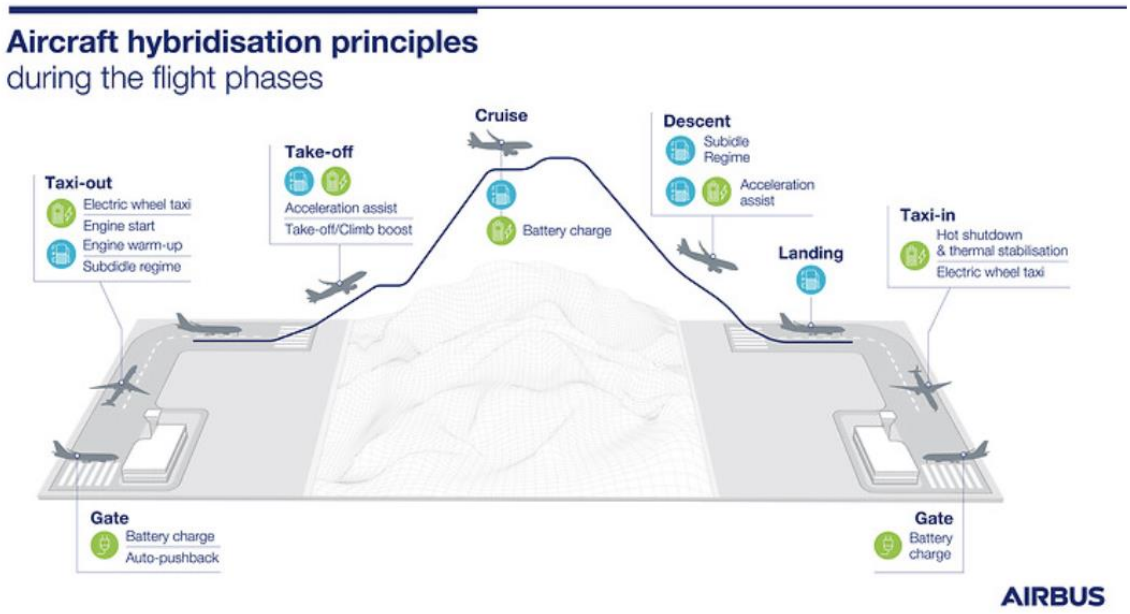

Figure 21. Aircraft hybridisation principles during the flight phases. Fuente: AIRBUS

En la anterior figura se puede apreciar como con este modelo de avión se puede reducir el empleo de combustible, específicamente en los momentos en los cuales la aeronave se encuentra en rampa, o durante el tramo de taxi, tanto en salidas como en las llegadas. Además, durante el proceso de vuelo recto y nivelado, o lo que es lo mismo que el tramo de vuelo de crucero, el avión podría cargar sus niveles de batería, de la misma forma que puede suceder cuando se encuentra en tierra.

En referencia a las demás fases del vuelo, tanto durante el despegue como el aterrizaje ambas energías estarían actuando en tándem, reduciendo de esta forma el consumo de combustible necesario para asumir estas fases del vuelo, pues los motores recibirían un plus de energía extra.

5. IMPLICACIONES ECONÓMICAS

En el presente apartado se encuentran las posibles implicaciones económicas que nos encontraríamos con la entrada en servicio de los modelos presentados en el proyecto ZEROe.

A continuación, se presentan las siguientes implicaciones: Inversión en investigación y desarrollo, cambios en la cadena de suministro, regulaciones y políticas gubernamentales e inversiones en instalaciones aeroportuarias.

5.1. Inversión en investigación y desarrollo

Para la entrada en servicio de los modelos presentados por Airbus, la principal implicación económica sería la fuerte inversión en investigación y desarrollo. Pues según su *road map*, que se puede apreciar en la figura número 3 del presente trabajo, se espera que la entrada en servicio de estas aeronaves sea en el año 2035, por la cual cosa se necesitaría un fuerte empujón económico tanto en personal, como en materiales, que pueda ayudar a acelerar el punto en el que se encuentra la compañía, pues como se ha podido ver, se encuentra en una fase temprana.

Por lo que, sería necesario desarrollar nuevas tecnologías que permitan la producción de estos aviones, así como de establecer estos sistemas, para poder asegurar una correcta operativa, además, por supuesto, de garantizar su seguridad.

Sin ningún tipo de dudas, cuando se habla de investigación y desarrollo, se hace referencia a una debida asignación de los recursos tanto financieros como humanos para investigar, desarrollar está nueva tecnología, además de probarla. Pues como sabemos, este enfoque es totalmente innovador, sin ningún tipo de precedentes anteriores, por lo cual se debería proceder a contrataciones de personal experto en la propulsión eléctrica y de hidrógeno, materiales para estructuras aerodinámicas, para minimizar al máximo el peso estructural de los aviones.

Así mismo, la inversión más grande sería el cambio de flota, comenzar una transición entre aviones suministrados por SAF o queroseno a aeronaves impulsadas por pilas de combustible de hidrógeno. Deberían de ser aeronaves totalmente nuevas, sin tener la posibilidad de poder aprovechar los motores utilizados en la actualidad, la cual cosa provocaría una gran inversión por parte del sector, pudiendo rondar los 800.000 millones de euros la renovación total de la flota.

5.2. Inversión en nuevas infraestructuras

Sin duda alguna, una de las mayores implicaciones económicas, junto con las inversiones en I+D para traer aviones de estas características a la aviación comercial, es la fuerte inversión en nuevas infraestructuras necesarias en el entorno aeroportuario, necesarias para poder operar este tipo de aviones. A continuación, se enumerarán las inversiones en infraestructuras necesarias.

- **Puntos de elaboración de hidrógeno líquido**. Serán necesarias instalaciones que se encuentren situadas en las cercanías de los diferentes aeropuertos, en las cuales se elabore hidrógeno en estado líquido, ya almacenado en cápsulas que garanticen la temperatura requerida para que estos modelos puedan operar.
- **Puntos de almacenado de hidrógeno.** Diferentes hubs, donde puedan estar almacenadas en tanques criogénicos y mantenidas a la temperatura adecuada. Donde

estos tanques estarían preparados para poder ser transportados a los diferentes aviones que necesiten hidrógeno para poder realizar sus correspondientes vuelos.

- **Transportes habilitados**. Vehículos de suministro correctamente habilitados para garantizar la distribución de estos tanques de hidrógeno, en los cuales se pueda mantener todas las características necesarias para que el hidrógeno sea transportado y pudiendo suministrar los diferentes aviones de manera óptima. Garantizando así que las características del hidrógeno no se vean alteradas, siendo seguro para todas las operaciones y personas que se puedan encontrar abordando un avión o trabajando en plataforma y siendo un proceso rápido, el cual no ralentice el proceso de escala entre vuelos.
- **Equipos de carga eléctrica.** Equipos de rampa físicos los cuales permitan realizar recargas o suministro de energía a los diferentes sistemas eléctricos necesarios para poder operar correctamente.

5.3. Medidas gubernamentales

Por parte de los diferentes estados o a nivel de las diferentes autoridades competentes de la aviación, como podría ser EASA a nivel europeo o OACI a nivel internacional. Es lógico pensar que se puedan implementar ciertas tasas o en su defecto ayudas económicas, ambas irían de la mano de los diferentes gobiernos de cada estado o Comunidades políticas de derecho, como podría ser la UE, en nuestro caso.

Pues como sabemos, a niveles de otras modalidades de transportes ya han aparecido diferentes medidas o impuestos los cuales fomentan la reducción del uso de vehículos los cuales supongan una emisión de gases de efecto invernadero.

Por lo que, es lógico pensar, que, en este caso, se implementarán diferentes impuestos, más restrictivos sobre las emisiones de carbono o incentivos.

- **Impuestos por emisión de CO_2**. Estos impuestos afectarían directamente a las aerolíneas, las cuales realicen operaciones con diferentes combustibles fósiles, no garantizando la descarbonización que pretende conseguir el sector aéreo. Este caso provocaría que los combustibles fósiles pudiesen ser más costosos, además de tener una tasa a pagar por operar con este tipo de combustible.
- **Incentivos o subvenciones.** Para las aerolíneas que decidan renovar su flota, cuando empiecen a integrar este tipo de modelo a sus operaciones, los estados podrían establecer diferentes ayudas económicas para la obtención o pago de impuestos para este tipo de aeronaves, motivo por el cual podría incentivar la adquisición de estos.

5.4. Modificaciones en el mantenimiento de aeronaves

La evolución tanto en motores, como estructuras o sistemas de alimentación de energía que tendrían los aviones con la implementación de este tipo de aeronaves serían causantes de una evolución en el mantenimiento de estas, las cuales deberían venir acompañadas de una inversión económica y humana.

- **Hangares e instalaciones de mantenimiento**. Estos deberían de estar acondicionados y equipados de las herramientas necesarias, que permitan poder realizar el mantenimiento

requerido a estas aeronaves. Garantizando la seguridad de estos aviones y de las tareas de mantenimiento a las cuales deberían de ser sometidos.

- **Nuevos programas de mantenimiento**. Cada modelo de aeronave tiene su propio programa de mantenimiento, el cual es especializado en esa aeronave en cuestión. Sin duda alguna todos los programas de mantenimiento tendrían cambios innovadores y diferentes a los vistos hasta la fecha.
- **Formaciones y certificaciones.** Todo el personal, tanto TMA como certificadores, pasando por centros de mantenimiento, deberían de tener nuevas habilitaciones para poder realizar este tipo de mantenimiento. Por la cual cosa, se deberían de establecer nuevas formaciones y licencias para que se pueda desarrollar este tipo de mantenimiento.

5.5. Mecanismos de financiación

Actualmente el estado del hidrógeno renovable se encuentra en una etapa temprana de desarrollo, por lo que, para poder alcanzar los objetivos de descarbonización son necesarios diferentes mecanismos de financiación.

Tanto a nivel europeo como nacional, existen diferentes instrumentos de financiación para impulsar el desarrollo y avance del hidrógeno renovable.

5.5.1. Mecanismos de financiación nacional

A continuación, se presentarán los principales instrumentos con potencial de financiación, a nivel nacional, para desarrollo de proyectos de hidrógeno renovable.

- **Proyectos CIEN**. Es un mecanismo de financiación del CDTI, Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial, otorgando ayudas parcialmente reembolsables, para grandes proyectos de investigación y de desarrollo experimental desarrollados en colaboración efectiva por agrupaciones empresariales y orientadas a la realización de una investigación planificada en áreas estratégicas de futuro y con potencial proyección internacional. Con estos proyectos se pretende fomentar la cooperación en el ámbito de la I+D. Los proyectos tendrán un presupuesto mínimo solicitado de 5.000.000 euros y máximo de 20.000.000 euros. [29]
- **Misiones ciencia e Innovación**. Proporciona apoyo a grandes iniciativas estratégicas, intensivas en I+D y desarrolladas en colaboración publico privada, que incorporen las tendencias y retos científico-técnicos más recientes para identificar y resolver los desafíos de sectores productivos críticos para la economía española. El presupuesto de esta convocatoria es de 70.000.000 de euros. [30]

5.5.2. Mecanismos de financiación europea

A continuación, se presentarán los principales instrumentos con potencial de financiación, a nivel europeo, para el desarrollo de proyectos de hidrógeno renovable.

- **Innovation Found.** Es uno de los mayores programas de financiación del mundo para la demostración de tecnologías innovadoras con bajas emisiones de carbono. Este programa es financiado directamente por el dinero recaudado mediante los impuestos cobrados a contaminadores de gases de efecto invernadero a través del ETS, Emissions Trading Sysem. [31]
- **Horizon Europe.** Programa de inversión en investigación e innovación de la UE para el periodo de 2021-2027. Este programa contará con un presupuesto de 75.900.000 de

euros, de los cuales destinará el 35% para abordar desafíos del cambio climático, apoyando así políticas para la transición de la descarbonización y protección del medio ambiente. [32]

- **Clean Hydrogen Alliance.** Alianza que brinda apoyo a una gran escala de tecnologías limpias del hidrógeno de aquí a 2030. Reúne la producción de hidrógeno renovable y bajo en carbono, la demanda en la industria, la movilidad y otros sectores, y la transmisión y distribución de hidrógeno. [33]

5.6. Comparación de costes entre la actualidad y un posible escenario económico del proyecto ZEROe

En el presente apartado desarrollaremos una comparación entre el escenario actual con los modelos de aeronave los cuales emplean el queroseno como combustible, con un posible escenario con los costes que podría implicar la integración de estas aeronaves a la aviación comercial.

En primer lugar, hace falta remarcar que la integración de los modelos ZEROe tendrán unos costes diferentes tanto en combustible e infraestructuras necesarias, en el propio avión y las tareas de mantenimiento que se le deberían de realizar y las operaciones.

Para los vuelos de corto alcance, durante el primer año de este proyecto, 2035, los costes aumentarían entorno a un 25% en comparación a los costes de 2023. Como se puede observar en la siguiente ilustración, este aumento en un 25% sería el resultado del aumento de costes en un 9% de costes por combustible, 6% de aumento en costes de mantenimiento, un 7% en costes por ser el operador de esta aeronave y de un 3% de otros costes [34].

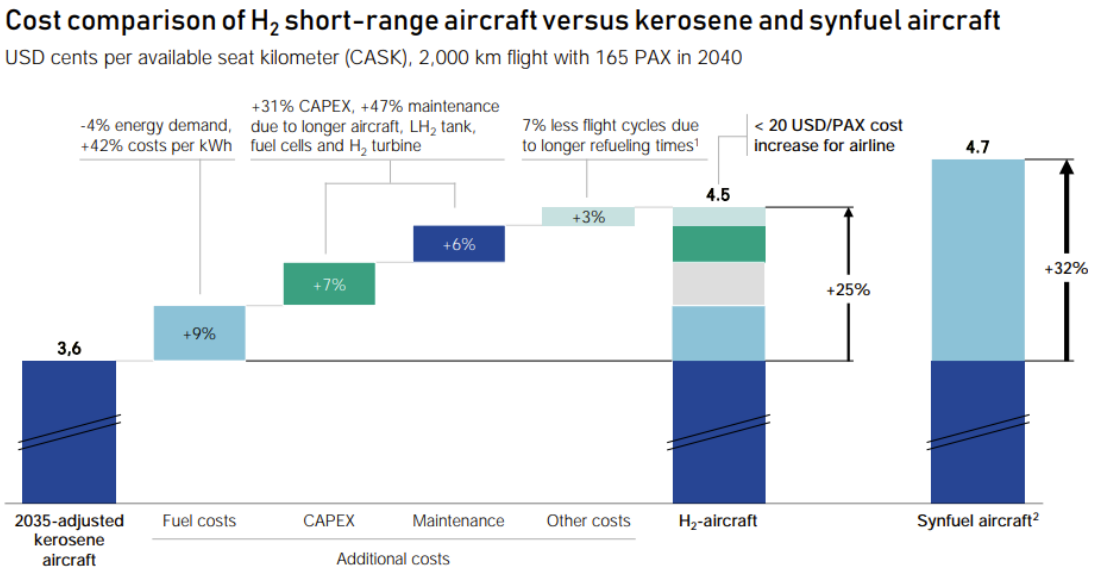

Figure 22. Cost Comparison of H2 short-range aircraft versus kerosene and synfuel aircraft. FUENTE: CleanSky2

Los costes de combustible se verían aumentados debido a la mayor energía necesaria por el aumento de peso que podrían tener las aeronaves, debido a la utilización del hidrógeno y de los

nuevos sistemas que serían necesarios implementar. Además, la producción del hidrógeno es más cara que la del queroseno, aunque se espera que su coste disminuya conforme avancen los años y se disponga de más centros productores de hidrógeno.

Comparación de costes LH_2 – Queroseno (€/litro)	
LH_2	**Queroseno**
Variable entre 4€/litro - 10 €/litro [35]	0.93 €/litro [36]

Figure 23. Comparación de costes LH2 - Queroseno

La producción de hidrógeno es más cara en comparación con el queroseno, por eso vemos tanta variación entre los precios de ambos. Aunque se espera que su precio disminuya rápidamente.

En referencia a los costes CAPEX y los costes de mantenimiento de las aeronaves de hidrógeno, se espera que estos aumenten debido a los costes de la nueva estructura necesaria para albergar los depósitos de LH_2 integrados en el fuselaje de los prototipos.

Hecho que también provocaría más revisiones a estos modelos de avión, especialmente durante los primeros años de integración de estos modelos a la aviación comercial.

6. IMPLICACIONES LEGISLATIVAS

En los siguientes apartados, se presentarán las implicaciones técnicas, que están directamente relacionadas entre ellas, en términos de diseño, construcción y operación.

En este apartado encontraremos desarrolladas las posibles implicaciones legislativas que presentaría la aviación con la entrada en servicio de los modelos de aeronave presentados en el proyecto ZEROe de Airbus.

6.1. Estándares y regulaciones

Con la entrada en servicio de este modelo de aeronaves vendrá acompañado de una modificación en los certificados de aeronavegabilidad, que deberán de garantizar, en primera instancia y antes de su entrada en servicio, que estas aeronaves son aptas para el servicio, garantizando la seguridad de las personas que viajaran en los modelos de ZEROe. Algunos de las variaciones en las regulaciones de en estas aeronaves estarían relacionadas con:

- **Seguridad**. Regulaciones de seguridad, las cuales permitan garantizar que los vuelos serán operados de forma segura, garantizando la protección de las personas que viajarán en la aeronave. Estás regulaciones de seguridad afectarían al diseño de la aeronave, test flight necesarios antes de su entrada en servicio y obviamente disponer de su certificado de aeronavegabilidad en todo momento.
- **Centros de almacenado de hidrógeno**. Sin duda, el almacenado del hidrógeno, que sería uno de los principales cambios en la aviación, debería de garantizar unas características determinadas, manteniendo sus características necesarias para su optimo funcionamiento, además de mantener la seguridad, pues como sabemos éste es un gas inflamable.
- **Equipos de suministro de hidrógeno**. Los equipos de suministro de hidrógeno, que podrían sustituir a las actuales cubas, utilizadas en la actualidad para suministrar tanto queroseno como SAF, deberían de estar sometidos a ciertas regulaciones, cambios en sus estructuras y procedimientos a la hora de realizar la actividad de suministro.

- **Estándares ambientales.** El cambio de combustible vendría acompañado, también, de modificaciones en los estándares y políticas ambientales implementados por la aviación, podría implicar cambios en regulaciones ambientales, estos estándares podrían incentivar la utilización de estos aviones, tanto de forma económica como operativa, para así fomentar la utilización de modelos impulsados por hidrógeno.

- **Estándares de mantenimiento.** Con la entrada en servicio, se debería de modificar las tareas de mantenimiento, tanto preventivo como correctivo que deban de seguir estos aviones. Durante los primeros años, deberían de tener un menor intervalo de ciclos, ya sean en días, flight hours o flight cicles, entre las tareas de mantenimiento que se le deben de hacer. Para así poder monitorizar y conocer de una mejor forma, si los diferentes componentes que configuran estos modelos pueden someterse a estas tareas de mantenimiento en un intervalo de tiempo similar a los modelos que tenemos actualmente o se verá afectado siendo un mayor o menor intervalo.

6.2. Instrumentos regulatorios

Desde el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, del Gobierno de España, se nos presenta una hoja de ruta a seguir para resolver los principales problemas regulatorios.

6.2.1. Simplificación administrativa y eliminación de barreras regulatorias

Actualmente la producción de hidrógeno es considerada como una actividad industrial, pues está clasificada como una industria química para la producción de gas inorgánico. Este hecho, consecuentemente, provoca que la construcción de industrias solo puede realizarse en suelo calificado como industrial. Las medidas que se deberían abordar son las siguientes: [37]

- Modificar la clasificación como actividad industrial de la producción de hidrógeno renovable en las estaciones de servicio.
- Analizar los distintos procedimientos para la tramitación de la operación y ejecución de instalaciones de producción de hidrógeno verde a pequeña escala y evaluar su simplificación sin menoscabar la protección medioambiental y asegurando criterios de sostenibilidad.
- Promover el desarrollo de medidas regulatorias que simplifiquen y faciliten el despliegue de líneas directas de electricidad dedicadas a la producción de hidrógeno renovable en el marco de la normativa del sector eléctrico.
- En colaboración con las instituciones europeas, establecer un sistema de garantías de origen de hidrógeno renovable que permita proporcional las variaciones de precio adecuadas a los consumidores.
- Considerar en el marco de la fiscalidad verde y en los impuestos indirectos, los efectivos positivos en el medioambiente del hidrógeno renovable.

6.2.2. Regulaciones en el transporte aéreo

Con el conocimiento de la continua evolución del transporte aéreo y la importancia que se pretende que tenga el hidrógeno en este sector, se plantean una serie de medidas que se deberían de llevar a cabo para la implantación de estos aviones a la operativa del tráfico de personas y carga.

- Fomentar el desarrollo de plantas de producción sintético producido a partir de hidrógeno renovable o biocombustible de nueva generación para descarbonizar el transporte aéreo.
- Analizar las condiciones necesarias para el rediseño y modificaciones pertinentes que permitan la utilización de aeronaves que empleen combustibles sintéticos a partir de hidrógeno renovable o biocombustible de nueva generación.
- Establecer requisitos ambientes en los pliegos técnicos que regulan los contratos de los agentes de handling[7] que prestan servicios de asistencia en el lado aire de los aeropuertos.

6.3. Regulación de emisiones e impuestos o incentivos relacionados

Como se ha comentado en apartado previo, podría ser una obviedad la integración incentivos o beneficios fiscales, para las aerolíneas que decidan integrar a sus flotas estos modelos de avión. Por la cual cosa, las aerolíneas que utilicen aviones impulsados por hidrógeno, durante los años de transición podrían recibir incentivos o apoyo gubernamental, podrían tener ayudas económicas

[7] Handling. Asistencia en tierra a aeronaves incluye todos los servicios de que es provista una aeronave desde que aterriza hasta su posterior partida

para la obtención de estos modelos. De la misma forma, des de los gobiernos podrían poner más económico el precio del hidrógeno para así fomentar este cambio.

Por otro lado, para los aviones los cuales operen mediante la utilización de otro tipo de combustible deberían de pagar una tasa por operación o anual en forma de impuesto sobre la cantidad de gases de efecto invernadero que son emitidos. Las compañías que utilizasen queroseno tendrían un impuesto mucho más elevado que las que utilicen SAF, que durante la transición entre SAF e hidrógeno tendrían un menor costo a pagar. Además de seguramente un mayor precio por combustible, pues podría ser modificado por los gobiernos haciendo así que sea una alternativa no tan atractiva a la hora de adquirir combustible. Por parte de los aeropuertos, podrían implementar una diferenciación de tasas, mayores, en los casos de las aerolíneas que no empleen el hidrógeno como combustible.

6.4. Certificados de aeronaves, centros de mantenimiento y personal

En la actualidad, cada modelo de aeronave tiene sus propias habilitaciones o certificados para ser operada o mantenida. Por la cual cosa, todas las personas que estén relacionadas a desarrollar tareas de mantenimiento, desde los TMA o MRO[8] encargados de realizar el mantenimiento de estas aeronaves, deberán de tener unas habilitaciones especiales para ello, para cada parte de la aeronave, al caso, estructuras, sistemas o motores, pues serían totalmente distintas a los aviones actuales.

Así mismo, los pilotos deberán de tener una formación totalmente nueva, obteniendo un type rating para poder ser aptos para pilotar este tipo de aeronaves, de una forma segura, garantizando la seguridad del avión y de todas las personas que van en él. De la misma forma, pasaría algo parecido con los TCP[9], los cuales deberían de tener también una nueva formación, obteniendo así el conocimiento de la aeronave.

[8] MRO. Entidad certificada que cumple los requisitos para realizar el mantenimiento, reparación y revisión de una aeronave, motor o accesorio.
[9] TCP. Tripulante de Cabina de Pasajeros

6.5. Evolución hasta 2050 de implicaciones legislativas

Como se puede apreciar en los apartados anteriores la integración de estos modelos de aeronave a la aviación comercial presentaría un gran número de implicaciones legislativas las cuales, hoy en día, no son vigentes.

Por este motivo, junto con la idea de operar con estos modelos a partir del año 2035, tal y como querría Airbus, requeriría iniciar un proceso de adaptación legal para que estos modelos pudiesen operar en el futuro, pues no faltarían tantos años para esta primera fecha clave.

A continuación, se presenta un posible camino que se debería de seguir para la implementación de estos modelos a la aviación comercial, observando los primeros cambios que se deberían de realizar antes de 2030, año en el cual se pretendería operar con los modelos turbofán y turboprop, y las modificaciones o actualizaciones a realizar para lanzar su modelo Blended-Wing Body en 2050.

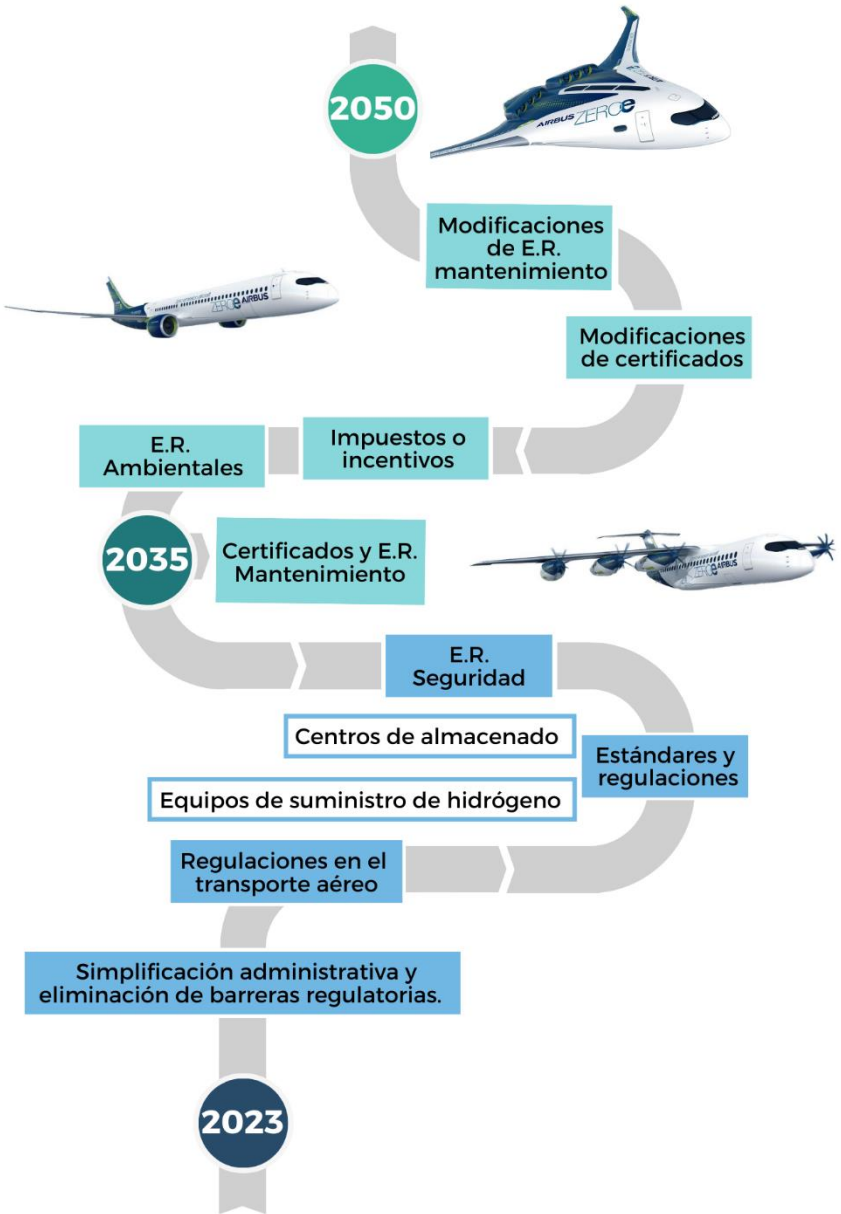

Figure 24. Road map - integración medidas legislativas

6.6. Evolución hidrógeno en los próximos años

En el presente subapartado veremos cómo podría ser la evolución del hidrógeno durante los próximos años, o por lo menos que se espera en referencia a esto.

Desde el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, del Gobierno de España, se nos presenta una hoja de ruta del hidrógeno, en la que se desarrolla cual es la evolución esperada en referencia a la fabricación y uso de hidrógeno.

Encontraríamos tres fases, en los que se determinan diferentes hitos que se deberían alcanzar.

- 2020-2025. Durante estos 5 años, dese espera la instalación de al menos 6 GW de electrolizadores en la UE y la producción de hasta 1 millón de toneladas de hidrógeno renovable. [38]
- 2025-2030. Durante los siguientes 5 años, se pretendería la instalación de 40 GW de electrolizadores para alcanzar en el año 2030, con la producción de hasta 10 millones de toneladas de hidrógeno líquido renovable. [39]
- 2030- 2050. Las tecnologías de hidrógeno renovable deberían alcanzar la madurez y desplegarse a gran escala. [40]

Se espera que a partir del año 2030 se acelere el desarrollo de una economía basada en la producción del hidrógeno renovable en España. Con estas medidas, se pretende alcanzar una sociedad descarbonizada para el año 2050.

7. IMPLICACIONES A NIVEL DE MODELO DE GESTIÓN AEROPORTUARIA

Para que el proyecto Zero – Emissions de Airbus pueda seguir adelante no solo deben centrarse en realizar modificaciones y adaptar los aviones para ser capaces de operar con hidrógeno, también se debe realizar las modificaciones pertinentes en los diferentes aeropuertos para que estos pueden contar con todos los servicios e instalaciones que permitan cubrir las necesidades que presentarían estos nuevos modelos.

En el presente apartado encontraremos desarrolladas las diferentes aéreas o servicios que deberían de ser creadas o modificadas para la correcta entrada en servicio de estos nuevos modelos de aeronave, y así puedan garantizar la seguridad para todas las personas, tanto trabajadores como pasajeros.

7.1. Nuevas infraestructuras aeroportuarias

Uno de los principales cambios que se deberían de tener en cuenta en el sector aeroportuario sería la habilitación de instalaciones para la elaboración o almacenamiento de hidrógeno, necesario para los aviones ZEROe.

El hidrógeno podría ser transferido al aeropuerto a través de tuberías, camiones o trenes de manera similar y paralela a los combustibles convencionales.

Sin embargo, también se podría producir en dentro o en las cercanías de los aeropuertos, de forma líquida o gaseosa. Si este llega en forma gaseosa, requeriría la necesidad de una licuadora, para convertir el hidrógeno en líquido.

Asimismo, también se podría introducir el hidrógeno a través de cápsulas de H_2 intercambiables. Estas capsulas, llenas de hidrógeno, podrían intercambiarse directamente con las aeronaves, realizando un proceso de reemplazos, intercambiando la capsula repleta de hidrógeno por una cápsula vacía que se encuentre en uno de los aviones con necesidad de más hidrógeno.

Cada una de estas opciones tendría diferentes implicaciones de infraestructura, operaciones, seguridad y costos para el aeropuerto [41].

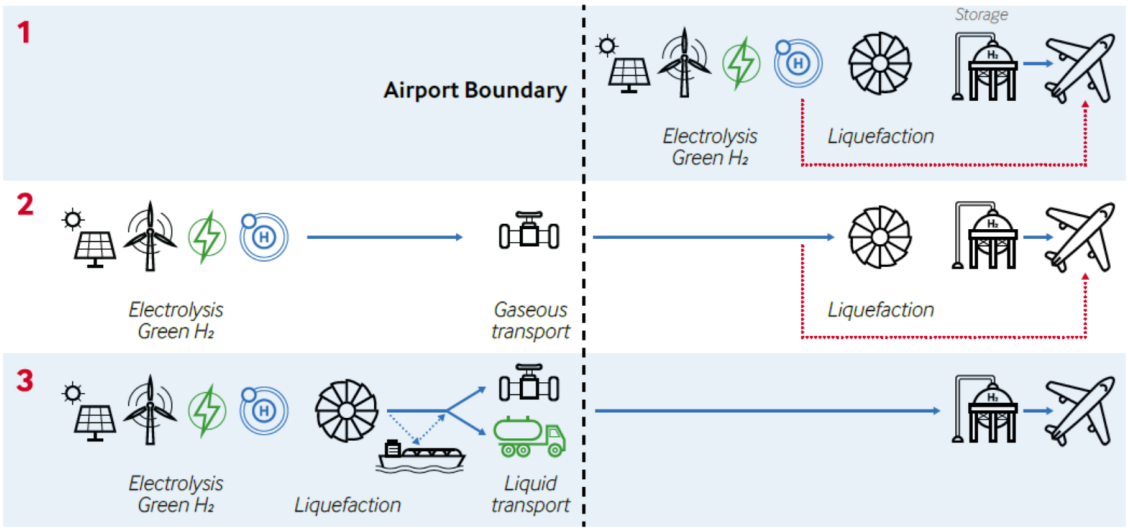

Figure 25. Three primary hydrogen supply chain/pathways into the airport. FUENTE: Aerospace Technology Institute

7.1.1. Producción de hidrógeno

Una de las principales problemáticas reside en el espacio necesario para estas infraestructuras, las cuales permitirían la producción o en su defecto licuar el hidrógeno para otorgarle su efecto líquido.

Las necesidades de superficie necesaria variarían, según la necesidad de producir o modificar el estado del hidrógeno, entre 15 toneladas por día hasta más de 600 toneladas por día [42].

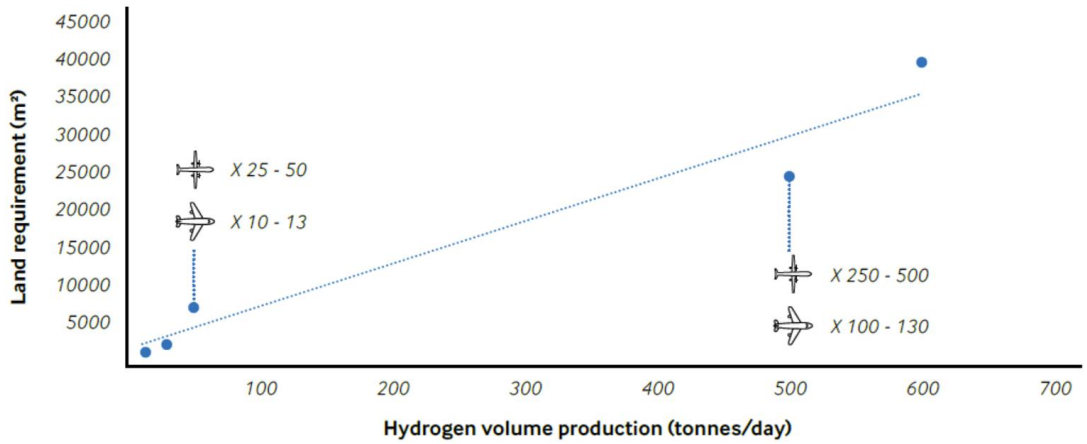

Figure 26. Three primary hydrogen supply chain/pathways into the airport. FUENTE: Aerospace Technology Insistute

La ilustración anterior, un estudio realizado por CleanSky2, muestra la necesidad de espacio para producir hidrógeno, con niveles de indicativos de tráfico, ajustados a modelos turbohélice o turbofán, como correspondería a dos de los tres modelos del proyecto ZEROe de Airbus.

7.1.2. Almacenamiento de hidrógeno

Según una estimación de la Agencia Internacional de Energía, los tanques de almacenamiento de hidrógeno podrían tener hasta un 99% de eficiencia, siendo así el modelo apropiado de almacenado de éste, durante un periodo corto de tiempo, durante el cual no se disponen de estudios o construcciones necesarias para poder habilitar los aeropuertos para la entrada en servicio de los modelos, presentados anteriormente. Los tanques existentes utilizados por el programa espacial de la NASA tienen una capacidad de 3.200m^3 por tanque, que equivaldría a 220 toneladas. Por lo que, cada uno de estos tanques podría ser suficiente para el abastecimiento de unos 200 aviones turbohélice o alrededor de 50 aviones turbofán.

Figure 27. 20 m diameter LH2 storage tank in NASA Kennedy Space Centre. FUENTE: Aerospace Technology Institute

Almacenar el hidrógeno en estado gaseoso ocuparía hasta siete veces más espacio en comparación a un combustible de hidrocarburo, por lo que almacenar grandes cantidades no podría ser muy eficiente, por la gran demanda de espacio para almacenar el hidrógeno necesario.

Por otro parte, el hidrógeno líquido ocupa casi cuatro veces más en comparación con el queroseno, por lo que se deberían de ampliar las instalaciones de almacenado [43].

7.2. Nuevos equipos de suministro para aviones

Para el suministro de hidrógeno desde los centros de almacenado hasta los distintos aviones se contemplan, hoy en día, dos posibles escenarios. Transportarlo vía tuberías o cambiones, como los utilizados actualmente para transportar el SAF o JET A-1.

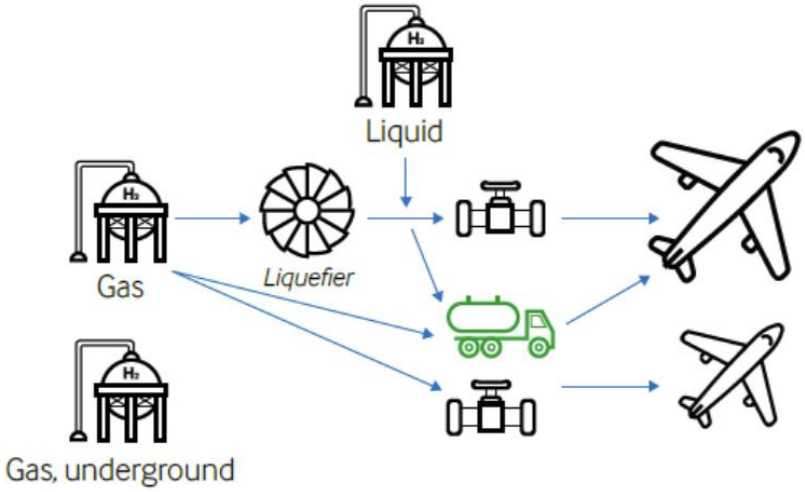

Figure 28. Hydrogen supply chain inside the airport. FUENTE: Aerospace Technology Institute

Varios estudios realizados, por parte de la NASA, concluyó que la forma más eficiente de transportar el hidrógeno podría ser una forma dual, entre los dos escenarios anteriormente expuestos y uno nuevo, el cual constaría de implantar un centro de reabastecimiento en el cual puedan ir los aviones para realizar esta actividad de una forma más segura [44].

7.3. Modificaciones en procesos de escala

Para la óptima integración y garantizar la seguridad operativa para la integración de los modelos ZEROe en la aviación comercial, los procesos de escala deberían de experimentar ciertas modificaciones.

En el presente apartado se expondrán las posibles modificaciones que podrían o no haber durante las diferentes actividades que tienen lugar en tierra, como podría ser el reabastecimiento, proceso de embarque, carga de equipaje o entre otros procesos que tienen lugar.

7.3.1. Proceso de reabastecimiento de hidrógeno

Como hemos visto en el apartado anterior, para el suministro del avión podríamos tener diferentes alternativas, por lo cual cada proceso de escala podría variar en este aspecto.

Con la implementación de estaciones de reabastecimiento de hidrógeno situadas en otra ubicación diferente a la del parking del avión, por lo que éste antes de llegar al parking debería de ser suministrado, antes de realizar el embarque de pasajeros y carga aérea.

Es cierto, que este proceso podría ser el más seguro para la operativa y para la seguridad de los pasajeros y carga. Sin embargo, sería la alternativa que más tiempo requiera, pues se debería desplazar los aviones antes del inicio del embarque para que este sea reabastecido. Podría convertirse en una buena alternativa para los aviones que pasan la noche realizando diferentes tareas de mantenimiento en hangar, pasando por esta estación para ser suministrado y llevado hasta su respectivo parking a primera hora de la mañana.

Por otra parte, encontraríamos varias alternativas a realizar con el avión en su respectivo parking, donde tendrá lugar el embarque de pasajeros y carga.

La primera de estas alternativas sería utilizando camiones de suministro, de la misma forma que se hace hoy en día con los combustibles actuales o realizando un remplazo de los tanques de hidrógeno, cambiando los vacíos por otros repletos de combustible. Sin embargo, estos camiones deberían de estar habilitados criogénicamente para mantener el hidrógeno de forma líquida.

Las otras dos alternativas serían un poco diferentes, utilizando las tuberías que se han comentado en el apartado 7.2. donde el hidrógeno es transportado por estas instalaciones hasta los diferentes parkings, la forma de suministrar los aviones podría realizarse mediante sistemas integrados en la zona. Modificando el edificio de la terminal, ubicando un sistema similar al del finger que permita conectarse con el avión para realizarle el reabastecimiento [45]. Esta alternativa debería de realizar muchas más modificaciones y por ende inversiones. Tal y como se ha indicado anteriormente en el presente Trabajo de Fin de Grado, los tanques de combustible estarían posicionados en la parte trasera del fuselaje del avión.

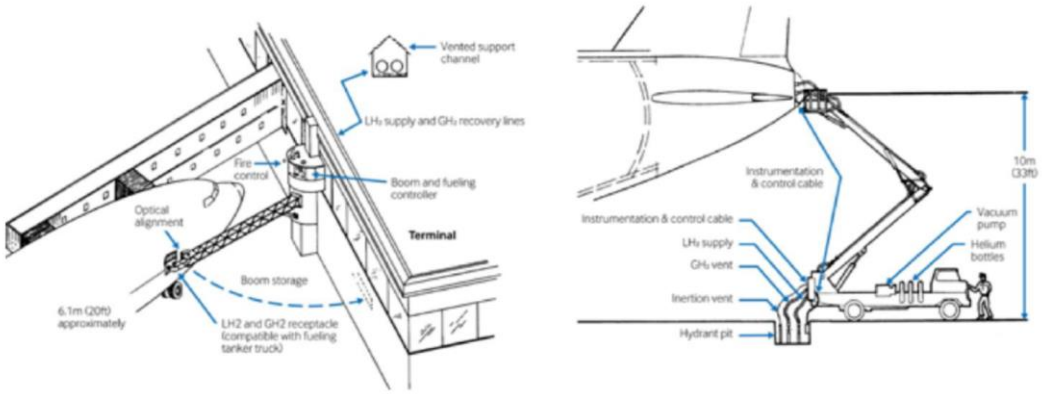

Figure 29. Options for hydrogen aircraft refuelling at the gate. FUENTE: Aerospace Technology Institute

Otra alternativa, y más viable que la anterior, sería mediante una instalación subterránea, similar a la del GPU [10], conectando una maguera desde la salida situada en la superficie de la pista hasta la entrada de reabastecimiento del avión.

7.3.2. Proceso de carga de pasajeros y equipaje

El proceso de embarque por grupos y abordaje de pasajeros en la aeronave, así como la acomodación de pasajeros en ésta no debería de presentar modificación. Únicamente, se debería de tener nuevos procedimientos de seguridad, pues el hidrógeno es altamente inflamable, por lo que se deberían de necesitar nuevas medidas de seguridad y protocoles de inspección durante el embarque, para garantizar que se mantiene la seguridad en todo momento. Pudiendo detectar fugas de hidrógeno gracias a la implementación de sistemas de seguridad adecuados.

Por parte del proceso de carga de equipaje debido a los cambios en el diseño de los modelos de ZEROe podría verse modificado su CG[11], debiendo tener en cuenta estas nuevas características para realizar la carga de equipaje en las bodegas que indique la LIR [12], manteniendo el CG dentro de los límites establecidos. Los procesos de carga de equipaje deberían de realizarse de una forma más cautelosa manteniendo nuevas medidas de seguridad, de la misma forma que en el proceso de embarque de pasajeros.

El resto de los procesos de escala como podrían ser el catering, limpieza o asistencia de personas con movilidad reducida (PMR) podrían mantenerse de la misma forma que se realiza actualmente, siempre manteniendo protocolos de seguridad adaptados al nuevo combustible que se utilizaría.

[10] GPU. Ground Power Unit
[11] CG. Centro de gravedad
[12] LIR. Loading Instruction Report: Es un documento normalizado internacionalmente que se utiliza como único medio para transmitir las instrucciones de carga y descarga, primero desde las oficinas de control de carga hacia los responsables de cargar el avión, y posteriormente entre estos últimos y la tripulación técnica

7.4. Estrategia de AENA

El pasado 2022 la empresa AENA, empresa encargada de gestionar la red de aeropuertos de España, presentó su última actualización de su plan de acción climático.

En el cual podemos ver como hacen referencia a dar prioridad a los proyectos de sostenibilidad en la red de aeropuertos, siendo parte de diversos proyectos y alianzas con otras entidades, aeropuertos, y estados de la UE para garantizar las cero emisiones en el año 2050.

Su estrategia de sostenibilidad 2021-2030, en la cual se integra su plan de acción climática, constaría con una inversión cercana a los 750 millones de euros.

Figure 30. Inversiones AENA periodo 2021-2030. FUENTE: AENA

Teniendo activos diferentes programas de sostenibilidad, entre los cuales podemos observar que se tienen en cuenta la descarbonización de las operaciones aéreas, alcanzando una neutralidad del carbono, así como una aviación sostenible. Pretendiendo emplear energías renovables en las diferentes infraestructuras aeroportuarias, así como en los equipos de transporte dentro del mismo aeropuerto. Por parte de los combustibles aéreos también se tiene presente adaptar los aeropuertos para ayudar a garantizar una propulsión limpia para aviones.

Figure 31. Programas sostenibilidad AENA. FUENTE: AENA

La hoja de ruta del Plan de Acción Climática, propuesta por AENA, entre los años 2021-2030, pretende llegar a las cero emisiones, reflejando el compromiso con la protección y descarbonización de la atmosfera. Marcándose como objetico alcanzar las cero emisiones en el año 2040 y la neutralidad en carbono en 2026.

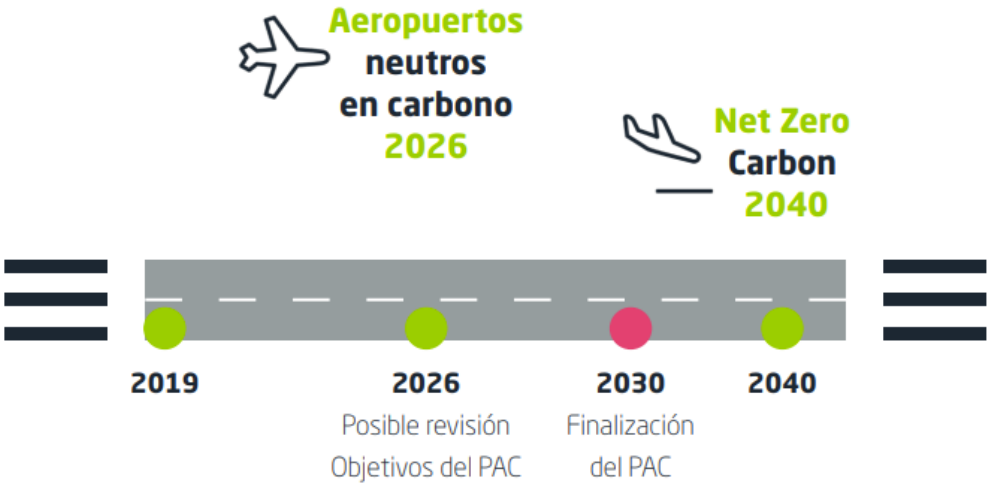

Figure 32. Transición estratégica de sostenibilidad AENA. FUENTE: AENA

Desde Aena quieren ser impulsores de la transformación para otros agentes del sector, impulsando a fabricantes de aeronaves, líneas aéreas, proveedores de servicio, productores de combustible, etc. Para poder acelerar este proceso y alcanzar los objetivos marcados anteriormente [46].

8. PUNTO DE VISTA DE UN OPERADOR – VUELING

Como sabemos uno de los principales motivos para que un fabricante de aeronaves, en este caso Airbus, siga fabricando e implementando nuevas tecnologías a sus diseños son sus principales clientes, las compañías aéreas o diferentes operadores quienes utilizarán sus modelos de aeronaves para realizar sus vuelos.

En este apartado se hablará sobre la opinión que se tiene desde dentro de una compañía aérea que opera con modelos de avión de la familia Airbus, así como cuál es su estrategia para alcanzar las cero emisiones de carbono.

8.1. Opinión de Vueling sobre el proyecto ZEROe

El pasado 27 de abril de 2022, Airbus presentó a Vueling su *road map* para la reducción de emisiones de gases invernadero. En esta presentación se les presento su innovador proyecto ZEROe, que como se puede ver en este trabajo, todavía se encuentra en una fase muy temprana.

Esta parte, clasificada por ellos como tecnología disruptiva, era una de las piezas que les ayudará a alcanzar el objetivo esperada.

Sin embargo, aunque por parte de Vueling les parece un gran reto, además de un proyecto innovador y que podría cambiar la aviación y la imagen de los modelos de avión que tenemos en la actualidad. Consideran que todavía se encuentra en una fase muy temprana, y quedando muchas incógnitas por resolver y mucho trabajo por realizar [47].

Por su parte, están comprometidos con el objetivo de cero emisiones netas para 2050. Y una de sus bazas para poder alcanzar este objetivo es seguir trabajando en el uso de SAF en toda su flota, renovando está a aviones más eficientes y modificaciones que consideran que deben de hacerse para poder alcanzar esta meta.

Figure 33. Objetivos de sostenibilidad de Vueling. FUENTE: Vueling

A continuación, se presenta, brevemente, la estrategia que desde esta compañía se pretende seguir para llegar a las cero emisiones para 2050.

8.1.1. Mejora de la eficiencia de las operaciones

Vueling es parte del programa Single European Sky, trabajando para mejorar el funcionamiento del espacio aéreo y recudiendo así un 10% de consumo de combustible, mitigando así las emisiones de CO_2. Las acciones para la eficiencia de operaciones comprenden:

- Mejoras en la planificación de la ruta
- Optimización de las maniobras en tierra
- Definición de velocidad y altitud de vuelo óptima

Trabajan de la mano con Enaire y Eurocontrol para mejorar la eficiencia en el vuelo, en espacio europeo [48].

Figure 34. Mejora de la eficiencia en el uso del cielo europeo. FUENTE: Vueling

8.1.2. Uso de SAF como combustible

Como se ha introducido en el apartado 3.1 el SAF es un combustible alternativo, obtenido a través de materias primas o residuos.

Desde Vueling se apoya mucho esta alternativa, además de fomentar el uso de este. A partir del mes de junio de 2023, Vueling y Cepsa operarán más de 70 vuelos con combustible sostenible desde el aeropuerto de Sevilla, con un 4,5% de SAF en sus depostiyos, superando así el objetivo del 2% que establece la Unión Europea para 2025[49].

Figure 35. Proceso repostaje. FUENTE: Vueling

Vueling se ha propuesto operar el 10% de los vuelos con combustibles sostenibles (SAF) para 2030, por encima del 2% obligatorio.

8.1.3. Renovación de la flota y reducción de peso

Hasta un 25% de la flota de Vueling será de nueva generación en 2023, y se espera que para el 2023 sea del 100%.

Actualmente, los últimos modelos de avión que han incluido a su flota son los nuevos A321 NEO entre ellos, los últimos en integrarse a su flota el EC-NLY, EC-NYC, EC-NYD, EC-NYE o EC-NYF.

Figure 36. Nuevo A321 NEO - EC-NYD. FUENTE: Vueling

Estos nuevos modelos de Airbus les ha permitido reducir en un 18% las emisiones de gases de efecto invernadero por pasajero. Asimismo, se ha conseguido las emisiones de CO_2 con las siguientes medidas:

- Reducción el peso en el interior del avión. Invirtiendo 20.000.000 de euros para optimizar el peso, llegando a reducir en 45 kg de CO_2 emitido por vuelo.
- Digitalización de la documentación. Eliminando 75kg de papel por vuelo, provocando una reducción de 16kg de CO_2 emitido por vuelo [50].

9. ROAD MAP DE AIRBUS EN LA REDUCCIÓN DE CO2

Airbus presentó un road map a las diferentes compañías, que operan con sus distintos modelos de aeronaves, el camino a seguir para poder llegar a las cero emisiones en el año 2050.

Basándose en cinco grandes pilares que les permitirían poder alcanzar este hito, y así, poder garantizar un transporte totalmente limpio en emisiones de gases de efecto invernadero a nuestra atmosfera.

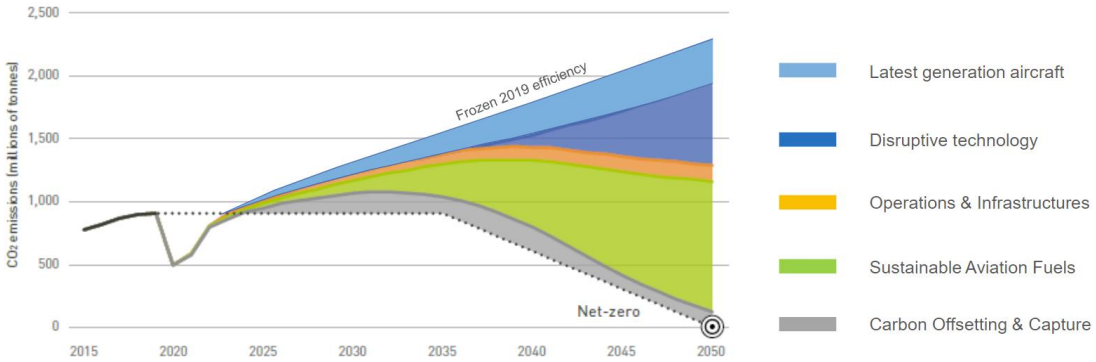

Figure 37. Aviation CO2 reduction roadmap. FUENTE: AIRBUS

Aviones de última generación.

Desde el primer vuelo de la historia, la aviación siempre ha estado en la búsqueda de desarrollar nuevas tecnologías para presentar aviones mucho más eficientes, presentando unas mejores características.

Es por eso por lo que Airbus continúa investigando y desarrollando aeronaves más eficientes, durante los últimos años ha estado desarrollando nuevos modelos de avión los cuales les permitirían emplear un 25% menos de combustible y de CO_2 que la generación anterior de modelos.

Los nuevos modelos presentados por la compañía como sus aviones de última generación, que garantizan estas condiciones son el A220, A320 NEO, A330 NEO A350 XWB. En 2023 estos modelos representan el 12% de su flota activa [51].

Tecnología disruptiva.

El estudio e investigación en tecnología disruptiva es la fase previa para poder seguir garantizando aviones de última generación en el futuro. Por este motivo Airbus está estudiando nuevas alternativas y soluciones a problemas que puedan surgir en la aviación.

El proyecto ZEROe es la baza principal a este punto, pues se considera que el uso de pilas de combustible de hidrógeno es el futuro en la aviación.

Además, también encontraríamos su proyecto demostración eXtra Performance Wing, el cual pretende epxlorar el potencial de las tecnologías de alas disruptivas en el rendimiento de las aeronaves. Se espera que este proyecto les permita:

- Reducir las emisiones de CO_2.

- Acelerar y validar tecnologías que mejoren y optimicen la aerodinámica de las alas y el rendimiento de cualquier avión futuro.
- Compatible con cualquier solución de propulsión y configuración de avión [52].

Operaciones e infraestructuras.

Este pilar hace referencia a ciertas soluciones pretendidas por Airbus para mejorar la operativa, además de suponer una reducción en emisiones de CO_2. Entre las cuales podríamos encontrar:

- Actualizaciones en la optimización del perfil de descenso o función de gestión del aire.
- Ayudas a las diferentes aerolíneas a implementar y controlar el ahorro de combustible o optimización de la aeronave.
- Gestión del tráfico aéreo, realizando investigación y desarrollo en diferentes proyectos como podrían ser SESAR
- Operaciones de tierra, implementando soluciones a APUs apagados, taxi con un solo motor o taxi con un solo motor y sin APU.

Otro de los estudios principales de la compañía, en este campo, es el denominado Fello'fly destinado a reducir emisiones y ahorrar combustible. Gracias a la utilización de la energía de las corrientes ascendentes de estela para generar sustentación en un avión seguidor para vuelos de largo radio [53].

Combustibles de aviación sostenibles – SAF.

Como hemos presentado anteriormente en el presente trabajo, el empleo de combustibles alternativos sostenibles, en este caso SAF ya es una realidad. Desde Airbus saben que esta alternativa al queroseno tradicional jugará un papel vital en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero emitidos por parte de la aviación.

Desde la compañía se pretende que entre los años de 2025 y 2030 ya se esté operando, empleando únicamente este tipo de combustible, y de esta forma evitando utilizar carburantes altamente contaminantes [54].

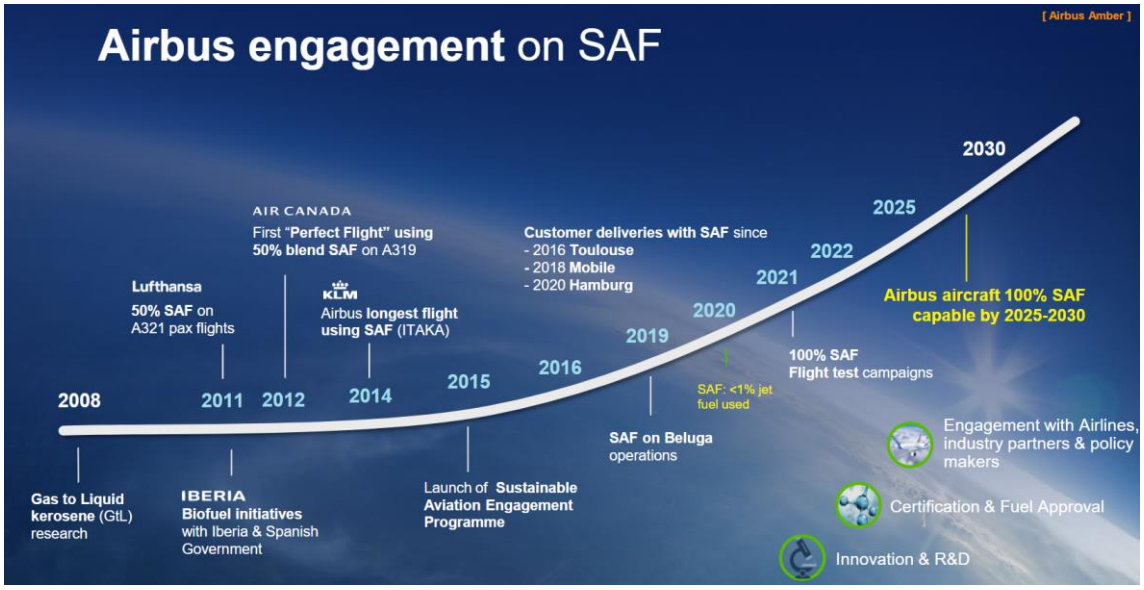

Figure 38. Airbus engagement on SAF. FUENTE: AIRBUS

Compensación y captura de carbono.

Esta práctica, la cual se pretende que cada vez sea empleada en menor medida, no es más que la compra de derechos de emisión dentro del límite máximo para así poder alcanzar el objetivo de cero emisiones netas para 2050 [55].

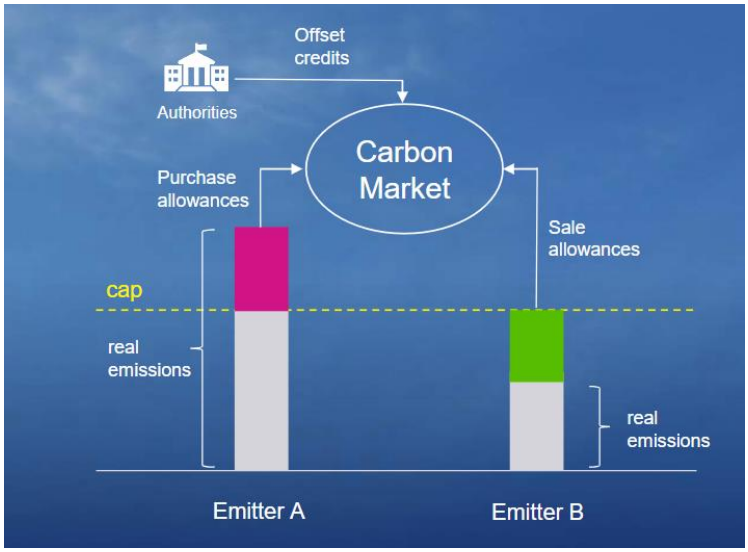

Figure 39. Market Based Measures. FUENTE: AIRBUS

9.1. Evolución hasta 2035 y transición a SAF

Como está descrito en el apartado anterior, en la parte referente al pilar de los combustibles de aviación sostenible, de aquí al año 2030 se espera que ya se esté operando con aviones que únicamente utilicen SAF. Alcanzando así un estado de carbonización neutra, no se emitiría más CO_2 que el existente en ese momento, los niveles se mantendrían constantes.

Este hecho no debería de presentar ningún cambio o variación. Pues actualmente ya se están actualizando las diferentes flotas operadas por modelos de la familia de Airbus, dando paso a la nueva generación de aviones, modelos los cuales pueden operar con queroseno tradicional y SAF, por lo que este paso a la utilización de SAF 100% para los próximos años no presentará ninguna complicación o necesidad de realizar ninguna modificación a los motores de estas aeronaves [56].

Figure 40. Modelos de avión de nueva generación. FUENTE: AIRBUS

Los modelos que podemos observar en la figura 40 son algunos de los ejemplos de la nueva generación de aviones de Airbus los cuales podrían operar exclusivamente con SAF, además de ser utilizados en 2023 con Jet A-1.

9.2. Evolución a partir de 2035

A partir del año 2035 es donde nacen las primeras cuestiones e incertidumbres, pues en primera instancia desde Airbus se espera que para ese entonces ya se puedan integrar sus modelos de ZEROe en la aviación comercial.

La transición de aviones 100% SAF a aviones que utilicen pilas de combustible de hidrógeno sería una evolución durante plazo de tiempo mucho más duradero, en comparación con el punto anterior.

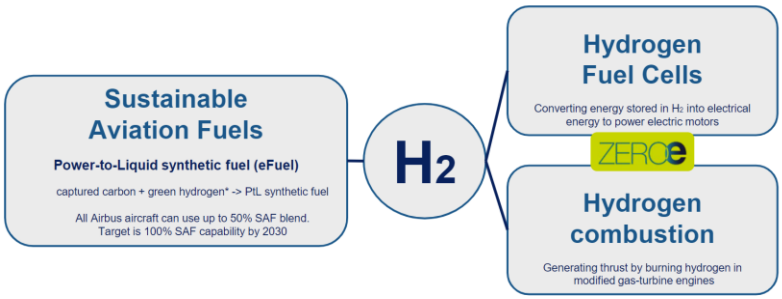

Figure 41. A surrogate for renewable energy, key enabler for aviation's targets. FUENTE: AIRBUS

Son muchas las cuestiones que deberían de ser resueltas de aquí a 2035, iniciando por las implicaciones legales, las cuales se hace referencia en el apartado 6 del presente trabajo. Además, la adaptación de los aeropuertos integrando nuevas infraestructuras necesarias el empleo de estos modelos debería de iniciarse en estos años, para disponer de todo lo necesario para poder iniciar esta nueva transición hacia el futuro.

En cuento a la transición a partir de 2035 entre aviones que emplean SAF y los modelos del proyecto ZEROe, en un escenario optimista, en el cual de dispusiera de todo lo necesario para incluir estos modelos a la operativa de las diferentes aerolíneas, sería un proceso muy lento.

Pasar de aviones de SAF a aviones de hidrógeno, en comparación a la transición entre el uso de queroseno a SAF, sería un proceso mucho más lento. Pues en este caso, los aviones utilizados con SAF no podrían ser adaptados para operar con hidrógeno, con lo que se debería de realizar un plan de relevo entre estos modelos y los modelos ZEROe, por lo que este proceso podría implicar un gran número de años. Así, sería de esperar durante los años de esta transición veríamos aviones de ambos de amos estilos operando en simultáneamente durante un gran número de años, hasta poder llegar al 100% de aviones impulsados por combustible de pila de hidrógeno.

Asimismo, se debería de tener en cuenta que aeropuertos disponen de las infraestructuras necesarias para poder operar, condición que podría condicionar la velocidad de transición entre modelos a las aerolíneas.

10. CONCLUSIONES

En el presente apartado se exponen las conclusiones obtenidas en el desarrollo del presente Trabajo de Fin de Grado, sobre la investigación del nuevo motor de pila de combustible impulsado por hidrógeno del nuevo proyecto ZEROe de la compañía Airbus.

Estas conclusiones se encontrarán separadas en distintos apartados permitiendo estructurarlas en conclusiones sobre los objetivos marcados en la iniciación de este TFG y las conclusiones personales.

10.1. Conclusiones sobre objetivos

Durante el inicio de este trabajo fueron planteados los siguientes cinco objetivos, que se pretendían alcanzar con la finalización de este. Los mismos quedarían descritos de la siguiente manera:

1º El primero de esos objetivos consistía en realizar una investigación sobre el uso de hidrógeno como combustible y de su aplicación en el proyecto ZEROe de Airbus para así poder obtener un conocimiento de este. Por lo que, después de realizar este trabajo podría concluir que el presente objetivo ha sido cumplido, pues he podido adquirir conocimientos técnicos y estratégicos sobre que consiste en proyecto de Zero-Emissions de Airbus, así como del funcionamiento que tendría el hidrógeno como combustible.

2º El segundo objetivo que me marqué en la fase inicial de este trabajo fue el de realizar un estudio sobre la rentabilidad técnica y económica sobre la utilización de este tipo de combustible. Este punto fue más complicado de estudiar, pues como se ha podido ver durante todo el presente trabajo el estado de este proyecto todavía es muy inicial, por lo que en la actualidad hay muchas incógnitas y mucho trabajo por hacer por parte de Airbus. Pues se disponen de las ideas, que a priori les gustaría realizar, pero no se dispone de ningún modelo físico, más allá de las pruebas que se pretenden hacer con la compañía CFM, que se encuentra desarrollado en el apartado 3.2., por lo que mucha de las implicaciones tanto técnicas como económicas de este proyecto son meras hipótesis de carácter propio, desarrolladas a través de estudios realizados por empresas ajenas a Airbus sobre los costes e implicaciones técnicas que podrían presentar los aviones impulsados por hidrógeno. Por tanto, en 2023, por parte de Airbus tienen mucho trabajo por hacer aún, si pretenden poder integrar sus modelos en 2035 a la aviación comercial. Una idea de lo que supondría cambiar la flota actual a modelos sostenibles en base tecnológica con H_2, sería alrededor de unos **800.000 millones de €,** cifra que por su magnitud hace pensar en cómo sería su línea principal de financiación y posterior adaptación al *road map* establecido.

3º El tercer objetivo marcado hace referencia a la realización de un estudio sobre las implicaciones legislativas necesarias para este proyecto. De la misma forma que en el apartado anterior, todavía se dispone de escasa información, tanto por la parte de la compañía, como de los órganos oficiales, tanto del estado español, como por parte de la UE. Se disponen de varias hojas de ruta que se debería de seguir para poder operar este tipo de avión, así como del uso del hidrógeno como alternativa al queroseno. Sin embargo, da la sensación de que este pilar, que es prioritario para que el proyecto ZEROe se pueda llevar a cabo, será el que más tarde en adaptarse a este cambio, pues en 2023 hay escasas, por

no decir ninguna, adaptación o proyectos reales activos, para que en 2035 se pueda comenzar a operar con aviones de hidrógeno.

4º El cuarto objetivo planteado en el inicio del proyecto consistía en realizar una investigación sobre los cambios que causaría en las instalaciones aeroportuarias. Para la realización de este estudio sobre las implicaciones y cambios que tendrían las instalaciones aeroportuarias ya se disponía de más información sobre el tema realizada. Conocer la viabilidad de que este proyecto se pueda llevar a cabo en las fechas indicadas por Airbus. También se ha podido obtener información sobre la estrategia de AENA para alcanzar las cero emisiones en el año 2050. Además, la estrategia de AENA de poder alcanzar un estado de carbonización neutro iría sincronizado con la intención de Airbus de alcanzar el 100% de SAF en todos sus modelos de avión durante los años 2025-2030, de la misma forma que ambas empresas, junto con las aerolíneas, como hemos visto con Vueling, de poder alcanzar las cero emisiones para el año 2050.

   Sin embargo, aún no se ha iniciado ningún tipo de construcción o modificación en los diferentes aeropuertos, **situación que hace cuestionar si realmente se podrá cumplir con las fechas marcadas por Airbus en su proyecto.**

5º Por último, y de la mano de todos los objetivos anteriores, encontramos el último objetivo marcado durante el inicio de la realización de este trabajo, el cual consiste en conocer la viabilidad de que este proyecto se pueda llevar a cabo en las fechas indicadas por Airbus. Puedo concluir, después de la realización del presente TFG, **que cumplir con las fechas marcadas por AIB cuando se presentó el proyecto ZEROe resultan difíciles de consumar** viendo el estado actual del proyecto y teniendo en cuenta todos los puntos anteriores y el estado en el cual se encuentran en la actualidad.

10.2. Conclusiones personales

La realización de este Trabajo de Fin de Grado ha sido un proceso desafiante y beneficioso personalmente, el cual ha sido todo un reto. Pues realizar un estudio sobre un tema el cual no sé conocía mucho, partiendo sin ningún conocimiento sobre el proyecto de Airbus y de su estado, ha hecho que haya tenido que aprender a buscar información ya no solo la que se puede disponer en internet, bibliotecas o diferentes hemerotecas, sino tratado de realizar contactos los cuales sean útiles para poder alcanzar los objetivos marcados. Además de aprender a organizar el tiempo y los recursos obtenidos para poder elaborar un trabajo que pueda cumplir con mis objetivos personales. Los mismos se podrían resumir de la forma siguiente:

6º En referencia al proyecto ZEROe de la compañía Airbus, y después de haber aprendido todo lo que he podido, hablado con profesionales que se dedican a estrategias sostenibles de compañías aéreas, como es el caso de la compañía Vueling, me ha ayudado a entender el estado de la aviación en la actualidad, cuáles son sus intenciones y dificultades. Sobre el proyecto ZEROe puedo concluir que, bajo mi punto de vista, es el futuro de la aviación, **considero que el empleo de hidrógeno como alternativa al queroseno es la mejor alternativa para poder mitigar totalmente las emisiones de gases de efecto invernadero** realizadas por las operaciones aéreas.

7º Sin embargo, considero que las fechas marcadas por la compañía son muy justas, por lo **que el *road map* sobre la evolución que se pretende tener en este proyecto no es**

realista con las condiciones que se tienen actualmente, por lo que veo muy difícil que se pueda llegar a realizar estas acciones que refleja Airbus. No tengo duda en que tarde o temprano se podrá terminar realizando, pero des de luego no en las fechas establecidas por los encargados de presentar este proyecto de aviones impulsados por hidrógeno.

Referencias

[1] *INFORME ESPECIAL DEL IPCC LA AVIACIÓN Y LA ATMÓSFERA GLOBAL*. (2019). IPCC. https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/av-sp.pdf.

[2] *REUNIÓN DE ALTO NIVEL SOBRE LA FACTIBILIDAD DE UN OBJETIVO AMBICIOSO A LARGO PLAZO PARA LA REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES DE CO2 DE LA AVIACIÓN INTERNACIONAL (HLM-LTAG)*. (2022, 19 junio). ICAO. https://www.icao.int/Meetings/HLM-LTAG/Documents/HLM.LTAG.WP.03.sp.pdf.

[3] *Hidrógeno*. (2019, 6 febrero). Centro Nacional de Hidrógeno. https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/.

[4] Green hydrogen: the energy of the future essential for decarbonisation | ACCIONA. (s. f.). https://www.acciona.com/green-hydrogen/?_adin=02021864894.

[5] Producción de hidrógeno. (s. f.). TUVSUD. https://www.tuvsud.com/es-es/temas/hidrogeno/cadena-valor-hidrogeno/produccion-hidrogeno.

[6] Blue Hydrogen - Una visión general. (2023, 15 febrero). Crowcon Detection Instruments Ltd. https://www.crowcon.com/es/blog/blue-hydrogen-an-overview/.

[7] Producción de hidrógeno. (s. f.). TUVSUD. https://www.tuvsud.com/es-es/temas/hidrogeno/cadena-valor-hidrogeno/produccion-hidrogeno.

[8] Green hydrogen: the energy of the future essential for decarbonisation | ACCIONA. (s. f.-b). https://www.acciona.com/green-hydrogen/?_adin=11551547647

[9] Integration of Hydrogen Aircraft into the Air Transport System: An Airports Operations and Infrastructure Review. (2021, 3 junio). ACI World Store. https://store.aci.aero/product/integration-of-hydrogen-aircraft-into-the-air-transport- system-an-airports-operations-and-infrastructure-review/

[10] Integration of Hydrogen Aircraft into the Air Transport System: An Airports Operations and Infrastructure Review. (2021, 3 junio). ACI World Store. https://store.aci.aero/product/integration-of-hydrogen-aircraft-into-the-air-transport- system-an-airports-operations-and-infrastructure-review/

[11] Green hydrogen: the energy of the future essential for decarbonisation | ACCIONA. (s. f.-b). https://www.acciona.com/green-hydrogen/?_adin=11551547647

[12] El hidrógeno verde: una alternativa para reducir las emisiones y cuidar nuestro planeta. (2021, 22 abril). Iberdrola. https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/hidrogeno-verde

[13] Cardona, M. B. (2020, 29 septiembre). Airbus presenta ZEROe, el primer avión cero emisiones. viajes.nationalgeographic.com.es. https://viajes.nationalgeographic.com.es/lifestyle/airbus-presenta-zeroe-primer-avion-cero-emisiones_15981

[14] Airbus desvela nuevos conceptos de aviones con cero emisiones. (2020, 21 septiembre). AIRBUS. https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/afd1a6a4808e6c4da042f5a792608d59_ES-Airbus-unveils-ZEA-concepts.pdf

[15] AIRBUS. (2020, 15 diciembre). These pods could provide a blueprint for future hydrogen aircraft. https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2020-12-these-pods-could-provide-a-blueprint-for-future-hydrogen-aircraft

[16] Airbus desvela nuevos conceptos de aviones con cero emisiones. (2020, 21 septiembre). AIRBUS. https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/afd1a6a4808e6c4da042f5a792608d59_ES-Airbus-unveils-ZEA-concepts.pdf

[17] Airbus desvela nuevos conceptos de aviones con cero emisiones. (2020, 21 septiembre). AIRBUS. https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/afd1a6a4808e6c4da042f5a792608d59_ES-Airbus-unveils-ZEA-concepts.pdf

[18] AIRBUS. (s. f.). ZEROe Towards the world's first hydrogen-powered commercial aircraft. Recuperado 10 de abril de 2023, de https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission-journey/hydrogen/zeroe

[19] ENAIRE recupera el 92,2% de los vuelos en 2022 respecto a los niveles récord de 2019. (2023, 11 enero). ENAIRE. Recuperado 23 de abril de 19d. C., de https://www.enaire.es/es_ES/2023_01_11/np_estadisticas_2022_enaire#:~:text=En%202022%2C%20los%20vuelos%20gestionados,tr%C3%A1fico%20previo%20a%20la%20COVID.&text=Adem%C3%A1s%2C%20la%20recuperaci%C3%B3n%20del%20tr%C3%A1fico,puntos%20(8%2C9%25)

[20] *Hybrid and electric flight. Laying the groundwork for decarbonising aviation*. (s. f.). AIRBUS. https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission-journey/hybrid-and-electric-flight

[21] Akrofi, C. (2021, 14 julio). A Guide to Sustainable Aviation Fuels - ADS Group. ADS Group. https://www.adsgroup.org.uk/sustainability/sustainable-aviation-fuels/

[22] SUSTAINABLE AVIATION FUELS GUIDE. (2018, 9 abril). ICAO. https://www.icao.int/environmental-protection/knowledge-sharing/Docs/Sustainable%20Aviation%20Fuels%20Guide_vf.pdf

[23] Airbus reveals hydrogen-powered zero-emission engine. (2022, 30 noviembre). AIRBUS. https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2022-11-airbus-reveals-hydrogen-powered-zero-emission-engine

[24] Penalba, J. (2022). Airbus y CFM International se asocian para desarrollar un motor de hidrógeno. Avion Revue Internacional. https://www.avionrevue.com/aviacion-comercial/airbus-y-cfm-international-se-asocian-para-desarrollar-un-motor-de-hidrogeno/

[25]Presión.(s. f.).https://www.cenam.mx/FYP/Presion/Pre1.aspx#:~:text=Presi%C3%B3n%20atmosf%C3%A9rica%20normal%20(est%C3%A1ndar)%3A,general%20de%20Pesas%20y%20Medidas.

[26] How to store liquid hydrogen for zero-emission flight. (2021, 10 diciembre). AIRBUS. https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2021-12-how-to-store-liquid-hydrogen-for-zero-emission-flight.

[27] Gardiner, G. (2022, 9 marzo). Will the Airbus-CFM H2 flight demonstrator use metal or composite tanks? Gardner Business Media, Inc. https://www.compositesworld.com/articles/will-the-airbus-cfm-h2-flight-demonstrator-use-metal-or-composite-tanks.

[28] Hybrid and electric flight. (s. f.). AIRBUS. https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission-journey/hybrid-and-electric-flight.

[29] García, L. (2023, 10 marzo). Proyectos CIEN. Euro Funding. https://euro-funding.com/es/blog/proyectos-estrategicos-cien/.

[30]Misiones Ciencia e Innovación. CDTI.https://www.cdti.es/index.asp?MP=100&MS=902&MN=2&TR=C&IDR=2902

[31] Innovation Fund. (s. f.). Climate Action. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/funding-climate-action/innovation-fund_en#tab-0-0

[32] Horizon Europe. (2023, 25 mayo). Research and innovation. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en

[33] European Clean Hydrogen Alliance. (s. f.). Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/strategy/industrial-alliances/european-clean-hydrogen-alliance_en

[34] Hydrogen-powered aviation. (2020). CleanSky2. https://www.euractiv.com/wp-content/uploads/sites/2/2020/06/20200507_Hydrogen-Powered-Aviation-report_FINAL-web-ID-8706035.pdf

[35] Precio del Hidrógeno - Hidrogeno verde. (2021, 9 marzo). Hidrogeno verde. https://hidrogeno-verde.es/precio-del hidrogeno/#:~:text=Teniendo%20en%20cuenta%20todos%20estos,y%2010%20euros%20por%20kilogramo.

[36] Precios de keroseno en todo el mundo, 19-jun-2023 | GlobalPetrolPrices.com. (s. f.). GlobalPetrolPrices.com. https://es.globalpetrolprices.com/kerosene_prices/

[37] MITECO. (s. f.). https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/hidrogeno/hojarutahidrogenorenovable_tcm30-525000.PDF

[38] MITECO. (s. f.). https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/hidrogeno/hojarutahidrogenorenovable_tcm30-525000.PDF

[39] MITECO. (s. f.). https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/hidrogeno/hojarutahidrogenorenovable_tcm30-525000.PDF

[40] MITECO. (s. f.). https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/hidrogeno/hojarutahidrogenorenovable_tcm30-525000.PDF

[41] Airports Council International. (s.f.). Integration of Hydrogen Aircraft into the Air Transport System.

[42] Airports Council International. (s.f.). Integration of Hydrogen Aircraft into the Air Transport System.

[43] Airports Council International. (s.f.). Integration of Hydrogen Aircraft into the Air Transport System.

[44] Airports Council International. (s.f.). Integration of Hydrogen Aircraft into the Air Transport System.

[45] Airports Council International. (s.f.). Integration of Hydrogen Aircraft into the Air Transport System.

[46] Plan Acción Climática - AENA. (2022). AENA.es. https://www.aena.es/es/corporativa/sostenibilidad-ambiental/cambio-climatico/plan-accion-climatica.html

[47] Santiago Lopezbarrena Arenas, Sustainability Manager de Vueling (16/05/2023). Comunicación personal.

[48] Vueling Sustainability. (2023). Vueling. https://www.vueling.com/es/corporativo/sostenibilidad

[49] Europa Press. (s. f.). Vueling y Cepsa operan más de 75 vuelos con combustible sostenible desde el aeropuerto de Sevilla. europapress.es. https://www.europapress.es/turismo/transportes/noticia-vueling-cepsa-operan-mas-75-vuelos-combustible-sostenible-aeropuerto-sevilla-20221125150931.html

[50] Vueling Sustainability. (2023). Vueling. https://www.vueling.com/es/corporativo/sostenibilidad

[51] Airbus. (27th April 2022). Airbus Sustainability roadmap for Vueling.

[52] Airbus. (27th April 2022). Airbus Sustainability roadmap for Vueling.

[53] Airbus. (27th April 2022). Airbus Sustainability roadmap for Vueling.

[54] Airbus. (27th April 2022). Airbus Sustainability roadmap for Vueling.

[55] Airbus. (27th April 2022). Airbus Sustainability roadmap for Vueling.

[56] Airbus. (27th April 2022). Airbus Sustainability roadmap for Vueling.

El abajo firmante, Juan Antonio Linares Gallego autor del presente Trabajo de Fin de Grado, alumno de la Escuela de Ingeniería de la UAB.

JUAN ANTONIO LINARES GALLEGO - DNI 45990950N

Firmado digitalmente por JUAN ANTONIO LINARES GALLEGO - DNI 45990950N
Fecha: 2023.06.28 11:23:33 +02'00'