



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

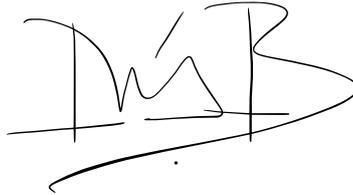
ANÁLISIS DEL TRANSPORTE AÉREO DE MERCANCÍAS Y SOLUCIONES PARA SU DESCARBONIZACIÓN

Autora: Inés Ibáñez Plaza
Director: Alberto Mascareñas Brito

2022/2023 Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Análisis del transporte aéreo de mercancías y soluciones para su descarbonización
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2022/23 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Inés Ibáñez Plaza

Fecha: 17/06/2023

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Alberto Mascareñas Brito

Fecha: 17/06/2023



**GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES**

TRABAJO FIN DE GRADO

**ANÁLISIS DEL TRANSPORTE AÉREO DE MERCANCÍAS
Y SOLUCIONES PARA SU DESCARBONIZACIÓN**

**Autora: Inés Ibáñez Plaza
Director: Alberto Mascareñas Brito**

2022/2023 Madrid

ANÁLISIS DEL TRANSPORTE AÉREO DE MERCANCÍAS Y SOLUCIONES PARA SU DESCARBONIZACIÓN

Autora: Ibáñez Plaza, Inés.

Director: Mascareñas Brito, Alberto.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de fin de carrera tiene como propósito el tratamiento sistemático de la cuestión relativa a la descarbonización del transporte aéreo de mercancías, con el fin de presentar soluciones realistas en el proceso progresivo de reducción de las emisiones de carbono a la atmósfera, en el marco de la lucha contra el cambio climático.

Se ha realizado desde una triple perspectiva y, estudio conjunto, que integra la visión tecnológica, económica y normativa. El análisis recogido en el documento se circunscribe al ámbito territorial nacional y europeo. A lo largo de sus páginas se explica la situación del sector, sus dificultades y las posibles soluciones, unas más innovadoras que otras, para alcanzar la reducción o, en su caso, la eliminación de las emisiones de CO₂ en el ámbito de la navegación aérea.

La industria de la aviación no es uno de los sectores que más contribuyen a la contaminación del medioambiente, ya que sus emisiones de CO₂ solo representan en torno al 3 % de las mundiales. Por su parte, el transporte de mercancías solo es responsable de un 15 %. Ahora bien, ambas circunstancias no eximen al sector aéreo del cumplimiento de la obligación de búsqueda de soluciones que reduzcan las emanaciones de gases. A este respecto, resulta de enorme interés la puesta en marcha de estrategias e iniciativas conjuntas, entre los diversos sectores afectados y afines a la navegación aérea de carga, con el fin de alcanzar mejores y más eficaces resultados frente al grave problema de la contaminación.

Los informes emitidos por el IPCC, que evalúan todos los elementos científicos relacionada con el cambio climático, son desalentadores y previenen a Gobiernos e instituciones sobre la urgente necesidad de tomar medidas para desacelerar los efectos del cambio climático, que ya venimos padeciendo. Los GEI se acumulan en la atmósfera formando una barrera de aislamiento térmico que atrapa el calor generado por el sol, lo retienen y aumentan el calor en la atmósfera, lo que genera patrones climáticos más extremos. Según el IPCC, la temperatura de la tierra va a experimentar

un incremento entre 1,7° Celsius y 2,2° Celsius. La consecuencia es la multiplicación de fenómenos climáticos y meteorológicos que provocan grandes catástrofes, tales como el calor extremo, las lluvias torrenciales, la escasez de agua o los disturbios ciclónicos, entre otros.

Se examinan de forma detallada, a lo largo de las siguientes páginas, las posibles y necesarias soluciones tecnológicas que la comunidad científica estima que posibilitarán la transición hacia una industria aérea libre de emisiones. Nos referimos a fórmulas, tales como los carburantes sostenibles, la electrificación del transporte aéreo, o el hidrogeno verde, entre otros. Se han tenido en cuenta los costes financieros asociados a la implementación de las citadas soluciones, valorándose los beneficios ambientales generados por el uso sostenible, tanto a largo, como a corto plazo.

No todas las medidas citadas en el párrafo anterior tienen el mismo recorrido. En Europa, actualmente, solo un 0,05 % del carburante utilizado por la aviación es del tipo SAF. La construcción de plantas industriales de SAF se ha comenzado entre los años 2022 y 2023, y está previsto que su producción empiece en breve. El resto de las opciones energéticas, tales como el hidrogeno verde y los aviones eléctricos son de enorme importancia, sobre todo a largo plazo, ya que son tecnologías con emisiones nulas. El problema que plantean es que su desarrollo científico se encuentra en una fase embrionaria, esto es, requieren un nivel de investigación mucho más avanzado; demandan grandes inversiones económicas e infraestructuras más complejas.

Por último, no podemos ignorar otro tipo de soluciones como las compensaciones de emisiones, comúnmente conocidos como offsets, cuya función es la captura de dióxido de carbono.

Una parte del presente estudio se ha dedicado a la sistematización y al análisis de la normativa básica en la materia desde los planos internacional, europeo y español. Se trata no solo de la mera recopilación de normas y proyectos, sino de presentar un estudio exhaustivo sobre el uso sostenible del transporte aéreo, las normas y proyectos implementados por las organizaciones internacionales en general y las responsables de la navegación aérea, en particular, así como el análisis de las cuestiones medioambientales globales y regionales para incentivar una industria aérea más comprometida con el medio ambiente. Destacamos, a modo de ejemplo, el plan estratégico CORSIA y el RCDE UE, que han puesto en marcha el comercio de derechos de emisión junto con los programas de compensación de emisiones. Así mismo, se abordan algunas consideraciones relacionadas con el importante tema de los impuestos aplicados al sector, así como las subvenciones y ayudas ofrecidas desde instancias gubernamentales nacionales, comunitarias y de entidades no lucrativas y/o privadas que tienen como objetivo fomentar la descarbonización.

Por último, se han planteado posibles escenarios del proceso de descarbonización del sector aéreo enfocado, principalmente, a la reducción de emisiones CO₂. En la elaboración se han tenido en cuenta factores que acompañan, de forma inevitable, a la necesaria transformación de la navegación aérea, tales como, el coste económico de queroseno en el futuro, la disponibilidad de las tecnologías, así como la capacidad de satisfacer los suministros requeridos por esta industria, que garanticen una prestación de servicios eficaz a clientes y mercados.

METODOLOGÍA



Fuente: Elaboración propia
Figure 1. Metodología

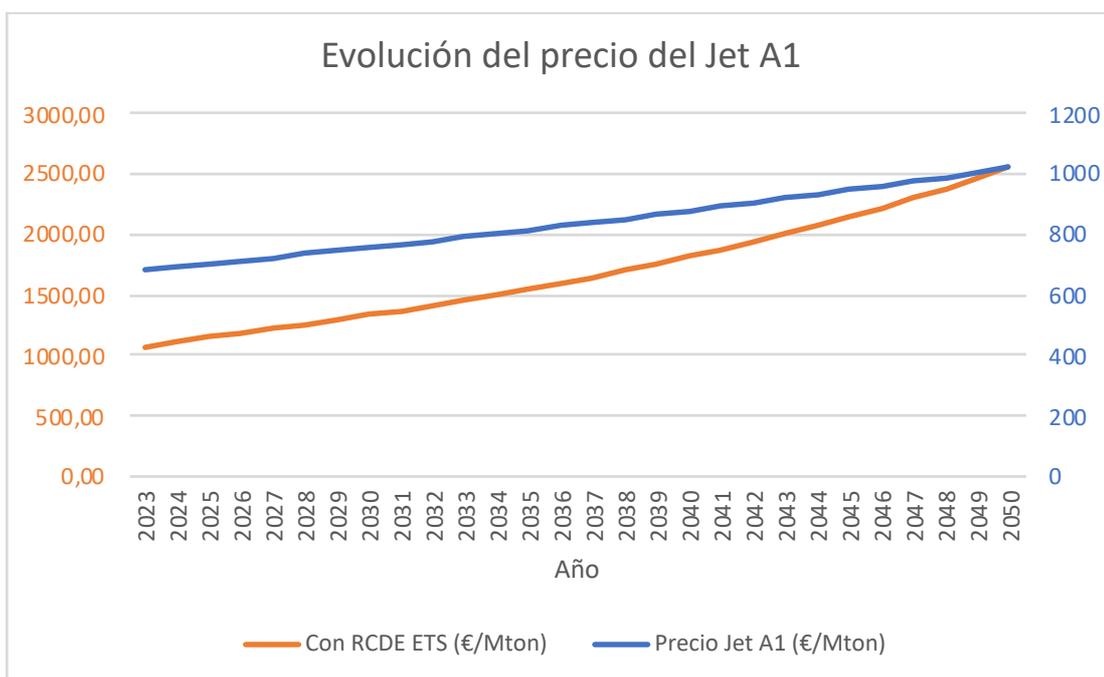
El presente trabajo se ha dividido en dos bloques diferenciados, pero íntimamente conectados. Una primera parte dedicada a la investigación y análisis de la documentación sobre el tema, y una segunda, más práctica, en la que se aplica la información obtenida al diseño de tres escenarios, en el que se plantean diversas hipótesis. La metodología seguida es descriptivo, analítica y prospectiva (utilizando el método de los escenarios).

En la primera parte se realizó un profundo estudio sobre el sector aéreo en el ámbito español y europeo en la actualidad, analizando los principales aeropuertos y el funcionamiento del transporte de mercancías dentro de los diferentes territorios, así como su impacto medioambiental. Proseguido de un examen de la normativa, proyectos e iniciativas en los planos internacional, europeo y español. Por último, se analizaron todas las soluciones disponibles en el mercado, o que se encuentran en fase de desarrollo, para descarbonizar esta industria.

Una vez finalizada la parte de documentación, se procedió a plantear las hipótesis y escenarios para realizar el estudio sobre la descarbonización del sector aéreo. Para ello se utilizaron todos los datos e información obtenida durante la investigación. Posteriormente, se elaboraron gráficas y tablas de emisiones de CO₂ para cada uno de los escenarios, que permiten evaluar las proyecciones futuras. Se desarrollaron también matrices comparativas, para obtener conclusiones más globales y reales.

RESULTADOS

Se plantean tres escenarios, desde el más optimista hasta el más pesimista, para los que el nivel de desarrollo e introducción de la tecnología analizada es diferente, esto tendrá un impacto directo sobre las emisiones y los precios de cada uno de los carburantes, así como de la retirada de las emisiones de CO₂. Además, se ha estudiado la evolución esperada del precio de Jet A1 en base a las hipótesis, así como su evolución tras la incorporación del precio de los derechos de emisión.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 1. Evolución del precio del Jet A1 con y sin precio RCDE EU

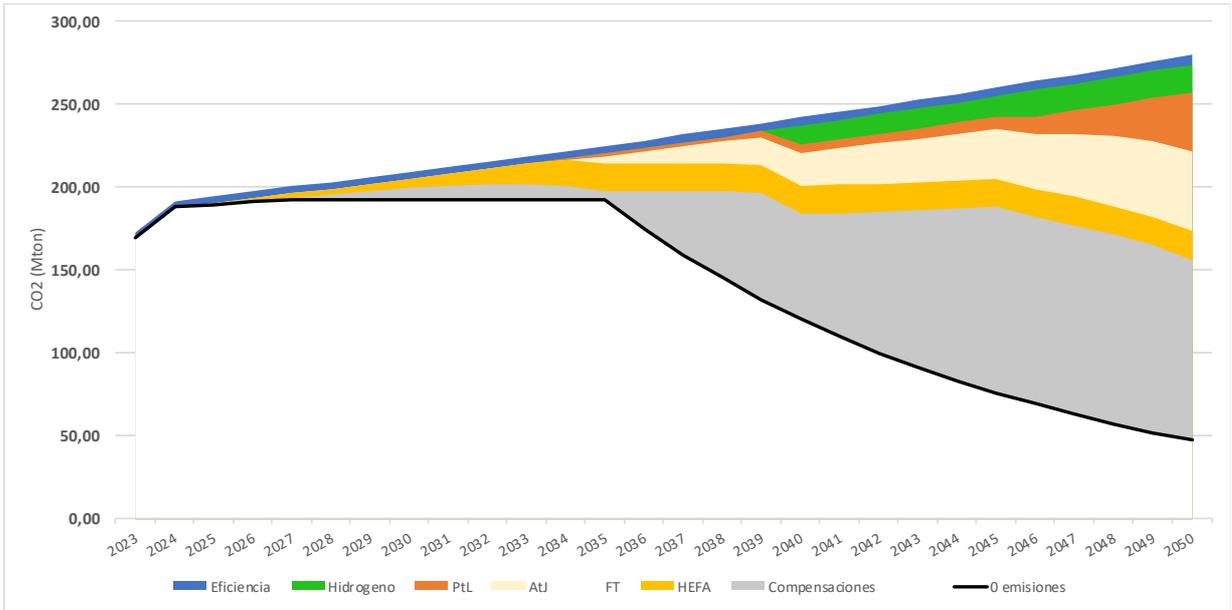
Escenario 1

Este primer escenario se presenta como el más negativo. Las mejoras tecnológicas se mantienen a un nivel de progreso conservador y, por tanto, muestran una continuación del ritmo de mejora actual.

	Eficiencia	Hidrogeno	PtL	AtJ	FT	HEFA	Compensaciones
% Reducción 2050	3%	7%	15%	14%	7%	7%	47%

Fuente: elaboración propia

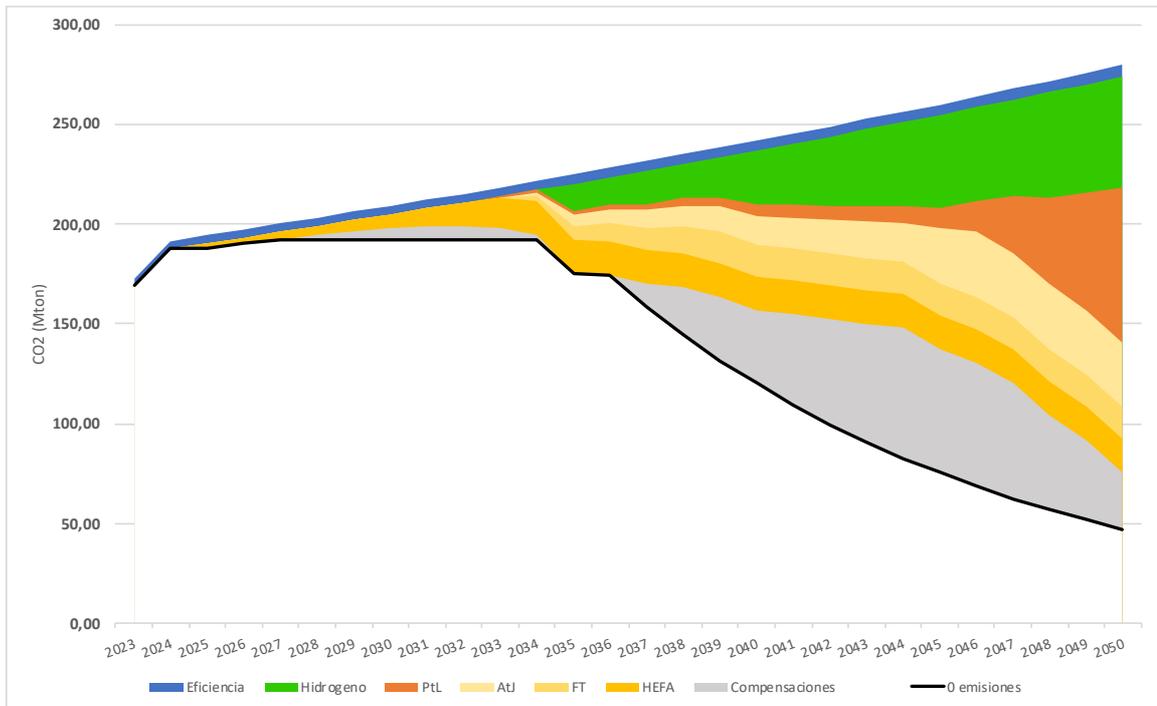
Tabla 1. Porcentaje de CO₂ reducido por cada medida en el escenario 1



Fuente: elaboración propia
Gráfico 2. Emisiones de CO2 en el escenario 1

Escenario 2

En este segundo escenario se cumplirían todas las hipótesis planteadas en la sección 7.1 (página 105), y se alcanzarían los valores mínimos de SAF marcados por la UE (Tabla 4, página 91). Además, en este contexto el hidrogeno verde cumple con las fechas de introducción estimadas en el informe de PwC (Figura 55).



Fuente: elaboración propia
Gráfico 3. Emisiones de CO2 en el escenario 2

	Eficiencia	Hidrogeno	PtL	AtJ	FT	HEFA	Compensaciones
% Reducción 2050	2%	20%	34%	14%	7%	7%	16%

Fuente: elaboración propia

Tabla 2. Porcentaje de CO2 reducido por cada medida en el escenario 2

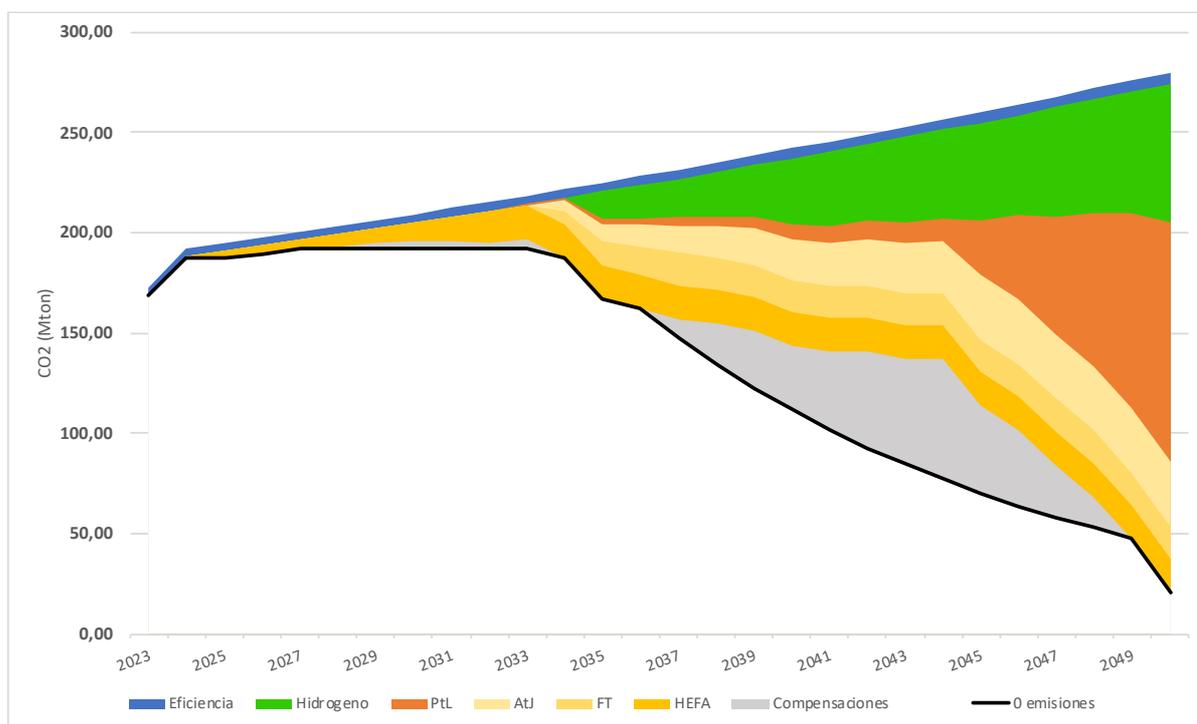
Escenario 3

El tercer escenario se presenta como una utopía, aunque no extremadamente alejada de la realidad, ya que solo se tendrán en cuenta aquellos recursos tecnológicos considerados viables, pero bajo la estimación de que su nivel de escalabilidad será mayor a la predicha hasta el momento.

	Eficiencia	Hidrogeno	PtL	AtJ	FT	HEFA	Compensaciones
% Reducción 2050	2%	27%	46%	13%	6%	6%	0%

Fuente: elaboración propia

Tabla 3. Porcentaje de CO2 reducido por cada medida en el escenario 3



Fuente: elaboración propia

Gráfico 4. Emisiones de CO2 en el escenario 3

CONCLUSIONES

El presente trabajo se ha concebido, de forma intencionada, dividido en dos bloques diferenciados, pero íntimamente conectados. Una primera parte reúne una exhaustiva e imprescindible investigación para la comprensión de un sector complicado como el aéreo, máxime si la cuestión a tratar es su descarbonización. En la segunda parte, con la ayuda de todos los datos técnicos, económicos y normativos recogidas en la parte primera del estudio, se han elaborado tres posibles escenarios diferentes en los que se plantea si será posible y en qué plazo una aviación libre de emisiones. Las conclusiones que se presentan se apoyan en el análisis realizado y los resultados obtenidos.

En la actualidad se encuentran en marcha un amplio abanico de medidas, estrategias y tecnologías encaminadas a la promoción, con mayor o menor éxito, a la descarbonización de la navegación aérea. Los SAF presentan interesantes ventajas que se resumen en tres ideas: tienen un punto de ignición similar al del Jet-A1, no necesitan una infraestructura especial para su almacenamiento y transporte y las aeronaves no requieren adaptaciones para su utilización. Los inconvenientes se concretan en que no eliminan las emisiones en su totalidad, son caros y, en la actualidad, su producción sigue siendo escasa. Los resultados del análisis realizado advierten que no es posible la descarbonización de la industria aérea sin la intervención de los SAF. Hoy por hoy, son la solución más viable, desde una perspectiva tecnológica y económica, pese a su elevado precio. Debe añadirse, que el coste del queroseno, presumiblemente, irá en aumento lo que tendrá consecuencias negativas para industria aérea.

Las medidas legislativas y los proyectos en curso para la descarbonización del transporte aéreo de mercancías son numerosas, su origen es diverso y presentan cierto carácter disperso y fragmentario. Se incluyen regulaciones sobre emisiones, investigación y desarrollo de tecnologías sostenibles, incentivos y financiación, colaboración público-privada y optimización logística. Todo este conglomerado, de normas y proyectos, pretende la promoción de una transición hacia un transporte aéreo de mercancías más sostenible y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero. En este sentido, se observa en los gráficos planteados en los tres escenarios proyectados que los planes CORSIA y Fly Net Zero de la IATA, son eficaces, jugando un papel esencial en la descarbonización del sector a corto y medio plazo. Iniciativas y planes como los citados son necesarios porque ofrecen incentivos imprescindibles para la promoción de grandes inversiones de capital requeridas, por ejemplo, para la construcción de plantas de producción de SAF o I+D en el marco del hidrógeno verde y la aviación eléctrica.

Las soluciones tecnológicas como la electrificación de las aeronaves o la producción de hidrógeno verde se presentan muy interesantes desde la perspectiva de

cero emisiones, aunque no estarán disponibles ni a corto ni a medio plazo. Pero requieren mayor desarrollo investigador todavía para conseguir un escenario, totalmente, libre de emisiones. Si solo se promueve el uso de combustibles sostenibles, dejando de lado estas otras soluciones, la descarbonización, a partir del año 2035, comenzará a ser inviable, ya que es un sector cuyo crecimiento se estima en alza constante debido al mundo globalizado en el que habitamos.

La implicación y el esfuerzo de toda la industria aeronáutica, gobiernos y organismos internacionales son fundamentales. Asimismo, la cooperación entre los distintos sectores industriales promovería un rápido desarrollo del hidrogeno verde, lo que nos proyectaría un horizonte más esperanzador que las funestas predicciones recogidas en los informes emitidos por el IPCC. No hay tiempo para una reducción paulatina de las emisiones de CO₂, como está planteado hasta 2050, hay que situarse en un escenario de descarbonización, es decir, de emisiones cero.

El transporte aéreo en general y el de mercancías, en particular, para que sea viable demanda, con urgencia, un mayor desarrollo investigador desde un punto de vista tecnológico y científico. Así mismo, requiere la cooperación de todas las partes implicadas en el proceso (Gobiernos, organismos internacionales, operadores y agentes económicos, etc.). Por último, precisa el estricto cumplimiento de normas, decisiones y acciones adoptadas hasta la fecha, como medio de transformación de la navegación aérea en un sector descarbonizado y sostenible, que conjugue prosperidad económica, integridad del medio ambiente y equidad social. Todo ello enmarcado en el respeto de los ODS, que mejoran la calidad de vida de todas las personas y el futuro del planeta.

Las conclusiones específicas de las hipótesis y escenarios planteados son las siguientes:

- La industria aérea ha experimentado un crecimiento exponencial y se prevé que así continuará en el futuro. Esta circunstancia provocará que, en 2050, en los aeropuertos europeos, tendrán lugar en torno a 11,3 millones de despegues, que necesitarán cerca de 65 Mton de Jet A1.
- Se prevé que el precio del queroseno experimente un crecimiento constante, de forma que, en 2050, su precio sea 3,6 veces el de 2023. En consecuencia, la compra derechos de emisiones, exigida por CORSIA y por el RCDE UE, se convertirá en una especie de “tasa impositiva”. Esta circunstancia podría dar lugar a una reducción del precio de los SAF e, incluso, del hidrogeno verde.
- Los bio-SAF juegan un papel esencial en la descarbonización hasta el año 2035, ya que son la única tecnología disponible en el mercado, lo que permitirá una escalabilidad más rápida a corto plazo. En el escenario más negativo, el primero, no se alcanzan los niveles de SAF establecidos por la UE y, sin embargo, en 2035, las emisiones de CO₂ serían de 197,3 Mton,

muy próximas a los 192 Mton fijados por el plan CORSIA. En el escenario 2, únicamente, con los niveles de producción marcados por la UE se consigue reducir la producción CO₂ a 16,8 Mton, respecto a las de 2019. Por ello, se concluye que los SAF son críticos a corto plazo, y necesarios a medio y largo plazo.

- Uno de los inconvenientes de los bio-SAF, en todos los escenarios planteados, es que la materia prima que utilizan es finita. Esta limitación provoca que, en 2050, el uso de los bio-SAF (AtJ, FT y HEFA) solo representará el 27 % de las soluciones de descarbonización. Sin embargo, este obstáculo debe verse como la oportunidad de un impulso mayor de la producción de los electrocombustibles.
- Los combustibles sintéticos, concretamente el PtL, se presenta en los tres escenarios como la solución más esperanzadora, puesto que se muestra como el mayor responsable de la reducción de las emisiones en 2050.
- Los offsets, implantados por los planes CORSIA y RCDE UE, ayudarán a seguir el ritmo de descarbonización necesario entre los años 2035 y 2050, aunque en los tres supuestos planteados su protagonismo es diferente. En todos los escenarios se presentan como una iniciativa esencial durante el periodo en el que el desarrollo de los electrocombustibles y del hidrogeno verde es insuficiente. Esta realidad se aprecia en el hecho de que, en 2050, el porcentaje de CO₂ reducido por los offsets en el escenario 1, que es el de menor desarrollo tecnológico, alcanzaría el 47 %; sin embargo, en el escenario 3, que presenta una gran implantación de hidrogeno verde, su contribución es de un 0 %.
- El cumplimiento del objetivo de la IATA de que en el 2050 el nivel de emisiones sea, como máximo, el 50 % de las emanadas en 2005 exige una gran implantación del hidrogeno verde; así lo demuestra el escenario 3.

ANALYSIS OF AIR FREIGHT TRANSPORT AND SOLUTIONS FOR ITS DECARBONIZATION

Author: Ibáñez Plaza, Inés.

Director: Mascareñas Brito, Alberto.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT OF THE PROJECT

INTRODUCTION

The purpose of this thesis is to address the issue of the decarbonization of air freight, in order to present realistic solutions in the process of reducing carbon emissions into the atmosphere, within the framework of the fight against climate change.

It has been carried out from a triple perspective, the technological, economic and regulatory vision. The analysis contained in the document is limited to the national and European territorial scope. Throughout its pages it explains the situation of the sector, its difficulties and possible solutions, some more innovative than others, in order to achieve the reduction or complete removal of CO₂ emissions in the field of air navigation.

The aviation industry is not one of the main sources of environmental pollution, as its CO₂ emissions represent only about 3% of global emissions. Freight transport, on the other hand, is responsible for only 15 %. However, these two circumstances do not exempt the airline industry from the obligation to find solutions to reduce their emissions. In this respect, it is of great interest to implement joint strategies and initiatives between the various sectors affected and related to cargo aviation, in order to achieve better and more effective.

The reports issued by the IPCC, which evaluate all the scientific elements related to climate change, are discouraging and warn governments and institutions of the urgent need to take measures to slow down the effects of climate change. GHGs generate a thermal barrier that traps the heat generated by the sun, retaining it and increasing the hearth's heat, which generates more extreme weather patterns. According to the IPCC, the earth's temperature will increase between 1.7° Celsius and 2.2° Celsius. As a consequence, there has been an increase in the number of climatic and meteorological phenomenon, which cause major catastrophes, such as extreme heat, torrential rains or water shortages, among others.

The possible and necessary technological solutions that the scientific community believes will enable the transition to an emission-free aviation industry will be examined. Technologies such as SAF, electrification of air transport, or green hydrogen, among others. The financial costs associated with the implementation of these solutions have been taken into account, as well their environmental benefits, both in the long and short term.

In Europe, only 0.05% of the fuel used by aviation is currently SAF. The construction of SAF factories began between 2022 and 2023, and production is expected to start soon. The other energy options, such as green hydrogen and electric aircraft, are of enormous importance, especially in the long term, as they are zero-emission technologies. The problem is that their scientific development is at an embryonic stage, i.e. they require a much more advanced level of research; they require large economic investments and more complex infrastructures.

Finally, we cannot ignore other types of solutions such as emission offsets, commonly known as offsets, whose function is to capture carbon dioxide.

Part of this study has been devoted to the systematization and analysis of the basic regulations inside the international, European and Spanish regions. The aim is not only to compile regulations and projects, but to present an exhaustive study on the sustainable use of air transport, the regulations and projects implemented by international organizations in general and those responsible for air navigation in particular, as well as the analysis of global and regional environmental issues to encourage an airline industry that is more committed to the environment. As an example, we have the CORSIA strategic plan and the EU ETS, which have implemented emissions trading together with emissions offsetting programs. Likewise, some considerations related to the important issue of taxes applied to the sector are addressed, as well as the subsidies and aid offered by national and community governmental bodies and non-profit and/or private entities that aim to promote decarbonization.

Finally, three different scenarios for the process of decarbonization of the aviation sector have been analyzed, mainly focused on the reduction of CO₂ emissions. Factors such as the economic cost of kerosene in the future, the availability of technologies, as well as the capacity to meet the supplies required by this industry to guarantee efficient service provision to customers and markets, have been taken into account in the preparation of these scenarios.

METHODOLOGY



Source: Own elaboration

Figure 2. Methodology

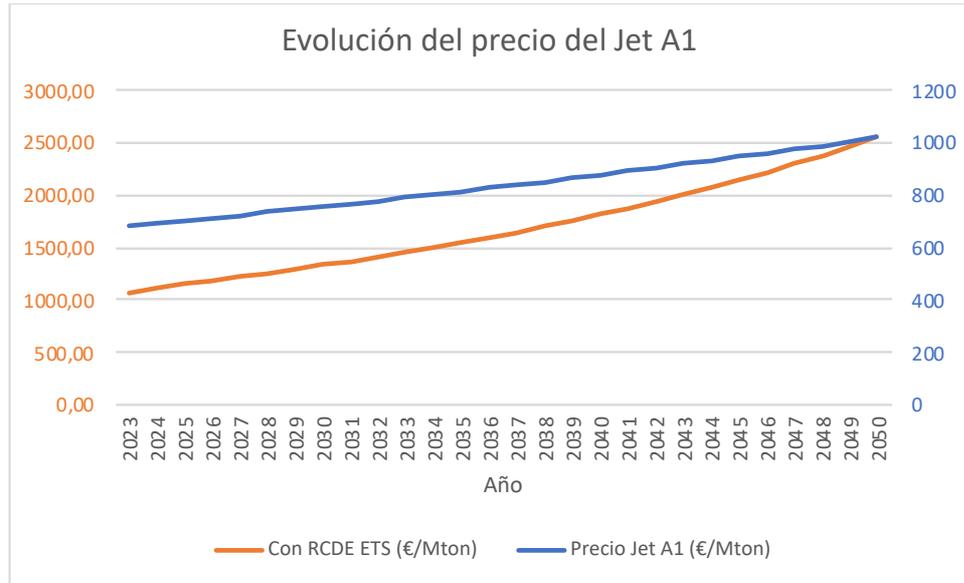
This work has been divided into two different but closely connected blocks. The first part is focused on the research and analysis of the subject, and the second part is more practical, in which the information obtained is applied to the design of three scenarios, in which various hypotheses are put forward. The methodology followed is descriptive, analytical and prospective (using the scenario method).

In the first part, an in-depth study of the air freight sector in Spain and Europe was carried out, analyzing the main airports and the operation of freight transport within the different territories, as well as its environmental impact. This was followed by a review of regulations, projects and initiatives at the international, European and Spanish levels. Finally, all the solutions available on the market, or under development, to decarbonize this industry were analyzed.

Once the documentation part was completed, the hypotheses and scenarios for the study on the decarbonization of the aviation sector were proposed. For this purpose, all the data and information obtained during the research was used. Subsequently, graphs and tables of CO₂ emissions were drawn up for each of the scenarios, allowing the future projections to be evaluated. Comparative matrices were also developed to obtain more global and realistic conclusions.

RESULTS

Three scenarios have been considered, from the most optimistic to the most pessimistic. For each one of them the level of development of the analyzed technology is different, which will have a direct impact on emissions and prices of each of the fuels. In addition, the expected evolution of the Jet A1 price has been studied on the basis of the hypotheses, as well as its evolution after the incorporation of the price of emission rights.



Source: Own elaboration

Graph 1. Jet A1 price evolution with and without ETS EU price

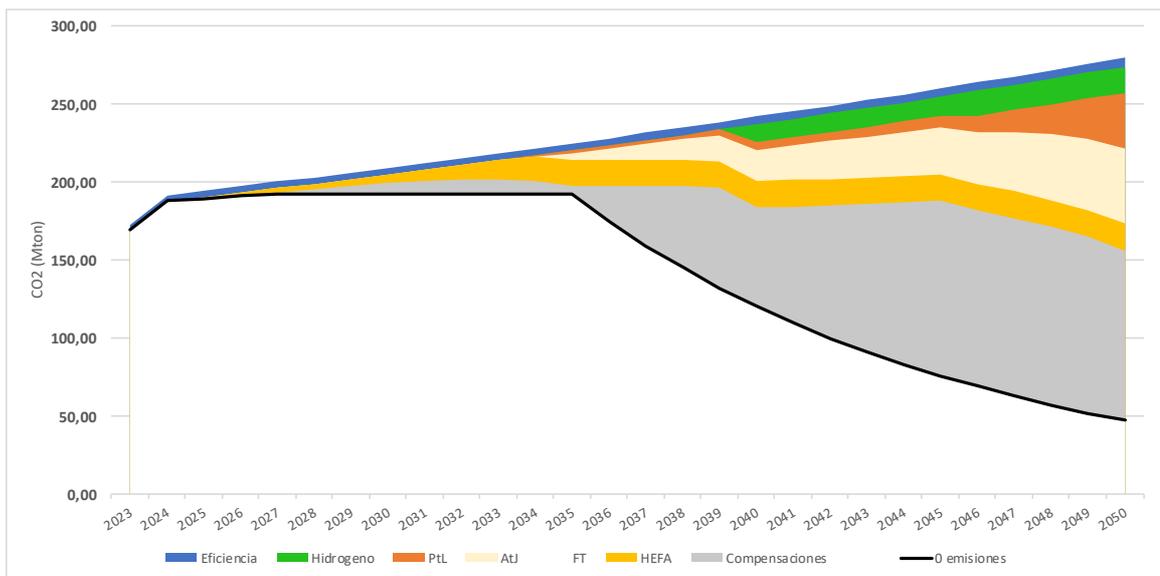
Scenario 1

This first scenario is the most negative. Technological improvements remain at a conservative level of progress and, therefore, show a continuation of the current rate of improvement.

	Eficiencia	Hidrogeno	PtL	AtJ	FT	HEFA	Compensaciones
% Reducción 2050	3%	7%	15%	14%	7%	7%	47%

Source: Own elaboration

Table 1. Percentage of CO2 reduced by each measure under scenario 1



Source: Own elaboration

Graph 2. CO2 emissions in scenario 1

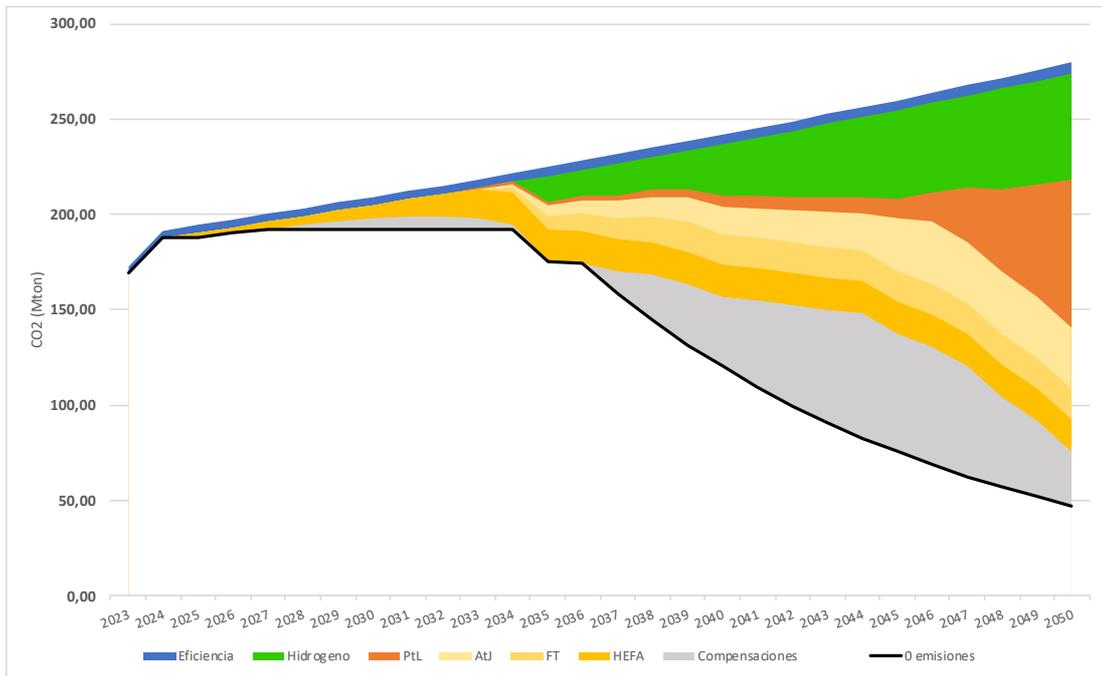
Scenario 2

In this second scenario, all the assumptions made in section 7.1 (page 98) would be met, and the minimum SAF values set by the EU would be achieved (Table 4, page 84). Furthermore, in this context green hydrogen meets the introduction dates estimated in the PwC report (Figure 55).

	Eficiencia	Hidrogeno	PtL	AtJ	FT	HEFA	Compensaciones
% Reducción 2050	2%	20%	34%	14%	7%	7%	16%

Source: Own elaboration

Table 2. Percentage of CO2 reduced by each measure under scenario 2



Source: Own elaboration

Graph 3. CO2 emissions in scenario 2

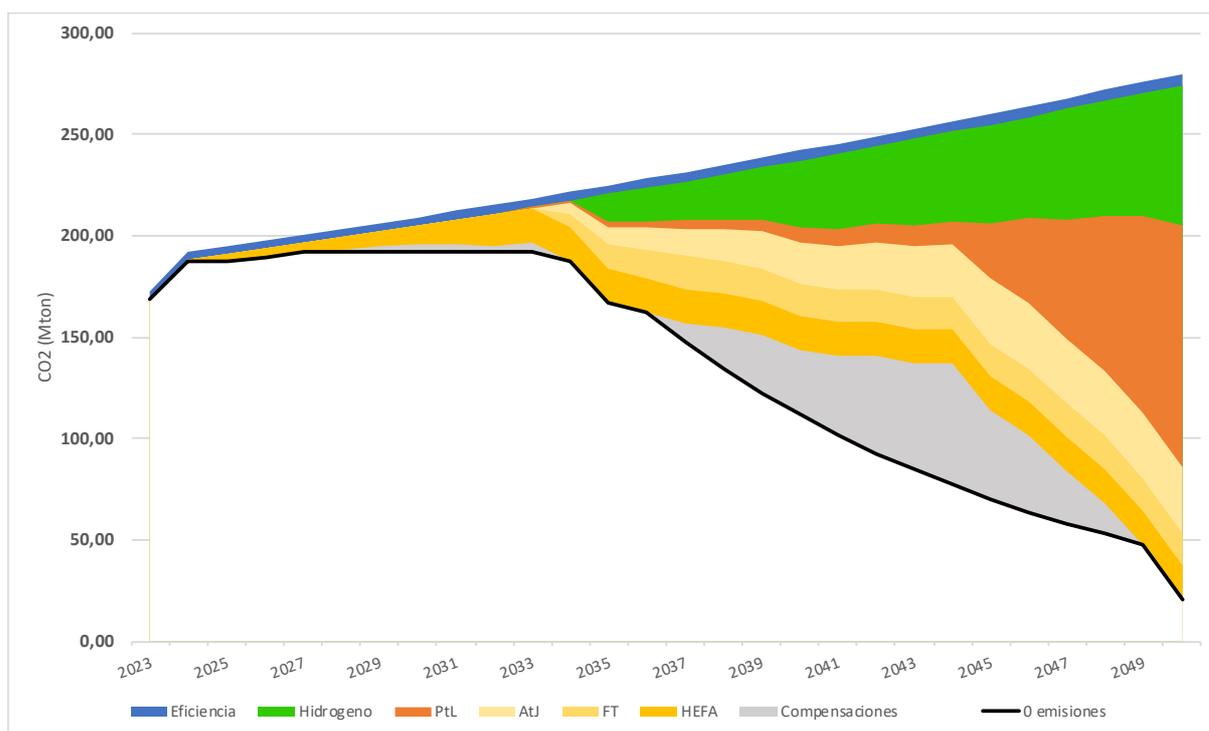
Scenario 3

The third scenario is presented as a utopia, although not extremely far from reality, since only the technological resources considered viable will be taken into account, but under the estimation that their level of scalability will be greater than that predicted so far.

	Eficiencia	Hidrogeno	PtL	AtJ	FT	HEFA	Compensaciones
% Reducción 2050	2%	27%	46%	13%	6%	6%	0%

Source: Own elaboration

Table 3. Percentage of CO2 reduced by each measure under scenario 3



Source: Own elaboration
Graph 4. CO2 emissions in scenario 3

CONCLUSIONS

This work has been divided into two different but closely connected blocks. The first part gathers an exhaustive and essential research for the understanding of a complicated sector such as the aviation sector, especially if the issue to be dealt with is its decarbonization. In the second part, with the help of all the technical, economic and regulatory data collected in the first part of the study, three different possible scenarios have been drawn up in which it is considered whether emission-free aviation will be possible and in what timeframe. The conclusions presented are based on the analysis carried out and the results obtained.

A wide range of measures, strategies and technologies are currently underway to promote, with varying degrees of success, the decarbonization of air navigation. SAF have interesting advantages that can be summarized in three ideas: they have a similar ignition point to Jet-A1, they do not need a special infrastructure for storage and transport, and aircraft do not require adaptations for their use. The disadvantages are that they do not eliminate emissions completely, they are expensive, and, at present, their production is still scarce. The results of the analysis show that the decarbonization of the airline industry is not possible without the intervention of UAS. At present, they are the most viable solution, from a technological and economic perspective, despite their high price. It should be noted that the cost of kerosene is likely to increase, which will have negative consequences for the airline industry.

The legislative measures and projects for the decarbonization of air freight are numerous, diverse in origin and somewhat scattered and fragmented in nature. They include regulations on emissions, research and development of sustainable technologies, incentives and financing, public-private partnerships and logistics optimization. This whole conglomerate of regulations and projects seeks to promote a transition towards more sustainable air freight transport with low greenhouse gas emissions. In this sense, it can be seen in the graphs presented in the three scenarios projected that IATA's CORSIA and Fly Net Zero plans are effective, playing an essential role in the decarbonization of the sector in the short and medium term. Initiatives and plans such as these are necessary because they provide essential incentives for the promotion of large capital investments required, for example, for the construction of SAF production plants.

Technological solutions such as the electrification of aircraft or the production of green hydrogen are very interesting from a zero-emission perspective, although they will not be available in the short or medium term. But they require further research development to achieve a totally emission-free scenario. If only the use of sustainable fuels is promoted, leaving aside these other solutions, decarbonization, from 2035 onwards, will begin to be unfeasible, since it is a sector whose growth is estimated to be constantly increasing due to the globalized world in which we live.

The involvement and efforts of the entire aeronautical industry, governments and international organizations are essential. Likewise, cooperation between the different industrial sectors would promote the rapid development of green hydrogen, which would give us a more hopeful outlook than the dismal predictions contained in the reports issued by the IPCC. There is no time for a gradual reduction of CO₂ emissions, as proposed until 2050; we must move towards a scenario of decarbonization, i.e. zero emissions.

Air transport in general and freight transport in particular, in order to be viable, urgently requires greater research development from a technological and scientific point of view. It also requires the cooperation of all parties involved in the process (governments, international organizations, operators and economic agents, etc.). Finally, it requires strict compliance with the rules, decisions and actions adopted to date, as a means of transforming air navigation into a decarbonized and sustainable sector that combines economic prosperity, environmental integrity and social equity. All of this is framed within the framework of the SDGs, which improve the quality of life of all people and the future of the planet.

The specific conclusions of the hypotheses and scenarios are the following:

- The airline industry has experienced an exponential growth and is expected to continue to do so in the future. This will result in around 11.3 million take-offs at European airports in 2050, requiring around 65 Mton of Jet A1.
- The price of kerosene is expected to grow steadily, so that in 2050 its price will be at least 3.6 times that of 2023. As a result, the purchase of emission allowances, required by CORSIA and the EU ETS, will become a kind of "tax rate". This could lead to a reduction in the price of SAF and even green hydrogen.
- Bio-SAFs play an essential role in decarbonization until 2035, as they are the only technology available on the market during this period, which will allow a faster scalability in the short term. In the most negative scenario, the first one, the SAF levels established by the EU are not reached and, nevertheless, in 2035, CO₂ emissions would be 197.3 Mton, very close to the 192 Mton set by the CORSIA plan. In scenario 2, with the production levels set by the EU, is possible to reduce CO₂ production by 16.8 Mton, compared to those of 2019. Therefore, it is concluded that SAF are critical in the short term, and necessary in the medium and long term.
- One of the drawbacks of bio-SAFs, in all the scenarios considered, is that the raw materials they use are finite. This constraint means that, in 2050, the use of bio-SAFs (AtJ, FT and HEFA) will only account for 27% of CO₂ reduction. However, this constraint should be seen as an opportunity for a major boost in the production of electrofuels.
- Synthetic fuels, specifically PtL, are presented in all three scenarios as the most promising solution, as it is shown to be the largest contributor to emissions reductions in 2050.
- Offsets, implemented by the CORSIA and EU ETS plans, will help to keep pace with the necessary decarbonization between 2035 and 2050, although they play a different role in each of the three scenarios. In all scenarios they are presented as an essential initiative during the period in which the development of electrofuels and green hydrogen is insufficient. This reality can be seen in the fact that, in 2050, the percentage of CO₂ reduced by offsets in scenario 1, which is the one with the least technological development, would reach 47%; however, in scenario 3, which presents a large deployment of green hydrogen, its contribution is 0%.
- Meeting the IATA target of a maximum emission level of 50 % of 2005 emissions by 2050 requires a large deployment of green hydrogen, as shown in scenario 3.

ÍNDICE

1. Introducción	25
1.1. Motivación.....	26
1.2. Objetivos del proyecto.....	27
2. Estado de la cuestión	28
2.1. Situación actual del sector	28
2.2. Protocolos y normativas	30
2.3. Soluciones y viabilidad	32
3. Transporte de mercancías en la actualidad	35
3.1. Ámbito espacial español	35
3.1.1. Transporte de mercancías	35
3.1.2. Principales aeropuertos y destinos de la carga aérea.....	38
3.1.3. Impacto medioambiental del transporte de mercancías.....	43
3.2. Ámbito espacial de la Unión Europea.....	48
3.2.1. Transporte de mercancías	48
3.2.2. Principales aeropuertos y destinos de la carga aérea.....	53
3.2.3. Impacto medioambiental del transporte de mercancías.....	58
4. Evolución y análisis de la normativa internacional, europea y nacional	60
4.1. La perspectiva internacional: Naciones Unidas	60
4.2. La perspectiva regional europea: La Unión Europea	65
4.3. La perspectiva estatal: España	76
5. Programas de subvenciones y de ayudas financieras.	79
5.1. Plano internacional	79
5.2. Ámbito de la Unión Europea.....	80
5.3. Ámbito Español.....	85
6. Tecnologías para la descarbonización	87
6.1. Combustibles de aviación sostenibles (SAF)	89
6.1.1. Bio-SAF/ Biocombustible.....	93
6.1.2. SAF sintético/Electrocombustible	97
6.2. Aviones eléctricos	99
6.3. Hidrógeno verde	101

7. Estudio de la descarbonización del sector aéreo	104
7.1. Hipótesis.....	105
7.2. Tecnologías.....	111
7.2.1. Queroseno.....	112
7.2.2. SAF.....	114
7.2.3. Hidrógeno verde	117
7.2.4. Aviones eléctricos	118
7.2.5. Medidas complementarias	119
7.3. Resultados	119
7.3.1. Escenario 1	119
7.3.2. Escenario 2	122
7.3.3. Escenario 3	124
7.3.4. Comparativa de los tres escenarios.....	127
5. Conclusiones.....	128
6. Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	131
7. Referencias.....	134
8. Índice de figuras.....	142
9. Índice de gráficos	145
10. Índice de tablas	146

1. Introducción

El presente trabajo se centra en el análisis del transporte aéreo de mercancías y las soluciones para su descarbonización desde la triple perspectiva económica, técnica y normativa.

En nuestro mundo globalizado, un sector esencial para el crecimiento económico mundial es el transporte aéreo de mercancías, dado que permite una rápida y eficiente distribución de los envíos en los planos internacional y nacional.

El sector aéreo, en general, contribuye a la emisión global de gases de efecto invernadero, si bien es cierto que no se trata del más contaminante, ya que únicamente es responsable de alrededor del 3 % de las emisiones globales de CO₂¹. Desde la perspectiva de la navegación aérea, el transporte de mercancías solo es causante de un 15 %, si bien, ello no es excusa para cumplir la obligación de búsqueda de soluciones que reduzcan las emanaciones de gases. Resulta de enorme interés la puesta en marcha de estrategias e iniciativas conjuntas, entre los diversos sectores afectados y afines a la navegación aérea de carga, con el fin de alcanzar mejores y más eficaces resultados frente al grave problema de la contaminación [1].

La descarbonización es un proceso gradual cuya finalidad es la disminución de las emisiones de carbono a la atmósfera. Concretamente, debe reducirse el dióxido de carbono, uno de los principales gases de efecto invernadero, producto de la actividad humana y uno de los principales causantes del cambio climático.

En el trabajo se examinarán, de forma detallada, las posibles y necesarias soluciones tecnológicas propuestas en el sector de la navegación aérea, como medio para contribuir a la lucha contra el cambio climático. Nos referimos a fórmulas tales como, los carburantes sostenibles, la electrificación del transporte aéreo, o el hidrogeno verde, entre otros. Se tendrán en cuenta los costes financieros asociados a la implementación de las citadas soluciones, valorándose los beneficios ambientales generados por el uso sostenible, tanto a largo, como a corto plazo.

Una parte del presente estudio se dedicará a la sistematización y análisis de la normativa básica en la materia desde los planos internacional, europeo y español. Se trata no solo de la mera recopilación de normas y proyectos, sino de presentar un estudio sobre el uso sostenible del transporte aéreo y las normas y proyectos implementados por las organizaciones internacionales responsables de la navegación aérea, las cuestiones medioambientales globales y regionales para incentivar una industria más comprometida con el medio ambiente.

¹ Dióxido de carbono, uno de los principales gases de efecto invernadero.

Se abordarán algunas consideraciones relacionadas con el importante tema de los impuestos aplicados al sector, así como las subvenciones y ayudas ofrecidas desde instancias gubernamentales nacionales, comunitarias y de entidades no lucrativas y/o privadas que tienen como objetivo fomentar la descarbonización.

Por último, se plantearán posibles escenarios del proceso de descarbonización del sector aéreo enfocado, principalmente, a la reducción de emisiones CO₂. En la elaboración se tendrán en cuenta factores que acompañan, de forma inevitable, a la necesaria transformación de la navegación aérea, tales como, el coste económico, la disponibilidad de las tecnologías, así como la capacidad de satisfacer los suministros requeridos por esta industria, que garanticen una prestación de servicios eficaz a clientes y mercados.

1.1. Motivación

La razón del presente trabajo se enmarca en la necesaria evolución del sector aéreo desde de la perspectiva de la sostenibilidad. Es indudable que la navegación aérea es un segmento muy innovador, el cual ha sido uno de los más innovadores que permite el desarrollo y la comunicación en nuestro mundo globalizado, sin embargo, se está quedando obsoleto en términos de sostenibilidad. Efectivamente, el sector aéreo debe conjugar la prosperidad económica, la integridad del medio ambiente y la equidad social para que sea viable. Es esencial que la navegación aérea lidere la descarbonización y, en consecuencia, la economía, los negocios, las culturas, los países y sus ciudadanos puedan seguir expandiéndose sin fronteras ni límites.

Uno de los enfoques del trabajo es la viabilidad económica de las eventuales soluciones que se propongan. Hasta el momento se han elaborado estudios sobre las diferentes tecnologías que se encuentran en fase de desarrollo, pero presentan un carácter fragmentario y parcial. Es necesario un análisis más global que recoja y trate de forma conjunta otros aspectos, tales como los costes, las subvenciones disponibles desde la perspectiva nacional y europea, y el carácter complementario con otros sectores.

En definitiva, el proyecto busca dar una respuesta a la cuestión de la descarbonización desde una triple perspectiva y un tratamiento conjunto que integre la visión tecnológica, económica y normativa.

1.2. Objetivos del proyecto

La finalidad de siguiente trabajo de fin de carrera tiene como propósito principal la comprensión y explicación del sector del transporte aéreo de mercancías y la aportación de soluciones innovadoras, que mejoren la calidad de vida de las personas y el futuro del planeta mediante la reducción/eliminación de emisiones de GEI. El método de trabajo a seguir se centrará en el análisis de la información disponible y la aplicación de nuevas metodologías; para ello llevaremos a cabo la identificación y cuantificación de los recursos, la definición y validación de los procesos necesarios para abordar el problema, la implementación de soluciones de diseño y la definición de estrategias para su optimización.

2. Estado de la cuestión

2.1. Situación actual del sector

El cambio climático, en la actualidad, es uno de los principales desafíos de los Estados y de la sociedad internacional, por ello, las naciones trabajan de forma conjunta para combatirlo desde ambos planos el interno e internacional, íntimamente ligados en estas cuestiones.

La batalla por el cambio climático nace a raíz del efecto invernadero, proceso natural por el cual se regula la temperatura de la Tierra. Está causado por los GEI², principalmente por el dióxido de carbono, el cual es responsable del 75 % de los GEI, emitidos por actividades humanas, debido a la quema de combustibles fósiles [4]. Estos gases generan una barrera de aislamiento térmico que, al retener el calor emitido por el sol, mantienen constante, y en ocasiones incrementan la temperatura de la Tierra, lo que lleva a más patrones meteorológicos extremos.

De acuerdo con la NASA GISS³, la temperatura media en la Tierra se ha incrementado en, al menos, 1,1^o Celsius desde 1880 [5]. Los efectos del cambio climático están comenzando a hacerse presentes en fenómenos climáticos y meteorológicos, que provocan catástrofes extremas, tales como, los calores extremos, tormentas torrenciales, escasez de agua y disturbios ciclónicos. El IPCC⁴ estima que entre 3300 y 3600 millones de personas viven en entornos muy expuestos a los efectos del cambio climático [6].

Los principales sumideros naturales de dióxido de carbono son los océanos y los bosques. Los océanos absorben alrededor del 50 % del CO₂ producido por el hombre a través de la fotosíntesis. Sin embargo, es importante mencionar que estos sumideros no son infinitos y tienen sus límites. Es decir, si la cantidad de CO₂ en la atmósfera sigue aumentando, los océanos y los bosques podrían llegarán a su punto límite de absorción. De un tiempo a esta parte, se está produciendo una absorción masiva de CO₂ por parte de los mares, lo cual está provocando una subida en la temperatura en el agua que origina una expansión del volumen del agua, dando lugar al preocupante aumento del nivel del mar. Además, el citado exceso de CO₂ está provocando la acidificación del océano, ya que se está produciendo un cambio en sus niveles de pH⁵, actualmente el agua es un 26 % más ácida que al inicio de la Revolución industrial [7]. Esta situación tiene un nefasto impacto sobre la biodiversidad y el ecosistema marino, nos referimos al blanqueamiento y la

² Gases Efecto Invernadero.

³ NASA Goddard Institute for Space Studies

⁴ El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

⁵ Medida que indica la acidez o la alcalinidad del agua.

debilitación de los corales, el deterioro del caparazón protector de muchas especies, las concentraciones tóxicas de CO₂ en la sangre de peces y la perturbación de su olfato, incluso se afirma que podría llegar a modificar los sonidos en el agua, llegando a ser un entorno más ruidoso.

Según datos recogidos por la EEA⁶, en 2020 en España se emitieron 245.671 kt de CO₂-eq, lo que supone un descenso del 21 % respecto a 2019 y, además, es el primer año con menor número de emisiones de GEI desde 1990, un -5 % respecto a 1990. Asimismo, desde el 2005 ha habido un claro descenso de GEI emitidos en territorio nacional.

Si centramos el estudio en el sector de la aviación, tanto doméstica como internacional, esta industria supone el 3,7 % de las emisiones totales, cuyo valor en 2019 es de 7.939 kt de CO₂-eq. Esta cifra ha disminuido considerablemente como consecuencia de la pandemia, puesto que las emisiones provocadas por los vuelos internacionales se han visto reducidas en un 66 %. Los datos expuestos revelan que a pesar de no ser una de las principales industrias contaminantes, su contribución a la emisión de carbono no ha dejado de crecer desde el año 1990. Los niveles de 2019 eran un 345 % superior a los de 1990 [8].

Desde una perspectiva europea, el análisis de los datos de la EEA refleja que las emisiones en 2020 fueron 2.438.739 kt de CO₂-eq, cifra que muestra un descenso del 13 % respecto al año anterior. Se observa que 2020 fue un periodo con menor número de emisiones. Ahora bien, a diferencia de lo que sucede en España, en el conjunto de Estados Europeos se ha conseguido que, prácticamente, todos los años desde 1990 descienda el volumen de emisiones. Si nos fijamos en el sector de la aviación, se comprueba que los datos del año 2019 son más representativos que los de 2020, puesto que estos se vieron afectados por la crisis del Covid-19. Las emisiones del conjunto de vuelos internacionales fueron 146.761.824 kt de CO₂-eq, un 226 % superior a las emisiones de 1990, crecimiento marcado, fundamentalmente, por la aviación internacional, pero que se ha mantenido más moderado que en España [8].

El sector de la aviación contribuye con 3,5 trillones al PIB⁷ mundial, concretamente representa un 4,1 %; dicho de otro modo, el citado sector si se tratase de un país sería el decimoséptimo con mayor PIB [1]. Además, ha experimentado un aumento importante en los últimos años, y se espera que continúe a un ritmo de crecimiento de un 4 % anual en los próximos veinte años. Los

⁶ European Environment Agency.

⁷ Producto interior bruto.

datos proporcionados por ATAG⁸ el transporte aéreo de mercancías contribuye un 35 % al comercio exterior mundial cuando solo transporta un 1 % del volumen de envíos de comercio mundial, lo cual significa que lleva mercancías consideradas de alto valor económico. Cerca de 88 millones de trabajos se mantienen gracias al sector aéreo, por consiguiente es un elemento esencial de la economía mundial y se deben abordar soluciones para que pueda seguir creciendo y operando de forma sostenible [9]. Sin embargo, a su vez es el causante del 3 % de las emisiones globales de dióxido de carbono, y en el caso de no tomarse las medidas necesarias para hacer frente a dichas emisiones, se estima que en el año 2050 esta industria llegaría a ser responsable del 22 % de las emisiones globales [1].

La industria aérea, desde el punto de vista de la fabricación, propiedad de activos y emisiones está muy concentrada, son pocas las empresas que controlan, absolutamente, el conjunto total de aerolíneas, aeropuertos y aviones, cuestión que se analiza más adelante. Concretamente, los dos principales fabricantes de motores y de aviones dominan el 75 % y el 90 % de la cuota de mercado, respectivamente [1]. Las veinticinco compañías aéreas más importantes cubren la mitad del volumen global de la navegación aérea y de los cien mil aeropuertos que existen en el mundo, veinticinco son responsables de la mitad de las emisiones de CO₂. Tal concertación de control empresarial sobre el sector sugiere que las decisiones pueden adoptarse con gran rapidez y generar un notable impacto. Es un sector necesitado de grandes inversiones, lo cual conlleva a que los cambios se produzcan lentamente. Así mismo, se trata de uno de los segmentos de la industria que menos ha avanzado en el campo de la sostenibilidad dado que su proceso de descarbonización es de los más complicados desde un punto de vista técnico, con un coste económico mayor debido a la larga vida de los activos, con una alta dependencia energética y con una dificultad añadida para su electrificación. El alcance de un notable impacto y el cumplimiento del objetivo de emisiones netas cero en el año 2050 hacen imprescindible la toma de decisiones con cierta celeridad.

2.2. Protocolos y normativas

En diciembre de 2015, líderes mundiales de 196 países se reunieron en París en el seno de la 21ª Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21)⁹, cuyo resultado fue la adopción de un compromiso internacional, conocido como Acuerdo de París, que sustituyó al Protocolo de Kioto.

⁸ Air Transport Action Group.

⁹ La 21ª conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

El objetivo de la COP21 era el establecimiento de un plan de acción para frenar el cambio climático, que requiere que en un plazo de cinco años los países desarrollen y cumplan la ruta trazada. Los compromisos aceptados exigen la descarbonización de la economía a largo plazo y se traducen en la disminución y el reemplazo de combustibles fósiles por energías renovables, tales como la eólica, la solar, entre otras. De esta manera, se puede reducir el volumen de gases invernadero emitidos a la atmósfera y disminuir la eventual probabilidad de que el entorno climático sea ingobernable. Además, se recoge un compromiso de solidaridad y transparencia entre países.

El Programa de las Naciones Unidas para el Medioambiente afirma en su informe “Brecha de Emisiones” que el mundo se dirige hacia los 3,2º Celsius de incremento de temperatura si no se produce ningún cambio [10]. Según el Acuerdo de París de 2015, el objetivo es llegar a limitar el calentamiento global a 1,5º Celsius. Se estima que para poder lograr estas metas será necesario haber alcanzado una reducción de las emisiones del 45 % para 2030, y emisiones netas cero para 2050 [11].

La Unión Europea presentó su plan estratégico, comprometiéndose a reducir en 2030, por lo menos, un 55 % las emisiones respecto de 1990. El PNIEC¹⁰ marca los objetivos que permitan a España alcanzar la meta marcada por la UE; entre tales propósitos destacan una reducción del 23 % de los GEI respecto a niveles de 1990, que el 42 % de la energía consumida y el 74 % de la energía generada sean renovables y que se mejore la eficiencia energética en un 39,5 %. Para ello se ha puesto en marcha un sistema de gobernanza integrado [12].

El aumento de las emisiones de GEI genera la necesidad de cálculo y gestión de estas, por ello en el año 2001 se publicó el primer informe de GHG Protocol¹¹ en el que definen los alcances 1, 2 y 3 de emisiones de carbono, que son las diferentes categorías utilizadas para identificar el origen de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Las emisiones de “alcance 1” son aquellas que surgen directamente de la fuente, vgr. los combustibles fósiles quemados. Las emisiones de “alcance 2” son aquellas que provienen de la generación de electricidad para el consumidor final, mientras que las emisiones de “alcance 3” son aquellas emisiones indirectas que se producen en la cadena de valor de una empresa. Las citadas categorías proporcionan un mejor entendimiento sobre el origen de las emisiones de carbono y ayudan a las

¹⁰ Plan Nacional Integrado de Energía y Clima.

¹¹ Greenhouse Gas Protocol, es la herramienta internacional más utilizada para el cálculo y comunicación del Inventario de emisiones.

empresas y organizaciones a identificar las oportunidades para reducir su huella de carbono. En un trabajo publicado por Deloitte se afirma que el alcance 3 es responsable del 70 % de las emisiones, y se debe prestar especial atención si se desea llegar a unas emisiones netas cero [13].

En páginas siguientes se analizará cómo las soluciones propuestas afectan a cada uno de los tipos de alcance. Para el sector de la aviación, Aena¹² proporciona un claro esquema de los alcances, que se puede observar en la Figura 20, recogida en la página 47.

2.3. Soluciones y viabilidad

La respuesta al problema de la contaminación que provoca el transporte aéreo de carga no pasa por el cambio de tipo de aviones o sus piezas, ya que estas medidas tendrían un coste elevadísimo. La solución debe buscarse en el tipo de carburantes a emplear, y que, posteriormente, todas las compañías se comprometan a su utilización. En este sentido un elemento esencial es la investigación y el desarrollo tecnológico de las diferentes opciones para poder crecer lo más rápido posible, y reducir los costes de producción al máximo.

Las principales soluciones tecnológicas se centran en la eliminación, compensación o captura de las emisiones de CO₂. Se analizarán aquellas que se consideren que tienen un mayor futuro como propone la IATA¹³, tales como, los SAF¹⁴, que se espera contribuya un 65 % a la descarbonización; los Offsets, cuya función es la captura de dióxido de carbono y se estima que reduzcan las emisiones un 19 %; las nuevas tecnologías eléctricas o de hidrógeno que supondrán un 13 %; los drones de reparto; y unas infraestructuras y operaciones eficientes que pueden suponer un 3 %. La combinación de estas iniciativas contribuirán a alcanzar un sector totalmente descarbonizado para el año 2050 [14].

La principal ventaja del SAF es que se puede usar sin modificar el diseño actual de los aviones, ni las infraestructuras de los aeropuertos. Dentro de los carburantes sostenibles destacan dos: el Biodegradable y el sintético. El Bio-SAF se obtiene de plantas y animales, es el más económico. Sin embargo, se espera que el precio se incremente puesto que los materiales disponibles se irán agotando. El SAF sintético está menos desarrollado que el Bio-SAF, por ello su coste de producción será

¹² Aena es la compañía líder en el mundo en gestión de infraestructuras aeroportuarias por volumen de pasajeros.

¹³ International Air Transport Association

¹⁴ Sustainable Aviation Fuel, combustible sostenible para el sector de la aviación.

superior, además la industria aeronáutica compite con otros sectores empresariales por la disponibilidad de hidrogeno. Sin embargo, en el futuro será más accesible el sintético que el Bio-SAF, porque este último se obtiene de materiales finitos. El principal problema que plantea el uso del SAF es su precio, que es de dos a ocho veces más caro que el de la gasolina tradicional (queroseno). Si el precio del nuevo carburante se pretende cubrir con el importe de los billetes de avión, esto supondría un aumento del precio de los pasajes entre un 30 % y 200 % [1].

La colaboración entre los diversos sectores industriales en aras a una investigación y desarrollo tecnológico de tales combustibles supondría un gran avance para muchas industrias y ayudaría a que los costes fuesen más fáciles de afrontar. Para el desarrollo del BioSAF se requiere indagar sobre los bio-feedstocks¹⁵ y los nuevos tipos de producción. Los sectores químicos y marítimos, también, se verían beneficiados. En el caso del SAF sintético es necesario el estudio de los electrolizadores que producen hidrógeno verde usando energías renovables. Esto se consigue dividiendo el agua en hidrógeno y oxígeno. Todo ello sería muy útil, también, para los sectores del acero, transporte por carretera, transporte marítimo y fertilizantes.

Los Offsets son compensaciones para el consumo, por ejemplo, la compra de un árbol por cada gas de CO₂ generado, opción que muchas aerolíneas empiezan a ofrecer a sus usuarios. Se están desarrollando métodos para capturar CO₂, para lo cual sería necesario la captura y el almacenamiento de carbono que, posteriormente, se podría utilizar para generar carburante. Si todos los procesos se hicieran de forma más transparente, con sus correspondientes certificaciones y simplificación de las comunicaciones, posiblemente, los usuarios serían conscientes del impacto de sus actos y estarían dispuestos a pagar un extra para colaborar con la protección del medioambiente.

Los drones de reparto son un tipo de (en adelante, UAV)¹⁶ utilizado para la distribución de paquetes a los consumidores durante la última milla. Estos tipos de drones, generalmente, tienen de cuatro a ocho hélices, baterías recargables y capacidad para transportar paquetes con un peso de hasta 2,5 kilogramo. Pueden funcionar de forma autónoma utilizando IA¹⁷ o de forma remota, bajo supervisión de los centros de distribución y operadores de vuelo. No se espera que esta solución sustituya a los aviones de reparto, ya que se encuentra limitados por el peso máximo de los paquetes y un radio de vuelo de 15 kilómetros. Sin embargo, si se observa

¹⁵ Cualquier material biológico renovable que pueda utilizarse directamente como combustible o transformarse en otra forma de combustible o producto energético.

¹⁶ Vehículo aéreo no tripulado.

¹⁷ Inteligencia artificial.

como una gran herramienta, que agilice los procesos de reparto de determinado tipo de mercancías y reduzca las emisiones.

Un gran obstáculo al avance de tales propuestas es la ausencia de regulación, infraestructuras e inversiones. Otro gran problema son las pequeñas iniciativas que contribuyen al avance a corto plazo, pero que no tendrán futuro ni impacto a largo plazo, y al final frenan el desarrollo de proyectos con mayor escala por la falta de ambición.

3. Transporte de mercancías en la actualidad

El comercio internacional y el desarrollo económico de los países dependen en gran medida de la circulación de mercancías. Se podría decir que el transporte de mercancías es la espina dorsal de la promoción del comercio interno e internacional, moviendo bienes y servicios dentro y entre los Estados.

La circulación de mercancías ha contribuido a la diversificación de las economías de los países, facilitando el intercambio de bienes y servicios entre los Estados y permitiendo la distribución de bienes a mercados más lejanos. El transporte ha ayudado a la industria a ampliar sus horizontes comerciales fuera de sus fronteras. Gracias a ello, las empresas han podido aumentar sus ingresos satisfaciendo la demanda nacional o mundial. Existe una clara correlación entre la mejora de la conectividad del transporte aéreo de mercancías y un aumento del valor del comercio internacional. La IATA estima que una mejora del 1% en la conectividad aérea supone un aumento de alrededor de un 6,3% en las exportaciones e importaciones globales. Además, los países que tienen conexiones bien establecidas, junto con servicios aduaneros de alta calidad y fronteras inteligentes, se integran mejor en las cadenas de valor globales [15].

El transporte que se realiza por vía aérea representa menos de un 1% del comercio mundial, sin embargo, se estima que representa el 35% de su valor, por lo que es un sector esencial para mantener el nivel actual del comercio internacional [9]. En particular, el comercio global supone un 56,5% del PIB mundial [16], lo que demuestra la importancia del flujo de mercancías para la economía global. En la actualidad, el comercio es casi tres veces mayor que a principios de los años 50, en porcentaje de la producción mundial.

En conclusión, la circulación de mercancías es un elemento esencial del comercio internacional. Ayuda a los Estados a fomentar el crecimiento económico y el desarrollo al permitir el intercambio de bienes y servicios.

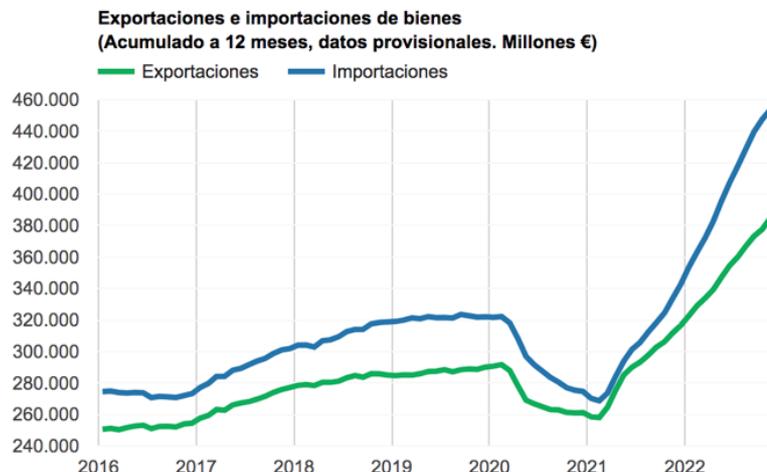
3.1. Ámbito espacial español

3.1.1. Transporte de mercancías

En el año 2021, España se situó en el puesto número 17 en el ranking mundial de economías por exportaciones totales y en el número 15 en relación con las importaciones totales, según datos obtenidos de WITS¹⁸. De hecho, experimentó un

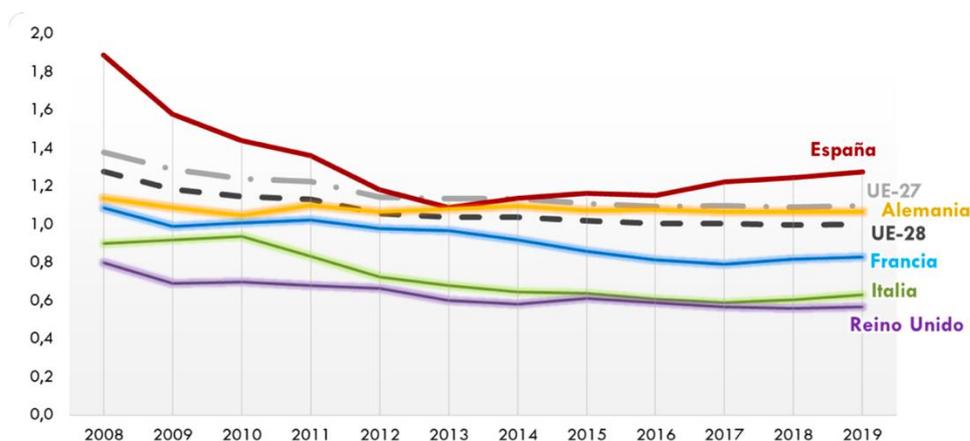
¹⁸ World Integrated Trade Solution.

gran crecimiento en 2021 (Figura 1. Evolución de las exportaciones e importaciones en España).



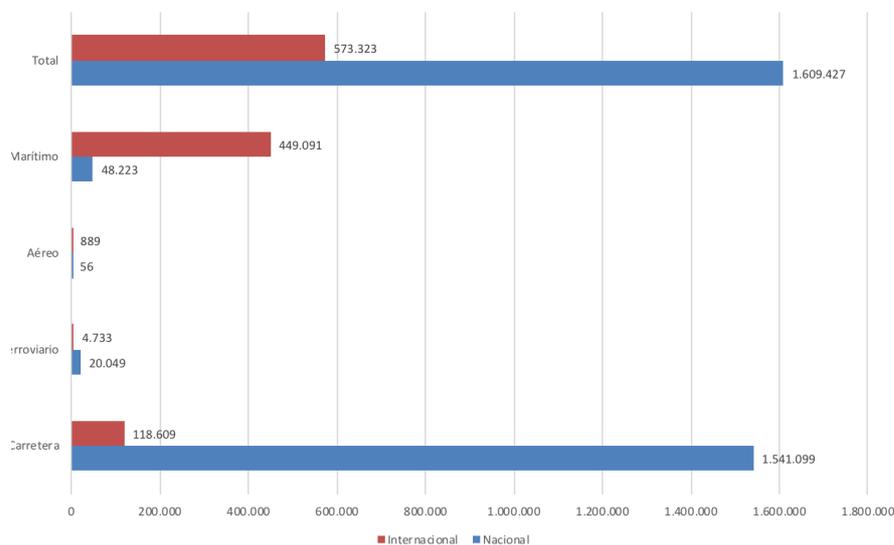
Fuente: Informe de comercio exterior [17]
 Figura 1. Evolución de las exportaciones e importaciones en España

Desde una perspectiva nacional, las exportaciones suponen un 34,6 % del PIB de España [18]. Esto explica el hecho de que el aeropuerto internacional Adolfo Suárez Madrid-Barajas y el de Zaragoza hayan experimentado un crecimiento constante en los últimos años. Sin embargo, no forman parte de los principales aeropuertos de transporte de mercancías a nivel europeo y mundial, debido a que en España el mayor volumen de transporte de mercancías se realiza dentro de sus fronteras. Nuestro país ha sido la nación con el mayor nivel de movilidad interna de mercancías en relación con el PIB, superando tanto a la media de Europa como a las principales economías del continente (Figura 2).



Fuente: IOTLE [19]
 Figura 2. Evolución de la ratio entre movilidad interna de mercancías y el PIB (toneladas/1.000 euros)

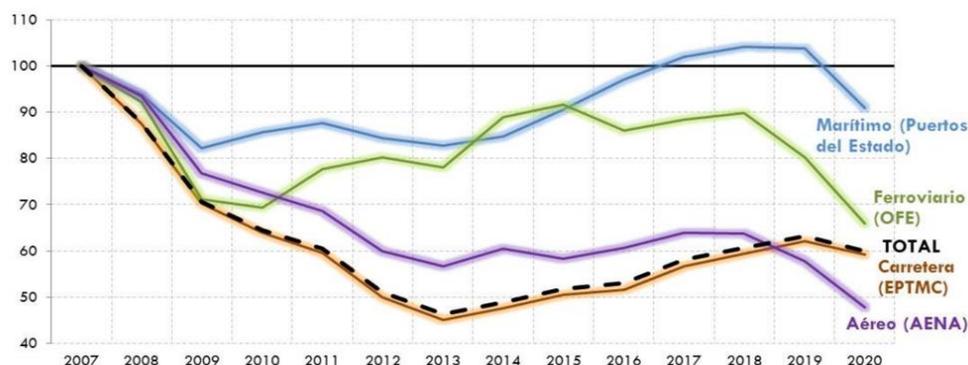
Según datos obtenidos por la OTLE¹⁹ y como se observa en la Figura 3, en 2021 el 73,7 % de los bienes transportados, lo fueron en el espacio interior del territorio español, y solo un 0,003 % de estas mercancías fueron trasladadas a través de medios aéreos [20].



Fuente: Elaboración propia con datos de WITS

Figura 3. Visión genérica del transporte de mercancías en España en 2021

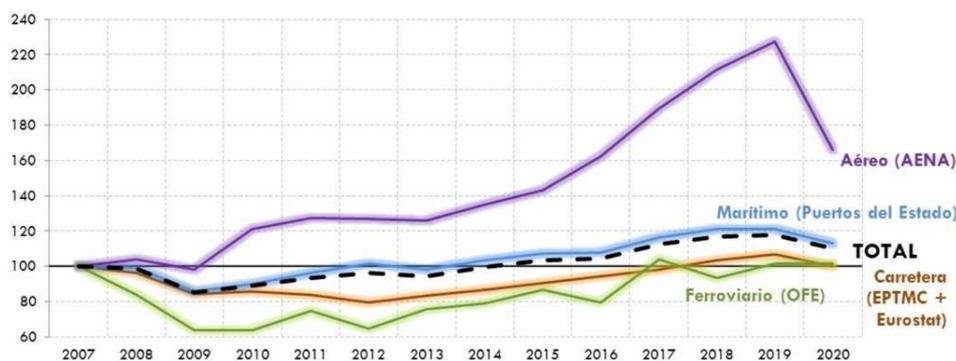
Si se centra el análisis en el estudio de las mercancías transportadas por vía aérea, el 94 % tenían un origen o destino internacional, es decir, en España el transporte aéreo, prácticamente, se circunscribe al intercambio de bienes con países extranjeros [20]. En el caso del transporte nacional, el uso aéreo disminuye significativamente cada año (Figura 4); sin embargo, el transporte internacional ha experimentado una subida acumulada del 66 % desde 2007 hasta 2020 y, además, su rendimiento es el mejor entre todos los modos de transporte disponibles (Figura 5).



Fuente: Elaboración propia con datos de WITS

Figura 4. Evolución del transporte de mercancías interior en España según modo de transporte (toneladas)

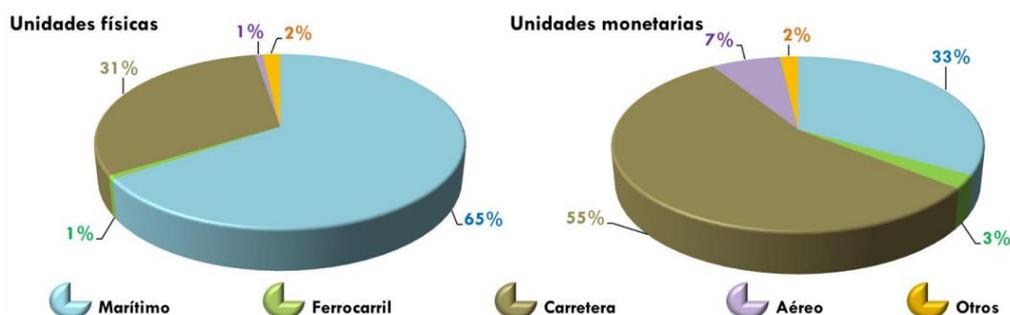
¹⁹ Observatorio del transporte y la logística en España.



Fuente: OTLE [19]

Figura 5. Evolución del transporte internacional de mercancías por modo (toneladas)

Por último, a pesar de transportar únicamente el 1 % del volumen de mercancía cada año, en la Figura 6 se observa que en términos monetarios traslada el 7 %; tomando como base a una ratio monetario-unidades se llega a la conclusión de que se trata del medio que traslada la mercancía más valiosa.



Fuente: OTLE [19]

Figura 6. División del transporte de mercancías internacionales por modo, estudiado en unidades físicas y unidades monetarias

3.1.2. Principales aeropuertos y destinos de la carga aérea

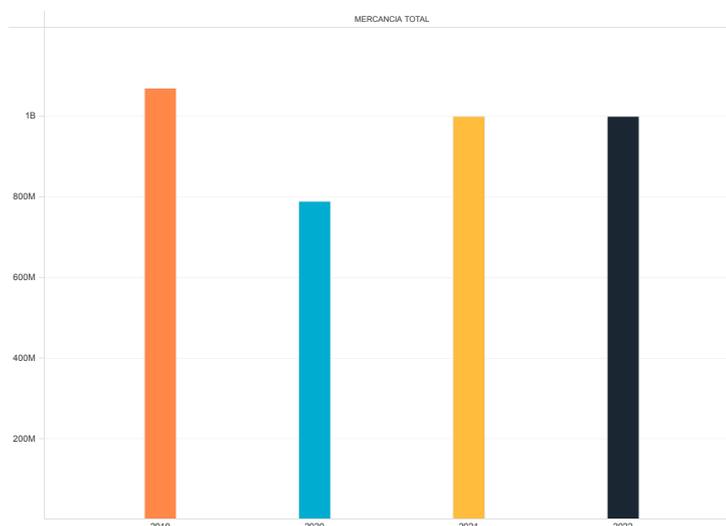
El informe anual de Aena revela que los principales aeropuertos españoles, en términos de volumen de mercancías transportadas son: Adolfo Suárez Madrid-Barajas, Barcelona-El Prat, Zaragoza, Vitoria y Gran Canaria (Figura 7).



Fuente: OTLE [19]

Figura 7. Principales relaciones aéreas nacionales en 2019 (Kg transportados)

El peso del número total de mercancía transportada (llegadas y salidas) desde/hasta España, durante el año 2022, fue de 1000 millones de kilogramos (Figura 8), de los que un 52,5 % fueron exportaciones y un 47,5 % importaciones, volumen que alcanza niveles previos a la pandemia.

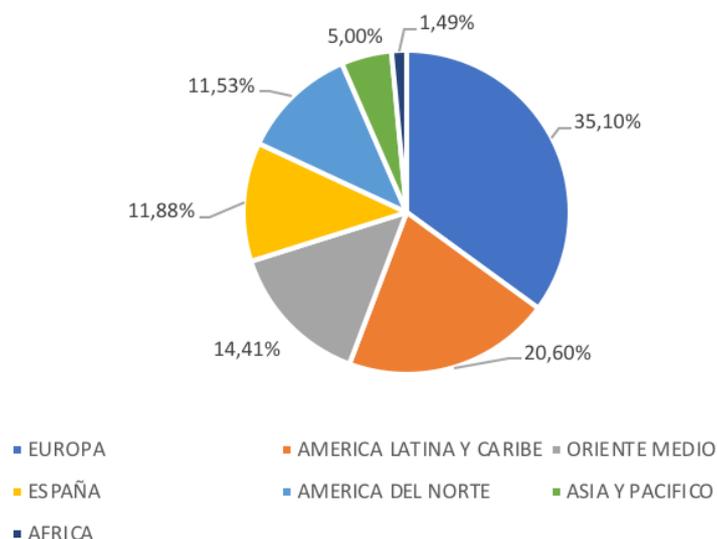


Fuente: Aena

Figura 8. Evolución de la carga transportada en España

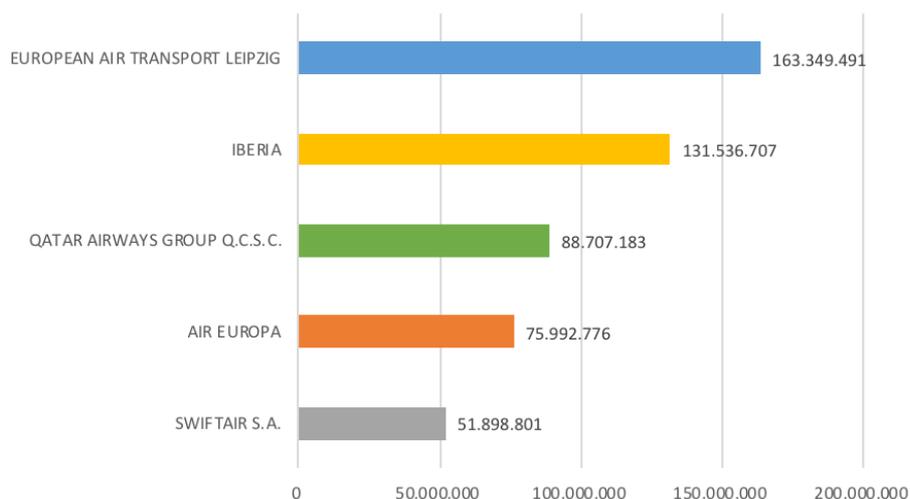
El 11,88 % de la mercancía transportada tiene un destino nacional, y el resto internacional, con la particularidad de que Europa encabeza la lista regional de destino (Figura 9). Los principales países de dirección de la carga transportada desde España son, por orden de volumen transportado: Alemania con un 12,39 % de la

carga, España un 11,88 %, Estados Unidos un 10,28 % y Qatar 6,76 % [21]. Estas cifras se explican por la circunstancia de que Estados Unidos es el primer importador del mundo y Alemania el tercero.



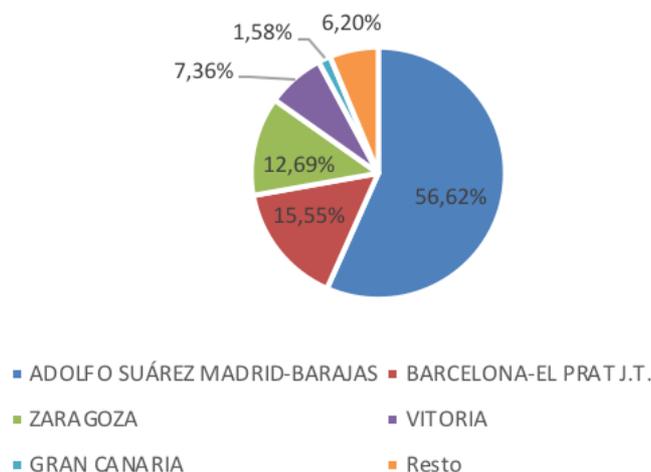
Fuente: elaboración propia con datos de Aena
 Figura 9. Destino de mercancías trasladadas desde España

Las cinco principales compañías aéreas (en términos de volumen transportado en el año 2022) que envían/cargan mercancías desde/hasta España, mostradas en la Figura 10, fueron responsables del 56,3 % de la carga total transportada en el año 2022. Se tartan de European Air Transport Leipzig, Iberia, Qatar Airways, Air Europa y Swiftair.



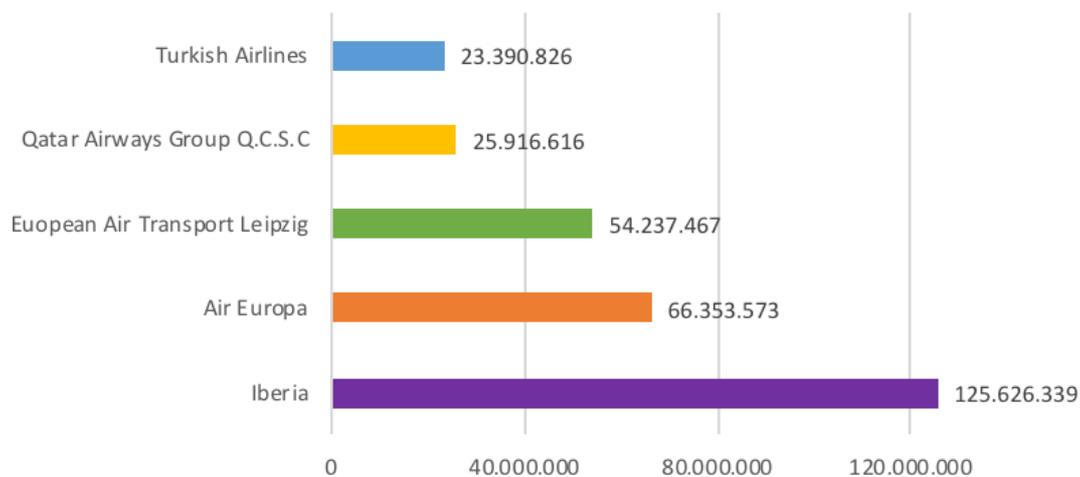
Fuente: elaboración propia a partir de datos de Aena
 Figura 10. Cinco principales compañías de transporte de mercancías aéreo en España en términos de volumen de carga transportado

En el ámbito de los aeropuertos españoles, el de Madrid concentra el 56,6 % (Figura 11) del volumen total movilizado en el año 2022 [22], de los que el 94,74 % de la carga es internacional y el 5,26 % es nacional. Europa preside la lista de destinos para la carga transportada desde el aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas, con un 33,92 %, dentro del citado porcentaje Alemania se sitúa “a la cabeza”, seguido por Turquía e, inmediatamente, después se encuentra América Latina y Caribe con un 31,01 % [21].



Fuente: datos de Aena, elaboración propia
 Figura 11. Tráfico de mercancías en los aeropuertos españoles (Kg)

En la Figura 12 se recogen las cinco principales compañías que operan en el aeropuerto de Madrid, que conjuntamente son responsables del 52,18 % de la mercancía transportada; Iberia encabeza la lista con un claro dominio, ya que representa el 22,18 %, le sigue Air Europa con una porción del 11,72 % [21].



Fuente: elaboración propia con datos de Aena
 Figura 12. Top compañías aéreas en Aeropuerto de Madrid 2022

En el aeropuerto de Barcelona, el 95,58 % de la carga transportada es internacional y el 4,42 % nacional, siendo el 49,96 % de la carga enviada a Europa, principalmente a Alemania [21].

El aeropuerto de Zaragoza destaca por ser el único en tener el 100 % de su mercancía un destino internacional. Concretamente, un 40,92 % de la carga se envía a Oriente Medio, seguido de un 16,58 % a América Latina y Caribe [21]. Esta situación extraordinaria tiene una clara explicación: Inditex es responsable de que, en la actualidad, Zaragoza sea un importante centro de distribución vía aérea de mercancías, con una cuota de mercado próxima a la del aeropuerto de Barcelona (Figura 11, página 41). Inditex tiene uno de sus principales centros logísticos en Zaragoza, desde el cual distribuye la línea femenina de la marca por todo el mundo. Esta es la razón del 97 % del tráfico de mercancías del aeropuerto de Zaragoza, ya que el 40 % de prendas que distribuye, anualmente, se transportan por vía aérea [23]. Esta circunstancia hace que la compañía Emirates realice cinco vuelos semanales con aviones de carga en Zaragoza, mientras que solo realiza uno en Barajas y otro en El Prat. Así mismo, justifica que Oriente Medio sea el principal destino de las mercancías exportadas desde el aeropuerto de Zaragoza. Según datos de Aena, Emirates transporta el 17,37 % de la mercancía del aeropuerto de Zaragoza y Qatar Airways Group Q.C.S.C transporta el 40 %. El hecho de que dos compañías de Oriente Medio controlen el 57,37 % de la carga total del aeropuerto refuerza el porqué de que esta región sea el principal destino de dicho aeropuerto [21].

Respecto del aeropuerto de Vitoria, se observa que el 74,2 % de la carga tiene un destino internacional y el 25,8 % nacional. Europa es el destino de su totalidad de la carga internacional, con Alemania en cabeza, seguido de Portugal [21]. Debido al auge del comercio electrónico y a la presencia de las principales empresas de paquetería en sus instalaciones, Vitoria está en plena expansión. Cada día operan más de veinte vuelos de carga UPS, FedEx y DHL. Concretamente, DHL tiene el principal hub²⁰ de la península Ibérica en Vitoria, llegando a cuadruplicar la capacidad de sus instalaciones en el año 2017 [23]. El 92,18 % de la carga es transportada por la compañía European Air Transport Leipzig (EAT), una filial de DHL Express, que opera bajo la marca de DHL.

Otro supuesto relevante es el del aeropuerto de Gran Canaria, que se caracteriza por tener un 80,1 % de la carga con un destino nacional, y únicamente un 19,9 % internacional. Por tanto, este aeropuerto se dedica, prácticamente, al transporte nacional [21]. De ese 19,9 % de la carga internacional, más de la mitad, 58,5 %, tiene como destino Mauritania, en África, debido a la proximidad geográfica

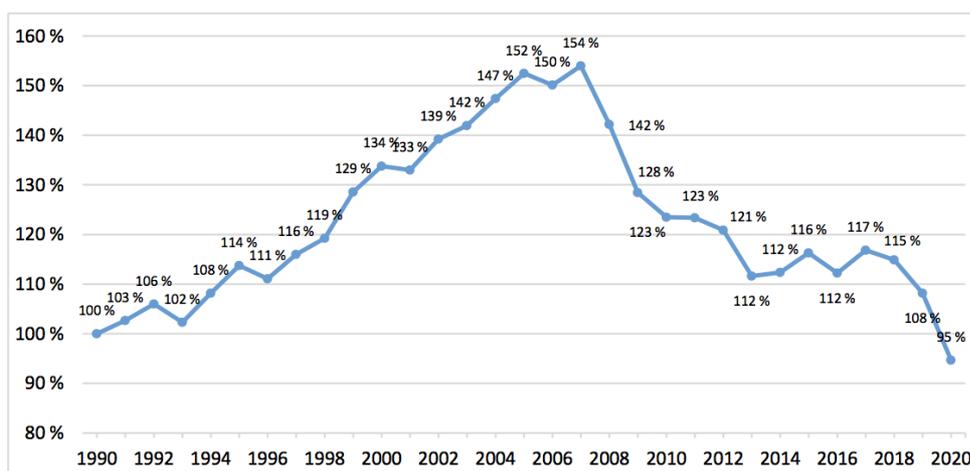
²⁰ Aeropuerto que sirve como centro de conexión para el tránsito aéreo.

entre Gran Canaria y el continente africano. En consecuencia, la principal compañía que opera en Gran Canaria es Swiftair, aerolínea española que interviene con gran frecuencia entre España y África, con destinos como Senegal, Marruecos y Mauritania.

3.1.3. Impacto medioambiental del transporte de mercancías

El transporte aéreo de mercancías se ha convertido en la fórmula habitual y práctica del comercio empleado a escala mundial. Este medio de transporte presenta numerosas ventajas, tales como rapidez, fiabilidad, amplia cobertura, mejor acceso a lugares donde no llegan otros transportes, entre otras. Sin embargo, muestra, a su vez, significativos inconvenientes como el coste económico, la dependencia de las condiciones climáticas y el mayor impacto ambiental, especialmente, en lo que se refiere a las emisiones de los gases de efecto invernadero, y en particular el carbono.

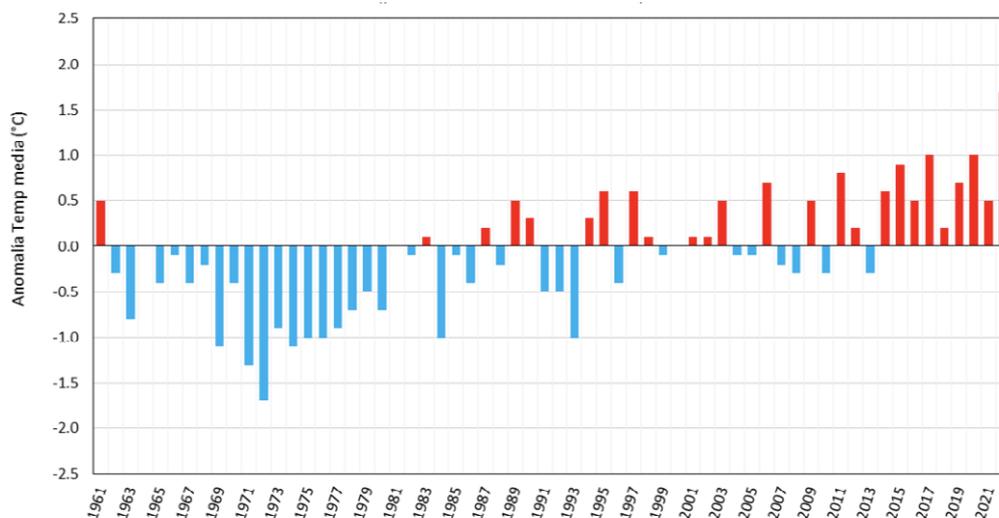
En este apartado se pretende examinar la situación en España del transporte aéreo de carga en relación con el impacto ambiental. Desde una perspectiva conjunta de todos los sectores españoles, el informe de 2022 del Observatorio de Sostenibilidad reveló que las emisiones de toneladas CO₂ en 2022 fueron 305 millones, un 105 % comparado con los 190 millones emitidos en el año 1990, lo que supone un punto de inflexión en el continuo descenso experimentado desde el año 2017 (Figura 13).



Fuente: Inventario Nacional de Emisiones a la Atmósfera

Figura 13. Variación de las emisiones brutas de G.E.I. respecto a 1990

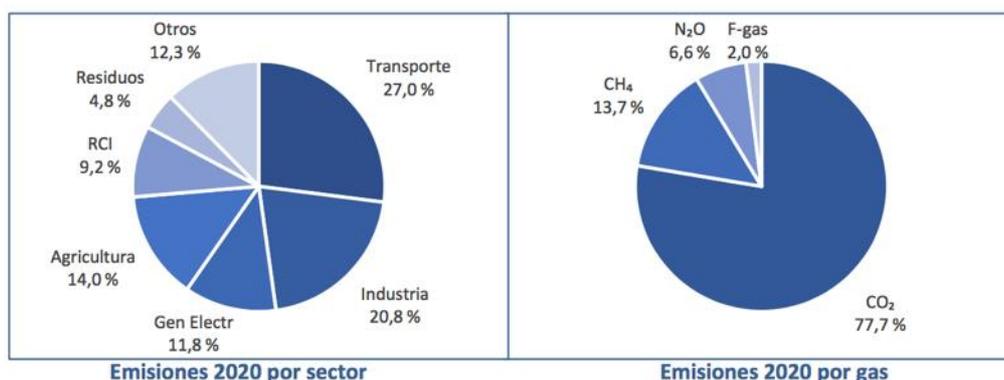
La situación antedicha ha tenido un claro efecto sobre las temperaturas, siendo la temperatura media española de 2022 un 1,7º Celsius más cálida que el rango típico (Figura 14), llegando a los 15,4º Celsius. Por primera vez, desde que se llevan a cabo registros, se han superado los 15º Celsius [24].



Fuente: AEMET

Figura 14. Evolución de las anomalías de la media de la temperatura anual (1961-2022)

Se observa en la Figura 15 que el sector que más contamina en España es el del transporte, y el máximo responsable es el dióxido de carbono, ya que es el gas que se emite con un claro dominio sobre el resto de GEI, siendo el causante del 77,7 % de las emisiones totales. Estos datos justifican la finalidad de que el presente trabajo se centre en la descarbonización del transporte aéreo de mercancías.



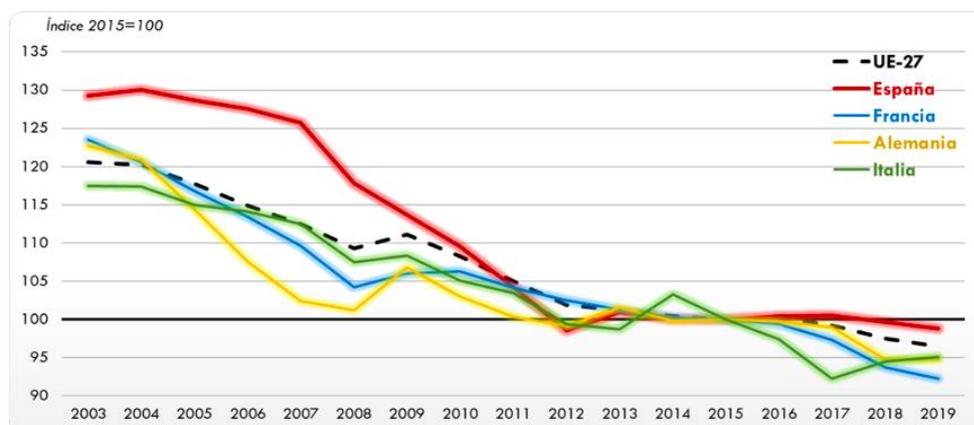
Fuente: Inventario Nacional de Emisiones a la Atmósfera

Figura 15. Variación interanual de las emisiones brutas de GEI (porcentaje)

Resulta preocupante que el segmento del transporte en España contribuya en mayor proporción a las emisiones de GEI que la media de los países que forman la Unión Europea, contribuyendo España un 6,2 % más [19]. Concretamente, si se comparan diferentes países de la UE²¹ y sus emisiones de GEI procedentes del transporte respecto su PIB (Figura 16), se llega a la conclusión de que las emisiones

²¹ Unión Europea.

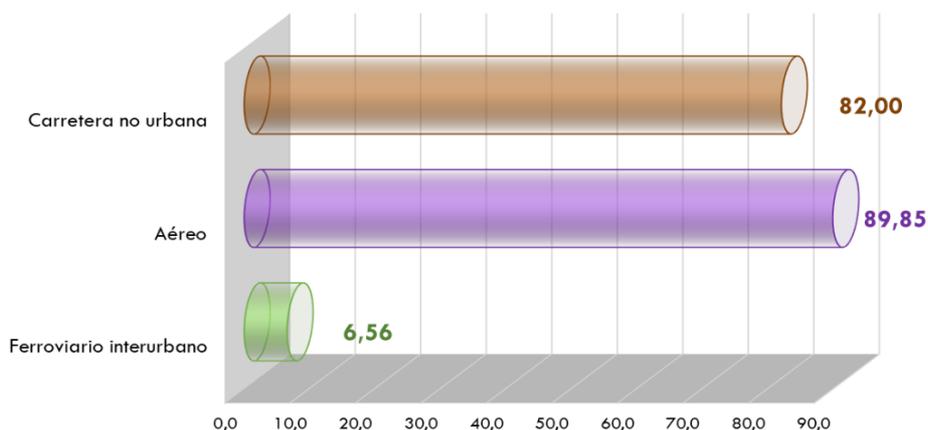
en España se encuentran por encima de países que transportan un mayor número mayor de mercancías al año, siendo un claro ejemplo Alemania, el tercer mayor importador y exportador del mundo.



Fuente: OTLE [19]

Figura 16. Evolución de las emisiones e G.E.I. procedentes del transporte (respecto al PIB) entre 2000-2019

En España, el aéreo no es el transporte que más contamina en términos de cantidad total. Sin embargo, desde la perspectiva de emisiones por cada tonelada-kilómetro y pasajero-kilómetro, el avión es el medio que genera más emisiones de GEI en España, siendo su valor 89,85, concretamente, un 9,6 % más desfavorable que el transporte por carretera (Figura 17).



Fuente: OTLE [19]

Figura 17. Emisiones de G.E.I. por unidad de transporte

El informe publicado en el año 2000 por el Inventario Nacional de Emisiones de Gases Efecto Invernadero, que recoge todas las emisiones desde el año 1990, antes de la pandemia el sector de la aviación nacional generaba alrededor de 3000kt de CO₂, entre otros gases, (obsérvese en la Figura 18). Teniendo en cuenta que las

emisiones totales de CO₂ en España, en 2022, fueron 3000 millones, se puede afirmar que la aviación nacional es responsable del 1 % de las emisiones en nuestro país.

	1990	2005	2015	2019	2020
CO₂	1.655	3.998	2.487	3.127	1.516
CH₄	0,03	0,06	0,04	0,05	0,02
N₂O	0,04	0,11	0,07	0,08	0,04

*Fuente: Inventario Nacional de Emisiones de Gases Efecto Invernadero
Figura 18. Emisiones por gas de la categoría de tráfico aéreo nacional (kt)*

Según un informe de la NASA, el aterrizaje y el despegue de los aviones es responsable del 25 % de sus emisiones, aproximadamente [25]. Esto se debe a que los motores consumen mucho combustible durante el despegue, de gran empuje, y el aterrizaje, de gran resistencia. En la Figura 19 se observa la cantidad y tipo de combustible consumido por los aviones para el transporte nacional, y se divide el vuelo en dos estados: CAD²² y la navegación de crucero.

Combustible	1990	2000	2005	2010	2015	2019	2020
Gasolina aviación, de la cual	379	315	296	229	133	170	141
CAD	37	31	29	27	14	17	14
Crucero	341	284	267	202	120	152	127
Queroseno aviación, del cual	22.326	45.080	54.548	47.542	33.978	42.721	20.652
CAD	5.140	10.380	12.561	10.670	7.455	9.318	4.433
Crucero	17.187	34.701	41.987	36.872	26.522	33.403	16.219
TOTAL	22.705	45.396	54.844	47.771	34.111	42.891	20.794

*Fuente: Inventario Nacional de Emisiones de Gases Efecto Invernadero
Figura 19. Consumo de combustible de la categoría de tráfico aéreo nacional*

El queroseno es el combustible más utilizado en el sector aéreo español, prácticamente, el 100 % de los vuelos usan dicho combustible, como lo indica la Figura 19. La National Aviation Academy sostiene que el carburante más utilizado en la actualidad es el Jet A1, que es especialmente adecuado para viajes internacionales a través de diversos climas, ya que tiene un punto de congelación de -47º Celsius [26]. El Jet A1 es un tipo de combustible de aviación utilizado para propulsar motores a reacción. Es un carburante a base de queroseno que cumple los requisitos de las normas de las autoridades internacionales de aviación civil. Se utiliza en la mayoría de los países del mundo, a excepción de Estados Unidos y algunos otros países, donde el Jet A es el combustible preferido. El Jet A1 tiene un punto de inflamación más alto que el Jet A, por lo que es más resistente a la ignición.

²² Ciclos de aterrizaje-despegue.

No se disponen de datos de las emisiones provocadas por la aviación internacional en el territorio español, por ello se analizarán los datos de emisiones proporcionados por Aena en su informe sobre Plan de Acción Climática del año 2022, ya que se trata de la principal empresa de gestión aeroportuaria en España [27].

En la Figura 20 se muestra cómo Aena clasifica sus emisiones en los Alcances 1, 2 y 3.

ALCANCE 1. Emisiones directas procedentes de fuentes o procesos y actividades controlados por Aena en nuestras instalaciones. Las fuentes de emisión de GEI son:	ALCANCE 3. Integra el resto de las emisiones indirectas procedentes principalmente de:
<ul style="list-style-type: none"> • Combustión estacionaria. Emisiones generadas por grupos electrógenos, generadores portátiles, calderas, prácticas del servicio de extinción de incendios (SEI) y bombas auxiliares de los depósitos de agua contra incendios. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ciclo LTO. Se trata del aterrizaje y despegue de aeronaves de las compañías aéreas que operan en los aeropuertos.
<ul style="list-style-type: none"> • Combustión en fuentes móviles. Emisiones procedentes de vehículos pertenecientes a la flota de Aena, tanto ligeros como pesados. 	<ul style="list-style-type: none"> • APUs. Unidades de potencia auxiliar que suministran energía a las aeronaves cuando están en tierra.
ALCANCE 2. Emisiones indirectas que se producen por la generación de electricidad o energía térmica adquirida y consumida en nuestros aeropuertos. Su fuente es:	<ul style="list-style-type: none"> • Vehículos y maquinaria que proporcionan los servicios de Handling o asistencia a los pasajeros y aeronaves en los aeropuertos.
<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de electricidad. Emisiones asociadas al consumo eléctrico de las actividades desarrolladas por los aeropuertos para climatización, iluminación y operativa de diversas instalaciones. 	<ul style="list-style-type: none"> • Otros (Consumo de energía de los concesionarios, accesos terrestres, viajes de empleados, etc.).

Fuente: Aena

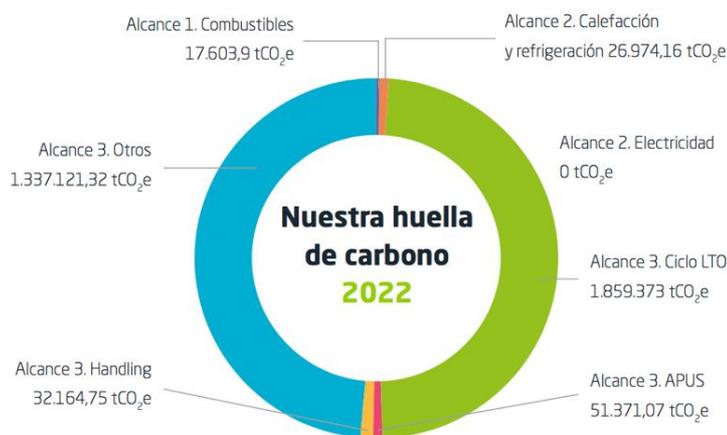
Figura 20. Las emisiones G.E.I. según alcance 1, 2, 3 en el sector de la aviación

El Alcance 3 emitió 3.326.005 tCO₂ en 2022 (Figura 21), de los cuales 1.859.373 tCO₂ provenían del Ciclo LTO. De las emisiones totales producidas por Aena, un 56 % de provenían del Ciclo LTO, es decir, de los despegues y aterrizajes (Figura 22).

Emisiones de gases de efecto invernadero (Alcance 1, 2 y 3) (tCO₂e).					
	2019	2020	2021	2022	Reducción 2022 vs 2019
Emisiones alcance 1	22.769,6	17.112,5	14.313,6	17.603,9	-22,69%
Emisiones alcance 2	113.860,9	26.199,3	31.870,9	26.974,2	-76,31%
Emisiones alcance 3	3.865.448,1	1.870.884,6	2.242.058	3.326.005	-14%

Fuente: Aena

Figura 21. Evolución de la huella de carbono según alcances (2019-2022)



Fuente: Aena

Figura 22. Contribución de emisiones año 2022 (tCO₂)

La conclusión es que en el sector de la aviación la mayor parte de la contribución de GEI proviene a raíz del uso de combustibles contaminantes, ya que resulta significativo que más de la mitad de las emisiones de una empresa de gestión, como Aena, provenga de las emisiones producidas por las aerolíneas que operan en sus instalaciones, y no por las propias infraestructuras de los aeropuertos y sus servicios.

3.2. Ámbito espacial de la Unión Europea

3.2.1. Transporte de mercancías

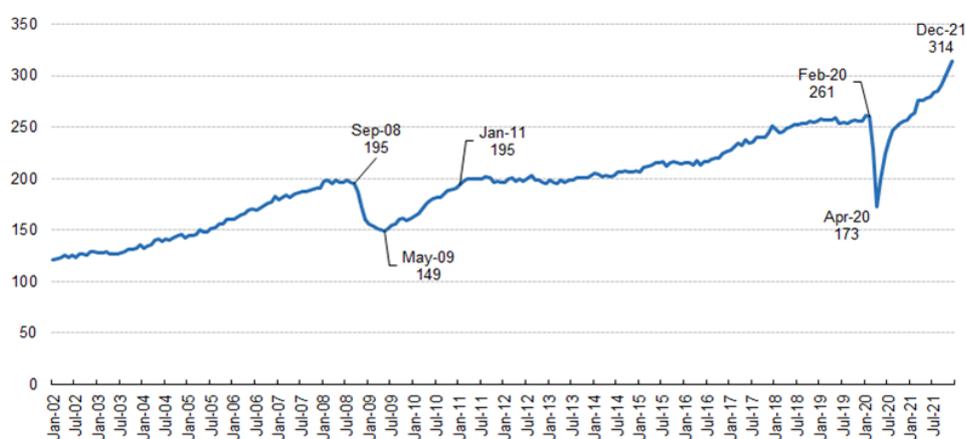
La Unión Europea es una organización internacional de integración y supranacional que ha creado un espacio económico y comercial muy potente entre sus socios, los Estados miembros. Su integración económica y comercial se ha visto impulsada por la noción de libre circulación de bienes, servicios, capitales y personas entre los países miembros. Todo ello ha permitido el crecimiento y la consolidación de un mercado interior fuerte.

Así mismo, la UE ocupa una posición privilegiada en el comercio mundial. Los acuerdos comerciales de la UE la han convertido en uno de los principales sujetos de la escena comercial mundial. Cada día, la UE exporta e importa bienes por valor de cientos de millones de euros. Es el mayor exportador mundial de bienes manufacturados y de servicios. En conjunto, los Estados miembros de la UE

representan el 14,6 % de las importaciones y exportaciones mundiales (Figura 26, página 51).

Se afirma que las economías abiertas crecen a un ritmo más rápido que las cerradas. El comercio internacional tiene el potencial de promover el crecimiento económico mediante el aumento de la demanda externa de bienes y servicios, al tiempo que ofrece a los consumidores una mayor oferta (y, a menudo, precios más bajos). Así mismo, fomenta la eficiencia y el aumento de la productividad y apoya la innovación. El hecho de que las transacciones mercantiles estén libres de aranceles y otros obstáculos comerciales, facilita que los bienes y servicios crucen las fronteras de forma eficiente y dinámica, y, en consecuencia, el consumo de bienes de origen internacional aumente. Por tanto, observamos que la política comercial internacional de la UE se ha diseñado en torno a la promoción de la apertura recíproca de los mercados y la liberalización del comercio, creando nuevas oportunidades para aumentar los niveles de comercio, inversión, innovación y crecimiento de la productividad.

El comercio interior en el seno de la UE, es decir, el realizado entre países que la integran, viene experimentando un crecimiento constante desde su creación (Figura 23), exceptuando periodos excepcionales, tales como el de la crisis de 2008 y el de la pandemia del Covid-19.



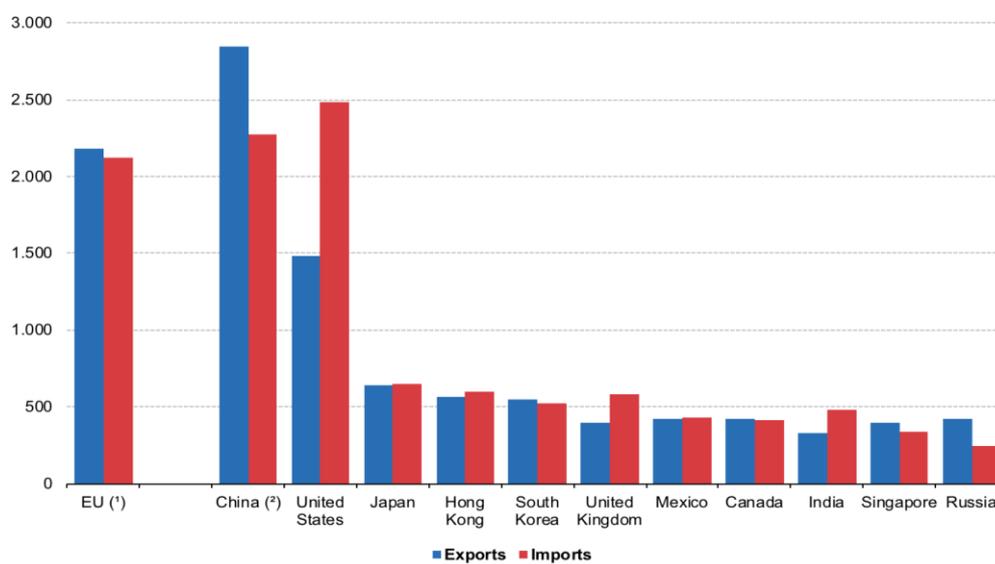
Fuente: Eurostat

Figura 23. Exportaciones de internas mensuales de bienes en la UE (enero 2002-diciembre 2021)

En 2021 se exportaron 3145,3 mil millones de euros entre los Estados miembros de la UE [28]. Los principales países exportadores en el comercio intracomunitario son Alemania, responsable del 21,79 % de las ventas, con una cifra de 750,5 mil millones de euros exportados a otros países de la UE, en 2021; le siguen Países Bajos, con un volumen en términos monetarios del 14,35 %, Bélgica con un 8,94 % y Francia con un 7,89 %; los cuatro Estados miembros citados son

responsables conjuntamente del 52,97 %. España ocupa el puesto séptimo, con el 5,95 % de las exportaciones, por un valor de 204,7 mil millones de euros [28]. La mayoría de las exportaciones de los Estados miembros de la UE se realizan con otros Estados miembros, a excepción de Irlanda y de Chipre. Esta situación viene marcada por el juego de la libre circulación de personas, bienes, servicios y capitales, en el seno de la UE.

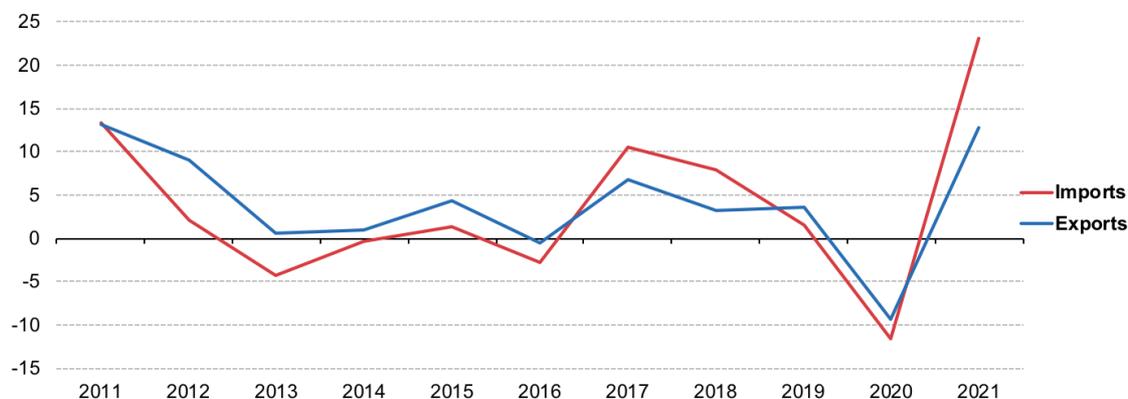
Desde una perspectiva mundial y global, la UE lidera el comercio exterior, siendo uno de los principales exportadores e importadores (Figura 24).



Fuente: Eurostat

Figura 24. Países que dominan el comercio exterior, 2021(mil millones de euros)

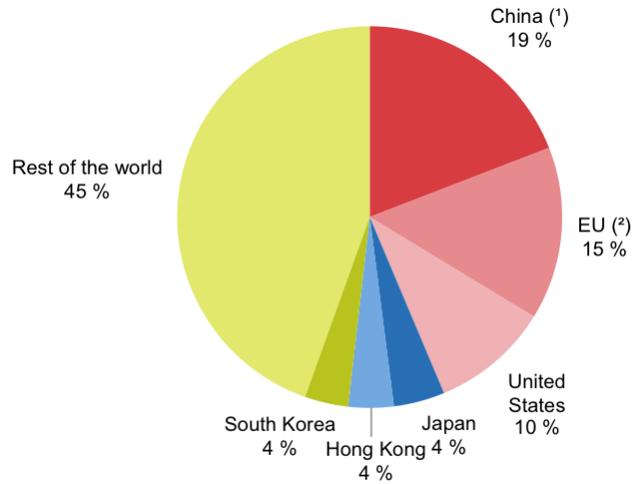
En el año 2022 exportó 2181 mil millones de euros e importó 2118,2 mil millones de euros, superando los niveles previos a la pandemia (Figura 25).



Fuente: Eurostat

Figura 25. Evolución del comercio exterior europeo entre 2011 y 2021 (mil millones de euros)

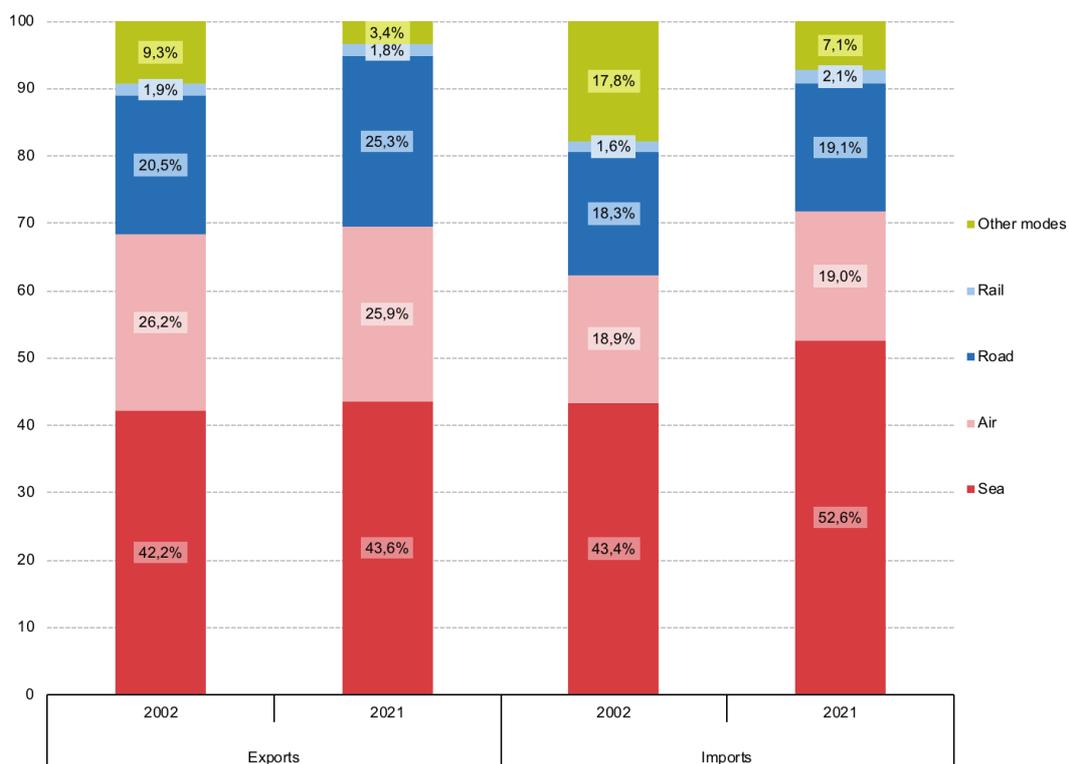
La UE representa el 14,6 % del comercio exterior mundial, un 4 % por detrás de China, como se puede observar en Figura 26. [29]



Fuente: Eurostat

Figura 26. Porcentaje de las exportaciones globales por país en 2021

En cuanto a los medios de transporte de mercancías más utilizados en la UE en sus transacciones fuera de las fronteras comunitarias, se estima que el 19 % del coste de las importaciones y el 25,9 % del valor de las exportaciones se realizan por vía aérea. Ahora bien, es necesario subrayar que el transporte aéreo va por detrás del marítimo, que es el más utilizado y el que ha experimentado un mayor crecimiento desde 2002, como se muestra en la Figura 27.



Fuente: Eurostat

Figura 27. División del valor de la carga transportada en Europa por modo de transporte

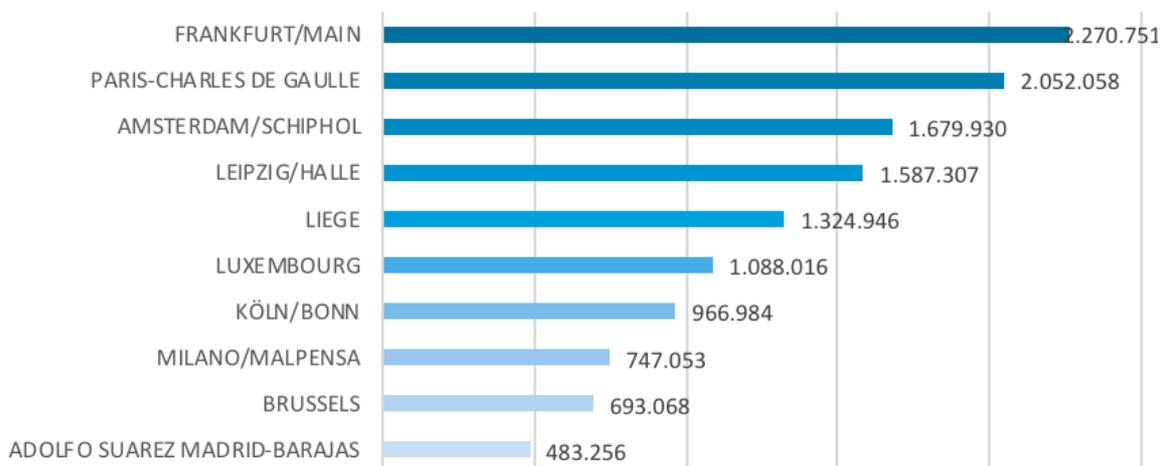
El mismo análisis, tomando como base el volumen de las exportaciones e importaciones, nos muestra que los porcentajes cambian significativamente, como se aprecia al comparar la Figura 27, con la Figura 28. Se observa que el porcentaje del transporte aéreo decrece, considerablemente, con una representación del 0,3 % del volumen de importaciones y un 0,7 % del volumen de exportaciones. Por contra, el transporte marítimo se incrementa, drásticamente, con un control del 72,7 % del volumen de importaciones y un 75,7 % del volumen de exportaciones. De ahí la afirmación de que la vía aérea es muy útil para el transporte de aquellas mercancías que se consideran valiosas. [30]



Fuente: Eurostat
 Figura 28. División del volumen de la carga transportada en Europa por modo de transporte

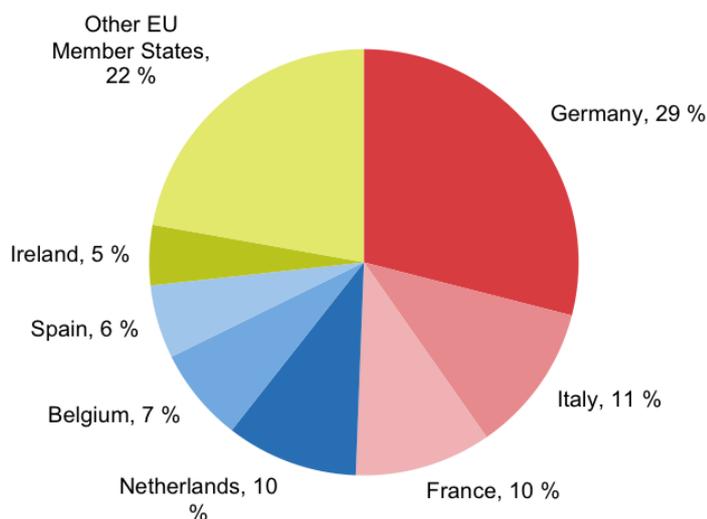
3.2.2. Principales aeropuertos y destinos de la carga aérea

Desde una perspectiva europea, el ranking de los aeropuertos más importantes se muestra en la Figura 29. A la cabeza se posiciona el Aeropuerto de Frankfurt Main (FRA), seguido por el Aeropuerto París-Charles de Gaulle (CDG), manejando entre 2,3 y 2,1 millones de toneladas de carga aérea, respectivamente, en 2021. Por detrás, se encuentran el Aeropuerto de Ámsterdam-Schiphol (AMS) y el de Leipzig (LEJ). Los cuatro aeropuertos, recién nombrados, juntos controlan el 52,18 % de la carga transportada desde/hasta Europa. Esta situación está justificada y relacionada por el hecho de que Alemania es el tercer exportador e importador del mundo. Francia se encuentra entre los diez primeros países, en términos de volumen de importaciones y exportaciones, como se observa en la Figura 35 y la Figura 36. [31]

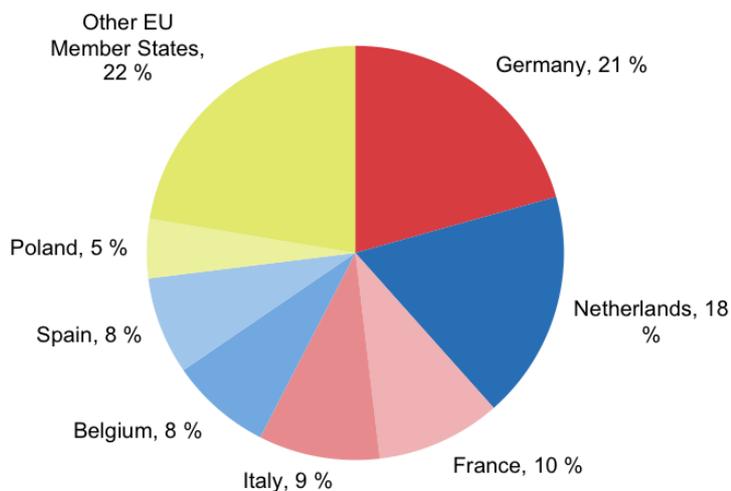


Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Eurostat
 Figura 29. Principales aeropuertos de mercancía europeos (2021)

En relación con el comercio exterior de los Estados miembros, esto es, el realizado fuera de las fronteras de la UE, Alemania es, con diferencia, el país con mayor intervención, en 2021, con un 29 % de las exportaciones (Figura 30) y un 21 % de las importaciones de la UE (Figura 31). Los tres Estados miembros que le siguen en calidad de mayores exportadores son Italia, Francia y los Países Bajos, con un 11 %, un 10 % y otro 10 %, respectivamente (Figura 30). Respecto a las importaciones de bienes, los Países Bajos representan un 18 %, Francia un 10 %, e Italia un 9 %, [29].



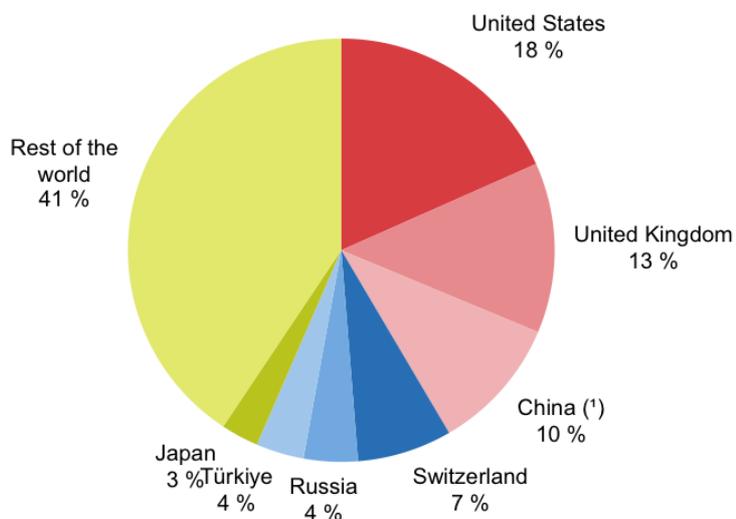
Fuente: Eurostat
 Figura 30. Principales exportadores de Europa



Fuente: Eurostat

Figura 31. Principales importadores de Europa

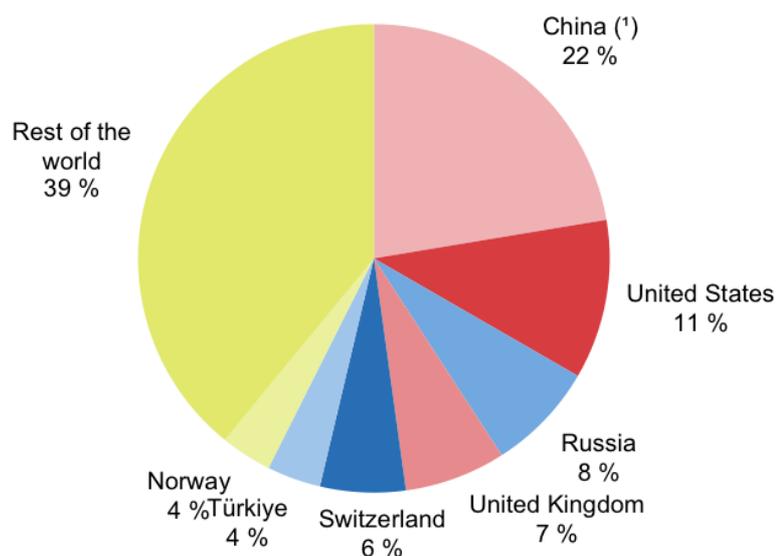
El primer destino de las mercancías exportadas desde la UE, en 2021, con una cuota del 18 %, es Estados Unidos y el segundo rumbo, con un 13 %, el Reino Unido (Figura 32).



Fuente: Eurostat

Figura 32. Exportaciones en Europa según país de destino

Los cuatro mayores mercados de destino de las exportaciones de bienes de la UE representaron casi la mitad todas las exportaciones de bienes de la UE. China fue el mayor proveedor de bienes a la UE en 2021, con un 22 % del total de las importaciones, seguido por Estados Unidos, con un 11 % (Figura 33). [29]



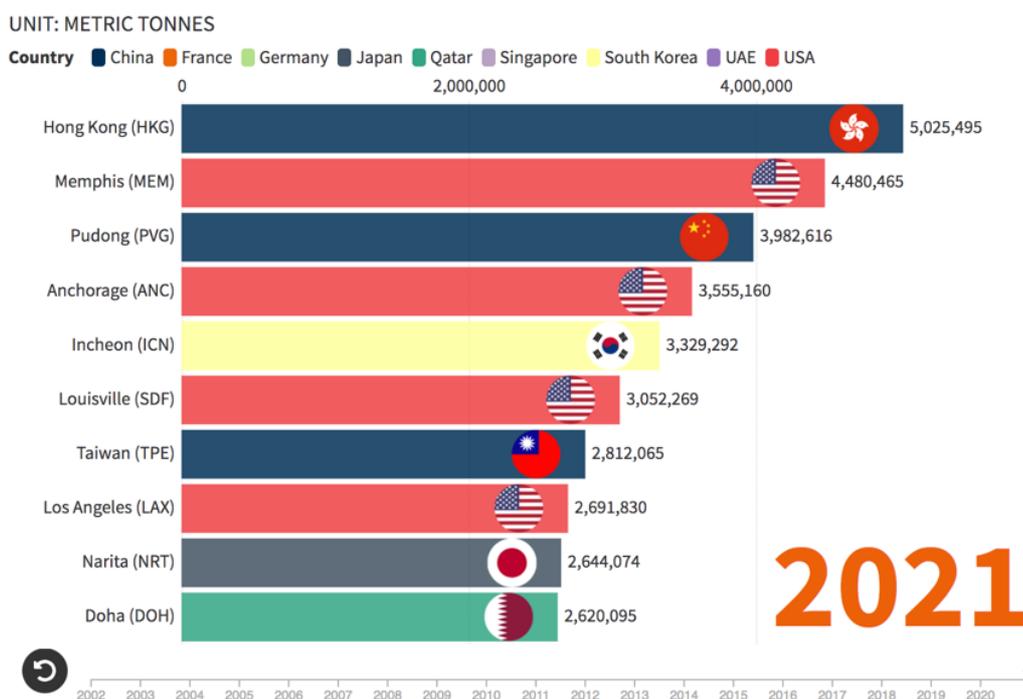
Fuente: Eurostat

Figura 33. Importaciones en Europa según país de origen

Los aeropuertos de los estados miembros de la Unión Europea, entre ellos los de España, se encuentran fuera de los rankings de los aeropuertos más importantes del planeta, principalmente, debido a que los países europeos tienden a transportar más mercancías dentro del propio continente, todo ello impulsado por su política libre circulación intracomunitaria.

Los diez aeropuertos más relevantes del mundo representan el 25 % del volumen total de carga del presente año 2022, manejaron en torno a 34 millones de toneladas, en 2021, según datos de la OACI²³, en parte debido al aumento de la demanda de bienes de consumo (Figura 34).

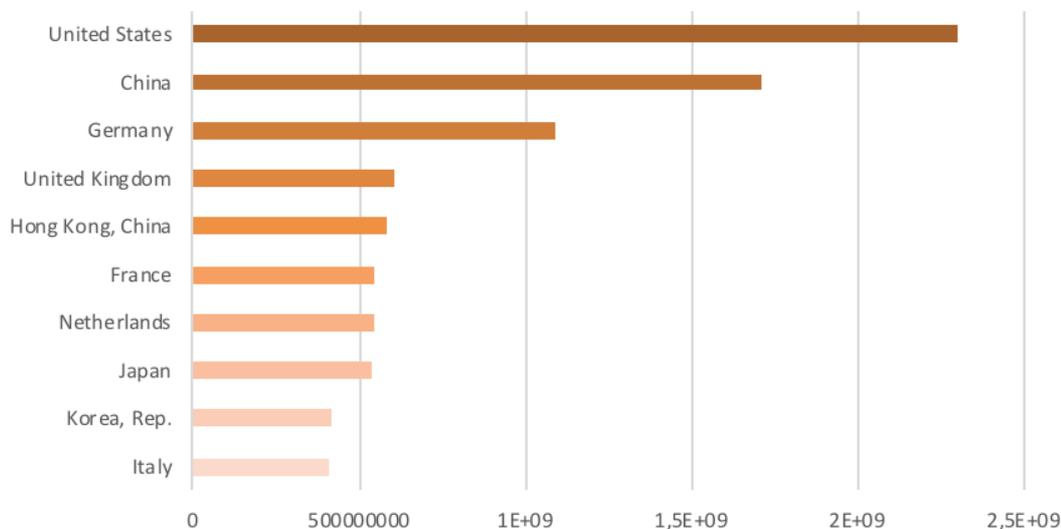
²³ Organización de Aviación Civil Internacional, foro mundial para la cooperación entre sus Estados miembros y la comunidad mundial de la aviación, establece normas y métodos recomendados para el desarrollo seguro y ordenado de la aviación civil internacional.



Fuente: AIC

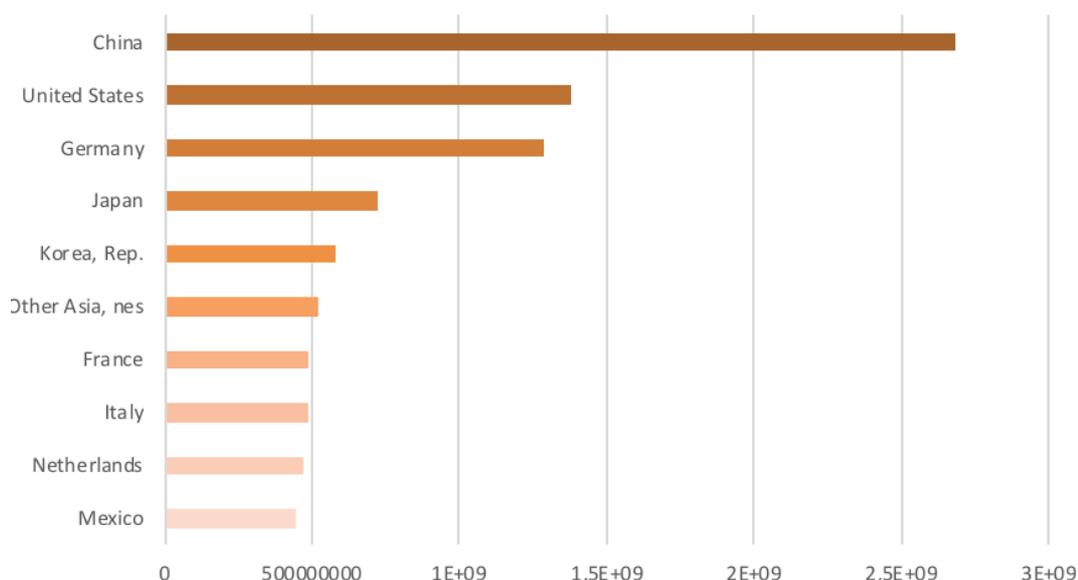
Figura 34. 10 principales aeropuertos de mercancías en el mundo (unidades: toneladas métricas)

La localización geográfica de tales aeropuertos se distribuye, seis ubicados en Asia, mientras que los cuatro restantes se encuentran en Estados Unidos. El motivo de esta geolocalización es que Estados Unidos y China son los dos países principales exportadores e importadores del mundo, en términos del valor comercial, y respecto a los restantes aeropuertos de los diez, pertenecen a países asiáticos (Figura 35 y Figura 36).



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de WITS

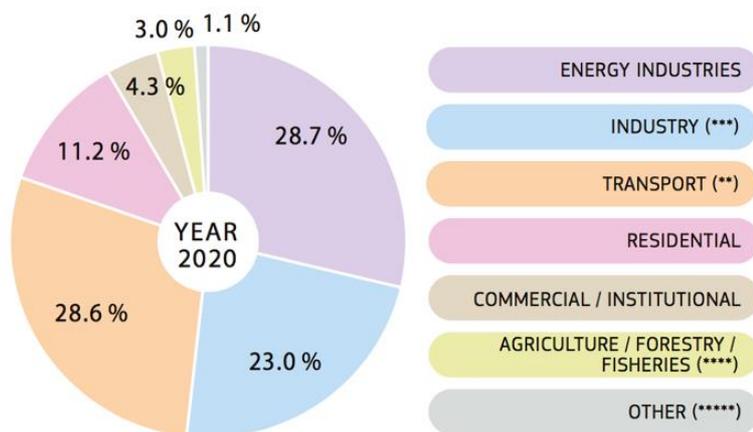
Figura 35. 10 principales países en términos de exportaciones en valor del comercio (miles de US\$)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de WITS
 Figura 36. 10 principales países en términos de importaciones en valor del comercio (miles de US\$)

3.2.3. Impacto medioambiental del transporte de mercancías

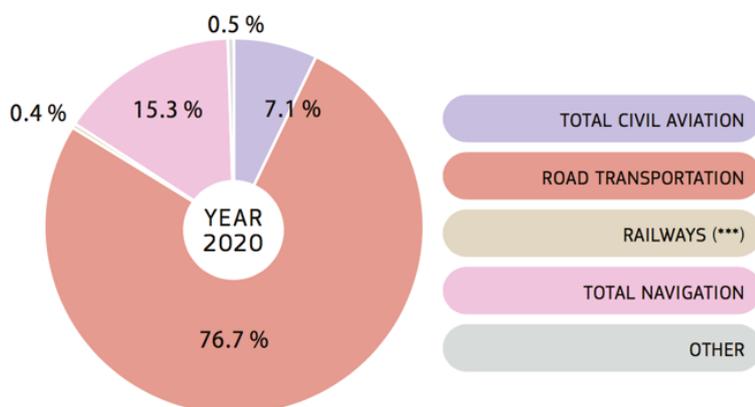
En Europa, en 2020, fueron emitidas 2688 millones de toneladas de CO₂, de los que el sector del transporte es responsable del 28,6 %, como se aprecia en la Figura 37, el sector más contaminante después del energético [32].



Fuente: EU Transport in figures
 Figura 37. División de las emisiones de CO₂ en Europa por sector

La navegación aérea es el tercer medio de transporte más contaminante, representa el 7,1 % de las emisiones totales causadas por el sector del transporte, por detrás del transporte de carreteras y el marítimo (Figura 38). Aunque no es el medio de transporte que más contamina, sin embargo, su volumen de emisiones es

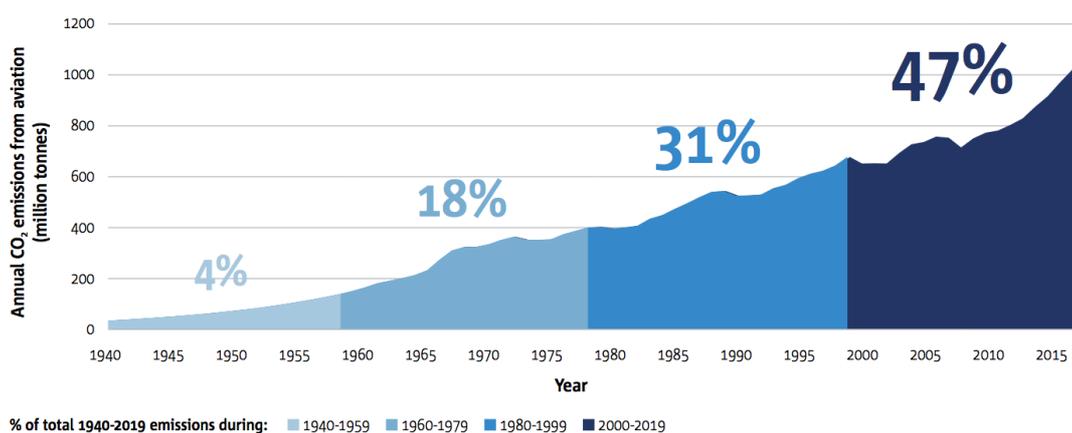
el que más ha aumentado respecto a 1990, concretamente, en el año previo a la pandemia, en 2019, las emisiones por parte de este sector fueron un 225 % en relación con las de 1990. [33]



Fuente: EU Transport in figures

Figura 38. División de las emisiones de CO2 generadas por el transporte según el modo

El mayor problema de las emisiones de CO2 es que pueden permanecer en la atmósfera de cientos a miles de años, y por ello, se debe prestar atención a las emisiones acumulativas, ya que provocan un aumento en las concentraciones de CO2. Tanto las emisiones globales, como las emisiones de aviación han aumentado, dramáticamente, en los últimos años, concretamente, el 47 % de las emisiones globales de CO2 generadas por la aviación han sido emitidas a partir del año 2000, como se muestra en la Figura 39. [34]



Fuente: EEA

Figura 39. Porcentaje acumulado en la atmósfera de emisiones de CO2 generadas por la aviación

4. Evolución y análisis de la normativa internacional, europea y nacional

El conjunto normativo vigente, así como como las iniciativas, políticas y estrategias, en torno a la descarbonización del transporte aéreo de mercancías presenta un triple rasgo reseñable: la diversa procedencia de las normas, su íntima conexión y el ámbito material al que se dirigen.

Se observa que el cuerpo normativo está integrado por normas internacionales, fundamentalmente, tratados internacionales adoptados en el seno de Naciones Unidas; otras normas y actos jurídicos varios, aprobadas en el ámbito de la Unión Europea, que constituyen el grueso normativo esencial en la materia; y, por último, la legislación nacional española. A pesar del distinto origen de las normas y del carácter, en cierta manera, disperso y fragmentario que presentan, sin embargo, muestran un nexo y conforman un conglomerado normativo.

Las áreas estratégicas a las que se dirige la normativa y los proyectos sobre descarbonización del transporte aéreo de mercancías son: regulaciones rigurosas en relación las emisiones de gases de efecto invernadero de los aviones de carga, que engloba la promoción de tecnologías más limpias, como biocombustibles, y el desarrollo de normas de eficiencia energética en la fabricación y operación de aeronaves.

Así mismo, se impulsa el fomento de la investigación y el desarrollo de tecnologías de transporte aéreo de mercancías con cero emisiones, como aviones eléctricos o propulsados por hidrógeno. Para ello, se ofrece financiación de proyectos de innovación y se promueve la colaboración entre la industria y los gobiernos para acelerar la adopción de tecnologías sostenibles.

Por último, se promueven regulaciones que impulsen la adopción de prácticas más sostenibles en la logística y el transporte de mercancías en tierra, tales como el uso de vehículos eléctricos en los aeropuertos para la carga y descarga de mercancías, la optimización de rutas, la reducción del tiempo de espera en los aeropuertos, etc.

4.1. La perspectiva internacional: Naciones Unidas

La organización internacional Naciones Unidas creó el IPCC -Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático- en 1988 cuya función es la emisión

de informes periódicos sobre el cambio climático²⁴. Sus trabajos dan lugar a que en 1992 se adoptara la CMCCNU²⁵ sobre el cambio climático²⁶. La Convención Marco ha sido, y es, un instrumento internacional de gran importancia para el debate anual de la situación el calentamiento global y la adopción de objetivos y medidas a alcanzar, por el conjunto de las Partes involucradas. La citada Convención tiene como propósito final la defensa del sistema climático, para ello, necesita que los Estados firmantes lleven a cabo políticas nacionales de implementación de los compromisos suscritos en orden a la atenuación del cambio climático.

En el seno de la CMCCNU se instituyó un órgano que bajo el acrónimo COP hace referencia a *Conference of the Parties*, traducido al castellano como Conferencia entre las partes firmantes [36]. La COP reúne a las partes en la Convención, una vez al año, con el fin de revisar el grado de cumplimiento de sus compromisos y adoptar otros que consideren oportunos²⁷.

La COP3 celebrada en 1997 [37], la tercera de todas las conferencias realizadas hasta la actualidad, con 169 participantes, constituyó un hito importante en el marco de las políticas de protección del medio ambiente porque aprobó el Protocolo de Kioto de 1997²⁸.

²⁴ El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) fue creado en 1988 conjuntamente por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Tiene como objetivo: a) evaluar la información disponible sobre la ciencia, los impactos y los aspectos económicos del cambio climático, así como las opciones para mitigarlos y adaptarse a los mismos; b) Proporcionar, si se le solicita, asesoramiento científico/ técnico/socioeconómico a la Conferencia de las Partes (COP) de la Convención Marco sobre el Cambio Climático. Desde entonces el IPCC ha emitido una serie de informes de evaluación, informes especiales, notas técnicas, metodologías y otros materiales que se han convertido en obras de referencia, ampliamente utilizadas por los encargados de la toma de decisiones, los científicos y otros expertos.

²⁵ Convención Marco de las Naciones Unidas

²⁶ La Convención Marco de Cambio Climático tiene su origen en la cumbre sobre desarrollo sostenible, celebrada en Río de Janeiro en 1992. Abierta a la firma el 4 de junio de 1992, entró en vigor el 21 de marzo de 1994. En la actualidad son 197 los Estados que la han ratificado. En Río se identificaron tres procesos biofísicos en alto riesgo: la desertificación, la pérdida de biodiversidad y el cambio climático. Ello dio lugar a tres convenciones, una para cada uno de los procesos mencionados más arriba; sin embargo, la más conocida es la de cambio climático. [35]

²⁷ Se trata de reuniones al más alto nivel internacional donde se negocia y se adoptan acuerdos, de manera conjunta, sobre cómo afrontar el cambio climático, principalmente, a través de la estabilización de las emisiones de los gases de efecto invernadero. Estas conferencias se han celebrado en el marco de Naciones Unidas, bajo la Convención Marco de Cambio Climático, que constituye el principal foro para abordar urgentemente los desafíos relacionados con el cambio climático. Las COP tienen una gran importancia en la agenda internacional porque integran a unas 200 Partes, entre las que se encuentran los Estados, organizaciones internacionales, como la Unión Europea, y actores internacionales no gubernamentales. Hasta el momento presente se han organizado veintisiete reuniones anuales, si bien no todas las COP han sido igual de relevantes. Las más señaladas han sido la COP3 que dio lugar al Acuerdo de Kioto y la COP21 que aprobó el Acuerdo de París.

²⁸ Ratificado por 192 Estados. [38]

Kioto constituye el primer convenio sobre el clima por el que los Estados parte se comprometen a implementar normativa interna que ayude a mitigar el calentamiento global. El citado acuerdo, que entró en vigor en 2005, fue suscrito por 150 países parte en la Convención de Naciones Unidas sobre el cambio climático de 1997. Los países más industrializados se comprometieron, por primera vez, a la reducción de las emisiones totales de GEI²⁹, al menos en un 5 % por debajo de los niveles existentes en 1990, durante el periodo de 2008 a 2012³⁰.

El Protocolo de Kioto recoge previsiones específicas dirigidas exclusivamente al transporte aéreo, sintetizadas en el compromiso de las partes de reducir las emisiones de los GEI generadas por los combustibles del transporte aéreo internacional³¹. A partir de ese momento se encomienda a la OACI, organismo especializado de Naciones Unidas³², que comience a promover, en el ámbito de la aviación internacional, la protección del medio ambiente y la lucha contra el cambio climático³³. Se le encargó el diseño de un sistema que limitase estas emisiones de una forma aceptable que verá la luz en 2016, bajo el nombre de CORSIA. Se constata en los informes que promueve la OACI, los efectos especialmente perjudiciales que producen los GEI emitidos en el transporte aéreo, dado que su emisión tiene lugar a gran altitud, a diferencia de los emitidos en otras industrias³⁴.

²⁹ Kyoto pretende la reducción de seis tipos de gases de efecto invernadero: el dióxido de carbono CO₂, el metano CH₄, el óxido nitroso N₂O, el hexafluoruro de azufre SF₆, los hidrofluorocarburos HFC, y los perfluorocarburos PFC.

³⁰ Los países menos desarrollados se comprometían solo a realizar un inventario de todas sus emisiones de GEI.

³¹ Vid. Art. 2. 2: *“Las Partes incluidas en el anexo I procurarán limitar o reducir las emisiones de gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal generadas por los combustibles del transporte aéreo (...) trabajando por conducto de la Organización de Aviación Civil Internacional (...)”*. Págs. 133 y ss. Vid. en: [38]

³² La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) es un organismo especializado de las Naciones Unidas, creado en 1944 que tiene como objetivos estratégicos formular las normas y reglamentos necesarios para garantizar la seguridad operacional, protección, eficiencia de las operaciones aéreas civiles, así como la protección del medio ambiente.

³³ La OACI coordina sus actividades para encarar el cambio climático con otros órganos de las Naciones Unidas como la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), el Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

³⁴ Este Informe especial, de 1999, fue preparado a solicitud de la OACI y de las Partes en el Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono. En el mismo se evalúan y se indican el estado de comprensión de la ciencia pertinente de la atmósfera, la tecnología aeronáutica y los problemas socioeconómicos asociados a las opciones de mitigación tanto en relación con las flotas subsónicas como supersónicas. Están incluidos los efectos potenciales que la aviación ha tenido en el pasado, y que puede tener en el futuro, tanto sobre el agotamiento del ozono estratosférico como sobre el cambio climático global; en cambio, no se abordan los impactos ambientales de la aviación a escala local. El informe sintetiza los resultados para identificar y caracterizar las opciones que podrían mitigar los impactos futuros. En relación con lo anterior vid. [39]

En términos generales, durante aquellos años, la política de la OACI para proteger el medio ambiente en el sector aéreo se ha limitado al comercio de los derechos de emisión, y no a medidas de reducción de las emisiones. El GIACC³⁵ que se ocupa de las cuestiones medioambientales³⁶, en su informe de 2009, reconoció la importancia de abordar el problema del cambio y de “esforzarse por encontrar las maneras, así como los medios para reducir y limitar el impacto de las emisiones de gases procedentes de la aviación civil mundial”³⁷, aunque lamentablemente no se logró el consenso deseado entre los Estados.

Por fin, en 2016, la OACI consiguió que en su seno se alcanzase el primer “Acuerdo Internacional para la Reducción de Emisiones de CO₂ en la Aviación” (CORSIA [41], por sus siglas en inglés)³⁸. El citado acuerdo, en términos generales, es un programa para reducir las emisiones de CO₂ de los vuelos internacionales y frenar el impacto de la aviación en el cambio climático. El plan CORSIA, configurado en varias fases sucesivas, prevé la creación de un mecanismo de mercado global mediante el cual se obligará a las compañías aéreas que superen las emisiones asignadas a adquirir derechos de emisión equivalentes o a establecer determinadas iniciativas compensatorias.

El modelo CORSIA es mucho más que un mercado de derechos de emisión, por primera vez, se diseña un conjunto de medidas, impulsadas por la OACI, encaminadas a reducir las emisiones. Encontramos iniciativas, tales como, la aplicación de nuevas tecnologías para aumentar la eficiencia energética de los nuevos aviones comerciales, el uso de biocombustibles renovables, la optimización de los procedimientos operativos que reduzcan el consumo de combustible, el desarrollo de infraestructuras con menor huella de carbono, en las terminales aeroportuarias, entre otras [42].

El compromiso de implantación se fijó, como fecha de inicio en 2021 como se muestra en la Figura 40, con una extensión temporal hasta 2035³⁹. Curiosamente,

³⁵ Grupo sobre Aviación Internacional y Cambio Climático.

³⁶ El Grupo de alto nivel sobre la aviación internacional y el cambio climático de la OACI (GIACC) se creó para presentar orientaciones sobre el desarrollo de un marco para las medidas basadas en criterios de mercado, evaluar la viabilidad de las opciones relativas a una medida basada en criterios de mercado de alcance mundial e identificar un conjunto de medidas tecnológicas y operativas. En la actualidad, este comité se encarga de desarrollar directrices para los Estados y aerolíneas que desean incluir la aviación en un plan de mitigación de emisiones que les permita alcanzar los objetivos fijados en Kioto.

³⁷ Informe del Grupo sobre la Aviación Internacional y el Cambio Climático (GIACC), N° 1, OACI, Montreal, p. 3, vid. en [40]

³⁸ Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation.

³⁹ La Comisión Europea propuso en 2017 prorrogar el sistema de comercio de emisiones del sector de la aviación, en el que se incluyen únicamente vuelos europeos, a la espera de que la

este acuerdo se produce un día después de que se lograra garantizar la entrada en vigor del acuerdo de París sobre el clima, que analizamos, brevemente, a continuación.



Fuente: ATAG⁴⁰

Figura 40. Plan CORSIA entrada en vigor

Finalizada la vigencia del Protocolo de Kioto en 2012 se sucedieron diversas Conferencias, tales como, la de Copenhague de 2009 (COP15)⁴¹, la de Varsovia 2013 (COP19), entre otras. Las citadas conferencias no fueron tan destacadas como la de Kioto, en cuanto a los compromisos alcanzados por las partes, pero si mostraban algún pequeño avance y, sobre todo, marcarían la hoja de ruta para alcanzar unos años más tarde el Acuerdo de París.

En 2015, la COP21 [44], reunida en Francia, adoptó el Acuerdo de París⁴² que establece un marco legal y global regulador de la lucha contra el cambio climático y sus consecuencias. El Acuerdo representó un punto de inflexión, dado que involucra a todos -Estados, desarrollados o en vías de desarrollo, organizaciones internacionales, actores internacionales, etc.- en el desafío mundial, en todas sus dimensiones, de proteger al planeta. Las Partes acordaron obligarse, mediante un

Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) definiera los detalles del mecanismo global que se aplicará a partir de 2021.

⁴⁰ <https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/climate-action/offsetting-emissions-corsia/corsia/corsia-explained/>

⁴¹ El objetivo principal de la COP15 fue lograr una estrategia que diera continuidad y mejorara el Tratado de Kioto, que finalizaba en 2012. Fruto de la COP15 fue el Acuerdo de Copenhague expresaba claramente la intención política de limitar el carbono y responder al cambio climático, tanto a corto como a largo plazo. Entre los objetivos a largo plazo que se marcaron estaba el de limitar el aumento máximo de la temperatura media mundial a no más de 2 grados centígrados por encima de los niveles preindustriales, sujeto a una revisión en 2015. Desde un punto de vista práctico no se llegó a un acuerdo sobre cómo hacerlo. [43]

⁴² Fue adoptado por 196 Partes. El acuerdo se firmó el 12 de diciembre de 2015 y entró en vigor el 4 de noviembre de 2016. [45]

convenio internacional a la consecución de determinados compromisos para frenar el calentamiento global y a establecer garantías para su cumplimiento.

El Acuerdo de París constituye, en la actualidad, el instrumento legal vigente que determina como objetivo esencial a alcanzar el mantenimiento del aumento de la temperatura media mundial por debajo de los 2º Celsius, así como limitar el aumento a 1,5º Celsius sobre los niveles preindustriales⁴³. Se incluye el compromiso de todos los Estados de reducir sus emisiones, así como la colaboración conjunta a fin de adaptarse a los impactos del aumento de las temperaturas. El Acuerdo exige que los países desarrollados ayuden a las naciones más vulnerables a aplacar y adaptarse al cambio climático. Se crea un marco de control e información sobre las medidas adoptadas y los progresos realizados en la mitigación del cambio climático⁴⁴.

4.2. La perspectiva regional europea: La Unión Europea

La Unión Europea se ha mostrado, desde la entrada en vigor del Protocolo de Kioto, como uno de los actores del escenario internacional más comprometidos y decididos en la lucha contra el cambio climático. Como exponemos a lo largo de las siguientes páginas, en el sector de la aviación, su estrategia para combatir el cambio climático se ha enmarcado fundamentalmente bajo dos de sus políticas, la de medio ambiente y la de transportes. Observaremos, también, que el marco normativo presenta un carácter disperso y fragmentario que dificulta una exposición ordenada, sistemática y coherente.

La Unión Europea y sus Estados miembros, ratificaron el Protocolo de Kioto en abril de 2002⁴⁵ y asumieron el cumplimiento de sus compromisos de forma conjunta y corresponsable. Pero lo cierto es que la Unión Europea, a través de dos Comunicaciones de finales de los años noventa, ya había iniciado con antelación los pasos necesarios para promover una política medio ambiental dirigida a alcanzar los objetivos de Kioto⁴⁶. Desde entonces, la Unión ha llevado a cabo una actividad

⁴³ Vid. art. 2.1 a) Acuerdo de París: *“Mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático”*. [45]

⁴⁴ Art. 2. 1. b), c) y d) y art. 2.2 del Acuerdo de París. [45]

⁴⁵ Decisión 2002/358/CE del Consejo, de 25 de abril de 2002, relativa a la aprobación, en nombre de la Comunidad Europea, del Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y al cumplimiento conjunto de los compromisos contraídos con arreglo al mismo, Diario Oficial L 130 de 15.5.2002 [46]

⁴⁶ Vid. Communication from the Commission to the Council and the European Parliament. *“Climate change- towards an EU post-Kyoto strategy”*, COM (1998) 353 final [47]

incesante de presentación estrategias, de mecanismos y de normas encaminadas a reducir la emisión de GEI desde una perspectiva general.

A continuación, nos ceñimos a las iniciativas más importantes adoptadas por la Unión Europea en el marco del transporte, preferentemente, aéreo.

La introducción de las cuestiones medioambientales en el sector del transporte arrancó con el Informe del Consejo al Consejo Europeo de Helsinki de 1999 sobre “la estrategia de integrar los aspectos medioambientales y el desarrollo sostenible en la política de transportes” [49]. En las Conclusiones del citado Consejo Europeo de Helsinki se aprobó que: “... las estrategias de integración de la dimensión medioambiental en los sectores de la agricultura, el transporte y la energía (...). Se pide al Consejo que concluya todo este trabajo y presente al Consejo Europeo, en junio de 2001, estrategias globales con la posibilidad de incluir un calendario para nuevas medidas y un conjunto de indicadores para estos sectores”⁴⁷. Añade, el Consejo Europeo, que las instituciones comunitarias deben poner en práctica de forma inmediata las estrategias y deben acompañarse de los instrumentos oportunos para llevar a cabo una “... evaluación periódica, seguimiento y supervisión para poder ajustarlas y consolidarlas”⁴⁸.

Centrados en el transporte aéreo, en 1999 la Comisión presentó una Comunicación bajo el título “Transporte aéreo y medioambiente: retos del desarrollo sostenible”⁴⁹. Interesante documento que, circunscrito al transporte aéreo, constituye un instrumento esencial para introducir las cuestiones medioambientales en la política de transporte aéreo. Analiza y establece como elementos esenciales de la estrategia: las emisiones atmosféricas, los incentivos económicos que refuercen las características de las aeronaves y el fomento de la investigación y el desarrollo, entre otras. Vinculado al documento anterior, la Comisión adoptó, en 2005, otra Comunicación sobre “Reducción del impacto de la aviación sobre el cambio climático” que analizamos más adelante⁵⁰.

Unos años antes, la Comisión dirigió una Comunicación al Consejo en la que se recogían los objetivos de las Comunidades Europeas a presentar ante la OACI, como responsable principal, en virtud del Acuerdo de Kioto, en el diseño de la protección

Vid. Communication from the Commission to the Council and the European Parliament - "Preparing for implementation of the Kyoto Protocol", COM (1999) 230. [48]

⁴⁷ Vid. número marginal 46: [49]

⁴⁸ Vid. número marginal 47: [49]

⁴⁹ Comunicación de la Comisión al Consejo, al Parlamento Europeo, al Comité Económico y Social y al Comité de las Regiones de 1999, COM (1999) 640 final. [50]

⁵⁰ Comunicación de la Comisión al Consejo, al Parlamento Europeo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones, de 27 de septiembre de 2005, COM (2005) 459. [51]

del medio ambiente en el ámbito aéreo⁵¹. En la Comunicación se fijan normas estrictas aplicables a todas las emisiones de gas procedentes del transporte aéreo y se refuerzan los incentivos económicos dirigidos a mejorar las características ecológicas de las aeronaves.

Se observa como la descarbonización del transporte aéreo comienza a ser un asunto de creciente importancia en la agenda medioambiental y climática, global y europea, y se cuela como un elemento esencial en la configuración de la política de transportes de la Unión Europea y, por tanto, del aéreo.

La notable expansión del transporte aéreo dio lugar a la adopción, en 2001, del Libro Blanco sobre Transporte [53]. Conscientes de las negativas consecuencias que el crecimiento de este sector provocaría sobre el medio ambiente, se establecieron como objetivos el control de su crecimiento, la lucha contra su saturación, la eficiencia en la prestación de servicios a sabiendas que los retrasos provocan un exceso de consumo de combustibles. Se adoptaron normas encaminadas a la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero en el transporte aéreo y la introducción del sector dentro del mercado de derechos de emisión.

En el marco del Sexto Programa de Acción Comunitario en materia de Medio Ambiente⁵², la Unión Europea define las prioridades y objetivos de la política de medio ambiente europea hasta 2010 y detalla las medidas que se deben adoptar para contribuir a la aplicación de su estrategia en materia de desarrollo sostenible. En el art. 5 se propone que para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector de los transportes deben emprenderse “actuaciones concretas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por la aviación en caso de que dichas actuaciones no puedan acordarse en el seno de la Organización de la Aviación Civil Internacional (...)”.

Como se señala más arriba, la Comisión, centrada en cómo reducir el impacto del sector de la aviación en el cambio climático adoptó, en 2005, una importante Comunicación sobre “Reducción del impacto de la aviación sobre el cambio

⁵¹ Comunicación de la Comisión al Consejo sobre “Objetivos de la Comunidad de cara a la 33ª asamblea de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) y las decisiones del Consejo de la OACI relativas a la protección del medio ambiente previas a dicha asamblea”, COM (2000) 821 final. [52]

⁵² Decisión nº 1600/2002/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 22 de julio de 2002 por la que se establece el Sexto Programa de Acción Comunitario en Materia de Medio Ambiente. [54] Vid., también, la Comunicación de la Comisión al Consejo, al Parlamento Europeo, al Comité Económico y Social y al Comité de las Regiones sobre el Sexto Programa de Acción de la Comunidad Europea en materia de Medio Ambiente “Medio ambiente 2010: el futuro está en nuestras manos” - VI Programa de medio ambiente, COM/2001/0031 final. [55]

climático”⁵³ [51]. Se señala la importancia de continuar con la investigación y el desarrollo para promover un desarrollo sostenible del sector⁵⁴, la necesidad de implementar una gestión eficiente del tráfico aéreo para reducir el consumo de combustible y mantener la fiscalidad de la energía; como novedad, se propone integrar el sector del transporte aéreo en el régimen comunitario de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero [58].

Por fin, la Directiva 2008/101/CE⁵⁵, incluye las actividades de aviación en el régimen comunitario de comercio de derechos de emisión de GEI⁵⁶. Si bien, se crea un mercado específico de derechos de emisión entre operadores aeronáuticos⁵⁷.

La política de transporte aéreo ligada a la medioambiental de la UE estaba planificada hasta 2012, por ello se hacía necesario la adopción de un nuevo texto que se proyectara en un plazo temporal mayor (2050) y que asumiera nuevos retos. La respuesta fue la adopción del Libro Blanco del Transporte de 2011⁵⁸ que diseña las líneas generales para alcanzar una política de transportes competitiva y sostenible con la vista puesta en 2050. Como actuaciones concretas prevé el fomento de la investigación, la innovación y la inversión en transportes que no

⁵³ Esta Comunicación implica una mayor definición del Sexto Programa de Acción Comunitario en Materia de Medio Ambiente, ya que asume como objetivo la lucha contra el cambio climático, a través de la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, promoviendo un cambio hacia formas más eficientes y limpias de transporte y reduciendo las emisiones de GEI en un 8% para 2008 desarrollando y utilizando combustibles alternativos.

⁵⁴ Se potencia la investigación en transportes sostenibles y otras fuentes de energía. Vid. en: Decisión nº 1982/2006/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de diciembre de 2006, relativa al Séptimo Programa Marco de la Comunidad Europea para acciones de investigación, desarrollo tecnológico y demostración (2007 a 2013). [56]

Así mismo, vid. Decisión del Consejo de 19 de diciembre de 2006 relativa al programa específico «Cooperación» por el que se ejecuta el séptimo programa marco de la Comunidad Europea de acciones de investigación, desarrollo tecnológico y demostración (2007-2013). [57]

⁵⁵ Directiva 2008/101/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, por la que se modifica la Directiva 2003/87/CE con el fin de incluir las actividades de aviación en el régimen comunitario de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero. [59]

⁵⁶ Este mecanismo constituyó una importante herramienta de la política medioambiental. Establece el régimen de comercio de derechos de emisión (RCDE) de la Unión Europea (UE). Esta es la piedra angular de la política de la UE para luchar contra el cambio climático mediante la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de una forma rentable y económicamente eficiente. Está basado en el principio de «tope y trueque». Vid. Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de octubre de 2003, por la que se establece un régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero en la Comunidad y por la que se modifica la Directiva 96/61/CE del Consejo, Diario Oficial L 275 de 25.10.2003. [60]

⁵⁷ El sistema consiste en que la autoridad competente fija la cantidad máxima de emisiones de GEI y distribuye esa cantidad entre las compañías aéreas que las generan. Deberán ajustar su comportamiento a la cantidad asignada, si son más eficientes podrán vender sus excedentes a otras compañías menos eficientes y viceversa. Esta herramienta fomenta el comportamiento eficiente de las compañías aéreas porque premia a aquellas que se comportan con mayor eficiencia medioambiental (ingresos extra) y sanciona a las más contaminantes.

⁵⁸ Libro Blanco “Hoja de ruta hacia un espacio único europeo de transporte: por una política de transportes competitiva y sostenible”, COM/2011/0144 final. [61]

dependan del petróleo. También se proponen el desarrollo y empleo en el sector aéreo de nuevos combustibles sostenibles hipocarbónicos, fijando una cuota del 40 % a alcanzar en 2050 y la reducción en un 60 % las emisiones de GEI. Así mismo, en ese plazo, se pretende enlazar todos los aeropuertos de la red básica a la red ferroviaria para conectar los distintos modos de transporte, especialmente con el tren de alta velocidad.

Si atendemos a la política medioambiental, el Séptimo Programa de Acción para el Medio Ambiente 2014-2020⁵⁹ se enmarca en las disposiciones concretas en materia de clima y energía recogida con anterioridad en la “Hoja de ruta hacia una economía hipocarbónica competitiva en 2050”⁶⁰.

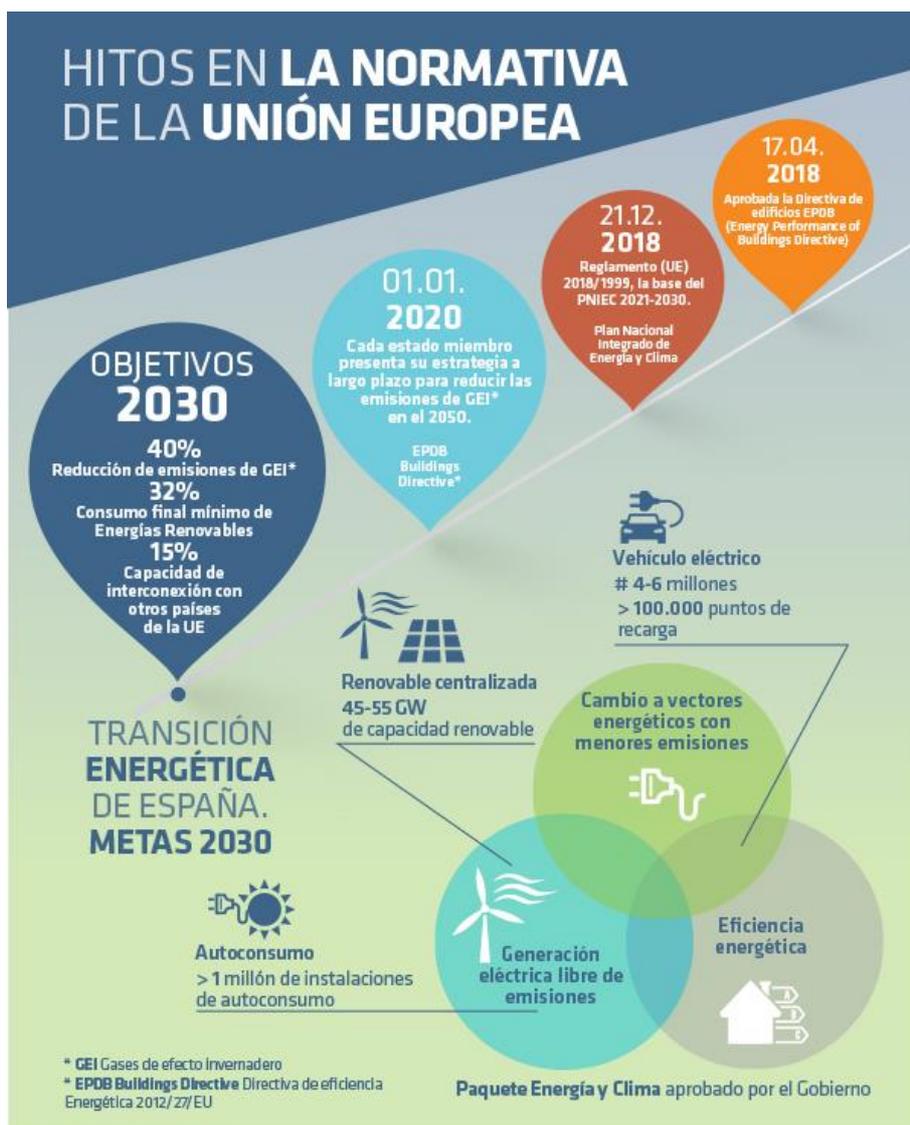
A finales de 2016, la Comisión Europea propuso el paquete de medidas denominado “Energía limpia para todos los europeos” conocido, también, como “paquete de invierno”⁶¹ con el objetivo de alcanzar unos objetivos expresados gráficamente en la Figura 41. Este conjunto de propuestas normativas incluye el Reglamento 2018/1999 sobre la gobernanza de la Unión de la Energía y de la Acción por el Clima⁶², en el que se establece la necesidad de elaboración de estrategias a largo plazo por parte de los Estados miembros, con una perspectiva de, al menos, 30 años.

⁵⁹ Decisión nº 1386/2013/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 20 de noviembre de 2013 relativa al Programa General de Acción de la Unión en materia de Medio Ambiente hasta 2020 «Vivir bien, respetando los límites de nuestro planeta». [62]

⁶⁰ Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones, “Hoja de ruta hacia una economía hipocarbónica competitiva en 2050”, COM (2011) 112 final. [63]

⁶¹ Es un ambicioso programa energético cuyo objetivo a alcanzar en 2030 es que Europa se convierta en el líder mundial en energía de origen renovable, y para ello se espera alcanzar: una reducción de, al menos, un 40 % de las emisiones de gases de efecto invernadero con respecto a los niveles de 1990; un incremento del 32 % de la cuota de las energías renovables en el consumo de energía; una mejora de la eficiencia energética de un 32,5 %; la interconexión de al menos el 15 % de los sistemas eléctricos de la Unión Europea. Para alcanzar estos objetivos, la UE se ha dotado de un “paquete jurídico” compuesto de cuatro directivas y cuatro reglamentos como instrumentos legales necesarios para alcanzar la meta y convertirse en líder mundial de la eficiencia energética. [64]

⁶² Reglamento (UE) 2018/1999 del Parlamento y del Consejo de 11 de diciembre de 2018 sobre la gobernanza de la Unión de la Energía y de la Acción por el Clima, y por el que se modifican los Reglamentos (CE) 663/2009 y (CE) 715/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo, las Directivas 94/22/CE, 98/70/CE, 2009/31/CE, 2009/73/CE, 2010/31/UE, 2012/27/UE y 2013/30/UE del Parlamento Europeo y del Consejo y las Directivas 2009/119/CE y (UE) 2015/652 del Consejo, y se deroga el Reglamento (UE) 525/2013 del Parlamento Europeo y del Consejo. [65]

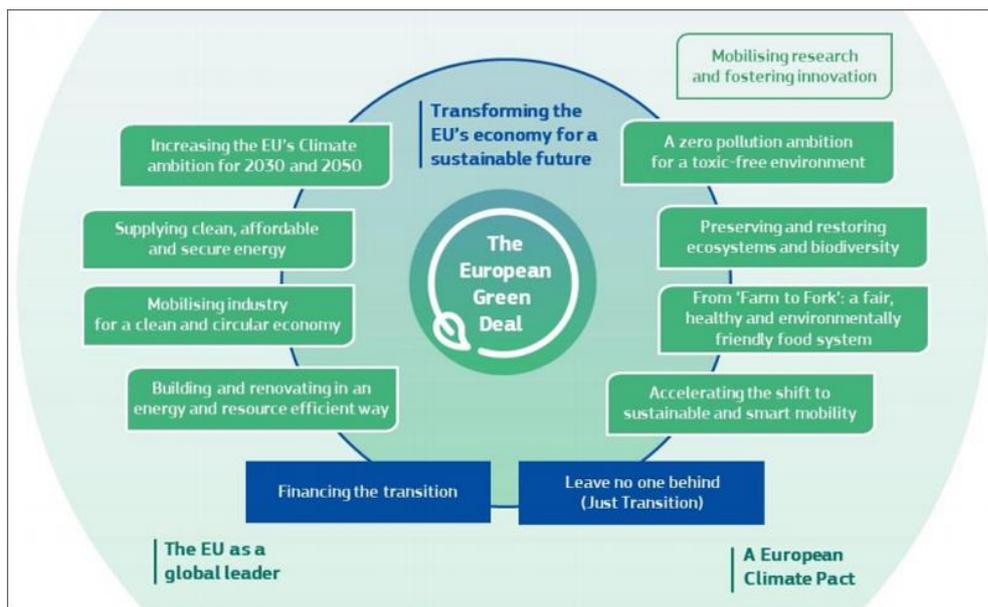


Fuente: Prysmian Club⁶³

Figura 41. Hitos en la normativa de la UE

Muy relacionado con el “paquete de invierno” y más cercano en el tiempo, en diciembre de 2019, el Consejo Europeo acordó que la UE debía lograr la neutralidad climática en 2050, lo que implica que desde esa fecha a 2050, los Estados miembros deben reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero y encontrar formas de compensar las emisiones inevitables para alcanzar un equilibrio de cero emisiones netas. Se encargó a la Comisión que impulsara los trabajos sobre el Pacto Verde Europeo cuyas metas se resumen muy bien en la Figura 42.

⁶³ <https://www.prysmianclub.es/cambios-en-la-edificacion-la-normativa-que-viene-de-europa-iv/>



Fuente: eSMARTcity⁶⁴
 Figura 42. The European Green Deal

En el marco del Pacto Verde Europeo (*Green Deal*) se adopta un elemento principal, el Reglamento (UE) 2021/1119 del Parlamento Europeo y del Consejo⁶⁵, conocido como la Ley Europea del Clima. Constituye un paso decisivo para acatar y desarrollar el contenido del Acuerdo de París. Es el intento definitivo de poner fin, ahora por ley, a la era de los combustibles fósiles.

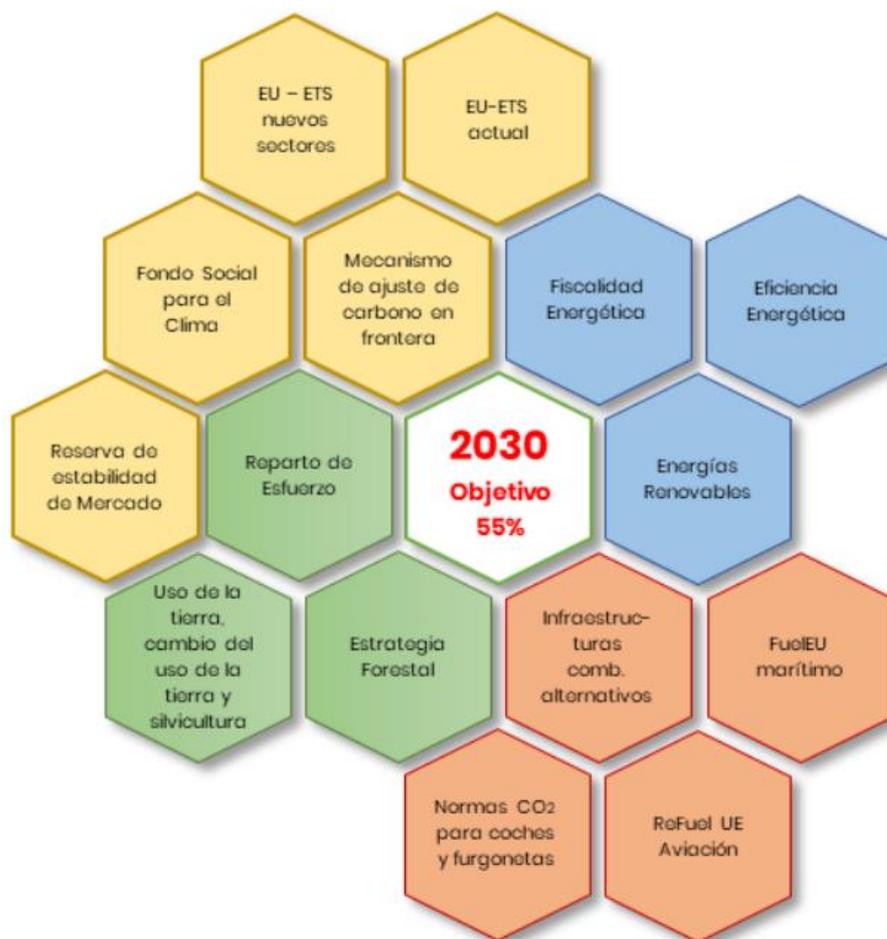
Toda esta legislación climática enmarca las medidas que han de adoptar la UE y los Estados miembros para reducir progresivamente las emisiones, así como la obligación de alcanzar la neutralidad climática en la Unión Europea en 2050. El objetivo supone que, en el año 2050, el volumen de emisiones de gases de efecto invernadero lanzadas a la atmósfera en la UE, tras un importante esfuerzo de reducción, tendrán que ser compensadas, capturadas o neutralizadas mediante sumideros (bosques u otros sistemas o fórmulas tecnológicas). A partir de esa fecha, el volumen de absorción de gases deberá ser superiores a las emisiones que se produzcan, para lograr un balance neto negativo.

⁶⁴ <https://www.esmartcity.es/2019/12/12/pacto-verde-europeo-supone-hoja-ruta-afrontar-retos-clima>

⁶⁵ Reglamento (UE) 2021/1119 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de junio de 2021 por el que se establece el marco para lograr la neutralidad climática y se modifican los Reglamentos (CE) nº 401/2009 y (UE) 2018/1999 («Legislación europea sobre el clima»). [66]

En diciembre de 2020, en el marco del *Green Deal*, el Consejo Europeo dio otro paso hacia la neutralidad climática acordando, como etapa intermedia, que, en 2030, a más tardar, las emisiones de gases de efecto invernadero de la UE se reducirán en al menos un 55 % con respecto a los niveles de 1990.

Se trata del denominado paquete de medidas «*Objetivo 55*» [67] o «*Fit for 55*», un conjunto de propuestas presentadas por la Comisión, todas interconectadas como se muestra en la. Constituye un proyecto de revisión de la legislación vigente y de nuevas iniciativas con el fin de garantizar una transición justa, competitiva y ecológica en 2030. El paquete incluye normas con el objetivo de ajustar las políticas en materia de fiscalidad, energía, transporte, comercio de derechos de emisión y reducciones, entre otras. La iniciativa se presenta como una herramienta que podría contribuir, significativamente, a reducir la huella de carbono, que el aspecto medioambiental se presenta como el factor elemental de la Propuesta, si bien atiende también a la competitividad del sector (Figura 43).



Fuente: CEOE Claves del Paquete Fit For 55 de la Comisión Europea
 Figura 43. Objetivo 55 %

Algunas propuestas tienen que ver con el transporte que se realiza en parte o en su totalidad por vía aérea, e incluyen las propuestas que analizamos, a continuación.

- a) Una propuesta que suprime los derechos de emisión gratuitos para la aviación⁶⁶.

El RCDE⁶⁷ de la UE se instauró en 2005 para promover la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de un modo rentable y económicamente eficiente. A pesar de que los vuelos dentro del EEE⁶⁸ están cubiertos por el RCDE UE desde 2012, las emisiones de la aviación en Europa aumentaron una media del 5 % interanual entre 2013 y 2018, y la previsión es que sigan aumentando.

Es indispensable la reducción de emisiones en el sector de la aviación para alcanzar los objetivos climáticos para 2030 e impulsar la sostenibilidad del transporte aéreo. Por ello, la Comisión propone una revisión de la normativa RCDE para el sector en cuestión consistente en reforzar la señal de precios que incentive una reducción eficaz de las emisiones de la aviación respecto a los costes, y ayudar a que el sector acelere su descarbonización [69]. Se establece que “los vuelos dentro del Espacio Económico Europeo (EEE), así como los vuelos a Suiza y el Reino Unido, seguirán estando cubiertos por el RCDE UE. El número total de derechos de emisión de la aviación en el RCDE se limitará a los niveles actuales y se reducirá anualmente en un 4,2 % (factor de reducción lineal). El número de derechos de emisión gratuitos asignados a los explotadores de aeronaves se reducirá progresivamente, con el objetivo de suspender la asignación gratuita a la aviación para finales de 2026” [70].

De forma paralela, se recoge que la UE también aplicará a los vuelos internacionales, extraeuropeos, el régimen de la OACI y el plan CORSIA, analizados más arriba⁶⁹, de modo que se compensen las emisiones de la aviación que superen los niveles de 2019.

⁶⁶ Propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se modifica la Directiva 2003/87/CE en lo que respecta a la contribución de la aviación al objetivo de la Unión de reducir las emisiones en el conjunto de la economía y a la adecuada aplicación de una medida de mercado mundial, COM (2021) 552 final. [68]

⁶⁷ Régimen de comercio de derechos de emisión.

⁶⁸ Espacio Económico Europeo.

⁶⁹ Vid. apdo. 4.1 del presente trabajo.

- b) Se propone la revisión de la Directiva sobre fiscalidad de la energía (DFE)⁷⁰.

El combustible empleado en la aviación está exento de impuestos en virtud de la Directiva vigente⁷¹. La propuesta de la Comisión presenta unos tipos impositivos mínimos para los combustibles del sector del transporte aéreo que fomentan el paso a combustibles más sostenibles. Se eliminarán las exenciones obsoletas en el transporte aéreo ⁷² y otros incentivos para el uso de combustibles fósiles, fomentando al mismo tiempo la adopción de combustibles limpios. También fomenta la utilización de aeronaves más eficientes y menos contaminantes en los sectores de la aviación de la UE.

La propuesta contempla la inclusión de determinados productos y usos energéticos que en la actualidad están exentos. El queroseno utilizado como combustible en el sector de la aviación dejará de estar totalmente exento de impuestos energéticos para los viajes dentro de la UE. Se trata de una medida crucial habida cuenta del papel de este sector en el consumo de energía y la contaminación. Durante un período de diez años, los tipos impositivos mínimos aplicables a este combustible aumentarán gradualmente, mientras que los combustibles sostenibles destinados a este sector disfrutarán de un tipo mínimo nulo a fin de fomentar su utilización⁷³ [73].

- c) Una propuesta de Reglamento sobre la infraestructura para los combustibles alternativos⁷⁴.

El objetivo de la propuesta es que haya una infraestructura suficiente para la recarga o repostaje de los turismos, camiones, aviones y buques con combustibles

⁷⁰ Propuesta de Directiva del Consejo por la que se reestructura el régimen de la Unión de imposición de los productos energéticos y de la electricidad (refundición) COM (2021) 563 final. [71]. Pretende revisar la Directiva 2003/96/CE del Consejo de 27 de octubre de 2003 por la que se reestructura el régimen comunitario de imposición de los productos energéticos y de la electricidad. [72]

⁷¹ Los Estados miembros tienen la posibilidad de gravarlo, si lo acuerdan bilateralmente dos Estados miembros, y solo para vuelos dentro de la UE. En la actualidad ningún Estado miembro lo grava.

⁷² Vid, art. 14.1. b), entre otros, DIRECTIVA 2003/96/CE en: [72]

⁷³ “El impuesto sobre el combustible de aviación se introducirá gradualmente antes de alcanzar el tipo mínimo final tras un período transitorio de 10 años. Esto significa que 10 años después de la entrada en vigor de las nuevas normas, al queroseno utilizado en el sector de la aviación para alimentar aviones destinados a volar dentro de la UE se le aplicará un impuesto mínimo de 10,75 EUR/GJ en toda la UE, al igual que a la gasolina utilizada en el transporte por carretera. Para fomentar el uso de energías más limpias en el sector aéreo, los combustibles sostenibles y alternativos disfrutarán de un tipo impositivo mínimo nulo durante un período transitorio 10 años cuando se utilicen para el transporte aéreo”.

⁷⁴ Propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo relativo a la implantación de una infraestructura para los combustibles alternativos y por el que se deroga la Directiva 2014/94/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 22 de octubre, relativa a la implantación de una infraestructura para los combustibles alternativos. COM (2021) 559 final. [74]

alternativos tales como, el hidrógeno o el metano licuado, con cobertura suficiente en toda la Unión Europea, que evite la falta la autonomía.

En particular, respecto del transporte aéreo, estipula que las aeronaves tendrán acceso a un suministro de electricidad limpia en los grandes aeropuertos de cada Estado miembro.

Esta propuesta se vincula a otra, recogida en el paquete «Fit for 55», denominada la *ReFuel Aviation*, centrada en el uso de combustibles más ecológicos que se analiza a continuación.

d) Iniciativa «ReFuelEU» para la utilización de combustibles de aviación sostenibles⁷⁵.

Constituye una propuesta de Reglamento de la Comisión Europea que impulsa una transición rápida de los combustibles fósiles a los combustibles sostenibles (SAF, Sustainable Aviation Fuels) en el sector del transporte aéreo. El objetivo principal es incrementar gradualmente la proporción de SAF (incluyendo los combustibles sintéticos) repostado por las aeronaves en los aeropuertos de la UE en el periodo 2025-2050.

Los combustibles SAF, que se analizan en el apartado 6 del presente trabajo, son aquéllos bajos en carbono, como los electrocombustibles, los biocombustibles avanzados y los combustibles sintéticos (de origen no biológico). Se considera que son un gran potencial para reducir la huella ambiental del transporte aéreo, pero tienen un coste notablemente superior al de los combustibles convencionales (hidrocarburos de fuentes fósiles).

La propuesta de la Comisión garantizará que los aeropuertos de la UE dispongan progresivamente de un mayor nivel de combustibles de aviación sostenibles, y exigirá a todas las compañías aéreas que se abastezcan con estos combustibles antes de volar. Por tanto, el suministro y abastecimiento de SAF vincula tanto a los operadores aéreos, a los proveedores de combustible y a los gestores aeroportuarios de la UE. Las aerolíneas deben garantizar que la cantidad anual de combustible cargado en un determinado aeropuerto de la UE se ajusta, como mínimo, al umbral del 90% de combustible anual necesario para sus vuelos. Los productores de combustible desempeñan la misión de incrementar su capacidad de producción de SAF. Y, por último, los aeropuertos tienen la obligación de

⁷⁵ Propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo relativo a la garantía de unas condiciones de competencia equitativas para un transporte aéreo sostenible. COM (2021) 561 final. [75]

proporcionar la infraestructura necesaria (almacenaje y repostaje) para facilitar el abastecimiento de SAF a los operadores aéreos.

Todas las partes involucradas en el proceso de descarbonización de la aviación deben presentar un informe a la Comisión Europea. Cada año, las compañías aéreas deben proporcionar un informe completo sobre sus planes de abastecimiento de combustible, que indique la cantidad, en toneladas, de combustible por cada aeronave y en cada aeropuerto, el total de combustible anual requerido para el total de sus vuelos o la cantidad total de SAF comprado, entre otras informaciones. Por su parte, el proveedor de combustible deberá indicar la cantidad de combustible de aviación entregado en cada aeropuerto, la cantidad de SAF entregado (señalando su tipo), el origen del combustible, etc.

Por último, debe subrayarse que la propuesta recoge unos objetivos obligatorios ambiciosos y se centra en los combustibles de aviación más innovadores y sostenibles, en particular los combustibles sintéticos, que pueden lograr un ahorro de emisiones del 80 o del 100 % en comparación con los combustibles fósiles [69].

4.3. La perspectiva estatal: España

La normativa española sobre descarbonización del transporte aéreo se sitúa en la misma línea que los acuerdos internacionales de los que España es parte, y de las regulaciones de la UE que buscan la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y el avance hacia una aviación más sostenible y con bajas emisiones de carbono.

Durante los últimos años se han puesto en marcha importantes iniciativas encaminadas al ahorro de energía, al incremento de la eficiencia energética y al fomento de las energías renovables, las cuales contribuyen al cumplimiento de nuestros compromisos en materia de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). En este sentido, los desarrollos normativos recogidos, a continuación, incluyen medidas específicas para la descarbonización efectiva del sector aéreo en España.

a) La Ley 7/2021, de 20 de mayo, de Cambio Climático y Transición Energética⁷⁶:

La Ley 7/2021, de 20 de mayo, de Cambio Climático y Transición Energética (en adelante, la Ley de Cambio Climático) constituye la primera norma española que regula la cuestión del cambio climático desde un planteamiento general. La ley establece el marco normativo para la lucha contra el cambio climático y la transición

⁷⁶ https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2021-8447

hacia una economía baja en carbono. En el texto se incluyen medidas concretas para la descarbonización del transporte, incluyendo el aéreo, por medio de la promoción de tecnologías sostenibles, la mejora de la eficiencia energética y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector.

La ley de Cambio Climático trae causa de la obligación de España, respecto de sus compromisos internacionales y comunitarios, de acoger el *Clean Energy Package* o “paquete de invierno”⁷⁷, adoptado por la UE. Lo cierto es que tales obligaciones internacionales, ya han sido superadas por nuevos paquetes normativos aprobados en el seno de la Unión (el Pacto Verde, la Ley del Clima y el paquete de medidas «Fit for 55»), a los que ya se ha hecho referencia más arriba.

b) Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC)⁷⁸:

El PNIEC es una herramienta de planificación estratégica nacional que integra la política de energía y clima, y refleja la contribución de España a la consecución de los objetivos y medidas para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en diferentes sectores, incluyendo el transporte aéreo.

El Plan persigue una reducción de un 23% de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) respecto a 1990. Este objetivo de reducción implica eliminar una de cada tres toneladas de gases de efecto invernadero que se emiten actualmente. Se trata de un esfuerzo coherente con un incremento de la ambición a nivel europeo para 2030, así como con el Acuerdo de París. El propósito final es alcanzar la neutralidad climática en 2050, para ello se establecen medidas específicas que fomentan la descarbonización del transporte aéreo, a través de la promoción de biocombustibles sostenibles, la electrificación de las flotas y la mejora de la eficiencia energética en el transporte aéreo.

c) Plan de acción sobre reducción de emisiones de CO₂ del sector aéreo internacional en España⁷⁹:

⁷⁷ A finales de 2018, las nuevas Directivas de fomento del uso de energías renovables y de eficiencia energética, así como el Reglamento de Gobernanza, entraron en vigor. El sector energético es uno de los principales contribuyentes a las emisiones en la UE, y como tal tendrá que someterse a una profunda transformación para su descarbonización. Posteriormente, el Pacto Verde Europeo y el paquete de medidas «Objetivo 55» establecen los objetivos y actuaciones de la UE para la transición energética.

⁷⁸ https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2021-5106

⁷⁹ https://www.ecacceac.org/images/activities/environment/Spain_Action_Plan_on_CO2_Emission_Reduction_2021.pdf

Este programa, adoptado en junio de 2021, es objeto de desarrollo por el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Establece un marco para la medición, seguimiento y reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero del transporte aéreo en España. Incluye medidas como la promoción de tecnologías y operaciones más sostenibles, la incentivación de la compra de aviones con menor huella de carbono, y la promoción del uso de biocombustibles sostenibles en la aviación.

d) La Estrategia de Movilidad Segura, Sostenible y Conectada 2030⁸⁰:

La Estrategia de Movilidad Segura, Sostenible y Conectada constituye el faro que guiará el debate de la movilidad en España, enriqueciéndose con las aportaciones de los distintos actores que forman parte del ecosistema de la movilidad. Establece la hoja de ruta que conducirá las actuaciones del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA) en materia de transportes, movilidad e infraestructuras en los próximos diez años. Se aprobó por el Consejo de Ministros el 10 de diciembre de 2021 y actualiza la Estrategia Española de Movilidad Sostenible (EEMS) de 2009.

⁸⁰ <https://www.mitma.gob.es/ministerio/planes-estrategicos/esmovilidad>

5. Programas de subvenciones y de ayudas financieras.

La descarbonización del transporte aéreo requiere la existencia de programas de ayuda financiera y subvenciones -en los planos internacional, europeo y nacional- que promuevan la investigación y el desarrollo de tecnologías más sostenibles en el sector.

A continuación, se exponen algunos de los planes de financiación y subvenciones presentados, fundamentalmente, por gobiernos, organizaciones internacionales y organismos especializados dirigidos a promover la investigación y el desarrollo de tecnologías sostenibles, limpias, cuyo fin es la reducción de las emisiones de carbono en la aviación.

Se trata de llevar a cabo programas de investigación, proyectos piloto y de demostración en áreas, tales como: los biocombustibles sostenibles; la electrificación de las aeronaves; las mejoras en la eficiencia energética de los motores; los sistemas de propulsión eléctrica y de almacenamiento de energía; las mejoras en la eficiencia operativa de las aeronaves y la modernización de las infraestructuras aeroportuarias⁸¹.

Las investigaciones realizadas sobre las tecnologías y soluciones sostenibles en la aviación deben probar su viabilidad en el mundo real.

5.1. Plano internacional

Un análisis de los fondos disponibles muestra que se destina una cantidad importante de recursos financieros a programas asociados a la mitigación del cambio climático y que estos programas están estrechamente vinculados a la financiación pública para las cuestiones climáticas a través de las Naciones Unidas, los bancos multinacionales de desarrollo, las organizaciones no gubernamentales y diversos entes asociados y partes interesadas de carácter privado⁸².

El proyecto de asistencia de la OACI y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) (2015- 2019), contiene un valioso recurso para los Estados que buscan apoyo financiero, ya que aporta una lista de programas de financiación pública para mitigar las emisiones de la aviación⁸³.

⁸¹ Por ejemplo, la instalación de sistemas de energía renovable, la mejora de la eficiencia energética en edificios aeroportuarios, o la implementación de sistemas de transporte terrestre sostenibles en los aeropuertos.

⁸² Vid. Apéndice, <https://www.icao.int/Meetings/HLM-LTAG/Documents/HLM.LTAG.WP.19.sp.pdf>

⁸³ <https://www.icao.int/Meetings/HLM-LTAG/Documents/HLM.LTAG.WP.06.en.pdf>

El Programa OACI de Asistencia, Creación de Capacidad e Instrucción en Combustibles de Aviación Sostenibles (ACT-SAF)⁸⁴, brinda apoyo personalizado a los Estados en desarrollo, para acelerar la disponibilidad y uso de combustibles sostenibles (SAF), y facilitar asociaciones y cooperación en todo el mundo.

Por último, señalar la iniciativa para la Aviación Sostenible (SAI, por sus siglas en inglés), consistente en una iniciativa global que busca la promoción de la aviación sostenible desde la perspectiva internacional. A través de diferentes programas y convocatorias, se ofrecen subvenciones y ayudas para proyectos que busquen desarrollar tecnologías y soluciones sostenibles para la aviación, incluyendo la descarbonización del transporte aéreo⁸⁵.

5.2. **Ámbito de la Unión Europea**

Se recogen en el presente apartado, sin ánimo exhaustivo, las principales estrategias, propuestas y programas de financiación, adoptados en el seno de la UE, en el campo de la investigación y desarrollo en el sector de la navegación aérea para luchar contra en cambio climático.

a) Programas de Transporte Aéreo Sostenible de la Unión Europea.

Los programas Clean Sky y Clean Sky 2⁸⁶, así como Clean Aviation que es el sucesor de Clean Sky 2, tienen como objetivo impulsar la investigación y desarrollo de tecnologías sostenibles para la aviación, incluyendo la reducción de emisiones de carbono y la mejora de la eficiencia energética en aviones y operaciones aeroportuarias (Figura 44). Se pretende disponer de tecnologías que permitan reducir a la mitad el ruido aeronáutico, doblar la eficiencia energética, disminuir un 80 % las emisiones de NOx⁸⁷ y las emisiones de CO₂, todo ello tomando como base la situación tecnológica del año 2000 [76].

⁸⁴ <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/ES/Launch-of-ICAO-Assistance-Capacitybuilding-and-Training-for-Sustainable-Aviation-Fuels.aspx>

⁸⁵ <https://sai-initiative.org/>

⁸⁶ Clean Sky tiene como objetivo desarrollar tecnologías de transporte aéreo más limpias para su implementación lo antes posible. Eso significa integrar, demostrar y validar tecnologías capaces de reducir las emisiones de CO₂, NOx y ruido entre un 20 y un 30 % en comparación con las aeronaves de última generación que entrarán en servicio a partir de 2014. Además de mejorar el impacto ambiental de las tecnologías aeronáuticas, incluidos los relacionados con la aviación pequeña, el objetivo de Clean Sky 2 es, también, desarrollar una industria aeronáutica y una cadena de suministro sólidas y competitivas a nivel mundial en Europa.

⁸⁷ Óxidos de nitrógeno son un grupo de gases compuestos por óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂).



Fuente: Clean Aviation EU

Figura 44. Clean Aviation

En 2001, en el Salón Aeronáutico de París, se creó el ACARE⁸⁸ integrado en la actualidad por más de cien organismos y asociaciones miembros, incluidos la Comisión Europea, los Estados miembros de la UE, la industria manufacturera, las aerolíneas, los aeropuertos, los proveedores de servicios de navegación aérea, EASA⁸⁹, Eurocontrol, centros de investigación y universidades⁹⁰. El objetivo del ACARE es fijar un marco estratégico de investigación que coordine los programas de investigación aeronáutica en el marco de la UE y sus Estados miembros⁹¹.

Los problemas ambientales mundiales, la contaminación atmosférica y acústica, y los efectos del cambio climático se “colaban” ya en la agenda de los organismos y de las empresas que movilizan el sector aeronáutico. La industria aeronáutica y, en particular, la relacionada con la aviación asumen nuevos compromisos con el medio ambiente y con la sostenibilidad de su actividad. Para actuar de forma responsable ante tales retos se constituyó el programa “Clean Sky de Tecnología Conjunta”⁹² en el marco estratégico del ACARE. El objetivo, entonces

⁸⁸ Consejo Asesor para la Investigación Aeronáutica en Europa.

⁸⁹ European Union Aviation Safety Agency.

⁹⁰ El origen de esta iniciativa se sitúa en el año 2000, en el seno de las reuniones de un grupo de personas del sector de la aviación encabezadas por el Comisario Busquin que acordaron en un documento sobre cómo se debería desarrollar la aviación en Europa, vid. en Comisión Europea, Dirección General de Investigación e Innovación, *European aeronautics: a vision for 2020*, Publications Office, 2002. [77]

⁹¹ Vid. último informe que ACARE presentó en junio 2022 sobre la nueva visión de la aviación europea “Fly the Green Deal”, que sucede al documento de visión de 2011 “Flightpath 2050”. [78]

⁹² Constituye una asociación público-privada participada por la Comisión Europea y la industria aeronáutica, y creada para aportar cambios significativos en la reducción del impacto ambiental de la aviación. Vid. Reglamento (CE) nº 71/2008 del Consejo de 20 de diciembre de 2007 por el que

y hoy, es llevar a cabo un programa de investigación en aeronáutica y transporte aéreo, que permitan logros significativos en el sector de la aviación en relación con el cambio climático. Lo cierto es que se han logrado avances interesantes, ya que los nuevos diseños de aviones son más silenciosos y consumen menos combustible por pasajero y kilómetro, lo que significa menos emisiones.

La iniciativa “Clean Sky de Tecnología Conjunta”, tiene como objetivo, entre otros, el desarrollo de tecnologías innovadoras para aumentar de forma significativa la eficiencia ambiental de las aeronaves y del transporte aéreo, logrando con ello un aumento de la eficiencia en el consumo de carburante [81]. Las actuaciones del programa Clean Sky se agrupan en torno a seis áreas de investigación tecnológica:

- Sustainable and Green Engines (SAGE): para reducir las emisiones de gases y de ruido de los motores.
- Green Rotorcraft (GRC): mejorar las prestaciones de los motores para reducir contaminación y ruido.
- SMART Fixed Wing Aircraft (SFWA): para mejorar tecnologías en la configuración de las alas de las aeronaves.
- Green Regional Aircraft (GRA): crear aeronaves ligeras empleando estructuras ligeras.
- Systemsfor Green Operations (SGO): desarrollo de equipamientos totalmente eléctricos para las aeronaves.
- Eco-design (ECOL): se centra el reciclaje de aeronaves y el uso óptimo de materiales y energías.

El programa “Clean Sky 2” da continuidad a la iniciativa “Clean Sky de Tecnología Conjunta” y se enmarca en el programa Horizonte 2020⁹³. Mantiene el objetivo de desarrollar tecnologías que reduzcan el impacto de la aviación en el medio ambiente y, además, apuesta por la ecoeficiencia en los diseños de los aviones. Su misión es desarrollar tecnologías de vanguardia para aumentar significativamente el comportamiento medioambiental de los aviones y el transporte aéreo, lo que se traduce en aviones con combustibles más eficientes y menos ruidosos, por lo tanto, supone una contribución clave en la consecución de

se crea la Empresa Común Clean Sky [79]; el citado reglamento fue derogado por el Reglamento (UE) nº 558/2014 del Consejo de 6 de mayo de 2014 por el que se establece la Empresa Común Clean Sky 2. [80]

⁹³ Reglamento (UE) Nº 558/2014 del Consejo de 6 de mayo de 2014 por el que se establece la Empresa Común Clean Sky 2 [80] que fue derogado por el Reglamento (UE) 2021/2085 del Consejo de 19 de noviembre de 2021 por el que se establecen las empresas comunes en el marco de Horizonte Europa y se derogan los Reglamentos (CE) nº 219/2007, (UE) nº 557/2014, (UE) nº 558/2014, (UE) nº 559/2014, (UE) nº 560/2014, (UE) nº 561/2014 y (UE) nº 642/2014. [82]

los objetivos ambientales del cielo único europeo. El nuevo programa Clean Sky 2 se extiende desde 2014 a 2024.

En la actualidad, Clean Aviation⁹⁴, sucesor de Clean Sky 2, sigue la línea marcada por sus predecesores. Es una exitosa asociación público-privada entre la Comisión Europea y la industria aeronáutica europea (incluidas las pequeñas y medianas empresas), centros de investigación y universidades, que tiene como función desarrollar tecnologías innovadoras para reducir las emisiones de CO₂, otros gases de las aeronaves y el ruido⁹⁵.

b) Programa Horizonte Europa de Investigación e Innovación de la UE.

Se trata de un programa marco de investigación e innovación (I+I) de la Unión Europea para para el período 2021/27, continuador del programa Horizonte 2020. Constituye un instrumento fundamental para llevar a cabo las políticas de I+D+I de la UE. El objetivo general del programa es alcanzar un impacto científico, tecnológico, económico y social de las inversiones de la UE en I+I. Tiene un presupuesto de 95.517 millones de euros, el mayor hasta la fecha⁹⁶, dirigido a proyectos de investigación y desarrollo en diferentes áreas, incluido la descarbonización del transporte aéreo.

A través de convocatorias específicas, se pueden obtener subvenciones para proyectos que busquen desarrollar y probar tecnologías y soluciones sostenibles para la aviación, como biocombustibles, tecnologías de propulsión eléctrica, mejoras en la eficiencia energética de las aeronaves, y sistemas de gestión del tráfico aéreo más eficientes.

c) Programa LIFE de la UE.

LIFE es un instrumento financiero de la Unión Europea dedicado, de forma exclusiva, al medio ambiente y a la acción por el clima⁹⁷. Va dirigido al desarrollo de

⁹⁴ <https://www.clean-aviation.eu/>

⁹⁵ Reglamento (UE) 2021/2085 del Consejo de 19 de noviembre de 2021 por el que se establecen las empresas comunes en el marco de Horizonte Europa y se derogan los Reglamentos (CE) nº 219/2007, (UE) nº 557/2014, (UE) nº 558/2014, (UE) nº 559/2014, (UE) nº 560/2014, (UE) nº 561/2014 y (UE) nº 642/2014 [82]

⁹⁶ Se estima que Horizonte Europa generará 11 euros en ganancia del Producto Interior Bruto (PIB) por cada euro invertido, creará hasta 320.000 nuevos puestos de trabajo altamente cualificados para el año 2040 y consolidará el liderazgo de Europa en Investigación e Innovación. El Programa está diseñado con una mentalidad de inversión más que como un instrumento exclusivamente de financiación, y contará con una planificación que ayudará a la UE a realizar la transición hacia un futuro próspero y sostenible. Vid. <https://www.horizonteeuropa.es/que-es>

⁹⁷ Ha venido poniendo en práctica ideas ecológicas desde 1992 y, hasta la fecha, ha cofinanciado más de 5 500 proyectos en toda la UE y en terceros países. Para el período 2021-2027, la Comisión Europea ha aumentado la financiación del Programa LIFE en casi un 60 %, hasta alcanzar la cifra de

tecnologías y soluciones innovadoras en los ámbitos de la eficiencia energética, la movilidad sostenible y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Los proyectos vinculados a la descarbonización del transporte aéreo (vgr. La introducción de biocombustibles sostenibles o la electrificación de la flota, entre otros) encajan a la perfección en la financiación del citado programa.

d) Mecanismo Conectar Europa (CEF).

El programa del Mecanismo «Conectar Europa» (CEF, siglas en inglés) para la energía es un programa de financiación de la UE que busca la mejora de las infraestructuras de transporte, incluyendo el transporte aéreo en la Unión Europea.

Apoya la inversión en las redes europeas de infraestructuras digitales, de transporte y de energía. Ayudará a lograr la doble transición ecológica y digital mediante su contribución a los ambiciosos objetivos del Pacto Verde Europeo y de la Década Digital⁹⁸.

A través del CEF, se pueden obtener subvenciones para proyectos de infraestructura aeroportuaria sostenible, como la instalación de sistemas de energía renovable en aeropuertos, la mejora de la eficiencia energética en terminales y edificios aeroportuarios, y la implementación de sistemas de transporte terrestre sostenibles en los aeropuertos.

e) Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

El FEDER es un fondo de la UE que tiene como objetivo la promoción de la cohesión económica y social en las regiones de la Unión Europea.

En el marco de este fondo, se pueden obtener subvenciones para proyectos de investigación, desarrollo e innovación en tecnologías y soluciones sostenibles para la aviación, como la electrificación de aeronaves, la mejora de la eficiencia energética en los procesos de producción y operación de aeronaves, y el desarrollo de biocombustibles sostenibles para la aviación⁹⁹.

5 400 millones de euros, y ha incluido el nuevo subprograma de transición hacia las energías limpias. El Programa LIFE está gestionado por la Agencia Ejecutiva Europea de Clima, Infraestructuras y Medio Ambiente (CINEA). Vid. https://cinea.ec.europa.eu/programmes/life_en

⁹⁸ https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/ip_21_1109

⁹⁹ <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/es/sheet/95/el-fondo-europeo-de-desarrollo-regional-feder->

f) Bancos multilaterales de desarrollo.

El Banco Mundial, el Banco Europeo de Inversiones y el Banco Interamericano de Desarrollo, también ofrecen financiación y subvenciones para proyectos de transporte sostenible, incluyendo la descarbonización del transporte aéreo. Tales programas pueden ofrecer subvenciones, préstamos o inversiones para proyectos que busquen implementar tecnologías y soluciones sostenibles en el sector de la aviación.

5.3. Ámbito Español

Algunos países cuentan con programas específicos de ayudas y subvenciones para promoción de la descarbonización del transporte aéreo. Tales programas pueden incluir incentivos fiscales y financiación para la investigación y desarrollo de tecnologías sostenibles.

- a) Programa de Apoyo a la I+D+i orientada a los Retos de la Sociedad del Ministerio de Ciencia e Innovación¹⁰⁰.

Este programa ofrece financiación para proyectos de investigación, desarrollo e innovación en diferentes áreas, incluyendo la descarbonización del transporte aéreo. A través de convocatorias específicas, se pueden obtener subvenciones para proyectos que busquen desarrollar y probar tecnologías y soluciones sostenibles para la aviación, como biocombustibles, tecnologías de propulsión eléctrica, mejoras en la eficiencia energética de las aeronaves, y sistemas de gestión del tráfico aéreo más eficientes.

- b) Programa de Energías Renovables del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)¹⁰¹.

El IDAE es una entidad pública en España que promueve la eficiencia energética y el uso de energías renovables. A través de su Programa de Energías Renovables se ofrecen subvenciones y ayudas para proyectos de energías renovables en diferentes sectores, incluyendo la aviación¹⁰². Esto puede incluir la instalación de sistemas de energía renovable en aeropuertos, como paneles solares o turbinas eólicas, para reducir las emisiones de carbono del transporte aéreo.

¹⁰⁰ <https://www.aei.gob.es/programa/programa-estatal-idi-orientado-retos-sociedad>

¹⁰¹ <https://www.idae.es/>

¹⁰² <https://www.idae.es/ayudas-y-financiacion>

5.4. Sector Privado. Iniciativas de empresas y asociaciones del sector.

Algunas empresas y asociaciones del sector de la aviación también ofrecen programas de apoyo a la descarbonización del transporte aéreo. Estos planes pueden incluir financiación para proyectos de investigación y desarrollo, asesoramiento técnico, y colaboración en iniciativas conjuntas para promover la sostenibilidad en la aviación. A continuación, se recogen algunas iniciativas en este sentido.

Un ejemplo es la Alianza para la Sostenibilidad del Transporte Aéreo en España (AST). Los principales agentes del sector empresarial, académico y ONGs se han unido en 2023 para dar respuesta al mayor reto presente y futuro de la aviación, la sostenibilidad. Esta unión nace con el objetivo de promover y avanzar de forma coordinada y conjunta al desarrollo de una aviación sostenible desde la perspectiva medioambiental, económica y social.

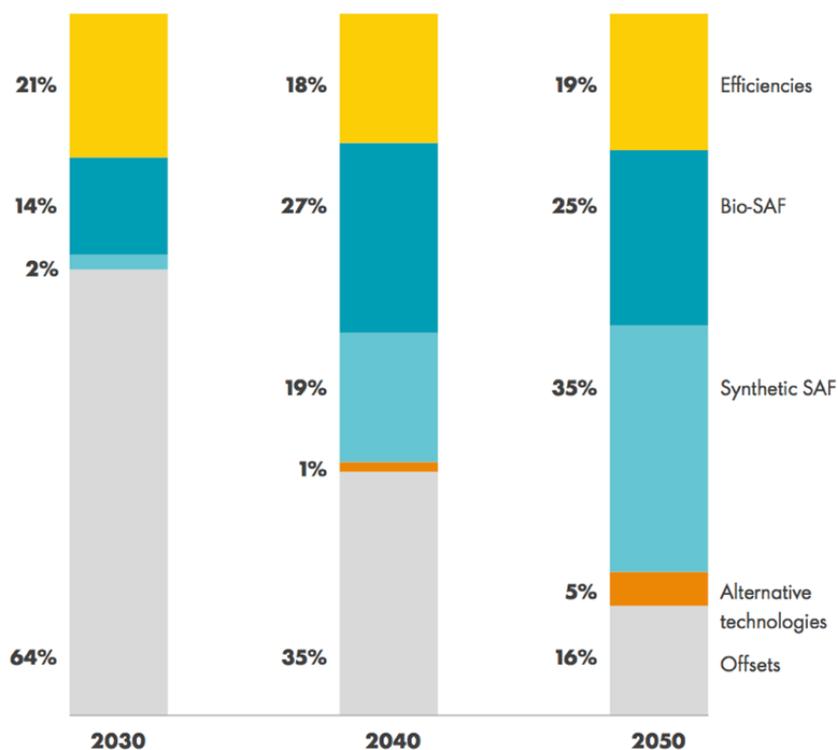
Otra muestra es el acuerdo suscrito en febrero de 2022 entre Cepsa y Binter con el fin de impulsar la descarbonización del sector aéreo mediante el desarrollo e investigación de combustibles sostenibles para la aviación. Asimismo, a través de esta alianza también se desarrollarán otras alternativas energéticas, tales como, el hidrógeno renovable y la electrificación, para las flotas terrestres de la aerolínea (vehículos para el suministro, las operaciones de carga y descarga de equipajes, asistencia a los aviones, etc.). En la misma línea el acuerdo de 2022 entre Cepsa y Etihad, etc.

6. Tecnologías para la descarbonización

La descarbonización de la navegación aérea es un objetivo complicado, sin embargo, la industria aeronáutica y los principales sujetos y actores internacionales con competencias en el sector (gobiernos, OACI, UE, ATAG, entre otros) llevan años trabajando en la búsqueda de soluciones para alcanzar una aviación sostenible, como medio para frenar el cambio climático.

Existe una amplia gama de soluciones disponibles para la descarbonización del sector aéreo de mercancías, entre ellas destacan los combustibles sostenibles, llamados SAF, tales como el biocombustible y el electro-combustible, que reciben su nombre, respectivamente, por el origen de la materia prima de procedencia y el proceso para su obtención. Otras opciones energéticas como el hidrogeno verde y los aviones eléctricos son de gran importancia, si bien tales tecnologías se encuentran en una fase de desarrollo más embrionaria que los SAF, y se estima que no estarán preparadas para cubrir los objetivos de 2030, por sí solas, y posiblemente, tampoco en 2050. Debe subrayarse que se considera que un avión híbrido que incorpore todas las tecnologías recién mencionadas podría garantizar la aceleración de la industria aeronáutica. Por último, otra medida que cuenta con un gran potencial, sobre todo, a corto plazo, son los *Offsets*, debido a que su investigación e implantación se encuentra en un punto más avanzado, habiendo llegado a implementarse por algunas compañías aéreas, como se verá más adelante.

Deloitte, junto con Shell, realizaron el informe “Cleared for take-off” [1], en el que se recoge una visión global de la industria aeronáutica, se da voz al sector, y se acelera el reto hacia emisiones netas nulas. En este estudio se analiza la evolución de las tecnologías para garantizar el cumplimiento del objetivo de descarbonización como se muestra en la Figura 45, en la que se aprecia la importancia, ya mencionada, a corto plazo de los *Offsets*, pero que se verá en gran medida reducida debido a la estimada proyección de crecimiento de los diferentes tipos de SAF.



Fuente: Informe Shell junto con Deloitte Cleared for take-off [1]
 Figura 45. Contribución a la reducción de carbono de las opciones de descarbonización

El informe realizado por Deloitte y Shell revela la existencia de serios obstáculos que dificultan, notablemente, el desafío de la descarbonización del sector aéreo¹⁰³. Se trata del elevado coste de los combustibles sostenibles (SAF) en comparación con el fuel de origen fósil, la falta de objetivos compartidos y ambiciosos por parte del sector y el hecho de que el uso del transporte aéreo está en auge.

Todas las partes implicadas en el objetivo de la descarbonización de la aviación convergen en que las actuaciones deben girar sobre el sistema de compensación de emisiones, los combustibles sostenibles para aviación (SAF), la aviación comercial con propulsión eléctrica o el uso del hidrógeno. Existen, además, varias alternativas relacionadas con la eficiencia energética en las que también se está avanzando, tales como, la investigación en motores, la digitalización en los procedimientos o la gestión del tráfico y las operaciones aéreas.

No todas las soluciones tienen el mismo alcance ni grado de madurez, por ello, la estrategia consiste en considerarlas a todas. Se constata que la compensación de emisiones amortigua a corto plazo el impacto de las emisiones, por su parte, los

¹⁰³ https://www.shell.com/energy-and-innovation/the-energy-future/decarbonising-aviation/_jcr_content/root/main/section_copy/promo/links/item0.stream/1667916358181/e4f516f8d0b02333f1459e60dc4ff7fd1650f51c/decarbonising-aviation-industry-report.pdf

combustibles con bajas o nulas emisiones netas de CO₂ son la única alternativa viable a corto-medio plazo. A la larga, se perfilan como potenciales respuestas tecnológicas la electrificación o el hidrógeno verde.

En el presente apartado nos centramos en tres posibles soluciones para reducir el impacto de la aviación en el medio ambiente: los combustibles sostenibles, la aviación eléctrica y el hidrógeno verde.

6.1. Combustibles de aviación sostenibles (SAF)

Los combustibles sostenibles para aviación, llamados SAF (*sustainable aviation fuel*)¹⁰⁴ son un sustituto alternativo, más limpio que el queroseno que procede del petróleo y que es el combustible de aviación convencional. Se generan a partir de fuentes de combustibles no fósiles¹⁰⁵. Su huella de carbono es inferior a los combustibles tradicionales por razón de su composición y por el modo en que se originan¹⁰⁶.

Este tipo de combustible debe cumplir los criterios de sostenibilidad marcados por la OACI, en el plan CORSIA¹⁰⁷. Bajo el genérico término SAF se hace referencia a todos aquellos combustibles fabricados a partir de fuentes no fósiles, o "materias primas", que, a través de los procesos de cultivo y fabricación, pretenden cerrar el ciclo del carbono y, en consecuencia, lograr una notable reducción, o incluso llegando a anular, las emisiones de CO₂ [3].

Los SAF se clasifican en dos categorías, aquellos producidos a partir de compuestos biológicos (cultivados con ese fin o residuales) y los producidos de forma sintética, a partir de CO₂ e hidrógeno (Figura 46)¹⁰⁸. Los que tienen su origen en materias primas de origen biológico, tales como, aceites vegetales (aceite de cocina usado), grasas animales, biomasa y otros residuos forestales y agrícolas, se denominan biojet (biocombustible). Aquellos que se generan con CO₂ retirado de la atmósfera y de la industria, así como del hidrógeno renovable, se conocen como e-jet (combustibles sintéticos), también llamados electrocombustibles.

¹⁰⁴ Aviation Alternative Fuel: combustible obtenido a partir de fuentes distintas al petróleo. [83]

¹⁰⁵ Los combustibles renovables se elaboran a partir de materias primas de origen orgánico, como aceites vegetales usados, grasas animales, biomasa, residuos de la industria agroalimentaria, como el biogás, o residuos forestales y agrícolas, entre otros.

¹⁰⁶ Teresa Parejo p. 348.

¹⁰⁷ Para que estos combustibles se consideren "sostenibles" deben cumplir ciertos requisitos desarrollados en el Plan CORSIA, bajo control de la OACI. Se consideran sostenibles si logran una reducción neta de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) sobre la base del ciclo de vida, si contribuyen al desarrollo social y económico local, y si evitan la competencia por la producción de los alimentos y el agua [83].

¹⁰⁸ <https://www.marca.com/uestudio/2022/12/12/63972601e2704e31628b4583.html>



Fuente: OVACEN

Figura 46. Tipos de combustibles sostenibles para la aviación

El SAF presenta características fisicoquímicas similares a los combustibles tradicionales que permite su uso sin necesidad de adaptaciones en el suministro o en los motores de los aviones, lo que implica una serie de ventajas que se exponen a continuación.

En primer lugar, puede ser mezclado con el queroseno tradicional en los motores a reacción aeronáuticos, en una proporción que, teóricamente, podría llegar hasta el 100 %. Sin embargo, la regulación actual prohíbe realizar vuelos con combustible 100 % SAF. En este sentido, la IATA establece que, según su tipo y origen, el SAF se mezclará con combustible tradicional en mayor o menor proporción, hasta un máximo de 50 % [84]. Como se explica más adelante, Airbus ha probado con éxito en sus diferentes tipos de aeronave combustible 100 % de SAF, lo que induce a pensar que son razones de naturaleza política y económica las que frenan su implementación. Efectivamente, tiene un coste notablemente superior al de los combustibles convencionales (hidrocarburos de fuentes fósiles), lo que plantea serias dificultades, dado que el combustible representa hasta el 25 % de los costes operacionales del transporte aéreo.

De hecho, la Unión Europea en su iniciativa «Fit for 55», concretamente, en la propuesta de Reglamento ReFuelEU impulsa de forma notable el uso del SAF, dado que se fijan porcentajes obligatorios de uso de estos combustibles, de un 2 % para

2025, un 5 % en 2030 y del 63 % en 2050. Como se observa en la Tabla 4 se incluye una cantidad menor, pero creciente de combustibles sintéticos. Esta obligación se aplica a todos los Estados miembros de la Unión y para todos los vuelos que despeguen desde cualquier aeropuerto de la UE. Como se analiza más adelante, algunas aerolíneas ya lo están utilizando con éxito.

Así mismo, se establece que: “La cantidad de combustible de aviación de la que se abastezca anualmente un operador de aeronaves determinado en un aeropuerto de la Unión determinado representará, como mínimo, el 90 % del combustible de aviación requerido anualmente”, lo que implica una limitación de tankering del 10 % anual, por aeropuerto, al objeto de promover el mercado SAF en el ámbito de la UE. El objetivo es evitar que las aeronaves reposten más combustible del necesario buscando un ahorro por la diferencia de precios entre destinos.

Previsión	Proporción mínima de SAF	Proporción mínima de combustibles sintéticos
2025	2 %	-
2030	5 %	0,7 %
2035	20 %	5 %
2040	32 %	8 %
2045	38 %	11 %
2050	63 %	28 %

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Objetivos marcados en UE por ReFuelEU y Fit for 55 [84]

En segundo lugar, otra de las ventajas que presenta el SAF es que su uso no requiere modificaciones en los motores ni en las aeronaves debido a sus similitudes con las propiedades del carburante convencional. Se les denomina "drop-in-fuels" debido a su capacidad de adaptación, ya que pueden incorporarse directamente a los sistemas de aviaciones actuales. [85]

En tercer lugar, el SAF reduce o elimina el impacto neto de la combustión en motores de aviación convencionales por lo que son compatibles con la flota actual de aviones comerciales.

Por último, las aeronaves podrán almacenar en sus tanques la misma cantidad de combustible que la que cargan en la actualidad y, bajo iguales condiciones de seguridad, lo que permite vuelos de larga distancia sin problemas. El SAF tiene un rendimiento operativo equivalente al del combustible Jet A1, por ello se presenta como la solución más viable a corto-medio plazo. Se origina a través de nuevas vías

de producción de biocombustibles, que han recibido la certificación de la ASTM¹⁰⁹ (obsérvese la Figura 47) [86]. Estos SAF son totalmente compatibles con los aviones actuales y son sustitutos directos que pueden incluirse, fácilmente, en la infraestructura de combustible ya existente en los aeropuertos.

ASTM reference	Conversion process	Abbreviation	Possible Feedstocks	Maximum Blend Ratio
ASTM D7566 Annex 1	Fischer-Tropsch hydroprocessed synthesized paraffinic kerosene	FT	Coal, natural gas, biomass	50%
ASTM D7566 Annex 2	Synthesized paraffinic kerosene from hydroprocessed esters and fatty acids	HEFA	Bio-oils, animal fat, recycled oils	50%
ASTM D7566 Annex 3	Synthesized iso-paraffins from hydroprocessed fermented sugars	SIP	Biomass used for sugar production	10%
ASTM D7566 Annex 4	Synthesized kerosene with aromatics derived by alkylation of light aromatics from non-petroleum sources	FT-SKA	Coal, natural gas, biomass	50%
ASTM D7566 Annex 5	Alcohol to jet synthetic paraffinic kerosene	ATJ-SPK	Biomass from ethanol or isobutanol production	50%
ASTM D7566 Annex 6	Catalytic hydrothermolysis jet fuel	CHJ	Triglycerides such as soybean oil, jatropha oil, camelina oil, carinata oil, and tung oil	50%
ASTM D7566 Annex 7	Synthesized paraffinic kerosene from hydrocarbon - hydroprocessed esters and fatty acids	HC-HEFA-SPK	Algae	10%
ASTM D1655 Annex A1	co-hydroprocessing of esters and fatty acids in a conventional petroleum refinery	co-processed HEFA	Fats, oils, and greases (FOG) co-processed with petroleum	5%
ASTM D1655 Annex A1	co-hydroprocessing of Fischer-Tropsch hydrocarbons in a conventional petroleum refinery	co-processed FT	Fischer-Tropsch hydrocarbons co-processed with petroleum	5%

Fuente: ICAO "Conversion Processes"

Figura 47. Vías de producción de combustibles alternativos aprobadas por la ASTM [86]

El sector de la aviación, en general, se ha propuesto alcanzar las cero emisiones netas en 2050, prueba de ello es la firma del plan Destination 2050¹¹⁰ en el ámbito europeo. Es una meta ambiciosa para un sector que, al menos a corto y medio plazo, no puede contar con la alternativa de la electrificación, dado que las baterías que garantizarían la autonomía y la potencia necesaria para realizar vuelos de media y larga distancia serían demasiado pesadas para un avión. Por lo tanto, la gran baza para la descarbonización del sector son los combustibles renovables.

¹⁰⁹ American Society for Testing and Materials, desde su fundación en 1898, ASTM International es una de las organizaciones internacionales de estándares más grande del mundo.

¹¹⁰ <https://www.destination2050.eu/>

Según estimaciones de la IATA¹¹¹, los SAF podrían contribuir a la reducción en torno al 65 % de las emisiones de CO₂ necesarias para que el sector alcance la neutralidad en 2050. Las pruebas piloto con combustibles SAF han arrojado los siguientes resultados: British Airways, a finales de 2021, realizó el primer vuelo transatlántico con un 35 % de combustible renovable¹¹²; por su parte, la compañía Airbus, a finales de 2022, ha probado con éxito en sus diferentes tipos de aeronave combustible 100 % de SAF¹¹³. En España, fruto de una colaboración entre Iberia y Repsol, en noviembre de 2021, se realizó el primer vuelo entre Madrid y Bilbao propulsado por biojet¹¹⁴. En junio de 2022, se siguió la misma práctica en varios vuelos de larga distancia con destino a Washington, Dallas y San Francisco¹¹⁵. Entre los tres le ahorraron a la atmósfera 125 toneladas de CO₂¹¹⁶.

El desarrollo y uso de los SAF en la aviación se enmarca en la consecución de los objetivos de desarrollo sostenible de lucha contra el cambio climático. Enlaza directamente con el ODS7 “energía renovable” y el ODS13 “acción por el clima” e, indirectamente, conecta con el ODS6 “agua limpia y saneamiento” y el ODS15 “vida de ecosistemas terrestres”, que por su carácter medioambiental promueven la reducción del impacto. Por último, el empleo de los SAF permite el alcance de objetivos de naturaleza social, tales como el ODS 1 “reducción de la pobreza” y ODS 10 “reducción de las desigualdades”.

6.1.1. Bio-SAF/ Biocombustible

Los Bio-SAF, combustibles alternativos al tradicional para la aviación -el queroseno-, se originan a través de la transformación de biomasa y/o residuos en carburante. Como explica la Figura 48 son combustibles cero emisiones netas porque solo liberan el CO₂ que se ha capturado antes para su producción¹¹⁷.

¹¹¹ <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet---alternative-fuels/>

¹¹² <https://actualidad aeroespacial.com/british-airways-opera-el-primer-vuelo-transatlantico-comercial-con-un-35-de-saf/>

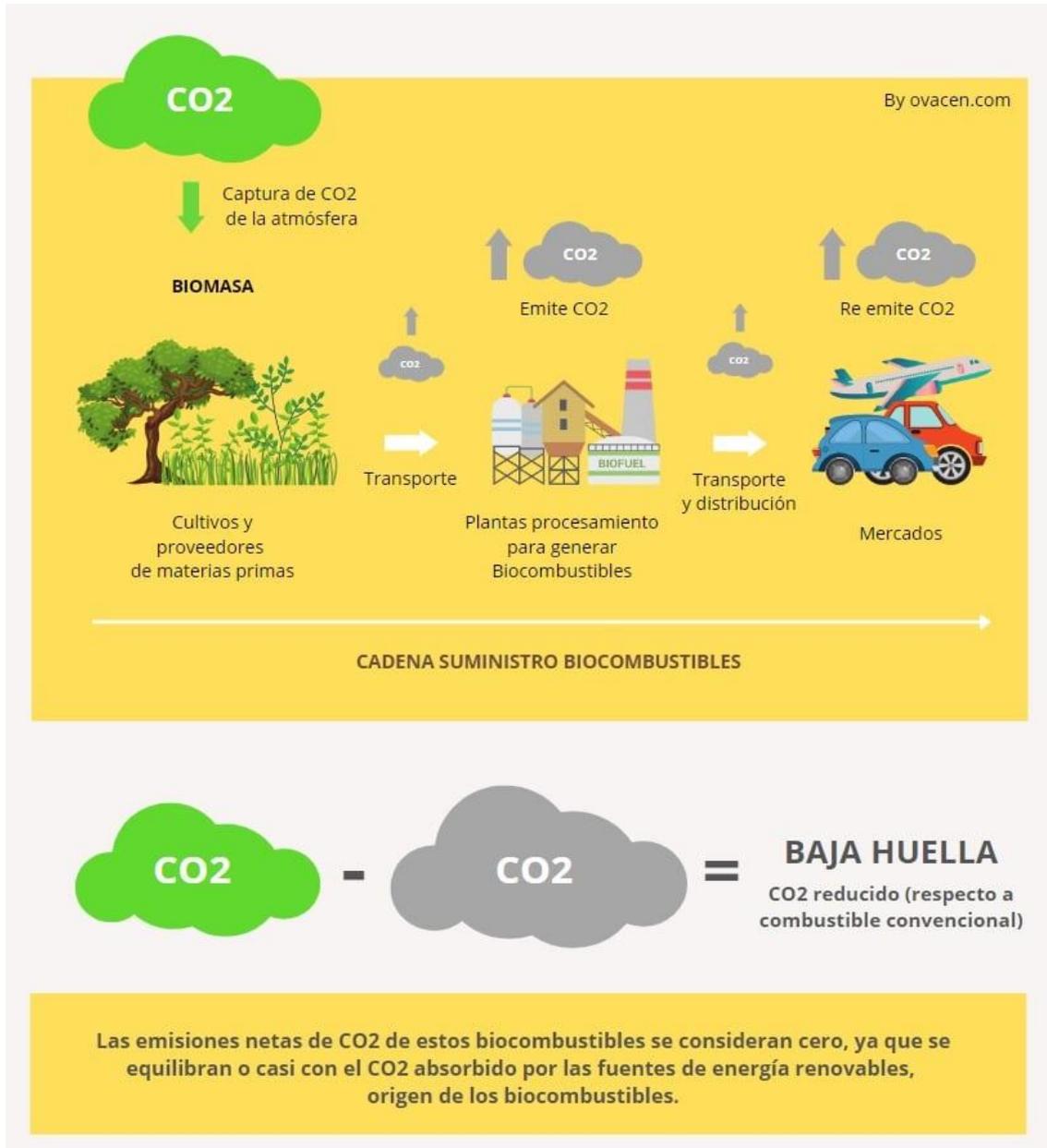
¹¹³ <https://h2businessnews.com/airbus-completa-el-primer-vuelo-de-prueba-100-saf-con-ambos-motores/>

¹¹⁴ <https://www.repsol.com/es/sala-prensa/notas-prensa/2021/repsol-e-iberia-realizan-el-primer-vuelo-con-biocombustible-prod/index.cshtml>

¹¹⁵ https://www.repsol.com/es/sala-prensa/notas-prensa/2022/iberia-opera-en-colaboracion-con-repsol-sus-primeros-vuelos-de-largo-radio-con-biocombustible-producido-en-espana-a-partir-de-residuos/index.cshtml?utm_campaign=rep-brandedcontent-221224_2212_corp&utm_medium=referral&utm_source=expansion

¹¹⁶ <https://www.iairgroup.com/~media/Files/I/IAG/annual-reports/iag-annual-reports/es/informe-y-cuentas-anuales-2022-v1.pdf>

¹¹⁷ “El principio por el que los biocombustibles reducen las emisiones netas de CO₂ es sencillo: los vegetales o derivados en los que se basa su fabricación capturan primero el dióxido de carbono de la atmósfera durante su crecimiento. Una vez transformados en biocombustible, su combustión en los motores libera este mismo CO₂, por lo que teóricamente se alcanza un impacto neutro”, en



Fuente: OVACEN

Figura 48. Cadena de suministro de los Biocombustibles

Se le conoce bajo el término biojet y, actualmente, es la mejor opción para que los vuelos reduzcan su huella de carbono. El biojet puede ser de dos tipos dependiendo de la materia prima que se haya utilizado en su fabricación (Figura 49). Es de primera generación cuando se obtiene a partir de aceites vegetales y, de segunda generación, cuando utiliza como materia prima residuos de la industria

Informe de CASTRO ÁLVAREZ, O. y MARTÍN SANTACANA, E., "Sostenibilidad en el sector aeronáutico: un sector altamente comprometido", COIAE, octubre 2020, p. 39.

agroalimentaria, residuos agrícolas, residuos forestales o la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos. En el primer caso la reducción de emisiones de CO₂ es superior al 60%, mientras que en el segundo puede superar el 85%.



Fuente: Sostenibles EM
Figura 49. Fabricación y uso de BioJet

Los biocombustibles se obtienen a través de dos recorridos. Un camino consiste en la transformación de las refinerías existentes -que hasta ahora se alimentaban solo de petróleo-, en centros adaptados para tratamiento de todo tipo de residuos que generar combustibles y materiales de baja o nula huella de carbono, e incluso emisiones negativas de carbono.

La segunda vía radica en generación de los biocombustibles en plantas de nueva construcción creadas específicamente para su producción. A modo de ejemplo, en España, la primera planta de biocombustibles avanzados la está construyendo Repsol en Cartagena. Esta factoría, que estará operativa en el año 2023, producirá, a partir de materias primas recicladas, biocombustibles avanzados que podrán usarse en aviones, entre otros medios de transporte, y permitirán reducir 900.000 toneladas de CO₂ al año. Con ella se cubrirán las necesidades de estos combustibles sostenibles del mercado español.

Una cuestión de enorme relevancia es tener la certeza de la sostenibilidad del SAF, tanto desde una perspectiva ambiental como social, en otras palabras, debe probarse su contribución real a la transición ecológica del sector de la navegación aérea.

En este sentido, la Unión Europea exige que la producción del biocombustible sea siempre sostenible, es decir, que las materias primas utilizadas no pueden provenir, por ejemplo, de cultivos donde antes hubiera un espacio natural, como un bosque. La Directiva sobre energías renovables de la UE (RED III) proporciona el marco jurídico imprescindible que garantiza que solo los biocombustibles de producción sostenible obtengan el apoyo del mercado dentro de la UE. Se exige que las industrias suministradoras de este tipo de combustibles demuestren en cada partida que el proceso de producción ha sido totalmente sostenible.

En la actualidad el uso de biocombustibles ya goza de un amplio reconocimiento como solución potencial al problema de las emisiones de gases de efecto invernadero, sin embargo, junto a los beneficios que presentan se observan una serie de inconvenientes. Los efectos positivos son de muy diversa índole: se crean empleos a lo largo de toda la cadena de valor, las plantas al crecer liberan oxígeno a la atmósfera, y el aumento del uso de biocombustibles, en lugar de combustibles fósiles, debería reducir la contaminación. En cuanto a los perjuicios que, eventualmente, generan los biocombustibles son que su producción masiva afecte de forma negativa a la biodiversidad, que implique el cambio del uso de la tierra, afecte a la seguridad alimentaria, introduzcan especies potencialmente invasivas, supongan el uso excesivo del agua e incluso, indirectamente, el traslado de la producción agrícola a áreas de conservación.

No obstante, la desventaja más notable que muestra el biocombustible es de índole económica [87], ya que cuesta entre dos y cuatro veces más que el precio del combustible convencional [34]. Su despegue, como alternativa al queroseno, pasa por su promoción desde las instituciones internacionales, nacionales y privadas, a través de normativas, políticas y estrategias, que recojan incentivos a gran escala que aceleren la expansión del uso de combustibles de aviación. En la misma línea de acción, son precisas medidas y políticas adecuadas, tales como, RCDE UE, CORSIA, entre otras, que fomenten el mercado de los SAF, estimulando su producción y ayudando a aumentar la oferta. La producción de electricidad con energía solar o eólica se enfrentó a obstáculos similares cuando estas tecnologías comenzaron a reemplazar a los combustibles fósiles. Con incentivos políticos efectivos, ahora ambas son asequibles y están ampliamente disponibles [88]. Debe mejorarse la tarificación de las emisiones de la aviación, dar por terminadas las exenciones fiscales del sector, promover el establecimiento de cupos, de cuotas de mezcla obligatoria, de

bonificaciones por su utilización o impuestos a la emisión de carbono. Este es el sentido de la iniciativa legislativa de la UE “ReFuelEU Aviation.

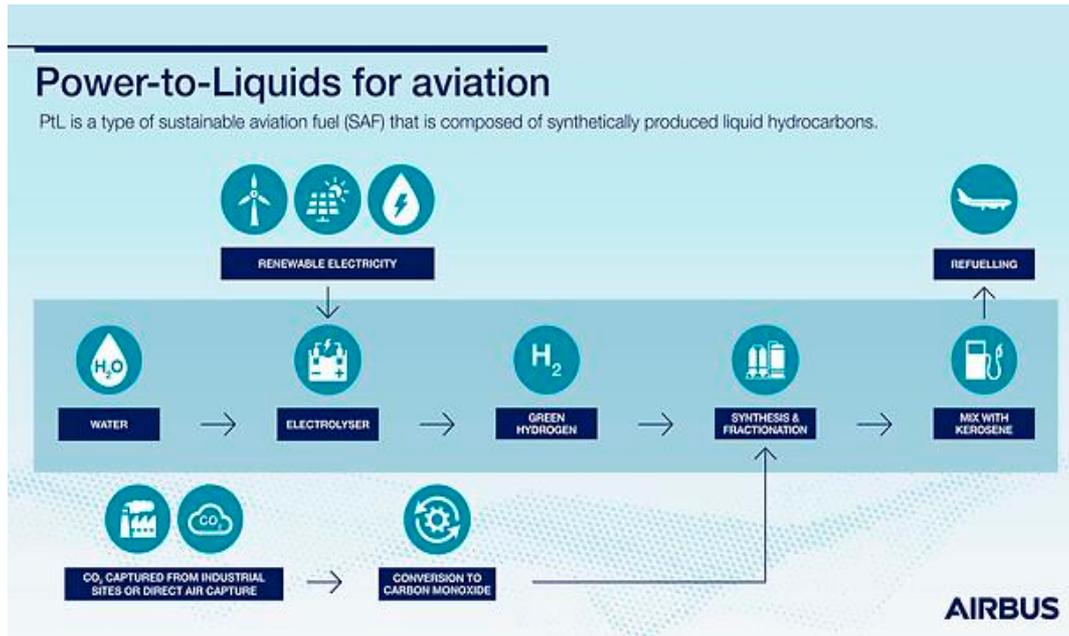
6.1.2. SAF sintético/Electrocombustible

Existen otro tipo de combustibles sostenibles para la aviación muy interesantes de cara a la descarbonización del sector aéreo: el denominado SAF sintético.

Se trata de combustibles sintéticos cero emisiones netas, también conocidos como e-fuels, que se producen con hidrógeno renovable y CO₂ como materias primas. Se fabrican por medio de procesos termoquímicos a partir de otro material que puede ser carbón, gas natural o biomasa. Podrán utilizarse en motores de combustión de aviones como los que se instalan, actualmente, en los automóviles.

Se les denomina electrocombustibles (e-fuels, power-to-liquid PtL, o power-to-jet-fuels) porque se sintetizan con electricidad, que se consigue a partir de energías renovables como la solar o la eólica. Del agua se obtiene el hidrógeno necesario, mediante hidrólisis usando la electricidad de las energías renovables, para el combustible. El dióxido de carbono se obtiene directamente del aire mediante grandes ventiladores que hacen que el aire pase por filtros que atrapan el dióxido de carbono.

Son combustibles cero emisiones netas o «combustibles neutros» porque se generan a partir de hidrógeno renovable y CO₂ retirado de la atmósfera, que se compensan. Se afirma que el e-jet “... supone un salto cualitativo en lo referente a la sostenibilidad de la aviación. Mimetizando en cierta forma el ciclo de los biocombustibles, el proceso implica la extracción del CO₂ directamente de la atmósfera o capturado en procesos industriales, y su conversión en hidrocarburos al combinarlo con hidrógeno, que a su vez se obtiene, por ejemplo, a partir de agua por hidrólisis [89] (Figura 50).



Fuente: AIRBUS
Figura 50. Power to Liquids

El sector aéreo lleva años trabajando en esta solución, de hecho, esta tecnología ha sido utilizada en demostraciones como la llevada a cabo por la compañía KLM, a comienzos del 2021. La citada aerolínea operó con éxito el primer vuelo comercial, Ámsterdam a Madrid, propulsado con e-jet (una mezcla de 500 litros de queroseno sintético sostenible).

En España, Repsol ya ha puesto en marcha en Bilbao la construcción de una de las mayores plantas del mundo de producción de combustibles sintéticos cero emisiones netas, que estará operativa en 2024. El e-jet será fabricado a partir de hidrógeno renovable y CO₂ capturado en su cercana refinería de Petronor.

Por su parte la compañía Airbus se ha unido al consorcio SAF+ Consortium de Canadá para acelerar el desarrollo de una nueva tecnología de combustible de aviación sostenible. El objetivo es convertir la ciudad de Montreal en un centro de aviación sostenible en América del Norte. La construcción de una planta piloto de producción de SAF producirá un tipo de combustible alternativo conocido como Power-to-Liquid (PtL) (Figura 50). Se estima que el citado combustible tendrá una huella de carbono un 80 % menor en comparación con el combustible para aviones convencional.

La solución de los electrocombustibles tiene el problema de su viabilidad comercial dado el alto coste de su producción. En el informe de 2022, de EASA, se

establece que el precio del combustible para aviones de origen fósil es de aproximadamente 600 € por tonelada, mientras que los precios actuales del SAF pueden oscilar entre 1,5 a 6 veces más [34]. Además, aunque es cierto que los e-fuel son neutros y solo emiten el CO₂ que ha sido extraído de la atmósfera, siguen emitiendo otros gases que, aunque no sean CO₂, son tóxicos.

El SAF sintético presenta ventajas respecto de los biocombustibles, ya que su producción no afecta de forma negativa a la biodiversidad, ni supone un uso excesivo de agua, ni implica el cambio del uso de la tierra, etc. Sus ventajas frente a los biocombustibles parecen reservarles un espacio propio a medio plazo en el camino hacia una aviación plenamente sostenible [89].

6.2. Aviones eléctricos

Se ha mantenido que las aerolíneas, así como todas las partes implicadas en el objetivo de la descarbonización de la aviación, apuestan, en la actualidad, por el uso de combustibles sostenibles de aviación (SAF), como mejor y más inmediata solución para la descarbonización del sector aéreo.

Se ha analizado, en los apartados anteriores, que los combustibles sostenibles, ya sean biológicos o sintéticos, no eliminan sino reducen –con mayor o menor intensidad, en función del tipo–, las emisiones CO₂. Se sabe, también, que los SAF no eliminan otros impactos ambientales de la aviación que afectan al medio ambiente y a la salud humana, tales como, los gases NO_x (óxidos de nitrógeno), las estelas (vapor de agua condensado) o el hollín, entre otros.

Por ello, el desafío de la industria de la aviación pasa por promover un cambio fundamental en la forma y sistemas de propulsión de las aeronaves: los aviones eléctricos y los impulsados por hidrógeno verde.

La aviación comercial eléctrica, que ya ha entrado en servicio con aviones pequeños y para trayectos cortos (Figura 51), es la única forma limpia de operar, es decir, cero emisiones CO₂, siempre que se utilice energía renovable. La circunstancia de que se desarrolle para vuelos de corta distancia, por aeronaves pequeñas, no le resta importancia porque debe tenerse en cuenta que los vuelos de corta distancia de menos de 600 millas representan más del 17 % de las emisiones de las aerolíneas. La aviación de corta distancia seguirá siendo necesaria allá donde no pueda utilizarse otro medio de transporte y resulta adecuada para los jets privados, ya que son pequeños y la mayoría de sus vuelos son de corta distancia.



Fuente: Eviation
Figura 51. Primer avión eléctrico, Alice

Sin embargo, esta opción de navegación aérea eléctrica no ha alcanzado el desarrollo tecnológico deseable y necesario que permita el uso de aviones eléctricos grandes, para desplazamientos de media y larga distancia. Se considera que los aviones eléctricos no podrán volar mucho más allá de 1.000 km, con 80-100 pasajeros, de aquí a 2050. Ciertamente, la electrificación de las aeronaves no es una alternativa válida a corto plazo, dado que las baterías actuales no pueden generar ni almacenar energía suficiente para realizar largos trayectos.

La aviación eléctrica presenta claras ventajas sobre los aviones de combustión, más allá de la no emisión de dióxido de carbono y de otros gases de efecto invernadero. Se afirma que los motores eléctricos son más silenciosos que los motores de combustión interna, lo que genera una menor contaminación acústica en los aeropuertos y las ciudades, además, de ser más eficientes. Estas razones convierten a la aviación eléctrica en una valiosa solución sostenible para la descarbonización del transporte aéreo.

Las dificultades a las que se enfrenta el desarrollo de la aviación eléctrica son muchas y de importante calado. Las baterías actuales de una aeronave carecen de capacidad de almacenaje de la energía precisa para vuelos de larga distancia o transporte de grandes cargas. La fabricación de un avión eléctrico tiene un coste elevado en comparación con los aviones tradicionales.

A pesar de las dificultades de la electrificación de la navegación aérea, merece la pena seguir desarrollando aviones eléctricos, ya que es la única tecnología que realmente no produce emisiones. La industria aeroespacial apuesta por la aviación eléctrica promoviendo tecnología de baterías de alta capacidad y sistemas de carga más eficientes, así como desarrollando iniciativas y proyectos, en algunos casos piloto, de vuelos con aparatos de motor eléctrico. En esta línea, un informe de la

IATA, que recoge su visión sobre las tecnologías de aviación desde 2020 a 2050, menciona al avión eléctrico como una de las principales opciones de renovación radical y revolucionaria de cara a la sostenibilidad del transporte aéreo [90].

6.3. Hidrógeno verde

La industria aeronáutica, los gestores aeroportuarios, los proveedores de sistemas de navegación, las instituciones reguladoras competentes y voces autorizadas convergen en la idea de que el hidrógeno verde es la mejor promesa para la descarbonización del sector aéreo, en un escenario en el que la electrificación aérea no es extrapolable, en la actualidad, más allá de la aviación regional de corta distancia. En esta situación, el hidrógeno verde cobra un protagonismo particular en el sector de la aviación que más contamina, vuelos de larga distancia, en torno a los 2000 km, con una carga notable [89].

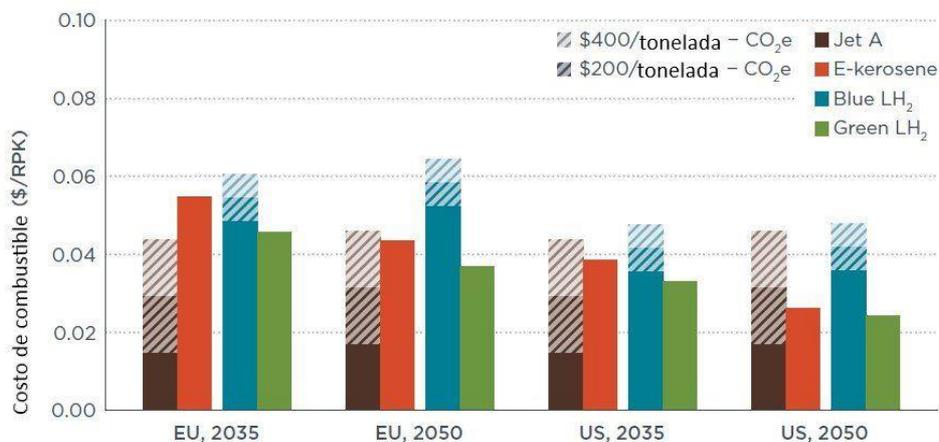
El hidrógeno verde (GH₂) se genera a partir de electricidad renovable, utilizando como materia prima el agua, mediante un proceso de electrólisis. Es una fuente de energía limpia porque sólo emite agua (H₂O) en forma de vapor y no produce dióxido de carbono (CO₂). El uso del GH₂ como vector energético sostenible en la propulsión de la aviación se realizará, a través de su combustión directa en turborreactores (turbina de hidrógeno), o por medio de pilas de combustible que generan electricidad (pila de hidrógeno).

Este combustible, también llamado e-Hydrogen, es muy potente, ya que tiene tres veces más energía que la gasolina, y, además, presenta cero emisiones de CO₂ cuando se quema y casi ninguna emisión de CO₂ cuando se produce con electricidad renovable. Como se ha indicado en el apartado que analiza los electrocombustibles, el hidrógeno verde es parte fundamental de la producción de combustibles sostenibles sintéticos. Además de las ventajas señaladas en relación con los SAF en general, el hidrógeno verde resuelve el problema de la autonomía de la propulsión eléctrica de los aviones.

Un obstáculo importante es la dificultad de su fabricación porque solo existe en combinación con otros elementos en la tierra por lo que, para poder utilizar hidrógeno como combustible, debe estar separado de otras moléculas. Y conseguirlo requiere mucha energía y es muy caro. Si bien un informe del ICCT¹¹⁸ demuestra que, a largo plazo, el hidrógeno verde será rentable e incluso más económico que sus competidores, -en término de combustibles-. Según el análisis que presenta (Figura 52) los costes de combustible de un avión ecológico propulsado por GH₂ (hidrógeno

¹¹⁸ The International Council on Clean Transportation.

verde) serán más elevados que Jet A (combustible convencional), pero más barato que el LH2 "hidrógeno azul" generado a partir de combustibles fósiles con secuestro de carbono o e-keroseno sintético [91].



Fuente: ICCT

Figura 52. Coste de combustible, 2035 y 2050, con y sin coste de carbono

El empleo del hidrógeno verde en la aviación presenta otros importantes desafíos, al margen del coste, que se recogen algunos de ellos a continuación.

La tecnología para suministrar hidrógeno verde a los motores de los aviones no funciona con los motores de las aeronaves convencionales y necesita un mayor desarrollo tecnológico. Reacondicionar el funcionamiento del motor a reacción para hacerlo más tolerante al hidrógeno requerirá tiempo y muchos recursos económicos.

Otro punto importante es que para que el hidrógeno verde alcance el mismo nivel de rendimiento que el Jet-A1, la cantidad de hidrógeno líquido tendría que aumentar significativamente. Esto requerirá más espacio de almacenamiento, más flujo de material y más espacio y peso en la propia aeronave para acomodar tanques más grandes.

Por último, debe ser objeto de análisis científico el impacto medioambiental de las emisiones de H₂O que se generan por la combustión de hidrógeno verde en la aviación.

Los inconvenientes planteados no significan que la solución basada en aviones de hidrógeno verde sea un proyecto a descartar, todo lo contrario, merece la pena su desarrollo tecnológico por muchas razones obvias, ya comentadas. Además, permiten la diversificación de las vías de descarbonización del sector de la navegación aérea, evitando la dependencia exclusiva de los SAF. Es importante que,

desde los distintos estamentos gubernamentales e institucionales, nacionales e internacionales, se apoye el desarrollo de la aviación propulsada por hidrógeno que, según afirma, podrían entrar en servicio a partir de 2035. Se trata de un avión turbopropulsado con capacidad para 100 pasajeros y una autonomía de más de 1.000 millas náuticas; un turboventilador (120-200 pasajeros) con una autonomía de más de 2.000 millas náuticas; y un "blended-wing body" (hasta 200 pasajeros) que también podría volar más de 2.000 millas náuticas [92]. Se calcula que todos los vuelos de menos de 2.500 millas, que representan más de la mitad de las emisiones de CO2 de la aviación, podrían electrificarse o funcionar con hidrógeno.

La compañía europea de aviación Airbus está desarrollando tres tipos de aviones comerciales (Figura 53) de emisiones cero propulsados por hidrógeno que, según afirma, podrían entrar en servicio a partir de 2035. Se trata de un avión turbopropulsado con capacidad para 100 pasajeros y una autonomía de más de 1.000 millas náuticas; un turboventilador (120-200 pasajeros) con una autonomía de más de 2.000 millas náuticas; y un "blended-wing body" (hasta 200 pasajeros) que también podría volar más de 2.000 millas náuticas [92]. Se calcula que todos los vuelos de menos de 2.500 millas, que representan más de la mitad de las emisiones de CO2 de la aviación, podrían electrificarse o funcionar con hidrógeno.



Fuente: Airbus
Figura 53. Airnus ZEROe características

7. Estudio de la descarbonización del sector aéreo

El presente trabajo de fin de carrera tiene como objetivo el análisis de posibles escenarios del proceso de descarbonización del sector aéreo enfocado, principalmente, a la reducción de emisiones CO₂. En la elaboración se han tenido en cuenta factores que acompañan, de forma inevitable, a la necesaria transformación de la navegación aérea, tales como, el coste económico, la disponibilidad de las tecnologías, así como la capacidad de satisfacer los suministros requeridos por esta industria, que garanticen una prestación de servicios eficaz a clientes y mercados.

La realización del estudio ha exigido una investigación previa y detallada, recogida a lo largo de los diversos apartados, sobre la situación, las emisiones y su procedencia en el sector aéreo español y en el europeo. Se ha realizado un análisis pormenorizado de la normativa internacional, de la UE y española sobre la descarbonización de la industria aérea, así como de las iniciativas, los proyectos, las subvenciones y las ayudas de entidades públicas o privadas establecidas para la consecución del citado objetivo. Otro aspecto importante recogido es el estudio de las distintas soluciones tecnológicas disponibles a corto y medio plazo para lograr, no solo la reducción, sino la neutralidad de emisiones en el sector.

Los datos sobre el coste de las nuevas tecnologías y la reducción de emisiones, que implica su implementación, son escasos y poco homogéneos. Esta situación se debe, entre otras razones, a la dificultad que implica la descarbonización del transporte aéreo, a la competitividad existente entre las empresas del sector y a la complejidad de rastrear las emisiones de CO₂ directas y, especialmente, las indirectas. En este contexto se ha hecho uso de la información proporcionada por empresas y organizaciones líderes en este sector, tales como IATA, EASA y AENA, entre otras. Con la información recabada se han elaborado las hipótesis necesarias para proceder al desarrollo de los escenarios y los modelos diseñados en el presente estudio.

Concretamente, se plantean tres posibles escenarios diferentes, desde el más optimista hasta el más pesimista, que se clasifican tomando como base el nivel de descarbonización alcanzado a corto, medio y largo plazo. Los motivos que dan lugar a estos hipotéticos escenarios se expondrán más adelante.

En los modelos elaborados se analizan todas las tecnologías mencionadas, desde el mantenimiento del uso del queroseno hasta la implantación de los SAF, pasando por el hidrógeno verde, los aviones eléctricos y otras medidas alternativas. En cada modelo se realiza un análisis de la evolución del volumen de emisiones de CO₂ a la atmósfera y la capacidad de satisfacer la demanda estimada.

Para la obtención de una medida aproximada de las emisiones de CO₂, se estudia el previsible crecimiento de la demanda de este sector y las emisiones que generan cada modelo a fin de cubrir las necesidades de los mercados. En términos monetarios, se calcula el precio actual de cada tecnología y su evolución, a medida que gana terreno en el mercado. Respecto de cada tecnología se tienen en cuenta diferentes factores que se explican más adelante, tales como, las sanciones económicas que implican cada emisión de CO₂ o el coste monetario de las infraestructuras necesarias, entre otros aspectos. Todo ello sin perder de vista el grado de desarrollo actual de cada una de las soluciones analizadas y su escalabilidad de cara al 2050, ya que alguna de las medidas tecnológicas podría verse “frenada” por su estado embrionario.

7.1. Hipótesis

- **Sector analizado**

La realización del estudio requiere un análisis conjunto del sector aéreo de mercancías y el de pasajeros, ya que las principales aerolíneas, en términos de transporte de viajeros, dominan, en su gran mayoría, el mercado del transporte de carga.

En España, Iberia, Qatar y Air Europa, son claros ejemplos de la citada situación, como se muestra en la Figura 10 (página 40). En ámbito europeo son Lufthansa y Air France-KLM. Un gran número de estas aerolíneas tienen su propia filial para el transporte de carga, este es el caso de IAG Cargo¹¹⁹ y Lufthansa Cargo, la cuales utilizan su flota de aviones para el traslado de pasajeros y, también, para el de mercancías [93] [94]. Por su parte, Boeing mantiene que alrededor de un 51 % del transporte de mercancías se realiza en las bodegas de los aviones de pasajeros [95].

Debe añadirse que, en Europa, el transporte aéreo de mercancías es responsable, únicamente, del 3 % de las emisiones totales de CO₂ generadas por la totalidad de los vuelos que operan en esta región [96]. Esta circunstancia refuerza y justifica la necesidad y la utilidad de la elaboración de un estudio conjunto que englobe todos los tipos de transporte aéreo (pasajeros y mercancías) para tener una visión global del sector. Los avances propuestos en el presente trabajo afectarán de forma similar a todos los sectores que integran la industria aérea.

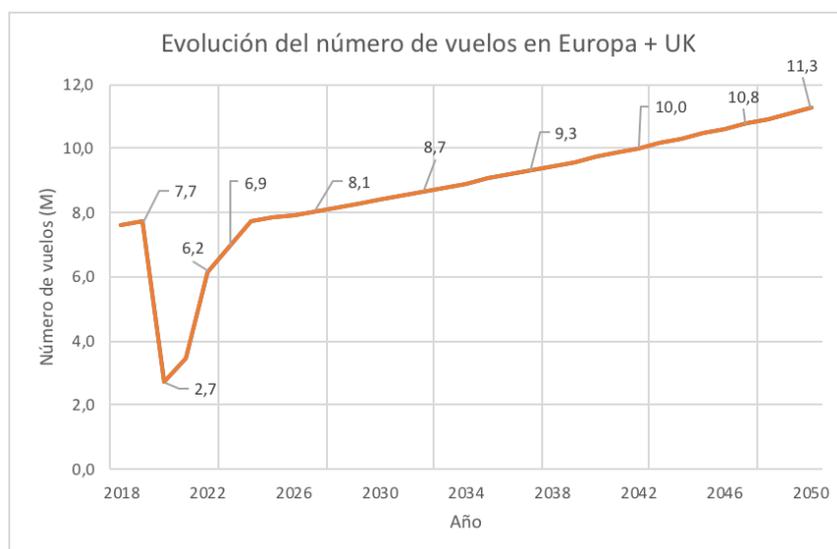
¹¹⁹ International Consolidated Airlines Group, compañía Holding español compuesto por Iberia, British Airways, Aer Lingus y Vueling.

Por último, resulta preciso indicar que el trabajo se ha realizado desde la perspectiva y marco territorial español y de la Unión Europea. Así se deduce de los apartados precedentes en los que se estudian diversos aspectos de la situación del transporte aéreo actual de nuestro país y de la UE, así como su legislación, iniciativas, proyectos y subvenciones, etc. Por esta razón los datos y análisis recogidos, a continuación, se circunscriben al ámbito territorial europeo.

- **Demanda de combustible**

La ACI¹²⁰ indica que la industria aérea recuperará los niveles previos a la pandemia, es decir 2019, en el año 2024, dato temporal que se ha tenido en cuenta a la hora de realizar las proyecciones.

En el año 2019, el número de vuelos que despegaron desde Europa + UK alcanzó la cifra de 7,7 millones, nivel que se estima que se recuperará en el año 2024. Para este estudio se han analizado los vuelos que despegan desde Europa, ya que el inventario Europeo de los GEI atribuye las emisiones al país donde se produce el llenado del tanque [97]. Para el cálculo de las proyecciones futuras se ha tenido en cuenta que el 3 % de los vuelos son de carga, con una estimación de crecimiento anual de un 3,5 %, y que el 93 % restante son aviones de pasajeros, respecto de los que se prevé un crecimiento anual de un 1,4 % [96]; crecimiento gradual que puede observarse en el Gráfico 5. Tales previsiones nos sugieren que en el año 2050 se llegarían a operar 11,3 millones de vuelos en esta región, Tabla 5.



Fuente: elaboración propia de Destination 2050 [96]
Gráfico 5. Evolución del número de vuelos con despegue en UE+UK

¹²⁰ Consejo Internacional de Aeropuertos.

Año	Nº vuelos
2019	7,7
2020	2,7
2025	7,8
2030	8,4
2035	9,1
2040	9,7
2045	10,5
2050	11,3

Fuente: elaboración propia de Destination 2050 [96]

Tabla 5. Número de vuelos con despegue en UE+UK

La determinación de la cantidad media de combustible consumida, por kilómetro recorrido y avión, requiere conocer qué aviones utilizan habitualmente las principales aerolíneas que operan en la región europea (grupo IAG, Qatar Airways, Ryanair y Lufthansa).

El modelo de avión que domina el mercado para vuelos de corta o media distancia, cuyo recorrido es inferior a los 4000 Km, es el Airbus A320; sin embargo, para los de larga distancia es el Boeing777. Según datos proporcionados por la OAG¹²¹, el consumo medio de litro de combustible recorrido del A320 es de 4 l/Km y del Boeing777 10 l/Km [98]. La ASTM¹²² indica que la densidad del Jet A1, combustible más común, es de 0,84 Kg/l.

En el 2020, los datos fueron los siguientes: solo el 6,2 % de los vuelos que despegaron en Europa fueron de larga distancia, frente a un 19,6 % de media distancia y un 74,2 % de corta distancia, con una media de kilómetros recorridos por vuelo de 4000 Km, 2750 Km y de 750 Km, respectivamente.

Tipo vuelo	Km	Porcentaje	Consumo (l/Km)	Densidad (Kg/l)	Kg Jet A1/vuelo
Largo	4000	6,2%	10	0,84	2083,2
Medio	2750	19,6%	4	0,84	1811,04
Corto	750	74,2%	4	0,84	1869,84

Fuente: elaboración propia

Tabla 6. Parámetros obtenidos a través de las hipótesis para realizar cálculos

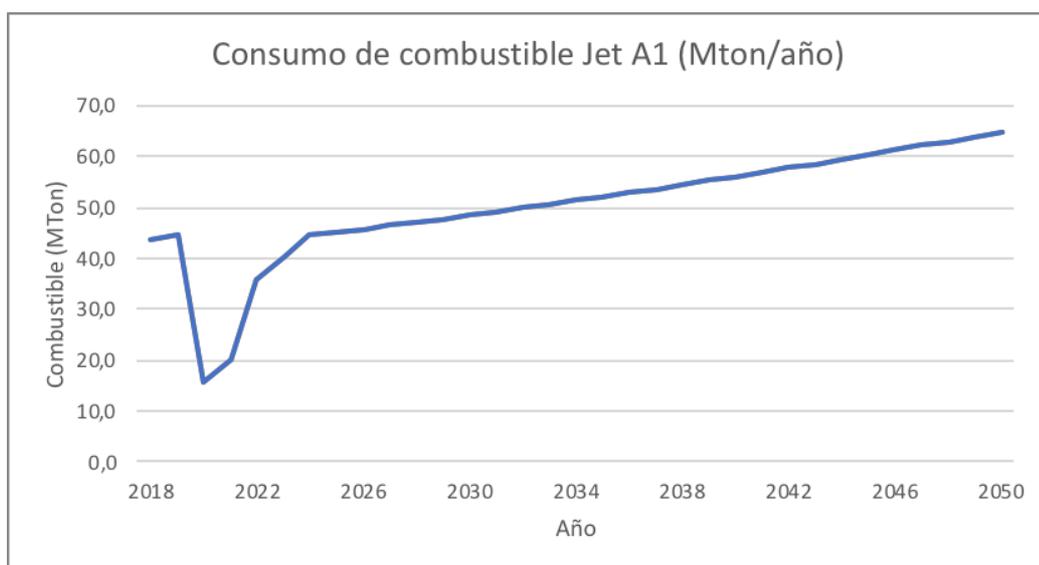
¹²¹ Official Aviation Guide.

¹²² American Society for Testing and Materials.

Año	JetA1 (Mton)
2019	44,5
2020	15,6
2025	45,1
2030	48,5
2035	52,2
2040	56,1
2045	60,3
2050	64,9

Fuente: elaboración propia

Tabla 7. Consumo estimado de Jet A1



Fuente: elaboración propia

Gráfico 6. Evolución del consumo de Jet A1 (Mton/año)

• Limitaciones y coste de emisión de CO2

La asignación de precios a las emisiones de CO2 garantizan que los agentes contaminantes tengan muy presente el impacto de sus emisiones en el medio ambiente de cara a la adopción de decisiones empresariales. El comercio de derechos de emisión junto con los programas de compensación de emisiones son dos instrumentos muy eficaces porque traducen el CO2 emanado en un valor económico-monetario.

En el seno de la UE existen dos regímenes vigentes sobre los derechos de emisión, el plan CORSIA y el RCDE UE que se han analizado en las secciones 4.1 (página 60) y 4.2 (página 65), respectivamente. Ambos sistemas promueven la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de un modo rentable y económicamente eficiente. El programa CORSIA tiene una dimensión global, por ello

afecta a los vuelos internacionales con origen en un país del UE. El segundo mecanismo, el RCDE UE, se circunscribe a los vuelos que operan en el interior de la UE.

Las disposiciones del RCDE UE establecen un sistema llamado “cap and trade” que consiste en que las empresas, de todos los sectores, deben rastrear sus emisiones para luego poder “canjearlas” por bonos que han comprado y que les dan derecho a emanar cierta cantidad de CO₂. Este procedimiento fija un límite de bonos al año, que se va reduciendo gradualmente, garantizando de este modo que el sector se descarboniza de manera progresiva. A su vez, el precio de los bonos aumenta, poco a poco, de forma que el impacto económico para las empresas sea cada vez más gravoso, adquiriendo cierto carácter sancionador.

El RCDE UE determina que entre los años 2021-2030, conocida como la fase 4, el número permisos de emisión tienen que reducirse anualmente en un 2,2 %; como no se disponen de datos de 2030 hasta 2050, se supone que se mantendrá el mismo porcentaje [99]. En 2022, para el sector de la aviación, correspondieron 24,8 MtCO₂ [100].

Para el establecimiento del precio actual de los permisos de emisión se han tomado los datos proporcionados por EEX¹²³, principal plataforma de subasta de permisos, según la Comisión Europea [101]. El precio medio de venta ha sido de 86,65 €/tCO₂, según indica su informe de negocio del año 2023 [102]. Varios analistas mantienen, en un artículo publicado por Reuters, que los precios estimados para estos bonos serán de 96,19 €/tCO₂ en 2024, lo que implica un aumento del 11 % respecto al año anterior, y 104,84 €/tCO₂ en 2025, que supone un incremento del 9 % respecto a 2024 [103]. No se disponen de datos concretos para los próximos años, sin embargo, sí que se ha observado que el crecimiento es exagerado comparado con los años precedentes, por lo que a partir del año 2026 se otorgará un valor de crecimiento anual del 5 %, porcentaje superior al previo a la pandemia, pero inferior a los valores excepcionales mencionados anteriormente. Bajo tales premisas los precios esperados se pueden observar en la Tabla 8.

¹²³ European Energy Exchange.

Año	Precio (€/tCO ₂)
2023	86,65
2025	104,8
2030	133,8
2035	170,8
2040	218,0
2045	278,2
2050	355,0

Fuente: elaboración propia

Tabla 8. Evolución del precio de RCDE EU

Por su parte, el plan CORSIA establece que aquellas aerolíneas que superen los niveles de emisiones del año 2019 deberán financiar proyectos que consuman la misma cantidad de CO₂ que la que han sobrepasado durante ese periodo. El cumplimiento de los objetivos marcados por CORSIA no será obligatorio hasta el año 2027, como se muestra en la Figura 40 (página 64). Además, este plan entró en vigor en el año 2021, por lo que no se disponen de datos para valorar el coste económico de las emisiones de CO₂. De las estimaciones realizadas por la organización EDF¹²⁴, que realiza numerosas proyecciones, se ha optado por aquella que es óptima para el cumplimiento del objetivo de los 2º Celsius [104]. El programa CORSIA tiene vigencia hasta el 2035, pero asumiendo que la situación climática continuará siendo crítica consideramos que se prorrogará. Para la elaboración de los cálculos se han tenido en cuenta un crecimiento anual del 27 %, porcentaje utilizado para realizar las proyecciones hasta el 2050 (Tabla 9).

Año	Precio (€/tCO ₂)
2020	33,90
2025	43,2
2030	55,2
2035	70,4
2040	89,4
2045	113,5
2050	144,2

Fuente: Elaboración propia con datos de EDF [104]

Tabla 9. Evolución del precio de CORSIA

Dado que, aproximadamente, un 40 % de los vuelos europeos se clasifican como extra-europeos, por lo que se enmarcan bajo el régimen del programa CORSIA, y un 60 % intra-europeos o nacionales, lo cual implica el pago de los bonos del RCDE UE [105], se ha realizado un cálculo combinado, que puede observarse en la Tabla

¹²⁴ Environmental Defende Fund.

10. Se sabe que, según los escenarios, estos precios irán variando, como se explicará más adelante.

Año	Precio (€/tCO ₂)
2023	67,69
2025	80,2
2030	102,2
2035	130,3
2040	166,2
2045	211,9
2050	270,2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Precio combinado RCDE UE y CORSIA

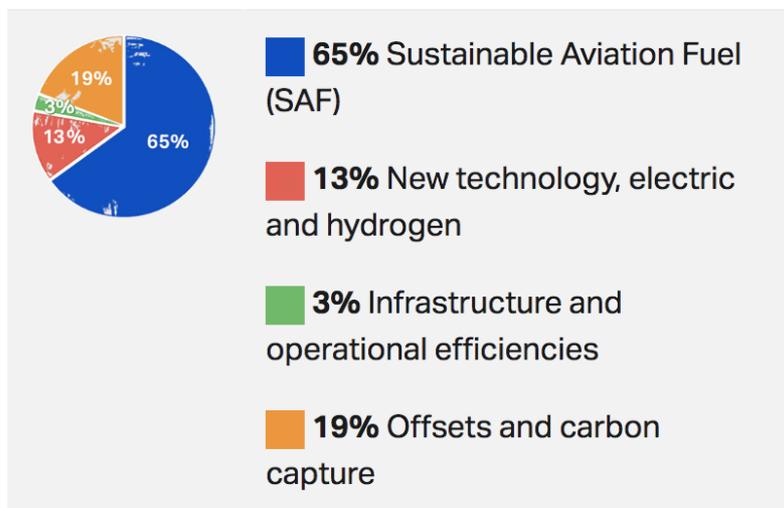
Los bonos deberán ser pujados siempre que se superen los límites de emisiones fijados por CORSIA y la IATA en sus planes estratégicos de emisiones netas nulas. Los objetivos son que las emisiones hasta el año 2035 no superen las de 2019, es decir, 191,9 MtCO₂ en Europa (Tabla 11, página 113); a partir de 2035, deben reducirse progresivamente hasta alcanzar en 2050 un 50 % del nivel de 2005, como máximo, es decir, 47 MtCO₂.

- **Porcentajes de SAF marcados**

En el paquete de medidas «Fit for 55» de la UE, se encuentra integrada la iniciativa ReFuelEU de la Comisión Europea, analizada en la sección 4.2 (página 65). En esta propuesta se establecen los porcentajes mínimos requeridos de SAF, utilizados en este estudio y mostrados en la Tabla 4 (página 91), necesarios para cumplir los objetivos establecidos.

7.2. Tecnologías

Un análisis correcto de las tecnologías recogidas en la presente sección, en los diferentes escenarios planteados, requiere una comparación entre los porcentajes estimados por la IATA sobre del grado de descarbonización por cada tecnología, mostrados en Figura 54, y los obtenidos en cada escenario.



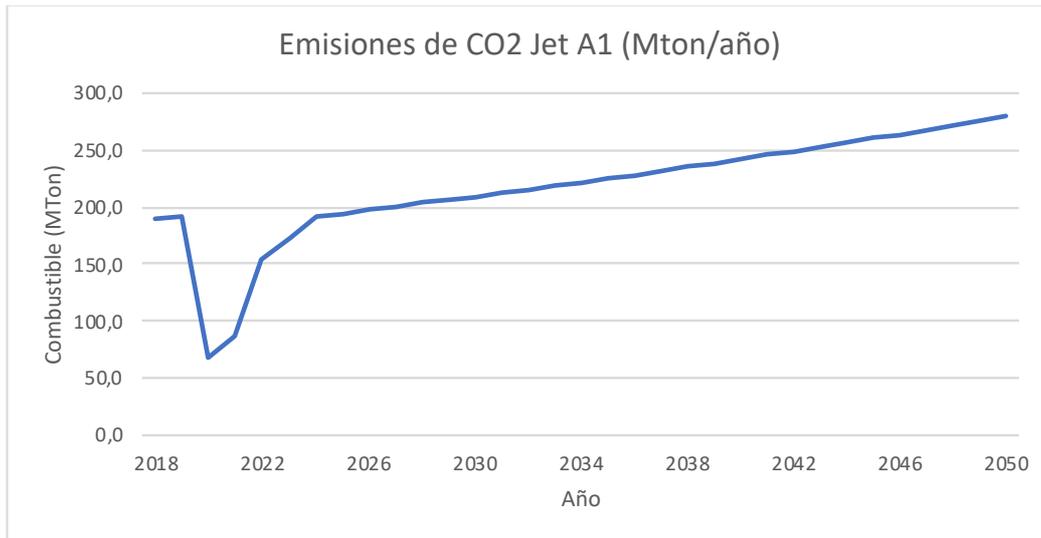
Fuente: Fly net zero by 2050 IATA

Figura 54. Porcentajes de contribución a la descarbonización por cada tecnología en 2050

7.2.1. Queroseno

Los informes de la IATA determinan que 1 Kg de combustible consumido produce 3,16 Kg de CO₂. En 2018, en Europa, se emitieron 192 MtCO₂ [96], y se utilizaron 44,5 Mton de combustible del tipo Jet A1, lo que nos lleva a la conclusión de que el ciclo completo del Jet A1, incluyendo emisiones directas e indirectas, da lugar a una conversión de 4,31 Kg de CO₂ generados por cada Kg de queroseno usado.

Si no se introdujera medida alguna para mejorar la situación actual, las proyecciones serían las mostradas en el Gráfico 7, generándose 280 MtCO₂ en el año 2050. Resulta interesante la comparación de este escenario con los que se plantearán más adelante, pero no constituye el núcleo principal del estudio, ya que es muy poco realista, entre otras razones porque no tiene en cuenta la situación actual en la que los SAF ya están presentes en el mercado. En este escenario ni siquiera se estaría cumpliendo la iniciativa CORSIA que estima que las emisiones deben mantenerse como máximo igual a las de 2019, situación que tampoco es extremadamente favorable.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 7. Evolución de las emisiones de CO2 para el escenario más crítico

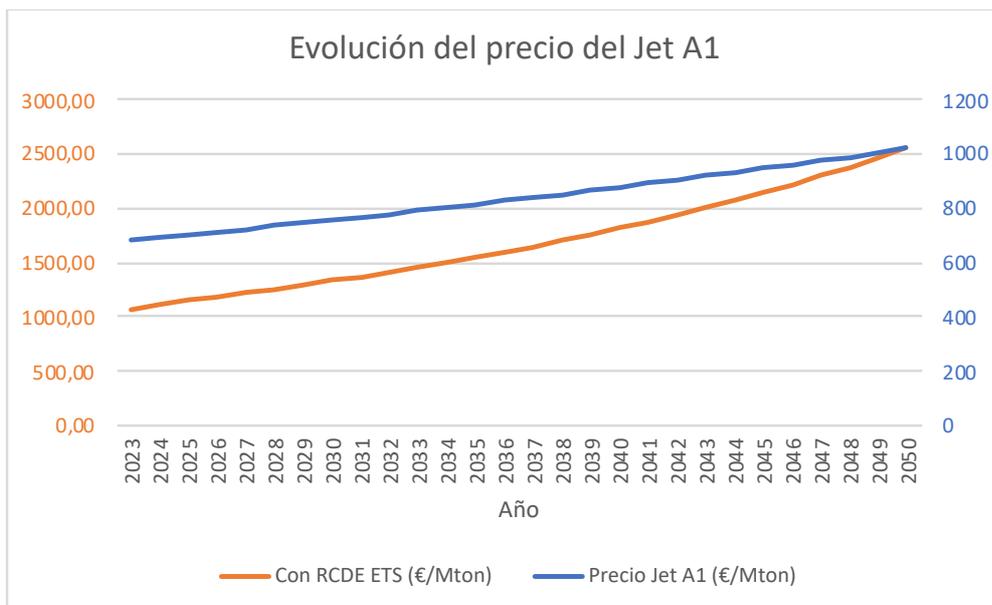
Año	CO2 (Mton)
2019	191,9
2020	67,2
2025	194,7
2030	209,3
2035	225,1
2040	242,0
2045	260,3
2050	279,9

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Emisiones de CO2 para el escenario más crítico

El precio del Jet A1 es de 0,54 €/l¹²⁵ [106], lo que equivale a 683 €/Mton. Se estima que el precio del combustible en un escenario como este, en el que la situación es muy crítica y no existen otras alternativas, el incremento anual del precio será de un 1,5 %. En el Gráfico 8 se observa el progreso del precio del Jet A1, y su evolución si se añade el coste de la compra de bonos para compensar las emisiones (se ha visto más arriba el factor de conversión de combustible quemado/CO2 emitido). Observamos que al incluir los permisos de emisión el precio sube significativamente, además de aumentar su incremento anual.

¹²⁵ Precio a día 9 de junio de 2023.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 8. Evolución del precio del Jet A1 con y sin precio RCDE EU

7.2.2. SAF

Los combustibles sostenibles se clasifican según su procedimiento de conversión, como muestra la Tabla 12.

Se aprecian un gran número de procesos, si bien nos centramos en los que se están desarrollando por parte de las principales empresas del sector energético. Las multinacionales Neste y LanzaJet son las principales productoras de HEFA y de AtJ, respectivamente. Analizaremos, también, el proceso de PtL porque, aunque se encuentra en un estado de escaso desarrollo es una de las grandes “promesas” energéticas.

Conversion process	Feedstock	LCA gCO ₂ e/MJ	% emissions savings compared to fossil-kerosene baseline of 89 g CO ₂ eq/MJ
Fischer-Tropsch (FT)	Agricultural residues	7.7	91%
	Forestry residues	8.3	91%
	Municipal Solid Waste (MSW), 0% NBC	5.2	94%
	MSW, NBC as % of total C	NBC × 170.5 + 5.2	
	Short-rotation woody crops	12.2	86%
	Herbaceous energy crops	10.4	88%
Hydro-processed esters and fatty acids (HEFA)	Tallow	22.5	75%
	Used cooking oil	13.9	84%
	Palm fatty acid distillate	20.7	77%
	Corn oil	17.2	81%
	Soybean oil	40.4	55%
	Rapeseed oil	47.4	47%
	Camelina	42	53%
	Palm oil - closed pond	37.4	58%
	Palm oil - open pond	60	33%
	Brassica carinata	34.4	61%
Synthesized IsoParaffins (SIP)	Sugarcane	32.8	63%
	Sugarbeet	32.4	64%
Iso-butanol Alcohol-to-jet (ATJ)	Sugarcane	24	73%
	Agricultural residues	29.3	67%
	Forestry residues	23.8	73%
	Corn grain	55.8	37%
	Herbaceous energy crops	43.4	51%
	Molasses	27	70%

Fuente: Destination 2050

Tabla 13. Combustibles calificados como aptos por el plan CORSIA

El biocombustible del tipo HEFA (Hydro-processed Esters and Fatty Acids), es importante para nuestro estudio puesto que es el método de producción más conocido y el único disponible en el mercado en la actualidad. Por tanto, se disponen de datos para la elaboración de un análisis con costes reales y precisos que permiten realizar estimaciones más solventes.

La planta de biocombustibles avanzados de Repsol, en Cartagena, producirá a través del proceso HEFA, biojet avanzado que podrá usarse en aviones. Los costes económicos para este proceso se muestran en la Tabla 14. Se observa que su precio es 1,9-2,8 más elevado que el importe de combustible Jet A1. A estas cifras debe añadirse el coste económico que implica la retirada de CO₂, dado que su porcentaje de reducción de emisiones no es del 100 %, como se muestra en la Tabla 13.

Pathways	Feedstocks	€/litre	€/tonne	Compared with fossil at 0.39 €/litre ¹²⁴	Source
HEFA	Soy oil, palm oil, Palm fatty acid distillate and used cooking oil	0.88-1.09	1100-1363	2.3-2.8	Pavlenko, Searle & Christensen (2019)
HEFA	Used cooking oil	0.76-0.84	950-1015	1.9-2.2	EASA, EEA & EUROCONTROL (2019)
HEFA	Used cooking oil	± 1	± 1,300	2.6	de Jong et al. (2017)

Fuente: Destination 2050

Tabla 14. Precio mínimo viable estimado para HEFA (Densidad de queroseno 0,8Kg/L)

El siguiente tipo es el proceso de producción de AtJ (Alcohol-to-jet), el cual convierte alcohol en combustible para aviones, usando recursos procedentes de residuos sólidos urbanos, residuos agrícolas, gases de escape de la industria, biomasa y otras fuentes de residuos [107]. Resulta muy interesante, ya que no presenta las limitaciones de otros procesos de producción de biocombustibles relativas al uso de recursos naturales que puedan suponer un detrimento para las especies que habitan ciertas regiones. Su precio aparece en la Tabla 15, e incluye el coste económico que implica la retirada del CO₂ emanado, ya que sus emisiones no son nulas, siendo su precio 4,1-6,4 veces el del queroseno.

Finalmente, el método de conversión PtL (Power to liquid), que como se ha descrito en la parte de las tecnologías, en el apartado 6, es una de las grandes apuestas a largo plazo. De entre todas las tecnologías que se espera que entren el mercado a corto plazo, esta sería la más cara, ya que su desarrollo se encuentra en fase embrionaria, y actualmente es poco eficiente. Sin embargo, se espera que su precio se reduzca a un ritmo más rápido que el resto, ya que su posible escalabilidad es mucho mayor. El precio estimado, actualmente, como se observa en la Tabla 15, es 6,4 veces más que el del combustible convencional.

Pathway	Feedstocks	€/tonne	€/litre	Compared with fossil at 0.39 €/litre ¹²⁷	CO ₂ e abatement cost ¹²⁸ €/tonne
FT gasification	MSW	1675-2338	1.34-1.87	3.4-4.8	± 400-500
AtJ	Corn, sugarcane, agricultural residues and energy crops	2000-3125	1.60-2.50	4.1-6.4	± 800-4500
SIP	Sugar cane molasses	5000	4.00	10.3	± 2500
FT power to liquid	Renewable electricity and CO ₂ point sources	3125	2.50	6.4	± 800

Fuente: Destination 2050

Tabla 15. Precio mínimo viable estimado con los costes de eliminar el CO₂ generado (Densidad queroseno 0,8Kg/L)

Un análisis sobre la capacidad de producción del SAF requiere conocer la disponibilidad de la materia prima necesaria para su fabricación, puesto que para la mayoría de ellos es la principal limitación. Se ha elaborado una tabla con los límites de producción de cada tipo de combustible hasta el año 2050 [108]. Los datos disponibles en el informe de Waypoint 2050 son para la producción global, pero como Europa será responsable del 20 % de dicha producción, se ha calculado la producción Europea para observar si puede satisfacer su propia demanda [109]. Los valores que restringirán la fabricación anual se muestran en la Tabla 16. Estos límites se alcanzarán en diferentes años, según los diferentes escenarios que se van a plantear, pero una vez se llegue a ese nivel de producción no se podrá superar. En el caso del PtL no hay limitación, ya que, al tratarse de un combustible sintético, su producción será ilimitada en términos de materia prima.

SAF	Límite de anuales Mt 2050
HEFA	6,00
AtJ (AR)	11,6
FT (MSW)	4,4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. Límites de producción de Bio-SAF debido a la disponibilidad de materia prima en Europa

HEFA	FT	AtJ	PtL
65%	85%	65%	95%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17. Porcentaje de reducción de CO2 comparado con el Jet A1

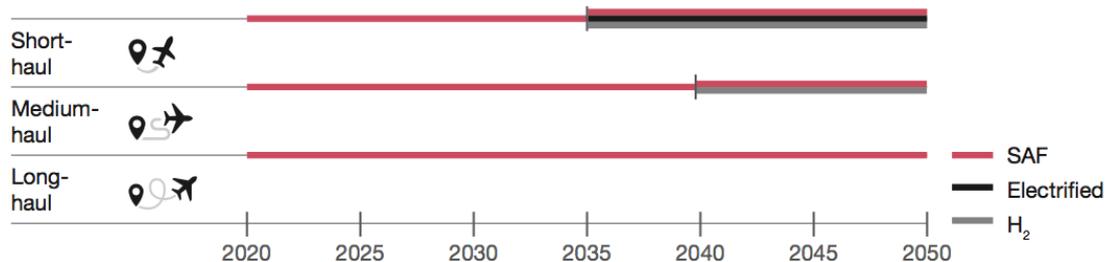
7.2.3. Hidrógeno verde

Cuando se habla de una sociedad con cero emisiones, el hidrogeno verde es una de las principales soluciones que se presentan. Este compuesto permitiría descarbonizar los sectores industriales en general, incluyendo entre ellos la aviación. Sin embargo, su nivel de desarrollo tecnológico en la actualidad es pobre.

El principal problema que plantea esta iniciativa es la necesidad de un cambio radical de las infraestructuras. Resulta indispensable el diseño de nuevos aviones, ya que necesitan su propio tipo de motor o pilas de combustión. Además, la densidad

del hidrógeno verde es mucho mayor que la del queroseno, lo que implica la necesidad de unos tanques de mayor tamaño. Se considera que el mayor impacto económico de esta solución será la necesidad de renovar la flota de aviones, y no tanto la producción del propio hidrogeno verde. Se estima que el precio medio de producción de hidrogeno verde en sus inicios será de alrededor de 2,7 €/Kg. Si no se incluye el coste del hidrogeno, se estima que el precio por CASK incrementaría un 26 % [96].

Por los motivos mencionados anteriormente, su introducción en el mercado no será antes del 2035 y, únicamente, para vuelos de corta distancia; se prevé que en 2040 alcanzará a los de media distancia (Figura 55). En consecuencia, la demanda de hidrogeno verde por parte del sector aéreo será muy inferior al volumen generado por muchas empresas que ya vienen dedicándose al desarrollo este elemento energético. Se presume que el uso del hidrógeno verde en otros segmentos industriales se producirá antes de las fechas establecidas en la Figura 55 respecto de la aviación.



Fuente: *The real cost of green aviation by PwC [110]*

Figura 55. Introducción de las tecnologías en el mercado de la aviación

7.2.4. Aviones eléctricos

Los aviones completamente eléctricos son una solución muy lejana en la actualidad, ya que presentan numerosos obstáculos sin solución a corto/medio plazo. En la actualidad solo se ha realizado un vuelo totalmente eléctrico, realizado por la nave Alice, de la compañía Eviation [111]. Esta aeronave tiene como límites nueve pasajeros y una tonelada de carga, además de volar a una distancia máxima de 400 Km. En la Figura 55 se observa que podrían entrar en este sector, para vuelos de corta distancia, como pronto en el año 2035. Hay otras soluciones, tales como, los aviones híbridos o los de hidrogeno que utilizan baterías, pero al carecer de datos, y plantearse como una solución tan lejana, no es objeto de estudio en este trabajo.

7.2.5. Medidas complementarias

A lo largo de los años el sector aéreo ha ido reduciendo sus emisiones, pero no únicamente debido a la introducción de nuevas tecnologías, sino también gracias “pequeñas” medidas con un gran impacto, tales como la optimización del número de vuelos diarios y las rutas cubiertas, o la organización de hubs de carga de mercancías etc. Estas pautas seguirán siendo muy importantes, por ello, se han tenido en cuenta en el estudio. Se estima que reducirán un 0,2 % anual las emisiones de CO₂ hasta el año 2050.

Entre las distintas medidas destacamos las siguientes:

- a) Single European Sky: esta iniciativa de la UE tiene como objetivo mejorar la gestión del tráfico con la desfragmentación del espacio aéreo europeo, junto con una reducción de los retrasos, un aumento de las normas de seguridad y la eficiencia de los vuelos.
- b) Espacio aéreo de libre ruta: consiste en la utilización de servicios de navegación como ANSP para una planificación de ruta a tiempo real, pudiendo proporcionar rutas flexibles según los cambios meteorológicos inesperados, así como volar por rutas más eficientes.
- c) Sistemas de gestión de la eficiencia del combustible: permitiría a las aerolíneas reducir el consumo de combustible y las emisiones de CO₂ en todas sus operaciones mediante el análisis de los patrones de vuelo.

7.3. Resultados

Se plantean tres escenarios para los que el nivel de desarrollo e introducción de la tecnología analizada es diferente, esto tendrá un impacto directo sobre las emisiones y los precios de cada uno de los carburantes, así como de la retirada de las emisiones de CO₂.

Se analiza si es posible alcanzar cero emisiones en el sector de la industria aérea, así como los costes económicos y de demanda que ello conlleva.

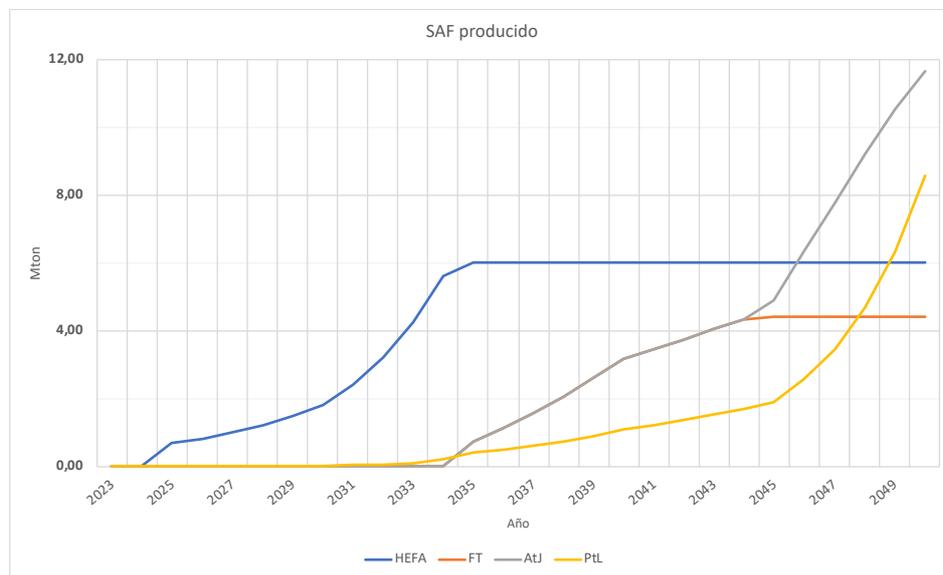
7.3.1. Escenario 1

Este primer escenario se presenta como el más negativo. Sirve de modelo base, ya que continuará la tendencia actual de descarbonización, que como ya se ha visto

a lo largo de la investigación, no es elevada. Las mejoras tecnológicas se mantienen a un nivel de progreso conservador y, por tanto, muestran una continuación del ritmo de mejora actual.

En este escenario, las compensaciones son necesarias y tendrán que desempeñar un papel importante en la evolución hasta el año 2050, por ello se espera que los precios de los bonos de CO2 sean los de la Tabla 10. Además, como se menciona en la sección 7.2.1, en un escenario tan nefasto como este, el precio del queroseno aumentaría un 1,5 % al año, alcanzando los precios mostrados en el Gráfico 8 (página 114).

La iniciativa «Fit for 55» establece los objetivos mínimos de SAF exigidos (Tabla 4, página 91), que requiere una proporción del 2 % de combustibles en 2025. Sabiendo que, en la actualidad, únicamente, un 0,05 % del combustible en Europa es sostenible, y que ha sido este año cuando un gran número de empresas han comenzado a construir sus plantas de producción de SAF, estimamos que los porcentajes fijados por la UE se cumplirán en un 75 %. La producción de los biocombustible para este escenario, que se muestra en el Gráfico 9, viene fijada por la limitación de la materia primera (Tabla 16).

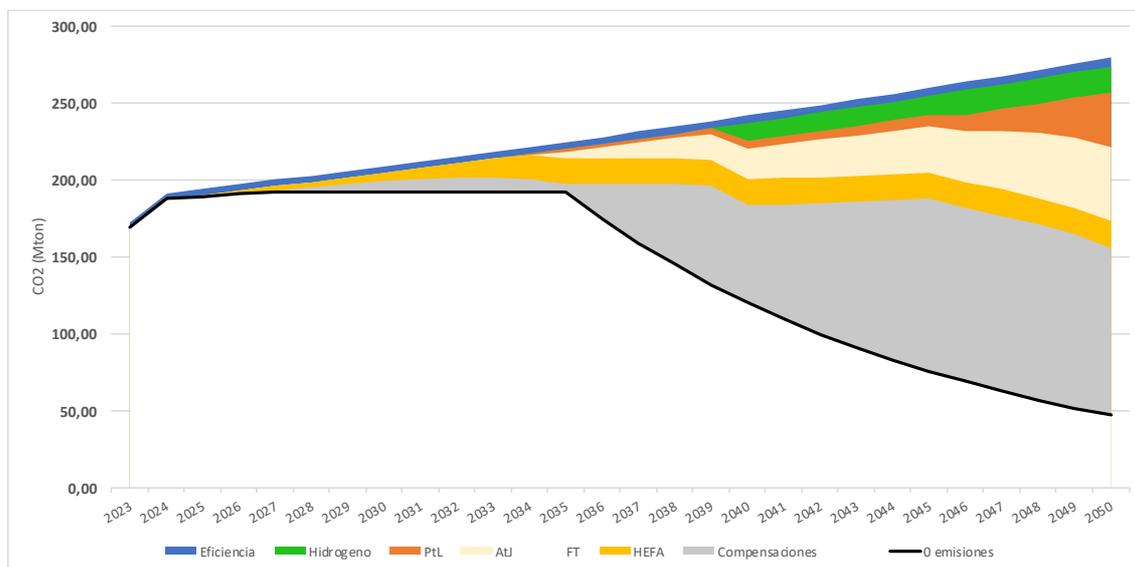


Fuente: elaboración propia

Gráfico 9. Producción de SAF en el Escenario 1

En este escenario la posibilidad de implantación del hidrogeno verde es prácticamente mínima, los plazos estimados (Figura 55, página 118) se retrasarán. Por lo que entrará en el mercado en el año 2040 para vuelos de corta distancia, que

representan el 74,2 % de los vuelos europeos (Tabla 6, página 107), y en el año 2045 para los trayectos de media distancia, que encarnan el 19,6 % de los despegues. Con este tipo de tecnología de emisiones nulas, solo se cubren un 20 % de estos vuelos.



Fuente: elaboración propia

Gráfico 10. Emisiones de CO2 en el escenario 1

Año	CO2 (Mton)
2019	191,9
2020	67,2
2025	188,7
2030	199,8
2035	197,3
2040	183,4
2045	187,9
2050	156,3

Fuente: elaboración propia

Tabla 18. Emisiones finales de CO2 sin tener en cuenta la medida de compensación de CO2 en escenario 1

	Eficiencia	Hidrogeno	PtL	AtJ	FT	HEFA	Compensaciones
% Reducción 2050	3%	7%	15%	14%	7%	7%	47%

Fuente: elaboración propia

Tabla 19. Porcentaje de CO2 reducido por cada medida en el escenario 1

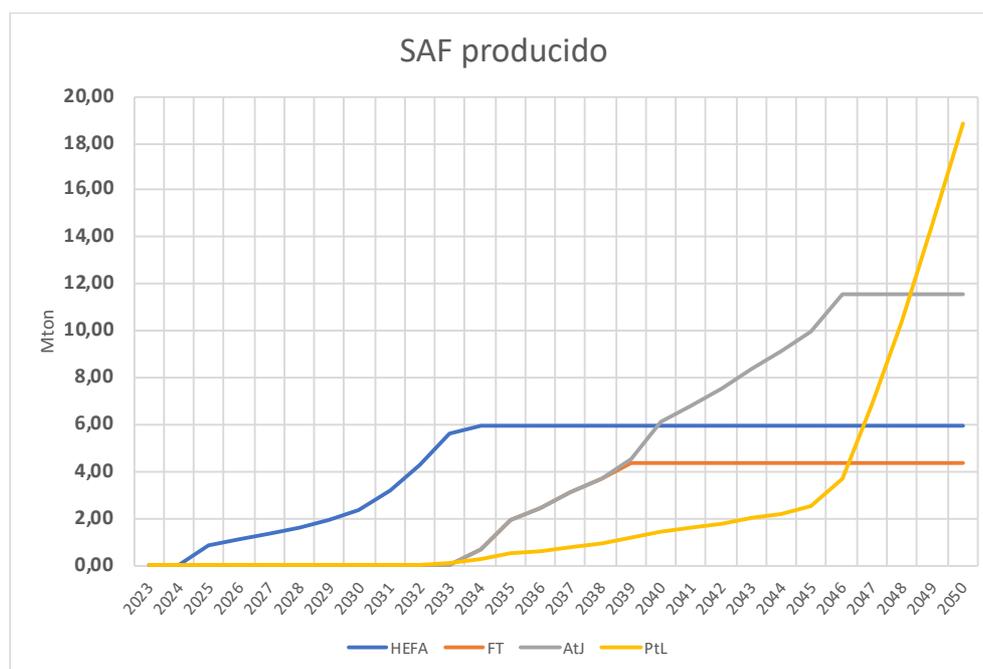
En el Gráfico 10 se observa que la puesta en marcha de las tecnologías es relativamente lineal, lo que dificulta la reducción acelerada de las emisiones. También cabe resaltar que no es hasta el 2045 cuando la tecnología PtL ganará terreno sobre los biocombustibles, lo que limitará mucho la producción de los SAF, ya que los biocombustibles vienen condicionados por la biodisponibilidad de materia

prima. La línea negra representa las emisiones óptimas para conseguir emisiones nulas en el futuro, que son fijadas por la IATA y el plan CORSIA, como se ha explicado en la hipótesis.

Para el caso planteado se concluye que la posibilidad de llegar a una industria totalmente descarbonizada, excluyendo del estudio los planes de compensación RCDE y CORSIA, es imposible, puesto que no cumpliría con el objetivo de lograr unas emisiones máximas en el 2035, equivalentes a aquellas de 2019, como se muestra en la Tabla 18. Por tanto, en este escenario tan crítico, los offsets jugarían un papel esencial llegando a eliminar hasta un 47 % del CO2 disipado en el año 2050, mientras que los SAF solo contribuirán un 43 % (Tabla 19), montante un 25 % inferior al estimado por la IATA (Figura 54, página 112). Se observa también la escasa presencia del hidrogeno por las dificultades técnicas en su desarrollo tecnológico.

7.3.2. Escenario 2

En este segundo escenario se cumplirían todas las hipótesis planteadas anteriormente, y se alcanzarían los valores mínimos de SAF marcados por la UE (Tabla 4, página 91). Además, en este contexto el hidrogeno verde cumple con las fechas de introducción estimadas en el informe de PwC (Figura 55). Se llegaría a operar con este tipo de tecnología en un 60 % de los vuelos de corta distancia en el año 2050, comenzando con una cuota de mercado del 25 % en 2035. Para los vuelos de media distancia, en 2040, un 25 % de la flota aérea estaría formada por aviones de hidrogeno verde, llegando hasta un 40 % en 2050.



Fuente: elaboración propia
Gráfico 11. Producción de SAF en el Escenario 2

Si comparamos este escenario con el anterior, se observa que los topes de producción de los biocombustibles se alcanzan antes, ya que se cumplen los porcentajes de mínima producción de la UE (Gráfico 9 vs. Gráfico 11). Asimismo, la producción de SAF sintético en este escenario duplica la del anterior, lo que resulta muy positivo puesto que a largo plazo no tendrán límites de producción, y su porcentaje de reducción de emisiones es muy superior a la de los combustibles bio, como se muestra en la Tabla 17 (página 117).

	Eficiencia	Hidrogeno	PtL	AtJ	FT	HEFA	Compensaciones
% Reducción 2050	2%	20%	34%	14%	7%	7%	16%

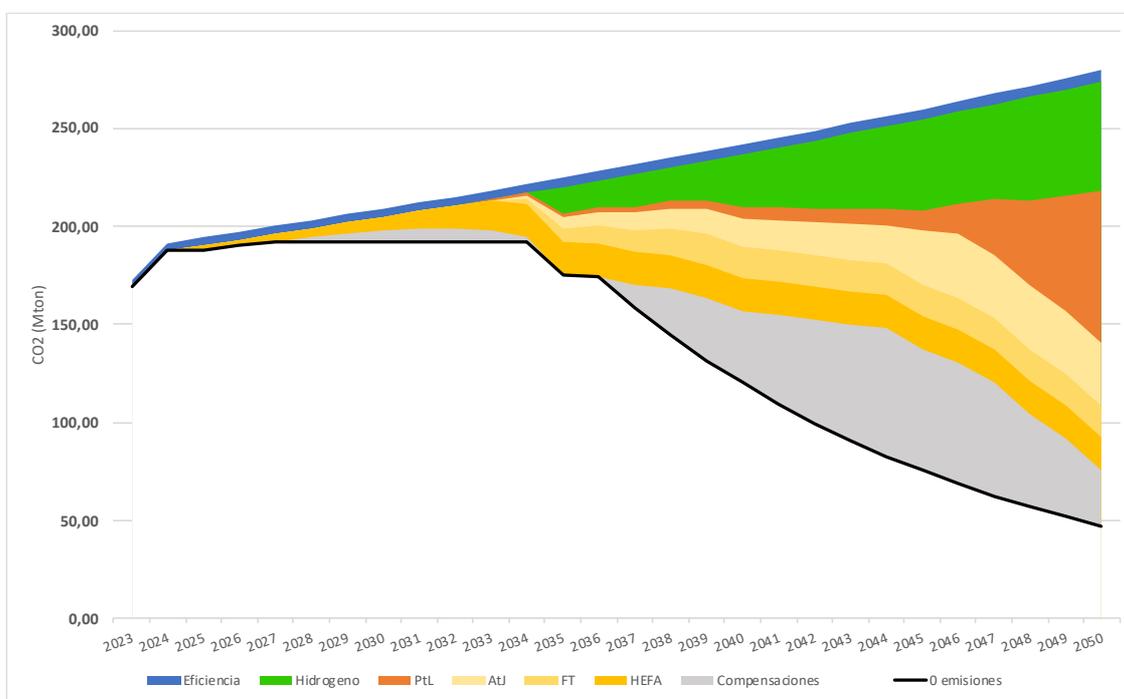
Fuente: elaboración propia

Tabla 20. Porcentaje de CO2 reducido por cada medida en el escenario 2

Año	CO2 (Mton)
2019	191,9
2020	67,2
2025	188,0
2030	198,1
2035	175,2
2040	159,3
2045	146,6
2050	84,1

Fuente: elaboración propia

Tabla 21. Emisiones finales de CO2 sin tener en cuenta la medida de compensación de CO2 en escenario 2



Fuente: elaboración propia

Gráfico 12. Emisiones de CO2 en el escenario 2

Este escenario se presenta, significativamente, más esperanzador que el anterior, sin que haya requerido un gran desarrollo de las tecnologías o su implantación en el mercado con mayor antelación. En esta situación no solo se cumpliría el requisito de emitir como mucho 192 MtCO₂ en el año 2035, sino que se habría visto reducida en un 8 %, llegando a 175 MtCO₂ (Tabla 21).

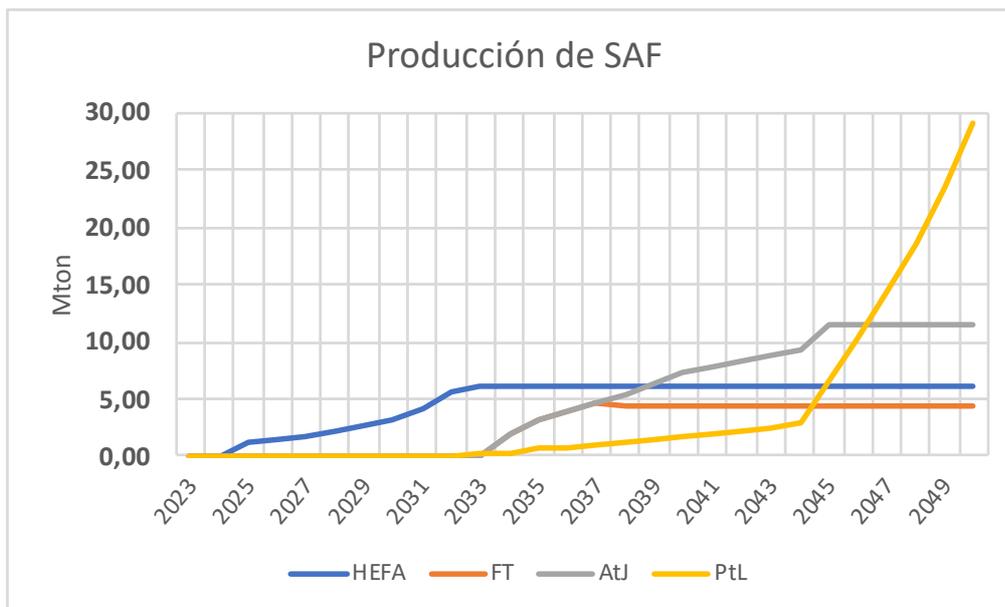
En términos de los porcentajes de contribución (Tabla 20), las compensaciones se han visto notablemente reducidas, lo que es muy positivo, ya que solo un 16 % del sector estaría “comprando” su pase para descarbonización, en lugar de realizar los esfuerzos e inversiones necesarias para, verdaderamente, evitar la emisión de CO₂ en sus procesos. Otro dato reseñable sería el cumplimiento de las estimaciones realizadas por la IATA sobre el futuro de los recursos para llegar al horizonte Fly Net Zero by 2050 (Figura 54, página 112).

Por último, es destacable, como se aprecia en el Gráfico 12, que la mejora desde el año 2035, en adelante, es exponencial. En conclusión, es un escenario altamente realista que presenta un futuro positivo para una industria, como la aérea, que se creía de casi imposible descarbonización.

7.3.3. Escenario 3

El tercer escenario se presenta como una utopía, aunque no extremadamente alejada de la realidad, ya que solo se tendrán en cuenta aquellos recursos tecnológicos considerados viables, pero bajo la estimación de que su nivel de escalabilidad será mayor a la predicha hasta el momento.

Los niveles de producción de SAF serían un 25 % superior al mínimo exigido por la UE, circunstancia que provoca que los biocombustibles alcancen su máximo volumen de producción en un espacio temporal menor que en los escenarios 1 y 2. El AtJ es el último en alcanzar su tope, en el año 2045. Esta situación provocaría la necesidad de una mayor introducción de combustibles sintéticos, detalle que se ve reflejado en el incremento de la producción de PtL en el Gráfico 13, dado que este combustible no tiene límite de producción. Este aumento es muy positivo, ya que reduce las emisiones de CO₂ en un 95 %, en comparación con el Jet A1.



Fuente: elaboración propia

Gráfico 13. Producción de SAF en el Escenario 3

La entrada del hidrogeno verde en el mercado sería idéntica a la planteada en el escenario 2, pero con la diferencia de que acapararía una parte mayor de la flota. En el año 2050, se llegaría a operar con este tipo de tecnología en un 80 % de los vuelos de corta distancia, comenzando con un 25 % en 2035. Para los vuelos de media distancia, en 2040, un 25 % de la flota serían aviones propulsados por hidrogeno verde, llegando hasta un 70 % en 2050.

Esta rápida escalabilidad se debe a que una vez que la tecnología alcance su completo desarrollo, el precio del hidrógeno verde iría decreciendo. Además, ante la necesidad de renovación de la flota, muchas compañías aéreas apostarían por aparatos que promueven el cambio hacía un futuro más sostenible.

	Eficiencia	Hidrogeno	PtL	AtJ	FT	HEFA	Compensaciones
% Reducción 2050	2%	27%	46%	13%	6%	6%	0%

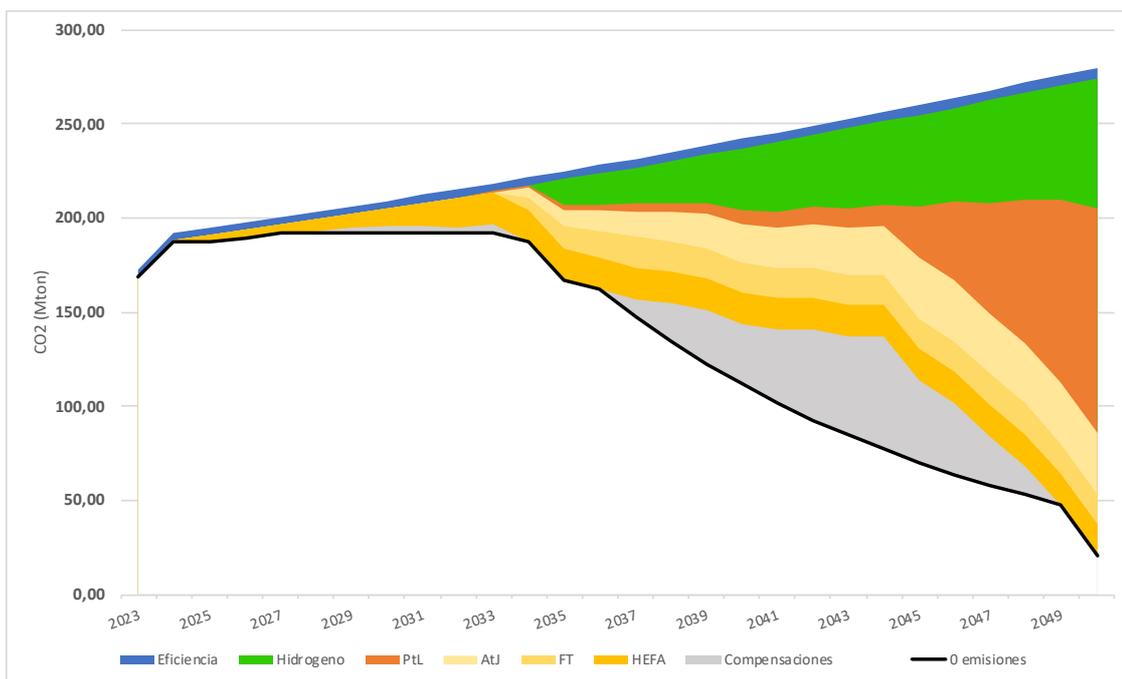
Fuente: elaboración propia

Tabla 22. Porcentaje de CO2 reducido por cada medida en el escenario 3

Año	CO2 (Mton)
2019	191,9
2020	67,2
2025	187,4
2030	196,1
2035	166,7
2040	143,4
2045	113,5
2050	20,3

Fuente: elaboración propia

Tabla 23. Emisiones finales de CO2 sin tener en cuenta la medida de compensación de CO2 en escenario 3



Fuente: elaboración propia

Gráfico 14. Emisiones de CO2 en el escenario 3

En este último escenario, el nivel de emisiones se presentaría mucho más favorable del esperado. Las emisiones del año 2035 serían un 13 % inferiores a las de 2019, y las de 2050 un 57 %, con 20,3MtCO2 en 2050 (Tabla 23). Nos encontraríamos ante un contexto cercano a una industria aérea libre de emisiones. Se observa en el Gráfico 14 que entre los años 2034 y 2036, así como a partir del año 2049, no serían necesarios los offsets, ya que con las propias tecnologías se alcanzarían las emisiones marcadas por CORSIA y la IATA.

Para terminar, un detalle que se aprecia en la Tabla 22. Porcentaje de CO2 reducido por cada medida en el escenario 3, muestra que los porcentajes de contribución a la descarbonización de los SAF y del hidrógeno verde superan a los

calculados por la IATA, debiéndose esta circunstancia a la contribución nula de los offsets.

7.3.4. Comparativa de los tres escenarios

% Reducción 2050	Eficiencia	Hidrogeno	PtL	AtJ	FT	HEFA	Compensaciones
Escenario 1	3%	7%	15%	14%	7%	7%	47%
Escenario 2	2%	20%	34%	14%	7%	7%	16%
Escenario 3	2%	27%	46%	13%	6%	6%	0%

Fuente: elaboración propia

Tabla 24. Comparativa del Porcentaje de CO2 reducido por cada medida en los tres escenarios

Año/CO2 (Mton)	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
2019	191,9	191,9	191,9
2020	67,2	67,2	67,2
2025	188,7	188,0	187,4
2030	199,8	198,1	196,1
2035	197,3	175,2	166,7
2040	183,4	159,3	143,4
2045	187,9	146,6	113,5
2050	156,3	84,1	20,3

Fuente: elaboración propia

Tabla 25. Comparativa de las Emisiones finales de CO2 sin tener en cuenta la medida de compensación de CO2 en los tres escenarios

En todos los escenarios planteados, como se observa en la Tabla 24, la disponibilidad limitada de materia prima es uno de los principales inconvenientes en la producción de Bio-SAF. En 2050, se prevé que los Bio-SAF podrán contribuir a la descarbonización, como máximo, en un 27 %.

El PtL se presenta en los tres escenarios como la solución tecnológica más esperanzadora, ya que, como se muestra en la Tabla 24, es el combustible que más contribuye a la reducción de emisiones en el 2050.

El nivel de desarrollo tecnológico de las soluciones presentadas, especialmente el PtL y el hidrógeno verde, está inversamente correlacionado con el sistema de compensación de emisiones establecido por la iniciativa CORSIA y el RCDE UE. Se aprecia en la Tabla 24, que, en un escenario de mayor desarrollo tecnológico, la efectividad de sistema de compensación de emisiones es nula; sin embargo, en un contexto en el que las tecnologías tienen menos protagonismo, su incidencia es del 47 %.

El objetivo fijado por la IATA de que en el 2050 el nivel de emisiones sea, como máximo, el 50 % de las emanadas en 2005 (Tabla 25), solo se cumple en el escenario 3, en el que se observa una gran implantación del hidrogeno verde.

5. Conclusiones

El presente trabajo se ha concebido, de forma intencionada, dividido en dos bloques diferenciados, pero íntimamente conectados. Una primera parte reúne una exhaustiva e imprescindible investigación para la comprensión de un sector complicado como el aéreo, máxime si la cuestión a tratar es su descarbonización. En la segunda parte, con la ayuda de todos los datos técnicos, económicos y normativos recogidas en la parte primera del estudio, se han elaborado tres posibles escenarios diferentes en los que se plantea si será posible y en qué plazo una aviación libre de emisiones. Las conclusiones que se presentan se apoyan en el análisis realizado y los resultados obtenidos.

En la actualidad se encuentran en marcha un amplio abanico de medidas, estrategias y tecnologías encaminadas a la promoción, con mayor o menor éxito, a la descarbonización de la navegación aérea. Los SAF presentan interesantes ventajas que se resumen en tres ideas: tienen un punto de ignición similar al del Jet-A1, no necesitan una infraestructura especial para su almacenamiento y transporte y las aeronaves no requieren adaptaciones para su utilización. Los inconvenientes se concretan en que no eliminan las emisiones en su totalidad, son caros y, en la actualidad, su producción sigue siendo escasa. Los resultados del análisis realizado advierten que no es posible la descarbonización de la industria aérea sin la intervención de los SAF. Hoy por hoy, son la solución más viable, desde una perspectiva tecnológica y económica, pese a su elevado precio. Debe añadirse, que el coste del queroseno, presumiblemente, irá en aumento lo que tendrá consecuencias negativas para industria aérea.

Las medidas legislativas y los proyectos en curso para la descarbonización del transporte aéreo de mercancías son numerosas, su origen es diverso y presentan cierto carácter disperso y fragmentario. Se incluyen regulaciones sobre emisiones, investigación y desarrollo de tecnologías sostenibles, incentivos y financiación, colaboración público-privada y optimización logística. Todo este conglomerado, de normas y proyectos, pretende la promoción de una transición hacia un transporte aéreo de mercancías más sostenible y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero. En este sentido, se observa en los gráficos planteados en los tres escenarios proyectados que los planes CORSIA y Fly Net Zero de la IATA, son eficaces, jugando un papel esencial en la descarbonización del sector a corto y medio plazo. Iniciativas y planes como los citados son necesarios porque ofrecen incentivos imprescindibles para la promoción de grandes inversiones de capital requeridas, por ejemplo, para la construcción de plantas de producción de SAF o I+D en el marco del hidrógeno verde y la aviación eléctrica.

Las soluciones tecnológicas como la electrificación de las aeronaves o la producción de hidrógeno verde se presentan muy interesantes desde la perspectiva de cero emisiones, aunque no estarán disponibles ni a corto ni a medio plazo. Pero requieren mayor desarrollo investigador todavía para conseguir un escenario, totalmente, libre de emisiones. Si solo se promueve el uso de combustibles sostenibles, dejando de lado estas otras soluciones, la descarbonización, a partir del año 2035, comenzará a ser inviable, ya que es un sector cuyo crecimiento se estima en alza constante debido al mundo globalizado en el que habitamos.

La implicación y el esfuerzo de toda la industria aeronáutica, gobiernos y organismos internacionales son fundamentales. Asimismo, la cooperación entre los distintos sectores industriales promovería un rápido desarrollo del hidrogeno verde, lo que nos proyectaría un horizonte más esperanzador que las funestas predicciones recogidas en los informes emitidos por el IPCC. No hay tiempo para una reducción paulatina de las emisiones de CO₂, como está planteado hasta 2050, hay que situarse en un escenario de descarbonización, es decir, de emisiones cero.

El transporte aéreo en general y el de mercancías, en particular, para que sea viable demanda, con urgencia, un mayor desarrollo investigador desde un punto de vista tecnológico y científico. Así mismo, requiere la cooperación de todas las partes implicadas en el proceso (Gobiernos, organismos internacionales, operadores y agentes económicos, etc.). Por último, precisa el estricto cumplimiento de normas, decisiones y acciones adoptadas hasta la fecha, como medio de transformación de la navegación aérea en un sector descarbonizado y sostenible, que conjugue prosperidad económica, integridad del medio ambiente y equidad social. Todo ello enmarcado en el respeto de los ODS, que mejoran la calidad de vida de todas las personas y el futuro del planeta.

Las conclusiones específicas de las hipótesis y escenarios planteados son las siguientes:

- La industria aérea ha experimentado un crecimiento exponencial y se prevé que así continuará en el futuro. Esta circunstancia provocará que, en 2050, en los aeropuertos europeos, tendrán lugar en torno a 11,3 millones de despegues, que necesitarán cerca de 65 Mton de Jet A1.
- Se prevé que el precio del queroseno experimente un crecimiento constante, de forma que, en 2050, su precio sea 3,6 veces el de 2023. En consecuencia, la compra derechos de emisiones, exigida por CORSIA y por el RCDE UE, se convertirá en una especie de “tasa impositiva”. Esta circunstancia podría dar lugar a una reducción del precio de los SAF e, incluso, del hidrogeno verde.

- Los bio-SAF juegan un papel esencial en la descarbonización hasta el año 2035, ya que son la única tecnología disponible en el mercado, lo que permitirá una escalabilidad más rápida a corto plazo. En el escenario más negativo, el primero, no se alcanzan los niveles de SAF establecidos por la UE y, sin embargo, en 2035, las emisiones de CO₂ serían de 197,3 Mton, muy próximas a los 192 Mton fijados por el plan CORSIA. En el escenario 2, únicamente, con los niveles de producción marcados por la UE se consigue reducir la producción CO₂ a 16,8 Mton, respecto a las de 2019. Por ello, se concluye que los SAF son críticos a corto plazo, y necesarios a medio y largo plazo.
- Uno de los inconvenientes de los bio-SAF, en todos los escenarios planteados, es que la materia prima que utilizan es finita. Esta limitación provoca que, en 2050, el uso de los bio-SAF (AtJ, FT y HEFA) solo representará el 27 % de las soluciones de descarbonización. Sin embargo, este obstáculo debe verse como la oportunidad de un impulso mayor de la producción de los electrocombustibles.
- Los combustibles sintéticos, concretamente el PtL, se presenta en los tres escenarios como la solución más esperanzadora, puesto que se muestra como el mayor responsable de la reducción de las emisiones en 2050.
- Los offsets, implantados por los planes CORSIA y RCDE UE, ayudarán a seguir el ritmo de descarbonización necesario entre los años 2035 y 2050, aunque en los tres supuestos planteados su protagonismo es diferente. En todos los escenarios se presentan como una iniciativa esencial durante el periodo en el que el desarrollo de los electrocombustibles y del hidrogeno verde es insuficiente. Esta realidad se aprecia en el hecho de que, en 2050, el porcentaje de CO₂ reducido por los offsets en el escenario 1, que es el de menor desarrollo tecnológico, alcanzaría el 47 %; sin embargo, en el escenario 3, que presenta una gran implantación de hidrogeno verde, su contribución es de un 0 %.
- El cumplimiento del objetivo de la IATA de que en el 2050 el nivel de emisiones sea, como máximo, el 50 % de las emanadas en 2005 exige una gran implantación del hidrogeno verde; así lo demuestra el escenario 3.

6. Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Como se señala a lo largo de la memoria descriptiva, el mundo actual se encuentra en una situación crítica, en términos de contaminación, sometido a unas consecuencias devastadoras y con un futuro incierto y nada halagüeño.

El trabajo que se presenta pretende ofrecer una pequeña, -pero sólida-, contribución e incentivación a la consecución de alguno de los Objetivos de la Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible, que se exponen a continuación. Los ODS fueron adoptados por 193 Estados, en el seno de Naciones Unidas, en septiembre de 2015 [2].

- Objetivo 7. Energía asequible y no contaminante

Constituye uno de los aspectos más relevantes a los que se refiere el presente TFG e incide de forma directa en la descarbonización del transporte aéreo de mercancías, puesto que tal propósito busca conseguir emisiones netas nulas a través del uso de una energía sostenible. Este proyecto se centra en el desarrollo de SAF, combustibles sostenibles que garantizarían una energía limpia en numerosos sectores económicos e industriales, incluido el ámbito de la navegación aérea.

A continuación, se analizan, brevemente, algunas de las metas que integran el ODS 7.

La meta 7.2 *“De aquí a 2030, aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas”*. Observamos la estrecha vinculación con el objetivo fijado por la IATA sobre Emisiones Netas Nulas en el año 2050 [3].

Por su parte, la meta 7.a, propone: *“De aquí a 2030, aumentar la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y la tecnología relativas a la energía limpia, incluidas las fuentes renovables, la eficiencia energética y las tecnologías avanzadas y menos contaminantes de combustibles fósiles, y promover la inversión en infraestructura energética y tecnologías limpias”*. Como se ha mencionado anteriormente, promueve la necesaria de cooperación entre sectores, empresas y gobiernos para hacer posible el desarrollo de las tecnologías necesarias para conseguir energía limpia. Este aspecto resulta interesante por razón del elevado coste económico que conlleva la investigación y el desarrollo tecnológico en estos ámbitos, facilitando la cooperación entre distintos estamentos para la consecución de los objetivos antedichos.

- **Objetivo 8. Trabajo decente y crecimiento económico**

Como se ha argumentado páginas atrás, la industria aérea es una de las que genera mayor número de empleos, directa e indirectamente. Además, se trata de un sector que se encuentra en constante crecimiento, lo que supone, a su vez, la generación de nuevos puestos de trabajo. Si este segmento económico-industrial consiguiese dar el salto a la sostenibilidad, se romperían muchas barreras que darían lugar a una industria que alcanzaría una escala mucho mayor. Asimismo, la investigación requerida abriría las puertas a nuevos puestos y líneas de investigación.

La meta 8.4 establece lo siguiente: *“Mejorar progresivamente, de aquí a 2030, la producción y el consumo eficientes de los recursos mundiales y procurar desvincular el crecimiento económico de la degradación del medio ambiente, conforme al Marco Decenal de Programas sobre modalidades de Consumo y Producción Sostenibles, empezando por los países desarrollados”*. El uso del Bio-SAF busca utilizar recursos de gran disponibilidad, que no perjudican el medioambiente porque se tratan de plantas y animales. Ello implicará que el crecimiento económico del sector no significará una mayor degradación del medioambiente.

- **Objetivo 13. Acción por el clima**

Este objetivo trata de otro de los aspectos clave del presente trabajo: el Acuerdo de París. Constituye un Convenio internacional que sirve de guía, define y enmarca los objetivos, estrategias y normativas adoptados en este ámbito y que se analizan en esta memoria. Con el desarrollo de las tecnologías adecuadas que reduzcan el efecto invernadero, las temperaturas volverán a alcanzar niveles óptimos y se frenarán los efectos tan drásticos del cambio climático. Según la ONU las emisiones de CO₂ han aumentado un 50 % desde 1990. Como consecuencia, están ocurriendo desastres naturales, tales como, las inundaciones, que son la causa del 70 % de las muertes por desastres naturales. Asimismo, se ha incrementado el número de lugares que sufren sequías, provocando que la escasez de agua afecte a más del 40 % de la población. Se estima que la temperatura se ha incrementado 1,5º Celsius desde 1900, lo que ha calentado los océanos y ha dado lugar al deshielo de algunas zonas, produciendo un incremento en el nivel del mar.

Con las medidas estratégicas introducidas por la UE, y el plan nacional - PNIEC-, se está cumpliendo la meta 13.2 *“Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales”*.

- Objetivo 14. Vida submarina

Resulta importante advertir que al ritmo que vamos, los océanos, que son los mayores sumideros de CO₂, van a superar sus límites de absorción provocando la desaparición de gran parte de su fauna marina y el deterioro de los corales. Concretamente, uno de los principales problemas del agua de las zonas costeras es la acidificación de los océanos, causada por la absorción de CO₂. La ONU afirma que la acidez de los océanos ha aumentado un 26 % desde la Revolución Industrial, lo que demuestra que es culpa del hombre y sus actividades. Debe haber consciencia de que la biodiversidad marina es una fuente de sustento crucial para tres mil millones de personas en el mundo.

La meta 14.3 establece: *“Minimizar y abordar los efectos de la acidificación de los océanos, incluso mediante una mayor cooperación científica a todos los niveles”*. Con la reducción de las emisiones de CO₂ los océanos no se verán “obligados” a absorber cantidades abusivas de este gas, lo que producirá una significativa mejora en la acidificación, reduciendo el deterioro de los corales y la vida submarina.

- Objetivo 15. Vida de ecosistemas terrestres

El calentamiento global provoca la desertificación de la tierra. Se observa el aumento de situaciones de sequía en un gran número de espacios terrestres, esto se debe al incremento de las temperaturas y la escasez de lluvias. El verano español de 2022 ha sido el más seco, con menos lluvias desde 1965. Debemos tener en cuenta que, aproximadamente, el 52 % de la tierra destinada a la agricultura sufre, a raíz de la degradación del suelo, y de este modo se pierden 12 millones de hectáreas cada año. La citada situación tiene un efecto directo sobre la biodiversidad de los ecosistemas. Actualmente, el 8 % de las razas de animales están extintas y el 22 % en peligro de extinción. Además, el 80 % de los alimentos consumidos por los seres humanos son plantas, y con las sequías se están perdiendo un gran número de cosechas.

Con el desarrollo y empleo de nuevas tecnologías se estima que se alcanzarán los objetivos marcados en el Acuerdo de París, que incidirán directamente en la meta 15.5 *“Adoptar medidas urgentes y significativas para reducir la degradación de los hábitats naturales, detener la pérdida de la diversidad biológica y, para 2020, proteger las especies amenazadas y evitar su extinción”*.

7. Referencias

- [1] Shell and Deloitte, «Decarbonising Aviation: Cleared for Take-off», 2021.
- [2] M. J. Gamez, «Objetivos y metas de desarrollo sostenible», *Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/> (accedido 20 de febrero de 2023).
- [3] «Developing Sustainable Aviation Fuel (SAF)». <https://www.iata.org/en/programs/environment/sustainable-aviation-fuels/> (accedido 27 de abril de 2023).
- [4] J. Skea, P. Shukla, y Ş. Kılış, *Climate change 2022: mitigation of climate change*. Cambridge University Press, Cambridge (MA), USA, 2022.
- [5] «World of Change: Global Temperatures», 29 de enero de 2020. <https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/global-temperatures> (accedido 20 de febrero de 2023).
- [6] W. L. Filho *et al.*, «SPM8 Poverty, Livelihoods and Sustainable Development».
- [7] «Ocean acidification - Ocean & Climate Platform», 14 de marzo de 2015. <https://ocean-climate.org/en/awareness/the-impact-of-climate-change-on-the-ocean/> (accedido 20 de febrero de 2023).
- [8] EEA, «EEA greenhouse gases — data viewer — European Environment Agency», 2021. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer> (accedido 31 de enero de 2023).
- [9] «Facts & figures». <https://www.atag.org/facts-figures.html> (accedido 31 de enero de 2023).
- [10] United Nations Environment Programme (2019), «Emissions Gap Report 2019», UNEP, Nairobi, 2019.
- [11] «The Paris Agreement | UNFCCC». <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement> (accedido 20 de febrero de 2023).
- [12] MITECO, «Estrategía de descarbonización a largo plazo 2050 PNIEC», Madrid, nov. 2020. [En línea]. Disponible en: https://ec.europa.eu/clima/sites/lts/lts_es_es.pdf
- [13] «Reducing scope 3 value chain emissions», *Deloitte United Kingdom*. <https://www2.deloitte.com/uk/en/focus/climate-change/reducing-scope-3-value-chain-emissions.html> (accedido 20 de febrero de 2023).
- [14] «IATA - Fly Net Zero». <https://www.iata.org/en/programs/environment/flynetzero/#tab-3> (accedido 20 de febrero de 2023).
- [15] B. Shepherd, A. Shingal, y A. Raj, «Value of air cargo: Air transport and global value chains», IATA Montreal, 2016.
- [16] «Trade (% of GDP) | Data». <https://data.worldbank.org/indicator/NE.TRD.GNFS.ZS> (accedido 20 de febrero de 2023).
- [17] «Ministerio de Industria, Comercio y Turismo - Informes de Comercio Exterior». https://comercio.gob.es/ImportacionExportacion/Informes_Estadisticas/Paginas/Informes-periodicos.aspx (accedido 18 de mayo de 2023).
- [18] «Las exportaciones españolas en 2021 alcanzan un máximo histórico y superan los 316.000 millones de euros». <https://www.lamoncloa.gob.es/serviciosdeprensa/notasprensa/industria/Paginas/2022/170222-comex.aspx> (accedido 21 de febrero de 2023).
- [19] Observatorio del Transporte y la Logística en España, «Informe OTLE 2021», OTLE, España, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://cdn.mitma.gob.es/portal->

- web-drupal/OTLE/elementos_otle/Informe_anual_2021.pdf
- [20] «Consulta BD OTLE: Transporte de mercancías (toneladas) por modo y ámbito (nacional e internacional)». <https://apps.fomento.gob.es/bdotle/visorBDpop.aspx?i=519> (accedido 20 de febrero de 2023).
- [21] AENA, «Estadísticas del tráfico aéreo». <https://www.aena.es/es/estadisticas/inicio.html> (accedido 28 de febrero de 2023).
- [22] AENA, «TRÁFICO DE PASAJEROS, OPERACIONES Y CARGA EN LOS AEROPUERTOS ESPAÑOLES», Estadísticas, 2022. [En línea]. Disponible en: file:///Users/inesibanezplaza/Downloads/PROVISIONALES_2022.pdf
- [23] Yovanna Blanco, «Así es el desconocido negocio de la carga aérea en España», *EXPANSION*, 19 de enero de 2019. <https://www.expansion.com/empresas/transporte/2019/01/19/5c435b30268e3e077e8b458c.html> (accedido 28 de febrero de 2023).
- [24] Agencia Estatal de Meteorología, «Resumen Anual Climatológico». 2022.
- [25] T. Schlossberg, «Flying Is Bad for the Planet. You Can Help Make It Better.», *The New York Times*, 27 de julio de 2017. Accedido: 7 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.nytimes.com/2017/07/27/climate/airplane-pollution-global-warming.html>
- [26] «What Are the Different Types of Aviation Fuel?», *National Aviation Academy*, 18 de noviembre de 2021. <https://www.naa.edu/aviation-fuel/> (accedido 7 de marzo de 2023).
- [27] AENA, «Informe actualizado del Plan de Acción Climática del año 2022», feb. 2023.
- [28] «Intra-EU trade in goods - main features». https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Intra-EU_trade_in_goods_-_main_features (accedido 9 de marzo de 2023).
- [29] «International trade in goods». https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=International_trade_in_goods (accedido 9 de marzo de 2023).
- [30] «International trade in goods by mode of transport». https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=International_trade_in_goods_by_mode_of_transport (accedido 21 de febrero de 2023).
- [31] «Air transport statistics». https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Air_transport_statistics (accedido 10 de marzo de 2023).
- [32] E. Commission, D.-G. for Mobility, y Transport, *EU transport in figures: statistical pocketbook 2022*. Publications Office of the European Union, 2022. doi: doi/10.2832/216553.
- [33] Directorate-General for Mobility and Transport (European Commission), *EU transport in figures: statistical pocketbook 2022*. LU: Publications Office of the European Union, 2022. Accedido: 9 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://data.europa.eu/doi/10.2832/216553>
- [34] EASA, EEA, EUROCONTROL, ICAO, «EUROPEAN AVIATION ENVIRONMENTAL REPORT 2022», Germany, 2022.
- [35] «Qué es la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático | CMNUCC». <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/que-es-la-convencion-marco-de-las-naciones-unidas-sobre-el-cambio-climatico> (accedido 8 de abril de 2023).

- [36] «Conference of the Parties (COP) | UNFCCC». <https://unfccc.int/process/bodies/supreme-bodies/conference-of-the-parties-cop> (accedido 8 de abril de 2023).
- [37] «COP 3 | UNFCCC». <https://unfccc.int/event/cop-3> (accedido 8 de abril de 2023).
- [38] Naciones Unidas, «Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático». 12 de marzo de 1998.
- [39] J. Penner, D. H. Lister, D. J. Griggs, D. J. Dokken, y M. McFarland, «IPCC Special report, aviation and the global atmosphere: 1999», *Intergov. Panel Clim. Change*.
- [40] GIACC, «Informe del Grupo sobre la Aviación Internacional y el Cambio Climático», Montreal, Canadá, jun. 2009. [En línea]. Disponible en: https://www.icao.int/environmental-protection/giacc/giaccreport_final_es.pdf
- [41] «Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSA)». <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSA/Pages/default.aspx> (accedido 8 de abril de 2023).
- [42] «El transporte aéreo internacional se suma a la lucha contra el cambio climático – E-Politécnica». <https://www.upm.es/e-politecnica/?p=9239> (accedido 8 de abril de 2023).
- [43] Conferencia de las Partes, «Informe de la Conferencia de las Partes sobre su 15º período de sesiones, celebrado en Copenhague del 7 al 19 de diciembre de 2009». 30 de marzo de 2010. [En línea]. Disponible en: <https://unfccc.int/resource/docs/2009/cop15/spa/11a01s.pdf>
- [44] «COP 21 | UNFCCC». <https://unfccc.int/event/cop-21> (accedido 8 de abril de 2023).
- [45] COP21, «Acuerdo de París». 2015. [En línea]. Disponible en: https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/spanish_paris_agreement.pdf
- [46] 2002/358/CE: *Decisión del Consejo, de 25 de abril de 2002, relativa a la aprobación, en nombre de la Comunidad Europea, del Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y al cumplimiento conjunto de los compromisos contraídos con arreglo al mismo*, vol. 130. 2002. Accedido: 8 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://data.europa.eu/eli/dec/2002/358/oj/spa>
- [47] *Communication from the Commission to the Council and the European Parliament - Climate change - Towards an EU post-Kyoto strategy*. 1998. Accedido: 8 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex:51998DC0353>
- [48] *Communication from the Commission to the Council and the European Parliament - «Preparing for implementation of the Kyoto Protocol»*. 1999. Accedido: 8 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A1999%3A0230%3AFIN>
- [49] «Consejo europeo de Helsinki 10-11.12.1999: Conclusiones de la Presidencia». https://www.europarl.europa.eu/summits/hell1_es.htm (accedido 8 de abril de 2023).
- [50] «Integración del medio ambiente en el ámbito de los transportes aéreos». <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=LEGISSUM:l28116&from=EN&isLegisum=true> (accedido 8 de abril de 2023).
- [51] *Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social committee and the Committee of the Regions*

- *Reducing the Climate Change Impact of Aviation* {SEC(2005) 1184}. 2005. Accedido: 8 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52005DC0459&qid=1680976246003>
- [52] *COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN AL CONSEJO: Objetivos de la Comunidad de cara a la 33ª asamblea de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) y las decisiones del Consejo de la OACI relativas a la protección del medio ambiente previas a dicha asamblea.* 2000. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52000DC0821&from=ES>
- [53] *White Paper - European transport policy for 2010: time to decide.* 2001. Accedido: 8 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52001DC0370&qid=1680977324805>
- [54] *DECISIÓN No 1600/2002/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 22 de julio de 2002 por la que se establece el Sexto Programa de Acción Comunitario en Materia de Medio Ambiente.* 2002. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002D1600&from=ES>
- [55] *Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on the sixth environment action programme of the European Community «Environment 2010: Our future, Our choice» - The Sixth Environment Action Programme.* 2001. Accedido: 8 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52001DC0031&qid=1680977677408>
- [56] *Decisión n o 1982/2006/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de diciembre de 2006 , relativa al Séptimo Programa Marco de la Comunidad Europea para acciones de investigación, desarrollo tecnológico y demostración (2007 a 2013)#Declaración de la Comisión, vol. 412.* 2006. Accedido: 8 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://data.europa.eu/eli/dec/2006/1982/oj/spa>
- [57] *Corrección de errores de la Decisión 2006/971/CE del Consejo, de 19 de diciembre de 2006 , relativa al programa específico Cooperación por el que se ejecuta el séptimo programa marco de la Comunidad Europea de acciones de investigación, desarrollo tecnológico y demostración (2007–2013) (DO L 400 de 30.12.2006) , vol. 054.* 2007. Accedido: 8 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://data.europa.eu/eli/dec/2006/971/corrigendum/2007-02-22/oj/spa>
- [58] *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2003/87/EC so as to include aviation activities in the scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community* {SEC(2006) 1684} {SEC(2006) 1685}. 2006. Accedido: 8 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52006PC0818&qid=1680978393000>
- [59] *Directiva 2008/101/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008 , por la que se modifica la Directiva 2003/87/CE con el fin de incluir las actividades de aviación en el régimen comunitario de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero (Texto pertinente a efectos del EEE), vol. 008.* 2008. Accedido: 8 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/101/oj/spa>
- [60] *Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council of 13*

- October 2003 establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community and amending Council Directive 96/61/EC (Text with EEA relevance)*, vol. 275. 2003. Accedido: 8 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://data.europa.eu/eli/dir/2003/87/oj/eng>
- [61] *WHITE PAPER Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system*. 2011. Accedido: 8 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52011DC0144&qid=1680979372718>
- [62] *Decisión n.º 1386/2013/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de noviembre de 2013, relativa al Programa General de Acción de la Unión en materia de Medio Ambiente hasta 2020 «Vivir bien, respetando los límites de nuestro planeta» Texto pertinente a efectos del EEE*, vol. 354. 2013. Accedido: 8 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://data.europa.eu/eli/dec/2013/1386/oj/spa>
- [63] Comisión Europea, «COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSEJO, AL COMITÉ ECONÓMICO Y SOCIAL EUROPEO Y AL COMITÉ DE LAS REGIONES Hoja de ruta hacia una economía hipocarbónica competitiva en 2050», Bruselas, mar. 2011. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0112&from=EN>
- [64] «Energía limpia para todos los europeos: desbloquear el potencial de crecimiento de Europa», *European Commission - European Commission*. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/IP_16_4009 (accedido 9 de abril de 2023).
- [65] *Reglamento (UE) 2018/1999 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 11 de diciembre de 2018, sobre la gobernanza de la Unión de la Energía y de la Acción por el Clima, y por el que se modifican los Reglamentos (CE) n.º 663/2009 y (CE) n.º 715/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo, las Directivas 94/22/CE, 98/70/CE, 2009/31/CE, 2009/73/CE, 2010/31/UE, 2012/27/UE y 2013/30/UE del Parlamento Europeo y del Consejo y las Directivas 2009/119/CE y (UE) 2015/652 del Consejo, y se deroga el Reglamento (UE) n.º 525/2013 del Parlamento Europeo y del Consejo (Texto pertinente a efectos del EEE.)*, vol. 328. 2018. Accedido: 9 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://data.europa.eu/eli/reg/2018/1999/oj/spa>
- [66] *Reglamento (UE) 2021/1119 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de junio de 2021 por el que se establece el marco para lograr la neutralidad climática y se modifican los Reglamentos (CE) n.º 401/2009 y (UE) 2018/1999 («Legislación europea sobre el clima»)*, vol. 243. 2021. Accedido: 9 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://data.europa.eu/eli/reg/2021/1119/oj/spa>
- [67] «Paquete de medidas “Objetivo 55”: el Consejo acuerda orientaciones generales sobre las reducciones de emisiones y sus repercusiones sociales». <https://www.consilium.europa.eu/es/press/press-releases/2022/06/29/fit-for-55-council-reaches-general-approaches-relating-to-emissions-reductions-and-removals-and-their-social-impacts/> (accedido 9 de abril de 2023).
- [68] *Propuesta de DIRECTIVA DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO por la que se modifica la Directiva 2003/87/CE en lo que respecta a la contribución de la aviación al objetivo de la Unión de reducir las emisiones en el conjunto de la economía y a la adecuada aplicación de una medida de mercado mundial*. 2021. Accedido: 9 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=CELEX:52021PC0552>

- [69] «Preguntas y respuestas: Transporte sostenible, infraestructura y combustibles», *European Commission - European Commission*. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/qanda_21_3525 (accedido 9 de abril de 2023).
- [70] «Comercio de derechos de emisión – Poner un precio al carbono», *European Commission - European Commission*. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/qanda_21_3542 (accedido 9 de abril de 2023).
- [71] *Proposal for a COUNCIL DIRECTIVE restructuring the Union framework for the taxation of energy products and electricity (recast)*. 2021. Accedido: 9 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0563&qid=1681030560102>
- [72] *Council Directive 2003/96/EC of 27 October 2003 restructuring the Community framework for the taxation of energy products and electricity (Text with EEA relevance)*, vol. 283. 2003. Accedido: 9 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://data.europa.eu/eli/dir/2003/96/oj/eng>
- [73] «Revisión de la Directiva sobre la fiscalidad de la energía (DFE)», *European Commission - European Commission*. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/qanda_21_3662 (accedido 9 de abril de 2023).
- [74] *Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the deployment of alternative fuels infrastructure, and repealing Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council*. 2021. Accedido: 9 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0559&qid=1681031021302>
- [75] *Propuesta de REGLAMENTO DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO relativo a la garantía de unas condiciones de competencia equitativas para un transporte aéreo sostenible*. 2021. Accedido: 9 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0561>
- [76] G. Alonso Rodrigo y A. Benito Ruiz de Villa, «El impacto ambiental del transporte aéreo y las medidas para mitigarlo», 2012.
- [77] European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, «European aeronautics : a vision for 2020». Publications Office, 2002. [En línea]. Disponible en: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/214b7682-3947-411f-bcb5-92cb03ea7931>
- [78] S. Aviation, «Fly», 2022.
- [79] *Council Regulation (EC) No 71/2007 of 20 December 2007 setting up the Clean Sky Joint Undertaking (Text with EEA relevance)*, vol. 030. 2007. Accedido: 9 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://data.europa.eu/eli/reg/2008/71/oj/eng>
- [80] *Council Regulation (EU) No 558/2014 of 6 May 2014 establishing the Clean Sky 2 Joint Undertaking Text with EEA relevance*, vol. 169. 2014. Accedido: 9 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://data.europa.eu/eli/reg/2014/558/oj/eng>
- [81] CDTI, «Dossier Informativo sobre la JU Clean Sky», jul. 2008. [En línea]. Disponible en: https://www.cdti.es/recursos/doc/Programas/Cooperacion_internacional/P.Marc_o_I%20D_de_la_UE/Transporte/37028_2972972008105827.pdf

- [82] *Council Regulation (EU) 2021/2085 of 19 November 2021 establishing the Joint Undertakings under Horizon Europe and repealing Regulations (EC) No 219/2007, (EU) No 557/2014, (EU) No 558/2014, (EU) No 559/2014, (EU) No 560/2014, (EU) No 561/2014 and (EU) No 642/2014*, vol. 427. 2021. Accedido: 9 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://data.europa.eu/eli/reg/2021/2085/oj/eng>
- [83] «Frequently Asked Questions». <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/FAQs.aspx> (accedido 27 de abril de 2023).
- [84] «Fit for 55 and ReFuelEU Aviation», EASA. <https://www.easa.europa.eu/en/light/topics/fit-55-and-refueleu-aviation> (accedido 9 de junio de 2023).
- [85] IATA, «What is SAF?» [En línea]. Disponible en: <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-what-is-saf.pdf>
- [86] «Conversion processes». <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Conversion-processes.aspx> (accedido 27 de abril de 2023).
- [87] «Are aviation biofuels ready for take off? – Analysis», IEA. <https://www.iea.org/commentaries/are-aviation-biofuels-ready-for-take-off> (accedido 11 de junio de 2023).
- [88] M. Ruediger, «Incentivos para incrementar la producción de SAF -30.000 millones de litros en 2030: un punto de inflexión-».
- [89] D. Óscar Castro Álvarez; Dña. Encarna Martín Santana, «SOSTENIBILIDAD EN EL SECTOR AERONÁUTICO: UN SECTOR ALTAMENTE COMPROMETIDO», oct. 2022.
- [90] IATA, «Aircraft Technology Net Zero Roadmap».
- [91] J. Mukhopadhaya y D. Rutherford, «Performance analysis of evolutionary hydrogen-powered aircraft».
- [92] «ZEROe - Low carbon aviation - Airbus». <https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hydrogen/zeroe> (accedido 11 de junio de 2023).
- [93] «Nuestra flota», *Lufthansa Cargo*. <https://lufthansa-cargo.com/fleet-ulds/fleet> (accedido 8 de junio de 2023).
- [94] «FLOTA», *IAG Cargo*. <https://www.iagcargo.com/es/fleet/> (accedido 8 de junio de 2023).
- [95] «Boeing: World Air Cargo Freighter Industry Forecast (WACF)». <https://www.boeing.com/commercial/market/cargo-forecast/> (accedido 8 de junio de 2023).
- [96] E. S. Van der Sman, B. Peerlings, J. Kos, R. Lieshout, y T. Boonekamp, «Destination 2050», 2020.
- [97] «Greenhouse gas emission statistics - emission inventories». https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Greenhouse_gas_emission_statistics_-_emission_inventories (accedido 9 de junio de 2023).
- [98] B. Rowland, «How Much Fuel Does a Plane Use During Flight? | OAG». <https://www.oag.com/blog/which-part-flight-uses-most-fuel> (accedido 9 de junio de 2023).
- [99] «Límites máximos y derechos de emisiones». https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/emissions-cap-and-allowances_es (accedido 9 de junio de 2023).

- [100] «EU Emissions Trading System (EU ETS) | International Carbon Action Partnership», 3 de mayo de 2023. <https://icapcarbonaction.com/en/ets/eu-emissions-trading-system-eu-ets> (accedido 9 de junio de 2023).
- [101] «Auctioning». https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/auctioning_en (accedido 9 de junio de 2023).
- [102] «EEX EUA Primary Auction Spot - Download». <https://www.eex.com/en/market-data/environmental-markets/eua-primary-auction-spot-download> (accedido 9 de junio de 2023).
- [103] Reuters, «Analysts raise EU carbon price forecasts after reform agreement», *Reuters*, 28 de abril de 2023. Accedido: 9 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.reuters.com/business/sustainable-business/analysts-raise-eu-carbon-price-forecasts-after-reform-agreement-2023-04-28/>
- [104] P. Piris-Cabezas, R. Lubowski, y G. Leslie, «Carbon prices under carbon market scenarios consistent with the Paris Agreement: Implications for the Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)», *N. Y.*, 2018.
- [105] «Air transport statistics». https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Air_transport_statistics (accedido 10 de junio de 2023).
- [106] «Jet Fuel Price Monitor». <https://www.iata.org/en/publications/economics/fuel-monitor/> (accedido 9 de junio de 2023).
- [107] «What We Do», *LanzaJet*. <https://www.lanzajet.com/what-we-do/> (accedido 10 de junio de 2023).
- [108] Air Transport Group, «Waypoint 2050», sep. 2021.
- [109] ICF para ATAG Waypoint 2050, «Fueling Net Zero», sep. 2021.
- [110] Strategy& PwC, «The real cost of green aviation», 2022.
- [111] «Aircraft – Aviation». <https://www.aviation.com/aircraft/> (accedido 10 de junio de 2023).

8. Índice de figuras

Figura 1. Evolución de las exportaciones e importaciones en España	36
Figura 2. Evolución de la ratio entre movilidad interna de mercancías y el PIB (toneladas/1.000 euros).....	36
Figura 3. Visión genérica del transporte de mercancías en España en 2021	37
Figura 4. Evolución del transporte de mercancías interior en España según modo de transporte (toneladas)	37
Figura 5. Evolución del transporte internacional de mercancías por modo (toneladas)	38
Figura 6. División del transporte de mercancías internacionales por modo, estudiado en unidades físicas y unidades monetarias	38
Figura 7. Principales relaciones aéreas nacionales en 2019 (Kg transportados).....	39
Figura 8. Evolución de la carga transportada en España	39
Figura 9. Destino de mercancías trasladadas desde España	40
Figura 10. Cinco principales compañías de transporte de mercancías aéreo en España en términos de volumen de carga transportado	40
Figura 11. Tráfico de mercancías en los aeropuertos españoles (Kg)	41
Figura 12. Top compañías aéreas en Aeropuerto de Madrid 2022	41
Figura 13. Variación de las emisiones brutas de G.E.I. respecto a 1990	43
Figura 14. Evolución de las anomalías de la media de la temperatura anual (1961-2022)..	44
Figura 15. Variación interanual de las emisiones brutas de GEI (porcentaje).....	44
Figura 16. Evolución de las emisiones e G.E.I procedentes del transporte (respecto al PIB) entre 2000-2019	45
Figura 17. Emisiones de G.E.I por unidad de transporte	45
Figura 18. Emisiones por gas de la categoría de tráfico aéreo nacional (kt)	46
Figura 19. Consumo de combustible de la categoría de tráfico aéreo nacional	46
Figura 20. Las emisiones G.E.I. según alcance 1, 2, 3 en el sector de la aviación.....	47
Figura 21. Evolución de la huella de carbono según alcances (2019-2022)	48
Figura 22. Contribución de emisiones año 2022 (tCO2).....	48
Figura 23. Exportaciones de internas mensuales de bienes en la UE (enero 2002-diciembre 2021)	49
Figura 24. Países que dominan el comercio exterior, 2021(mil millones de euros).....	50
Figura 25. Evolución del comercio exterior europeo entre 2011 y 2021 (mil millones de euros)	50
Figura 26. Porcentaje de las exportaciones globales por país en 2021.....	51

Figura 27. División del valor de la carga transportada en Europa por modo de transporte	52
Figura 28. División del volumen de la carga transportada en Europa por modo de transporte	53
Figura 29. Principales aeropuertos de mercancía europeos (2021).....	54
Figura 30. Principales exportadores de Europa.....	54
Figura 31. Principales importadores de Europa	55
Figura 32. Exportaciones en Europa según país de destino	55
Figura 33. Importaciones en Europa según país de origen	56
Figura 34. 10 principales aeropuertos de mercancías en el mundo (unidades: toneladas métricas)	57
Figura 35. 10 principales países en términos de exportaciones en valor del comercio (miles de US\$).....	57
Figura 36. 10 principales países en términos de importaciones en valor del comercio (miles de US\$).....	58
Figura 37. División de las emisiones de CO2 en Europa por sector.....	58
Figura 38. División de las emisiones de CO2 generadas por el transporte según el modo..	59
Figura 39. Porcentaje acumulado en la atmósfera de emisiones de CO2 generadas por la aviación	59
Figura 40. Plan CORSIA entrada en vigor	64
Figura 41. Hitos en la normativa de la UE.....	70
Figura 42. The European Green Deal.....	71
Figura 43. Objetivo 55 %.....	72
Figura 44. Clean Aviation	81
Figura 45. Contribución a la reducción de carbono de las opciones de descarbonización ..	88
Figura 46. Tipos de combustibles sostenibles para la aviación	90
Figura 47. Vías de producción de combustibles alternativos aprobadas por la ASTM [86].	92
Figura 48. Cadena de suministro de los Biocombustibles	94
Figura 49. Fabricación y uso de BioJet.....	95
Figura 50. Power to Liquids	98
Figura 51. Primer avión eléctrico, Alice	100
Figura 52. Coste de combustible, 2035 y 2050, con y sin coste de carbono	102
Figura 53. Airnus ZEROe características	103
Figura 54. Porcentajes de contribución a la descarbonización por cada tecnología en 2050	112

Figura 55. Introducción de las tecnologías en el mercado de la aviación 118

9. Índice de gráficos

Gráfico 1. Evolución del precio del Jet A1 con y sin precio RCDE EU	9
Gráfico 2. Emisiones de CO2 en el escenario 1	10
Gráfico 3. Emisiones de CO2 en el escenario 2	10
Gráfico 4. Emisiones de CO2 en el escenario 3	11
Gráfico 5. Evolución del número de vuelos con despegue en UE+UK.....	106
Gráfico 6. Evolución del consumo de Jet A1 (Mton/año).....	108
Gráfico 7. Evolución de las emisiones de CO2 para el escenario más crítico.....	113
Gráfico 8. Evolución del precio del Jet A1 con y sin precio RCDE EU	114
Gráfico 9. Producción de SAF en el Escenario 1	120
Gráfico 10. Emisiones de CO2 en el escenario 1.....	121
Gráfico 11. Producción de SAF en el Escenario 2	122
Gráfico 12. Emisiones de CO2 en el escenario 2.....	123
Gráfico 13. Producción de SAF en el Escenario 3	125
Gráfico 14. Emisiones de CO2 en el escenario 3.....	126

10. Índice de tablas

Tabla 1. Porcentaje de CO2 reducido por cada medida en el escenario 1	9
Tabla 2. Porcentaje de CO2 reducido por cada medida en el escenario 2	11
Tabla 3. Porcentaje de CO2 reducido por cada medida en el escenario 3	11
Tabla 4. Objetivos marcados en UE por ReFuelEU y Fit for 55 [84].....	91
Tabla 5. Número de vuelos con despegue en UE+UK.....	107
Tabla 6. Parámetros obtenidos a través de las hipótesis para realizar cálculos	107
Tabla 7. Consumo estimado de Jet A1.....	108
Tabla 8. Evolución del precio de RCDE EU	110
Tabla 9. Evolución del precio de CORSIA	110
Tabla 10. Precio combinado RCDE UE y CORSIA.....	111
Tabla 11. Emisiones de CO2 para el escenario más crítico.....	113
Tabla 13. Combustibles calificados como aptos por el plan CORSIA.....	115
Tabla 14. Precio mínimo viable estimado para HEFA (Densidad de queroseno 0,8Kg/L) ..	116
Tabla 15. Precio mínimo viable estimado con los costes de eliminar el CO2 generado (Densidad queroseno 0,8Kg/L).....	116
Tabla 16. Límites de producción de Bio-SAF debido a la disponibilidad de materia prima en Europa	117
Tabla 17. Porcentaje de reducción de CO2 comparado con el Jet A1.....	117
Tabla 18. Emisiones finales de CO2 sin tener en cuenta la medida de compensación de CO2 en escenario 1	121
Tabla 19. Porcentaje de CO2 reducido por cada medida en el escenario 1	121
Tabla 20. Porcentaje de CO2 reducido por cada medida en el escenario 2	123
Tabla 21. Emisiones finales de CO2 sin tener en cuenta la medida de compensación de CO2 en escenario 2	123
Tabla 22. Porcentaje de CO2 reducido por cada medida en el escenario 3	125
Tabla 23. Emisiones finales de CO2 sin tener en cuenta la medida de compensación de CO2 en escenario 3	126
Tabla 24. Comparativa del Porcentaje de CO2 reducido por cada medida en los tres escenarios	127
Tabla 25. Comparativa de las Emisiones finales de CO2 sin tener en cuenta la medida de compensación de CO2 en los tres escenarios.....	127